



**UCAM**

UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL  
DE DOCTORADO DE LA UCAM

Aportaciones para la optimización de compatibilidad  
terreno excavado – dovela, en la construcción de  
túneles mediante tecnología TBM.

Autor:

D. Ernesto A. Colomer Rosell

Directores:

Dr. D. Jesus H. Alcañiz Martínez

Dra. Dña. Julia I. Real Herraiz

Murcia, noviembre de 2020





**UCAM**

UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL  
DE DOCTORADO DE LA UCAM

Aportaciones para la optimización de compatibilidad  
terreno excavado – dovela, en la construcción de  
túneles mediante tecnología TBM.

Autor:

D. Ernesto A. Colomer Rosell

Directores:

Dr. D. Jesus H. Alcañiz Martínez

Dra. Dña. Julia I. Real Herraiz

Murcia, noviembre de 2020





**UCAM**  
UNIVERSIDAD CATÓLICA  
SAN ANTONIO

**AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS**

**PARA SU PRESENTACIÓN**

El Dr. D. Jesús H. Alcañiz Martínez y la Dra. Dña. Julia I. Real Herraiz, como Directores de la Tesis Doctoral titulada **“APORTACIONES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE COMPATIBILIDAD TERRENO EXCAVADO – DOVELA, EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES MEDIANTE TECNOLOGÍA TBM.”**, realizada por D. Ernesto A. Colomer Rosell, en la Escuela Internacional de Doctorado de la UCAM, **autoriza su presentación a trámite**, dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmamos, para dar cumplimiento al Real Decreto 99/2011, 1393/2007, 56/2005 y 778/98 y que surta los efectos que proceda.

Murcia a 30 de Julio de 2020

Fdo: Julia I. Real Herraiz

Fdo: Jesús H Alcañiz Martínez



## AGRADECIMIENTOS

A Julia I. Real y Jesús H. Alcañiz, por el apoyo que me han prestado desde el inicio de la investigación que motivó la presente Tesis Doctoral, tanto científica como personalmente. Parte fundamental de todos estos meses de duro trabajo.

A Pedro Castrillo, por su total predisposición y apoyo a lo largo de todos los cursos académicos superados.

A mi familia, que desde el primer momento me motivó y reforzó en este largo camino que supone realizar una Tesis Doctoral. Mis padres, Ernesto y Julia, y mi hermano, Sergio.

A los compañeros del edificio 8K, con quiénes he tenido la suerte de formar un gran equipo de trabajo, y de aprender diariamente como ser mejor profesional y mejor persona.

A Ester, acompañante y principal apoyo en esta aventura, siempre a mi lado para lo que ha hecho falta.

En definitiva, a todas aquellas personas que han hecho posible haber llegado hasta aquí.



## RESUMEN

La aparición de las tuneladoras TBM de Escudo supuso un importante avance en materia de excavación de túneles. Estos equipos son capaces de ir colocando el sostenimiento rígido de dovelas de hormigón a medida que se va avanzando a través del macizo rocoso, de modo que consiguen ahorros muy importantes en términos de dinero, tiempo y recursos humanos en comparación a cualquier otra tecnología de excavación disponible en el mercado. No obstante, es a raíz de su principal valor añadido – la colocación directa de las dovelas de hormigón – donde aparece su mayor limitación cuando se trabaja en túneles excavados a través de macizos rocosos poco competentes o de cierta inestabilidad, pues el terreno tendrá tendencia a fluir provocando un fenómeno conocido como *squeezing ground*. Ante dicha situación, las dovelas rígidas de hormigón no tienen capacidad para permitir una convergencia compatible del terreno, de modo que este genera una serie de sobrepresiones sobre el sostenimiento recién colocado inasumibles desde una perspectiva técnica o económica. Es por esto, que las tuneladoras TBM ven muy limitado su funcionamiento a la hora de trabajar en terrenos inestables o poco competentes.

Durante los últimos años han ido apareciendo diferentes soluciones constructivas tratando de favorecer la compatibilidad de convergencias entre terreno excavado y dovelas en terrenos con riesgo de *squeezing*: soluciones basadas en la instalación de elementos compresibles en las juntas longitudinales de las dovelas, en la disposición de dovelas discontinuas que de forma alterna vayan permitiendo ciertas deformaciones de la roca, o bien en la inyección de materiales compresibles (generalmente morteros de hormigón) en el espacio anular que forman el terreno excavado y la dovela. Si bien esta última solución ha ofrecido resultados prometedores, los actuales morteros compresibles formados a partir de partículas de poliestireno expandido también presentan algunas limitaciones tanto de índole técnico – la diferencia tan amplia de densidades entre el poliestireno y el resto de materiales del mortero provoca graves problemas en la colocación del material, siendo muy difícil conseguir una inyección homogénea del mortero –, como también económico – el elevado precio del poliestireno supone encarecer considerablemente

el costo total de la dosificación, y por ende, también el de la ejecución de la solución constructiva en su conjunto –.

Es en este marco donde surge el reto científico de la presente Tesis Doctoral, que pretende desarrollar un nuevo material compresible para su inyección en el espacio anular formado por terreno y dovelas de hormigón. Dicho material, estará compuesto por caucho procedente de neumático fuera de uso (NFU) como elemento diferenciador para lograr la compresibilidad necesaria. Las propiedades elásticas del caucho, su mayor densidad respecto los elementos compresibles empleados hasta la fecha, y su carácter medioambiental, ofrecen un escenario prometedor de cara a lograr un material compresible que supere las limitaciones técnicas y económicas que han venido mostrando hasta la fecha los morteros compresibles desarrollados. Para la obtención de este nuevo material se ha empleado una metodología de trabajo fundamentada en el uso de dos herramientas principales: ensayos de laboratorio y modelización numérica de diferentes escenarios de excavación en terrenos con riesgo de fluencia.

Mediante los ensayos de laboratorio, se han buscado en el mortero las propiedades y parámetros catalogados como deseables desde una perspectiva de colocación en obra y rendimiento una vez instalado. Fundamentalmente, se han seguido criterios de compresibilidad y bombeabilidad (capacidad de bombeo) en el material. Por lo que respecta a la modelización numérica, se ha buscado comprobar el comportamiento de cada una de las dosificaciones de mortero propuestas en la presente investigación una vez inyectadas en el espacio anular, verificando la capacidad de cada una de ellas para aliviar en las dovelas de hormigón las tensiones y sobrepresiones transmitidas por el terreno excavado. Finalmente, y como conclusión definitiva de la investigación, se ha podido comprobar como la dosificación que mejores resultados obtuvo en la campaña de laboratorio, evaluados estos desde una perspectiva multicriterio, resultó la misma que conseguía una mayor compatibilización de convergencias en los escenarios simulados en la modelización numérica, dando por concluida la investigación de forma satisfactoria.

*Palabras Clave: Excavación de túneles, TBM de Escudo, mortero compresible, caucho NFU*

## ABSTRACT

The appearance of the TBM tunnel boring machines was an important advance in terms of tunnel excavation. These devices are capable of placing the rigid support of concrete segments as it is advanced through the rocky massif, so that they achieve very important savings in terms of money, time and human resources compared to any other excavation technology commercially available. However, it is due to its main added value - the direct placement of the concrete segments - where its greatest limitation appears when working in tunnels excavated through rocky massifs that are not very competent or have some instability, as the terrain will tend to flow causing a phenomenon known as squeezing ground. In this situation, the rigid concrete segments don't have the capacity to allow a compatible convergence of the terrain, so that it generates a series of overpressures on the newly placed support that are unaffordable from a technical or economic perspective. This is why TBMs are very limited in their operation when working on unstable or poorly competent terrain.

During the last years, different constructive solutions have appeared, trying to promote the compatibility of convergences between excavated terrain and segments in terrains with risk of squeezing: solutions based on the installation of compressible elements in the longitudinal joints of the segments, in the arrangement of discontinuous segments that alternately allow certain deformations of the rock, or the injection of compressible materials (usually concrete mortars) into the annular space formed by the excavated terrain and the segment. Although this last solution has offered promising results, current compressible mortars formed from expanded polystyrene particles also have some technical limitations - the wide difference in densities between polystyrene and other mortar materials causes serious problems in the placement of the material, being very difficult to achieve a homogeneous injection of the mortar - as well as economic - the high price of polystyrene means that the total cost of dosing increases considerably, and therefore also the cost of executing the construction solution in your set -.

It is within this framework that the scientific challenge of the present Doctoral Thesis arises, which aims to develop a new compressible material for

injection into the annular space formed by terrain and concrete segments. Said material will be made up of rubber from out-of-use tires (NFU) as a differentiating element to achieve the necessary compressibility. The elastic properties of rubber, its higher density compared to the compressible elements used to date, and its environmental nature, offer a promising scenario for achieving a compressible material that overcomes the technical and economic limitations that developed compressible mortars have been showing to date. In order to obtain this new material, a work methodology based on the use of two main tools has been used: laboratory tests and numerical modeling of different excavation scenarios in lands with risk of squeezing.

Through laboratory tests, the properties and parameters cataloged as desirable were sought in the mortar from a placement and performance perspective once installed. Fundamentally, criteria of compressibility and pumpability (pumping capacity) have been followed in the material. With regard to numerical modeling, we have sought to verify the behavior of each of the mortar dosages proposed in the present investigation once injected into the annular space, verifying the capacity of each of them to alleviate in the segments of concrete the stresses and overpressures transmitted by the excavated terrain. Finally, and as a definitive conclusion of the research, it has been possible to verify how the dosage that obtained the best results in the laboratory campaign, evaluated these from a multicriteria perspective, was the same that achieved greater compatibility of convergences in the scenarios simulated in the numerical modeling, terminating the investigation satisfactorily.

*Keywords: Tunnel excavation, TBM with shielding, shredded scrap tyres, compressible mortar.*

ÍNDICE

AUTORIZACIÓN DE LO/S DIRECTOR/ES DE LA TESIS..... ¡ERROR!  
 MARCADOR NO DEFINIDO.

AGRADECIMIENTOS .....7

ÍNDICE DE FIGURAS ..... 17

ÍNDICE DE TABLAS ..... 25

1. INTRODUCCIÓN ..... 31

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN ..... 37

2.1 OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN .....39

2.2 OBJETIVOS CIENTÍFICOS.....39

2.3 METODOLOGÍA PROPUESTA.....43

3. ESTADO DEL ARTE..... 47

3.1 INVESTIGACIONES PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS DE SOSTENIMIENTO EN EXCAVACIONES CON TBM DE ESCUDO A TRAVÉS DE TERRENOS INESTABLES Y CON GRANDES SOBREPRESIONES .....	50
<b>3.1.1 Profundización en las investigaciones que han intentado desarrollar sistemas de sostenimiento empleados con TBM de Escudo a través de terrenos inestables y con grandes sobrepresiones .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1.2 Análisis en profundidad de los morteros compresibles al nivel de desarrollo alcanzado, identificando claramente sus limitaciones, e identificando propuestas para la corrección de las mismas .....</b>	<b>58</b>
<b>3.1.3 Planteamiento para superar las limitaciones que presentan los morteros compresibles desarrollados hasta la fecha. Resumen de la evaluación técnica, económica y medioambiental de los materiales que potencialmente podrían conformar el nuevo mortero compresible en base al planteamiento teórico inicial .....</b>	<b>60</b>
3.2 INVESTIGACIONES PARA EL DESARROLLO DE MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DE ESCENARIOS Y PROCESOS DE EXCAVACIÓN EMPLEANDO TECNOLOGÍA TBM DE ESCUDO .....	65
<b>3.2.1 Revisión de las principales teorías de convergencia-sostenimiento en terrenos inestables o sometidos a importantes sobrepresiones.....</b>	<b>65</b>
<b>3.2.2 Revisión de los modelos numéricos existentes en literatura científica para la simulación de la excavación mecánica de túneles .....</b>	<b>69</b>
<b>3.2.3 Bases para la modelización a desarrollar. Aproximación a las condiciones de contorno y escenarios a considerar. Síntesis sobre la modelización matemática.....</b>	<b>76</b>

<b>4. TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN: PLANTEAMIENTO, DESARROLLO, ENSAYO Y OBTENCIÓN DE LAS NUEVAS DOSIFICACIONES DE MORTERO COMPRESIBLE .....</b>	<b>83</b>
4.1 REQUISITOS A EXIGIR AL NUEVO MATERIAL. ENSAYOS Y MATERIALES PARA SU OBTENCIÓN.....	86
4.1.1 Requisitos a exigir al nuevo mortero compresible .....	86
4.1.2 Ensayos de laboratorio para la verificación de los requisitos a cumplir.....	92
4.1.3 Análisis de los materiales susceptibles de formar parte del nuevo mortero compresible .....	112
4.2 DOSIFICACIONES Y PLAN DE ENSAYOS DE LABORATORIO .....	123
4.2.1 Cantidades y proporciones en peso de los materiales seleccionados. Selección de variables y niveles.....	124
4.2.2 Diseño factorial de experimentos Taguchi - plan de ensayos de laboratorio .....	131
4.2.3 Ejecución del plan de ensayos de laboratorio y obtención de resultados .....	147
4.2.4 Evaluación de resultados y selección de dosificaciones definitivas .....	194
<b>5. MODELO NUMÉRICO SISTEMA: ANILLO DOVELAS - MORTERO COMPRESIBLE - ROCA EXCAVADA.....</b>	<b>199</b>

5.1	CONDICIONES DE CONTORNO Y GEOMETRÍA GLOBAL DEL SISTEMA .....	201
5.2	MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL CONJUNTO. SIMULACIÓN DE VARIOS ESCENARIOS.....	206
5.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES SOBRE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MORTERO CARACTERIZADAS EN LABORATORIO .....	210
5.4	HIPÓTESIS Y SIMPLIFICACIONES ADOPTADAS.....	234

**6. DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN..... 249**

6.1	DISCUSIONES .....	252
6.2	CONCLUSIONES.....	272
6.3	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	273

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1 Visita del doctorando al túnel Cristo Redentor (frontera Chile – Argentina) para visualización in situ de problemas en el revestimiento a causa una convergencia no compatible del terreno. Fuente: Elaboración propia. ....	34
Figura 3.1 Ejemplo Tuneladora TBM. Fuente: [1].....	50
Figura 3.2 Sección tuneladora TBM de Escudo. Fuente: [7].....	51
Figura 3.3 Detalle del mecanismo de Inyección a través de huecos en las dovelas de hormigón. Fuente: [1] .....	52
Figura 3.5 Detalle de los orificios en la cola del escudo (tailskin) para la inyección del mortero de relleno. Fuente: [1].....	53
Figura 3.6 Esquema del proceso de inyección a través de la cola del escudo. Fuente: [1].....	53
Figura 3.7 (a) Dovelas simples de mayor grosor fabricadas con hormigón convencional; (b) Sostenimiento de dovelas de hormigón de alta (HPC) y ultra alta Resistencia (UHPC); (c) Sostenimiento doble consistentes en dos anillos de elementos prefabricados; (d) Sostenimiento doble consistentes en un anillo de dovelas prefabricadas y un anillo interior de hormigón in situ. Fuente. [10] .....	54
Figura 3.8 Ejemplo gráfico de diferentes soluciones para sistemas de deformación tangencial. Fuente: [6].....	57
Figura 3.9 Líneas características para diferentes tipologías de sostenimiento. Fuente: [19].....	58
Figura 3.12 Respuesta a esfuerzos de compresión de hormigón con caucho reciclado en diferentes porcentajes. Fuente: [21]. ....	61
Figura 3.14 Respuesta tensión deformación en ensayo a compresión de mortero con diferentes proporciones de perlita expandida. Fuente: [27].....	63
Figura 3.16 Determinación del total de sobreexcavación en función de la curva respuesta del terreno. Fuente: [28].....	66

Figura 3.18 Interacción terreno-soporte en un modelo de simetría rotacional bajo condiciones de deformación plana. Fuente: [5] .....	66
Figura 3.21 Líneas características del suelo y puntos de equilibrio en los distintos casos considerados. Fuente: [1] .....	68
Figura 3.25 Curva característica del suelo y los puntos de equilibrio para los distintos sostenimientos. Fuente: [5] .....	69
Figura 3.28 Mallado 3D en la fase inicial. Fuente: Zhao et al. [31] .....	70
Figura 3.31 Resultados del cálculo tenso-deformacional del modelo. Contorno plastificado. Fuente: Zhao et al. [31].....	73
Figura 3.36 Geometría global del modelo. Fuente: Yoo [32] .....	74
Figura 3.50 Tabla de interacción entre los distintos factores que influyen en la presión que el terreno ejerce sobre el túnel. Fuente. [3].....	77
Figura 3.54 Diferentes secciones a tener en consideración durante la excavación. Fuente: [8]......	80
Figura 4.1 Bloqueo en tubería de bombeo de hormigón o mortero. Figura [34]....	90
Figura 4.2 Gráfico segregación periférica. Fuente: [38].....	96
Figura 4.3 Perfil de velocidades ante un problema de segregación periférica. Fuente: [38].....	96
Figura 4.4 Codo de tubería roto debido a cizallamiento. Fuente: [38].....	98
Figura 4.5 Perfil de velocidades ante un problema de cizallamiento. Fuente: [38]	98
Figura 4.6 Esquema de posible configuración de ensayo de resistencia a compresión confinada (I). Fuente: Elaboración propia. ....	104
Figura 4.7 Esquema de posible configuración de ensayo de resistencia a compresión confinada (II). Fuente: Elaboración propia. ....	104
Figura 4.8 Filtro – prensa de Barold. Fuente: Elaboración propia.....	110

INDICE DE FIGURAS	19
<hr/>	
Figura 4.10 Huso granulométrico. Fuente. [34].....	114
Figura 4.11 Representación huso granulométrico. Fuente: [34]. .....	114
Figura 4.12 Cementos con adición de humo de sílice. Fuente: [34] .....	116
Figura 4.14 Cementos con adición de cenizas volantes. Fuente: [34] .....	118
Figura 4.15 Cementos con escorias de alto horno. Fuente: [34] .....	119
Figura 4.16 Curva granulométrica de las arenas según huso granulométrico EHE. Fuente: Elaboración propia.....	136
Figura 4.17 Curva granulométrica de los áridos. Fuente: Elaboración propia.....	137
Figura 4.18 Resultados de densidades obtenidas. ....	137
Figura 4.19 Resultados globales ensayo Tesis_UCAM_1. Fuente: Elaboración propia.....	137
Figura 4.20 Título de la Figura. Fuente: Elaboración propia a partir de [53] y [52] .....	138
Figura 4.21 Adquisición de resistencias a compresión simple de cada una de las dosificaciones durante los 28 días de período de fraguado. Fuente: Elaboración propia.....	148
Figura 4.22 Comparativa de la adquisición de resistencias a compresión simple del mortero a 7 y 28 días. Fuente: Elaboración propia. ....	149
Figura 4.23 Adquisición de resistencias a flexo tracción de cada una de las dosificaciones durante los 28 días de período de fraguado. Fuente: Elaboración propia.....	150
Figura 4.24 Comparativa de la adquisición de resistencias flexo tracción del mortero a 7 y 28 días. Fuente: Elaboración propia. ....	150
Figura 4.26 Caso de flotabilidad del NFU. Fuente: Elaboración propia.....	151

Figura 4.25 Planos de rotura en las probetas ensayadas. Fuente: Elaboración propia. .....	151
Figura 4.27 Ensayo de resistencia a flexo tracción. Fuente: Elaboración propia. .	152
Figura 4.28 Adquisición de resistencias compresión confinada de cada una de las dosificaciones durante los 28 días de período de fraguado. Fuente: Elaboración propia. .....	154
Figura 4.29 Comparativa de la adquisición de resistencias a compresión confinada del mortero a 7 y 28 días. Fuente: Elaboración propia. .....	155
Figura 4.30 Comparativa de la deformación del anillo de guarda a 7 y 28 días. Fuente: Elaboración propia. .....	155
Figura 4.31 Resultados cruzados del ensayo de resistencia a compresión confinada, y la deformación del anillo de guarda. Fuente: Elaboración propia. .....	156
Figura 4.32 Ensayo de resistencia a compresión confinada, con anillo de guarda al centro. Fuente: Elaboración propia. .....	157
Figura 4.33 Módulo elástico del mortero para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia. .....	160
Figura 4.34 Comparativa del ensayo de módulo elástico con la deformación del anillo de guarda. Fuente: Elaboración propia. ....	161
Figura 4.35 Consistencia del mortero para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia. .....	163
Figura 4.36 Ensayo en mesa de sacudidas. Fuente: Elaboración propia. ....	163
Figura 4.37 Resultados de Embudo en V para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia. .....	165
Figura 4.38 Comparativa de resultados entre el ensayo de Embudo en V y consistencia. Fuente: Elaboración propia. .....	167

---

Figura 4.39 Resultados trabajabilidad para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.....	169
Figura 4.40 Resultados tiempo de fraguado para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.....	172
Figura 4.41 Ejecución de ensayo de tiempo de fraguado. Fuente: Elaboración propia.....	172
Figura 4.42 Comparativa entre los resultados de los ensayos de trabajabilidad y tiempos de fraguado. Fuente: Elaboración propia. ....	173
Figura 4.43 Resultados tiempo de densidad para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.....	175
Figura 4.44 Pesaje de probeta en estado fresco para obtención de densidad. Fuente: Elaboración propia.....	176
Figura 4.45 Resultados contenido en aire para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.....	178
Figura 4.46 Resultados de ensayo de exudación simple y bajo presión para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia. ....	180
Figura 4.47 Ensayo de exudación bajo presión. Fuente: Elaboración propia. ....	181
Figura 4.48 Resultados de ensayo de exudación simple y bajo presión para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia. ....	183
Figura 4.49 Celda para el sistema automático de 4 presiones de determinación de la permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.....	184
Figura 4.50 Comparativa entre los resultados de los ensayos de volumen de huecos y permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.....	185
Figura 4.51 Resultados de ensayo de cambio de longitud para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.....	187
Figura 4.52 Ensayo de cambio de longitud. Fuente: Elaboración propia.....	188

Figura 4.53 Resultados de ensayo de lavado del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	190
Figura 4.54 Determinación de la pérdida por lavado. Fuente: Elaboración propia. ....	190
Figura 4.55 Resultados de ensayo de fricción interna del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	192
Figura 4.56 Celda para ensayo triaxial (izquierda) y prensa triaxial (derecha). Fuente: Elaboración propia.....	193
Figura 4.57 Testigo ensayado en prensa triaxial. Fuente: Elaboración propia. ....	193
Figura 5.1 Perspectiva del modelo completo (arriba) y esquema de las condiciones de vinculación del modelo con el exterior (abajo). Fuente: Elaboración propia. .	205
Figura 5.2 Síntesis de escenarios planteados. Fuente: Elaboración propia. ....	209
Figura 5.3 Sección transversal del túnel en el modelo. Fuente: Elaboración propia. ....	211
Figura 5.4 Sección transversal deformada del túnel en el modelo – no a escala. Fuente: Elaboración propia.....	212
Figura 5.5 Evolución de las tensiones de Von Mises y deformación en los elementos según el avance del TBM. Fuente: Elaboración propia.....	213
Figura 5.6 Ubicación del punto de control de resultados de tensión y convergencia. Fuente: Elaboración propia.....	215
Figura 5.7 Tensión de Von Mises en el revestimiento para E9 y M_CONV durante todo el proceso de simulación numérica. Distintas etapas para el análisis de resultados. ANSYS APDL. Fuente: Elaboración propia. ....	220
Figura 5.8 Evolución de tensiones de Von Mises durante los primeros días de vida del revestimiento. Fuente: Elaboración propia. ....	221

---

Figura 5.9 Tensiones en cada escenario para M1 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.....	222
Figura 5.10 Tensiones en cada escenario para M2 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.....	223
Figura 5.11 Tensiones en cada escenario para M3 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.....	223
Figura 5.12 Tensiones en cada escenario para M4 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.....	224
Figura 5.13 Tensiones en cada escenario para M5 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.....	224
Figura 5.14 Tensiones en cada escenario para M6 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.....	225
Figura 5.15 Tensiones en cada escenario para M7 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.....	225
Figura 5.16 Tensiones en cada escenario para M8 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.....	226
Figura 5.17 Tensiones en cada escenario para M9 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.....	226
Figura 5.18 Tensiones en cada escenario para 9 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.....	227
Figura 5.19 Relación de tensiones para mezclas y escenarios – en kPa – a corto plazo. Fuente: Elaboración propia.....	227
Figura 5.20 Relación de tensiones para mezclas y escenarios – en kPa – a largo plazo. Fuente: Elaboración propia.....	228
Figura 5.21 Ratio tensión-convergencia para cada mezcla y escenario en tanto por uno. Fuente: Elaboración propia.....	229

Figura 5.22 Ratio tensión-convergencia para cada mezcla y escenario en tanto por uno. Fuente: Elaboración propia. ....	229
Figura 5.23 Evolución del ratio tensión-convergencia según el módulo de Young del terreno. Fuente: Elaboración propia.....	230
Figura 5.24 Rango teórico de utilización de mezclas. Fuente: Elaboración propia. ....	231
Figura 5.25 Tensiones longitudinales en frente de excavación. Fuente: Elaboración propia.....	237
Figura 5.26 Respuesta de las mezclas respecto a la óptima –valor unidad- según el módulo de elasticidad del terreno. Fuente: Elaboración propia. ....	243
Figura 5.27 Rango teórico de utilización de mezcla. Fuente: Elaboración propia. ....	244
Figura 5.28 Convergencias representativas de cada escenario. Fuente: Elaboración propia.....	244
Figura 5.29 Criterio de fluencia de Hoek y Marinos (2000). Fuente: [59], [63] y [64] .....	245
Figura 5.30 Convergencia relativa de cada escenario vs. módulo de elasticidad del terreno. Fuente: Elaboración propia. ....	246
Figura 5.31 Superposición de rango de utilización óptima de M7 y riesgo de ‘squeezing’ según el módulo de elasticidad del terreno. Fuente: Elaboración propia. ....	247

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 4.1 Normativa de ensayo de granulometría de los áridos empleados. Fuente: Elaboración propia.....	102
Tabla 4.2 Normativa de ensayo de compresión simple y flexo tracción del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	103
Tabla 4.3 Procedimiento adoptado para el ensayo de resistencia a compresión confinada. Fuente: Elaboración propia. ....	106
Tabla 4.4 Normativa de ensayo de módulo de elasticidad a compresión. Fuente: Elaboración propia.....	106
Tabla 4.5 Normativa de ensayo de consistencia por mesa de sacudidas. Fuente: Elaboración propia.....	107
Tabla 4.6 Normativa de ensayo de capacidad de relleno del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	107
Tabla 4.7 Normativa de ensayo de período de trabajabilidad. Fuente: Elaboración propia.....	107
Tabla 4.8 Normativa de ensayo de tiempo de fraguado. Fuente: Elaboración propia.....	108
Tabla 4.9 Normativa de ensayo de densidad en estado fresco. Fuente: Elaboración propia.....	108
Tabla 4.10 Normativa de ensayo de contenido en aire del mortero fresco. Fuente: Elaboración propia.....	108
Tabla 4.11 Normativa de ensayo de exudación del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	109
Tabla 4.12 Procedimiento adoptado para el ensayo de exudación bajo presión..	110
Tabla 4.13 Normativa de ensayo de permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.....	110

---

Tabla 4.14 Normativa de ensayo de contracción del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	111
Tabla 4.15 Normativa de ensayo de granulometría de los áridos empleados. Fuente: Elaboración propia.....	111
Tabla 4.16 Normativa de ensayo de granulometría de los áridos empleados. Fuente: Elaboración propia.....	112
Tabla 4.17 Variable 1. Resistencia característica del cemento Portland empleado. Fuente: Elaboración propia.....	129
Tabla 4.18 Variable 2. Pasta de cemento. Fuente: Elaboración propia.....	130
Tabla 4.19 Variable 3. Aditivos químicos. Fuente: Elaboración propia.....	130
Tabla 4.20 Variable 4. Porcentaje de sustitución de árido por NFU. Fuente: Elaboración propia.....	131
Tabla 4.21 Síntesis final de variables y niveles de cada una de ellas para el diseño factorial de experimentos. Fuente: Elaboración propia. ....	131
Tabla 4.22 Matriz de experimentos de Taguchi L9 (3 <sup>4</sup> ). Fuente: Elaboración propia. ....	132
Tabla 4.23 Variables y niveles para la aplicación del modelo de Taguchi. Fuente: Elaboración propia.....	133
Tabla 4.24 Dosificaciones a ensayar a partir del modelo de Taguchi. Fuente: Elaboración propia.....	134
Tabla 4.25 Resultados del ensayo Tesis_UCAM_1. Fuente: Elaboración propia.	135
Tabla 4.26 Título de la Tabla. Fuente: Elaboración propia a partir de [52]. Fuente: Elaboración propia.....	138
Tabla 4.27 DT_01. Fuente: Elaboración propia.....	140
Tabla 4.28 Parámetros de control DT_01. Fuente: Elaboración propia.....	141

---

Tabla 4.29 DT_02. Fuente: Elaboración propia.....	141
Tabla 4.30 Parámetros de control DT_02. Fuente: Elaboración propia.....	141
Tabla 4.31 DT_03. Fuente: Elaboración propia.....	142
Tabla 4.32 Parámetros de control DT_03. Fuente: Elaboración propia.....	142
Tabla 4.33 DT_04. Fuente: Elaboración propia.....	142
Tabla 4.34 Parámetros de control DT_04. Fuente: Elaboración propia.....	142
Tabla 4.35 DT_05. Fuente: Elaboración propia.....	143
Tabla 4.36 Parámetros de control DT_05. Fuente: Elaboración propia.....	143
Tabla 4.37 DT_06. Fuente: Elaboración propia.....	143
Tabla 4.38 Parámetros de control DT_06. Fuente: Elaboración propia.....	144
Tabla 4.39 DT_07. Fuente: Elaboración propia.....	144
Tabla 4.40 Parámetros de control DT_07. Fuente: Elaboración propia.....	144
Tabla 4.41 DT_08. Fuente: Elaboración propia.....	145
Tabla 4.42 Parámetros de control DT_08. Fuente: Elaboración propia.....	145
Tabla 4.43 DT_09. Fuente: Elaboración propia.....	145
Tabla 4.44 Parámetros de control DT_09. Fuente: Elaboración propia.....	146
Tabla 4.45 Recopilación de dosificaciones a ensayar. Fuente: Elaboración propia. .....	146
Tabla 4.46 Resultado del ensayo de resistencia a compresión simple. Fuente: Elaboración propia.....	148
Tabla 4.47 Resultado del ensayo de resistencia a flexo tracción. Fuente: Elaboración propia.....	149

---

Tabla 4.48 Normativa de ensayo de compresión simple y flexo tracción del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	153
Tabla 4.49 Resultado del ensayo de resistencia a compresión confinada. Fuente: Elaboración propia.....	154
Tabla 4.50 Procedimiento adoptado para el ensayo de resistencia a compresión confinada. Fuente: Elaboración propia. ....	158
Tabla 4.51 Resultado del ensayo de módulo elástico del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	159
Tabla 4.52 Normativa de ensayo de módulo de elasticidad a compresión.....	161
Tabla 4.53 Resultado del ensayo de consistencia del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	162
Tabla 4.54 Normativa de ensayo de consistencia por mesa de sacudidas. Fuente: Elaboración propia.....	164
Tabla 4.55 Resultado del ensayo de embudo en V. Fuente: Elaboración propia.	165
Tabla 4.56 Normativa de ensayo de capacidad de relleno del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	167
Tabla 4.57 Resultado del ensayo de embudo en V. Fuente: Elaboración propia.	168
Tabla 4.58 Normativa de ensayo de período de trabajabilidad. Fuente: Elaboración propia.....	170
Tabla 4.59 Resultado del ensayo de tiempo de fraguado. Fuente: Elaboración propia.....	171
Tabla 4.60 Normativa de ensayo de tiempo de fraguado. Fuente: Elaboración propia.....	174
Tabla 4.61 Resultado del ensayo de densidad. Fuente: Elaboración propia.....	175
Tabla 4.62 Normativa de ensayo de densidad en estado fresco. Fuente: Elaboración propia.....	176

---

Tabla 4.63 Resultado del ensayo de contenido en aire. Fuente: Elaboración propia. .....	177
Tabla 4.64 Normativa de ensayo de contenido en aire del mortero fresco. Fuente: Elaboración propia.....	179
Tabla 4.65 Resultado del ensayo de exudación simple y bajo presión. Fuente: Elaboración propia.....	180
Tabla 4.66 Normativa de ensayo de exudación del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	182
Tabla 4.67 Resultado del ensayo de permeabilidad. Fuente: Elaboración propia. .....	183
Tabla 4.68 Normativa de ensayo de permeabilidad. Fuente: Elaboración propia. .....	185
Tabla 4.69 Resultado del ensayo de cambio de longitud. Fuente: Elaboración propia.....	187
Tabla 4.70 Normativa de ensayo de contracción del mortero. Fuente: Elaboración propia.....	188
Tabla 4.71 Resultado del ensayo de lavado del mortero. Fuente: Elaboración propia. .....	189
Tabla 4.72 Normativa de ensayo de granulometría de los áridos empleados.....	191
Tabla 4.73 Resultado del ensayo de fricción interna. Fuente: Elaboración propia. .....	192
Tabla 4.74 Normativa de ensayo de granulometría de los áridos empleados. Fuente: Elaboración propia.....	194
Tabla 4.75 Clasificación de resultados. Fuente: Elaboración propia. Fuente: Elaboración propia.....	197

---

<i>Tabla 4.76 Matriz multicriterio de análisis de los resultados de laboratorio. Fuente: Elaboración propia a partir de [52]</i> .....	198
Tabla 5.1 Síntesis de escenarios. Fuente: Elaboración propia. ....	217
Tabla 5.2 Síntesis de dosificaciones: módulo elástico y Poisson. Fuente: Elaboración propia. ....	218
Tabla 5.3 Convergencias obtenidas – en cm- para cada escenario y dosificación. Fuente: Elaboración propia. ....	218
Tabla 5.4 Convergencias representativas de cada escenario. Fuente: Elaboración propia. ....	219
Tabla 5.5 Alivio de tensiones respecto a mortero convencional en kPa. Fuente: Elaboración propia. ....	232
Tabla 5.6 Alivio de tensiones respecto a mortero convencional en %. Fuente: Elaboración propia. ....	233
Tabla 5.7 Síntesis de dosificaciones. Fuente: Elaboración propia. ....	241
Tabla 5.8 Evolución del ratio tensión-convergencia según el módulo de Young del terreno. Fuente: Elaboración propia. ....	242
Tabla 6.1 Dosificación final. Fuente: Elaboración propia. ....	273



## **1. INTRODUCCIÓN**



## INTRODUCCIÓN

La tecnología más eficiente, segura y económica disponible en la actualidad para la construcción de túneles se basa en el empleo de las tuneladoras TBM. Esta tecnología se encuentra en estos momentos en claro auge, pues se espera que durante los próximos 15 años más del 40% de los 16.000 kilómetros de túneles que van a ser construidos en territorio europeo se lleve a cabo haciendo uso de ella.

Existen diferentes versiones para las tuneladoras TBM, entre las cuáles destaca la tuneladora TBM de Escudo. Dicha tuneladora, es capaz de colocar el sostenimiento definitivo de dovelas de hormigón a medida que va avanzando a través del macizo rocoso, de modo que supone un importante ahorro de dinero, tiempo y recursos humanos frente a cualquier otra tecnología disponible en el mercado.

Sin embargo, y es aquí donde aparece el problema planteado, es precisamente lo que le confiere su principal ventaja (su forma de sostenimiento mediante dovelas rígidas de hormigón prefabricado), lo que imposibilita su uso para túneles excavados a grandes profundidades o a través de rocas de cierta inestabilidad (en adelante, a este fenómeno se le nombrará como *squeezing ground*). Las dovelas de hormigón prefabricadas instaladas en cuanto se lleva a cabo la instalación, - totalmente rígidas por definición -, no permiten una convergencia suficiente del terreno inestable que está siendo excavado, lo que se traduce en grandes sobrepresiones del material excavado sobre el sostenimiento rígido recién instalado. Dicho escenario, provoca que sea técnica y económicamente imposible diseñar un sostenimiento que pueda soportar dicha convergencia, haciendo totalmente inviable el empleo de las tuneladoras TBM. Esta situación, aparecerá siempre que la excavación se deba practicar mediante tuneladoras TBM en terrenos donde existan rocas dúctiles o con facilidad de fluir plásticamente bajo altas presiones.

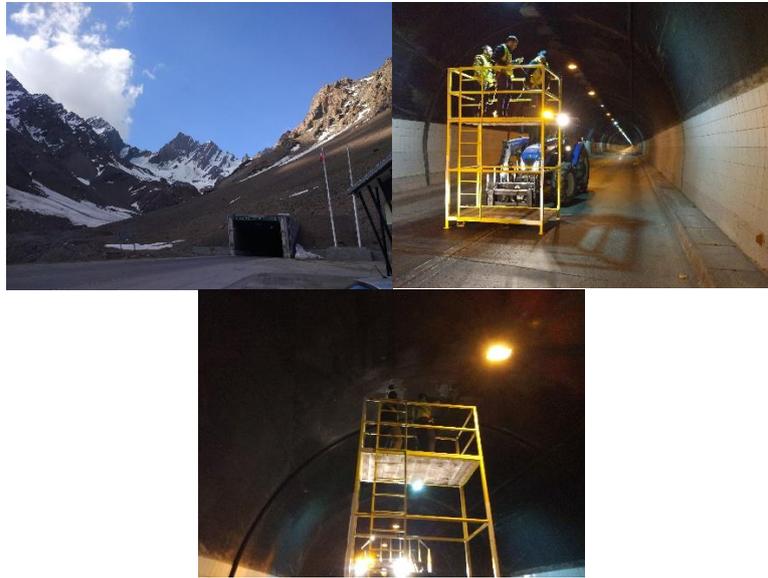


Figura 1.1 Visita del doctorando al túnel Cristo Redentor (frontera Chile – Argentina) para visualización in situ de problemas en el revestimiento a causa una convergencia no compatible del terreno. Fuente: Elaboración propia.

En la actualidad, si se hace un repaso al Estado del Arte de la técnica a nivel tanto nacional como internacional, no se detecta ninguna solución o procedimiento que corrija dicha problemática de forma global y plenamente satisfactoria. Hasta la fecha se han llevado a cabo exhaustivos estudios a cargo de Universidades o empresas vinculadas al sector ([1], [2], [3], [4], [5]) llegando de forma general a la conclusión de que todavía no se ha alcanzado una solución óptima que permita una convergencia compatible entre terreno excavado y dovela de hormigón. Algunos de los conceptos en los que la técnica se encuentra actualmente trabajando, bien en fase de estudio o fase de prototipo, son los siguientes:

- Instalación de elementos compresibles en las juntas longitudinales: Estos elementos deformables se realizan a base de acero u hormigón, con el objetivo de proveer una apropiada reacción frente a las cargas. Son diseñados para que las características de su curva tensión-deformación se ajuste a la capacidad de soportar la carga del revestimiento.

Aunque este planteamiento cuenta con una buena base científica, todavía no se han instalado elementos compresibles de este tipo en combinación con dovelas colocadas mediante una TBM de Escudo. Los principales inconvenientes [6] de este sistema son, por un lado, el cambio de forma que experimentará la sección, pudiendo incluso ser incompatible con la función que debe cumplir el túnel (gálidos mínimos, etc), y por otro lado, el alto coste de instalación de dichos elementos en términos de tiempo y materiales a emplear, ya que no se debe olvidar que al ser un sostenimiento definitivo las juntas deberían ser estancas.

- Ribbed-segments o dovelas discontinuas: esta solución permite que la deformación plástica de la roca se produzca entre los segmentos vacíos que genera una disposición de dovelas de acero discontinuas (es lo que se conoce como *costillas de acero*, de ahí su nombre en inglés). En este sistema se permite la deformación de la roca hacia dentro durante varios días, hasta que se completa el sostenimiento a partir de hormigón proyectado. Por tanto, las costillas de acero son la parte rígida del sistema, mientras que el espacio entre ellas deja paso a la deformación radial de la roca de los alrededores.

El problema fundamental de esta tecnología, es que en el caso de rocas demasiado inestables puede ser inviable al darse deformaciones excesivas o no controlables, además de producir un retraso en los trabajos de construcción al no tratarse de un sistema de sostenimiento definitivo.

- Relleno del espacio anular entre las dovelas y la roca con material compresible: durante los últimos años ha aparecido la idea de intercalar materiales compresibles en el hueco existente entre el sostenimiento rígido y el terreno excavado. Generalmente, este tipo de soluciones buscan crear un mortero a base de cemento y partículas de poliestireno expandido como árido, capaz de conseguir en condiciones de confinamiento lateral, una compresión mínima de hasta el 50% sin que aparezcan fisuras o fracturas sobre el material.

El principal problema de este tipo de morteros es el coste de las partículas de poliestireno expandido, el cual podría incrementar considerablemente el precio de la ejecución de la compatibilización de convergencias entre terreno excavado y dovela de hormigón por metro lineal de excavación. Así mismo, la diferencia tan amplia de densidades entre el poliestireno expandido y el resto de materiales que componen el mortero también puede suponer en ocasiones una dificultad añadida a la hora de la colocación del material (problemas de flotación dentro de la masa de

hormigón de las partículas de poliestireno expandido), o incluso generación de discontinuidades en el interior de la matriz cementosa por formación de cavidades de aire.

En base a las deficiencias encontradas en cada una de las soluciones anteriores, es un hecho demostrable que la problemática que pretende afrontar el doctorando sigue sin estar resuelta de forma óptima. Es, por tanto, Motivación de la presente tesis doctoral, plantear una propuesta de investigación que verse sobre el desarrollo de una nueva solución que asegure la compatibilidad de convergencias entre las doveles rígidas de hormigón y el terreno excavado cuando se trabaje con tuneladoras TBM de Escudo, a partir del diseño de un nuevo mortero compresible formado por gránulos de caucho de Neumático Fuera de Uso (en adelante, NFU).



## **2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**



## OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Los objetivos que se plantea el doctorando para dar respuesta a la línea de investigación anteriormente planteada se desglosan en dos, Objetivo General de la Investigación, y Objetivos Científicos:

### 2.1 OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

El Objetivo General de la Investigación es el desarrollo de una nueva solución constructiva para asegurar la compatibilidad de convergencias entre terreno excavado y dovelas rígidas de hormigón, cuando se trabaje con tuneladoras TBM de escudo en terrenos altamente fragmentados o inestables, con riesgo asociado de *squeezing ground*. Para ello, el doctorando plantea el desarrollo de un nuevo mortero compresible a base de partículas de NFU, el cual se pueda inyectar en el espacio anular generado por el terreno excavado y las dovelas a medida que avanza el frente de excavación.

La obtención de dicho Objetivo General de Investigación, se desliga en los siguientes Objetivos Científicos.

### 2.2 OBJETIVOS CIENTÍFICOS

Los objetivos científicos planteados por el doctorando son los siguientes:

- Identificación de los requisitos físicos, químicos y mecánicos a imponer al nuevo material. El proceso de puesta en obra y las exigencias estructurales a lo largo de su vida útil son las dos características de las que emanan los requisitos a imponer.

El nuevo material diseñado en el marco de la presente tesis doctoral pretende erigirse como una solución viable para asegurar la compatibilidad de convergencias. En este sentido, deberá de reunir una serie de características químicas, físicas y mecánicas que le permitan desempeñar su papel de forma funcional y eficaz, tanto en estado fresco, como una vez haya fraguado y endurecido. Dichas características habrá que identificarlas en la presente investigación, dado que hasta la fecha no ha sido desarrollado un material de similares características para dicha aplicación.

El doctorando identificará por tanto aquellas características químicas que deberán de reunir los materiales empleados para la dosificación del nuevo material. Se tratará de identificar las posibles compatibilidades o incompatibilidades entre dichos materiales, especialmente a la hora de evaluar los aditivos químicos a incorporar a la dosificación. Especialmente, serán importantes los aditivos químicos que tengan influencia sobre la reología en estado fresco del mortero, pues será un parámetro clave para garantizar la correcta puesta en obra del mortero una vez se inyecte en el ya mencionado espacio anular. Así mismo, será importante caracterizar químicamente el caucho NFU, pues, aunque en un principio se presuponga un material inerte en cuanto a la reactividad con el resto de componentes, dicha propiedad debe quedar asegurada.

Por otra parte, desde una perspectiva de características físicas del nuevo material, es especialmente importante analizar el comportamiento que el caucho procedente de NFU va a tener dentro de la mezcla, tanto en estado fresco como en estado endurecido. En estado fresco, se deberá de parametrizar y acotar como se comportará dentro de la matriz de cemento un material de una densidad tan diferente al resto de componentes del mortero (del orden de veces menor). Esto puede desembocar en problemas de flotabilidad dentro del material en estado fresco, que deben corregirse para evitar que el caucho flote una vez se inyecte el mortero, dando pie a un material no homogéneo y sí estratificado, en una capa inferior que prácticamente sería cemento y áridos, y una capa superior en la que se encontraría el caucho envuelto en una pequeña película de cemento. Así mismo y por lo que respecta al estado endurecido, será fundamental conocer como se va a integrar el caucho con la matriz cementosa del mortero. Conocer la interacción en la interfaz cemento – caucho resultará clave para garantizar que el caucho se comporta como un material plenamente integrado dentro del cuerpo del mortero, y no suponga un elemento no acoplado que propicie la formación de oquedades internas y discontinuidades dentro del mortero que faciliten los puntos de falla del mismo una vez entre en carga.

Por último, en cuanto a las propiedades mecánicas del mortero, se debe recordar que no se pretende desarrollar un material con competencias estructurales. No obstante, el material a desarrollar debe tener unas características de compresibilidad no convencionales dentro de la familia de materiales que se

aglomeran en base a cemento. Conocer los requisitos de compresibilidad será uno de los puntos de base a la hora de definir las características mecánicas del nuevo material, pues las proporciones o tipología de material a emplear dependerá en gran medida de esta premisa.

- Validación de las herramientas que permitan verificar el nivel de cumplimiento de los requisitos establecidos por parte del nuevo material. Las herramientas, tradicionalmente aceptadas por la comunidad científica son dos: ensayos de laboratorio y modelización matemática del fenómeno. En el caso de los ensayos, además de recurrir a ensayos normalizados, será necesario diseñar un nuevo ensayo útil para medir la resistencia a compresión confinada, simulando las condiciones en las que se encontrará el mortero una vez sea inyectado en el espacio anular formado por el terreno excavado y las dovelas de hormigón. En el caso de la modelización matemática, se optará por modelos numéricos del conjunto terreno-hueco anular relleno del nuevo material-dovelas; compatibilizando el método de los elementos finitos con el método de los elementos de contorno.

Ante el desarrollo de nuevo mortero compresible como el que pretende obtener la presente investigación, y considerando a su vez que este nuevo material hará uso de algunos elementos en su dosificación no convencionales como es el caso del NFU, uno de los objetivos de la presente investigación será validar aquellas herramientas que permitan conocer el nivel cumplimiento del material con los requisitos previamente establecidos. En este sentido, el estudio se dividirá en dos bloques, teniendo en cuenta que tanto la capacidad de puesta en obra como el comportamiento a lo largo de su vida útil serán las dos premisas fundamentales a chequear:

A) Ensayos de laboratorio. Las pruebas, ensayos y demás comprobaciones para verificar la calidad del nuevo material se deben de seleccionar de forma específica, con el objetivo de comprobar aquellas propiedades del mortero con un papel clave a la hora de medir su funcionalidad y rendimiento una vez instalado. Dicho esto, se seleccionará, de entre los ensayos y pruebas normalizadas, aquellos procedimientos considerados como indispensables para medir diferentes características del mortero compresible. Por otra parte, y debido al carácter especial del nuevo material, se estudiará y analizará la opción de desarrollar en el marco de la presente tesis pruebas propias que permitan medir algunas propiedades del mortero, y que los

ensayos normados actuales no recojan. A priori, se plantea el desarrollo de un nuevo ensayo de resistencia a compresión en situaciones de confinamiento, esto es, siendo el eje en el cual se aplica la carga a compresión, el único grado de libertad que tendrá el material.

B) Modelización matemática. En este caso se hará uso tanto del método de los elementos finitos (en adelante MEF) como del método de los elementos de contorno para simular el conjunto del escenario terreno – espacio anular – dovela prefabricada de hormigón. De este modo, y habiendo caracterizado numéricamente de forma previa el nuevo material, se podrá validar el rendimiento del nuevo mortero compresible en situaciones reales de funcionamiento. Mediante esta modelización, no solo se realizarán comprobaciones acerca del rendimiento del nuevo mortero una vez esté inyectado en su lugar correspondiente y haya endurecido, sino que también se podrá simular el proceso de inyección y asentamiento del terreno circundante conforme avanza el frente de instalación, de modo que se puede validar si, efectivamente, el nuevo mortero compresible asegura la compatibilización de convergencias cuando se excave mediante TBM de Escudo en terrenos inestables.

- Dosificación del nuevo material. En base a la literatura científica consultada, se plantea un nuevo material de características funcionales muy similares a un mortero elástico, que se pretende alcanzar incorporando caucho procedente de NFU a la mezcla, siendo objeto de estudio la granulometría y el porcentaje de adición.

Finalmente, y en base al cumplimiento previo de los objetivos científicos anteriormente planteados, se planteará la dosificación definitiva del nuevo material. De este modo, se concluye que la obtención del nuevo mortero compresible en base a NFU se obtendrá a partir de un proceso complementario en el cual se hará uso de campañas de laboratorio y modelizaciones numéricas, donde las consideraciones alcanzadas como parte de cada uno de dichos procesos servirán para definir de forma final la forma en que se incluirá el caucho en la dosificación de mortero definitiva, tanto en términos de granulometría, como en términos de cantidad.

Debe indicarse que la dosificación resultante del presente proceso investigador asumirá el empleo de los materiales aquí definidos, en términos de tipología y finura del cemento, granulometría y propiedades de áridos, aditivos, etc. El concepto y funcionalidad de la dosificación podrá ser replicado empleando otros materiales de similares características, pero siempre será necesario revisar sus

propiedades físico-químicas base, de manera que determinados parámetros de la dosificación final que pudieran servir como elementos de control, véase densidad, curvas granulométricas, índice de finos... se vean igualmente satisfechos y replicados.

### 2.3 METODOLOGÍA PROPUESTA

Para el desarrollo de esta investigación se planean cuatro hitos. Los tres primeros se corresponden con los tres grandes objetivos científicos expuestos anteriormente. El cuarto, y último hito, pretende analizar los distintos escenarios en los que se puede incorporar esta solución.

1. Con respecto al primer hito: *identificación de los requisitos físicos, químicos y mecánicos a imponer al nuevo material*. Se abordarán los siguientes puntos:
  - Requisitos físicos a imponer al nuevo material como consecuencia del proceso de inyección seleccionado.
  - Requisitos mecánicos a imponer al nuevo material como consecuencia del equilibrio estructural que se alcanzará gracias a la convergencia compatible.
  - Requisitos químicos a imponer al nuevo material como consecuencia de la interrelación entre los materiales que conformarán el mortero y la naturaleza geológica de distintos tipos de terreno.
2. Con respecto al segundo hito: *validación de las herramientas que permitan verificar el nivel de cumplimiento de los requisitos establecidos por parte del nuevo material*, se estudian los siguientes puntos:
  - Identificación de los ensayos normalizados a realizar al nuevo material. Definición del intervalo de valores admisibles.
  - Diseño de un nuevo ensayo de laboratorio conducente a obtener la resistencia a compresión confinada del mortero. Definición de los umbrales de aceptación.
  - Modelización matemática del conjunto terreno-espacio anular relleno por el nuevo material-dovelas. Identificación de los parámetros estructurales que definen la bondad de la solución. Definición de los valores, o intervalo de valores, admisibles.

3. En cuanto al tercer hito: *dosificación del nuevo material*, se estudian los siguientes puntos:

- Identificación de los insumos, y características relevantes de los mismos, que constituirán el nuevo material; en base a las publicaciones científicas.
- Diseño estadístico de experimentos. Partiendo de los insumos seleccionados y de las características relevantes de los mismos identificadas, se fijarán dos o más niveles con los que se identificarán, bajo la metodología Taguchi, las dosificaciones a fabricar y ensayar.
- Fabricación de las diferentes dosificaciones obtenidas a partir del diseño estadístico de experimentos.
- Realización de los ensayos, normalizados y diseñado específicamente para este fin, a las diferentes dosificaciones fabricadas.
- Análisis Multicriterio que permitirá seleccionar la dosificación óptima. Para ello se identificarán los parámetros relevantes y el peso de los mismos.

4. Por último, en el cuarto hito se pretende analizar los distintos escenarios en los que se puede incorporar esta solución. Para ello, se abordarán los siguientes puntos:

- Definición de distintos escenarios susceptibles de aplicación de la tecnología TBM Escudo con la incorporación del nuevo material.
- Modelización matemática del conjunto terreno-espacio anular relleno por el nuevo material-dovelas, correspondiente a los distintos escenarios definidos previamente.
- Identificación de los casos en los que la aplicación de la tecnología TBM Escudo con la incorporación del nuevo material implica beneficios considerables frente a otras opciones.

Con el propósito de dar respuesta a la consecución y alcance de cada uno de los Hitos anteriores, el presente documento se ha estructurado de una forma práctica que ayude en todo momento al lector a ubicarse dentro del proceso investigador llevado a cabo.

Como punto de partida de la investigación, se ha llevado a cabo un minucioso Estado del Arte que refleje el estado actual de la técnica. El objetivo de este punto es formar unos antecedentes claros sobre los que cimentar de forma sólida el cuerpo investigador de la tesis. Dicho Estado del Arte se ha realizado, de forma

interrelacionada pero diferenciada, para las dos disciplinas clave que atañen a la consecución del Objetivo General de la Investigación. En primer lugar, se realizará un estudio de las técnicas existentes en la actualidad, tanto a nivel de idea o concepto, como de prototipo o solución comercial, para la compatibilización de convergencias en excavaciones mediante TBM de Escudo en terrenos inestables. Dentro de este bloque, se realizará una mención especial a aquellos elementos o sistemas que, de igual forma a como sucede en esta tesis, basen su fundamento en la inyección de algún tipo de material compresible en la cavidad anular que forman el terreno excavado y la dovela de hormigón en el momento de la excavación. En segundo lugar, el Estado del Arte se ha enfocado hacia los diferentes desarrollos en materia de modelización desarrollados hasta el momento, y que han permitido, bien a partir del método MEF o a partir del método de los elementos de contorno obtener modelos válidos para la simulación de un frente de excavación en escenarios que contemplen el conjunto: terreno excavado – anillo anular – dovelas rígidas de hormigón.

En base a las conclusiones alcanzadas una vez se desarrolle el EdA anteriormente comentado, se iniciará la tarea investigadora propiamente dicha. El primer capítulo de índole investigadora consistirá en la recopilación todos los trabajos de laboratorio desarrollados, así como sus antecedentes o evaluación de resultados. En dicho apartado, se comentarán en primer lugar los requisitos del nuevo material a obtener, así como los ensayos preceptivos para validar su obtención. En segundo lugar, se desarrollará el plan de ensayos de laboratorio a ejecutar, para continuar con la propia realización del mismo y la obtención y recopilación de resultados. Finalmente, y como punto final, se realizará una evaluación de los resultados obtenidos a partir de una valorización multicriterio, para seleccionar como resultado final las configuraciones definitivas resultantes.

A continuación, y una vez el trabajo investigador en laboratorio haya obtenido como resultado diferentes configuraciones de dosificación potenciales, se llevará a cabo el proceso de modelización matemática del conjunto terreno excavado – anillo anular – dovela rígida de hormigón. En primer lugar, se analizarán las condiciones de contorno y geometría global del sistema, de forma que se pueda configurar un número determinado de escenarios representativos. A continuación, se ejecutarán los diferentes escenarios modelizados y se obtendrán y analizarán los resultados obtenidos. Como conclusión a este apartado, y en base a las dosificaciones

potenciales que se habrán incluido en la modelización, se seleccionará la dosificación de mortero definitiva como resultado del proceso investigador.

Finalmente, y como punto final a la presente tesis, se expondrán las conclusiones alcanzadas fruto del proceso investigador desarrollado, trazando una comparativa de estas con los objetivos iniciales de la investigación anteriormente comentados. Así mismo, se comentarán futuras líneas de investigación que emanen de los resultados alcanzados por el doctorando.



### **3. ESTADO DEL ARTE**



### ESTADO DEL ARTE

En el presente apartado se realiza un estudio del estado actual de la técnica asociada a sistemas para asegurar la convergencia compatible en procesos de excavación mediante TBM de Escudo en terrenos inestables, así como en materia de modelización matemática de un proceso de excavación mediante este tipo de maquinaria. Es importante indicar, que previa exposición del Estado del Arte realizado para cada una de las temáticas comentadas, se aportará la información necesaria en cuanto a antecedentes y particularidades, de modo que se permita un mayor entendimiento de la problemática en cuestión.

En primer lugar, se comentará el estado de avance del conocimiento respecto a los sistemas para asegurar la convergencia del terreno excavado con las dovelas, haciendo especial hincapié en aquellas soluciones que emplean un material como relleno del espacio anular generado. Se aprovechará por tanto el presente apartado, para explicar de forma detallada un proceso de excavación mediante TBM de Escudo, comentando todas sus fases o singularidades, o elementos intervinientes en la excavación.

En segundo lugar, se expondrá de forma detallada el avance de la técnica en materia de modelización de procesos de excavación mediante tecnología TBM de Escudo. En este sentido, se comentarán aquellos modelos desarrollados hasta el momento, indicando, entre otros, la manera en que han aproximado las condiciones de contorno del escenario en cuestión, la forma de representar la interacción entre el terreno y el sostenimiento, o la influencia que la presión del terreno o la existencia de diferentes estratos geológicos ha supuesto en la modelización. Finalmente, se indicarán también aquellas simplificaciones que se han adoptado en cada proceso de modelización, buscando mayor agilidad de cálculo sin perder representatividad en los resultados.

### 3.1 INVESTIGACIONES PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS DE SOSTENIMIENTO EN EXCAVACIONES CON TBM DE ESCUDO A TRAVÉS DE TERRENOS INESTABLES Y CON GRANDES SOBREPRESIONES

Como punto de partida del presente apartado se realizará un breve estudio acerca de los principios que rigen el funcionamiento de las tuneladoras TBM de Escudo, particularizando para operaciones que actúen en terrenos inestables o donde existan grandes sobrepresiones.



Figura 1.1 Ejemplo Tuneladora TBM.

Fuente: [1]

Generalmente, una tuneladora TBM de Escudo es un equipo de excavación que cuenta con una carcasa metálica exterior (escudo) que se encarga de sustentar provisionalmente el terreno desde el frente de avance hasta algo más allá de donde se coloca el sostenimiento definitivo, normalmente consistente en anillos formados por un determinado número de dovelas de hormigón prefabricado (alrededor de 7). De esta manera, es como se garantiza la estabilidad del túnel.

Dentro de las TBM de Escudo, encontramos las siguientes tipologías:

- **Escudos de frente abierto:** su uso se destina a túneles con frente estable. Para el desarrollo de la excavación se pueden emplear métodos manuales, brazo fresador, con un brazo excavador o una cabeza giratoria.
- **Escudos de frente cerrado:** su uso se reserva a situaciones donde el frente del túnel es claramente inestable, por ejemplo, en terrenos no cohesivos o saturados de agua. La sección que se excava debe ser circular necesariamente.

A continuación, se puede observar una imagen donde se aprecian las principales partes de una tuneladora TBM de Escudo:

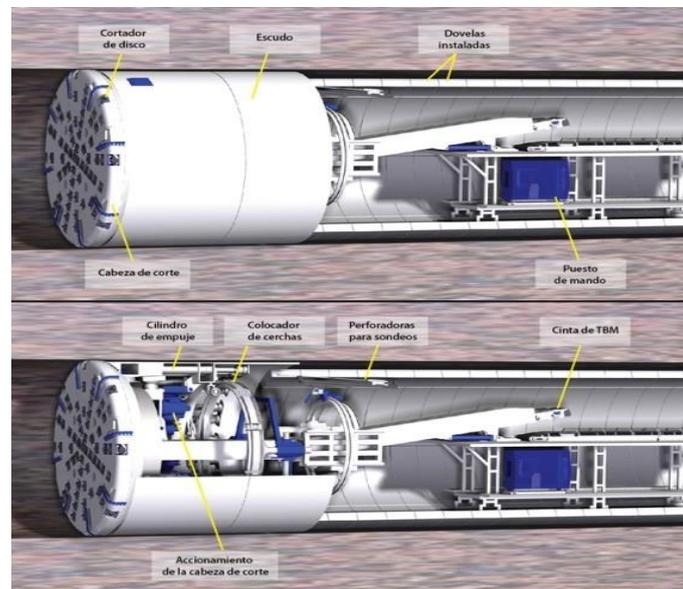


Figura 1.2 Sección tuneladora TBM de Escudo. Fuente: [7]

Una vez realizado este proceso, es cuando, si se opta por una solución de relleno del espacio anular, se procede a rellenar dicho hueco anular existente entre las dovelas y el terreno excavado, siendo este punto, donde aplicaría la solución que motiva esta tesis.

Por tanto, y en el ámbito de aplicación de la presente investigación, para la aplicación de la solución a desarrollar se antoja indispensable que se pueda hacer uso de los medios mecánicos actuales de mezcla, bombeo y colocación. Analizando las opciones que actualmente concede el desarrollo tecnológico de las tuneladoras TBM de Escudo, se han identificado dos posibles métodos de relleno anular: 1) Relleno anular a partir de inyección del material a través de los agujeros existentes en la dovela, o método discontinuo, y 2) Relleno a partir de la inyección del material por la cola del escudo, o método continuo. A continuación, profundizaremos en los aspectos clave de cada uno de estos procedimientos, habiéndose profundizado y dimensionado gracias a la investigación llevada a cabo en este capítulo de la tesis, el valor de algunas de las variables que caracterizan el proceso.

- 1) Inyección a través de los agujeros de las dovelas – Método Discontinuo

Se deben equipar las dovelas con agujeros para que se pueda rellenar el espacio anular con material de inyección. Los agujeros que se dispongan en las dovelas deben contar a su vez con un mecanismo que permita retener el material inyectado en dicho espacio, generalmente, se utilizan válvulas de no retorno o tapones. Habitualmente, se acostumbra a proveer a cada segmento con un agujero, sin embargo, el número final de agujeros vendrá definido en función de las propiedades del material que se vaya a inyectar.



Figura 1.3 Detalle del mecanismo de Inyección a través de huecos en las dovelas de hormigón. Fuente: [1]

## 2) Inyección a través de la cola del escudo – Método Continuo

Esta metodología es la recomendada en el caso de excavar en suelos blandos e inestables, como es el caso del terreno en el cual se fundamenta esta tesis. Para que esto sea posible la inyección debe realizarse mediante la cola del escudo (tailskin).



Figura 1.4 Detalle de los orificios en la cola del escudo (tailskin) para la inyección del mortero de relleno. Fuente: [1]

La siguiente figura muestra la forma de funcionamiento de la inyección a través de la cola del escudo.

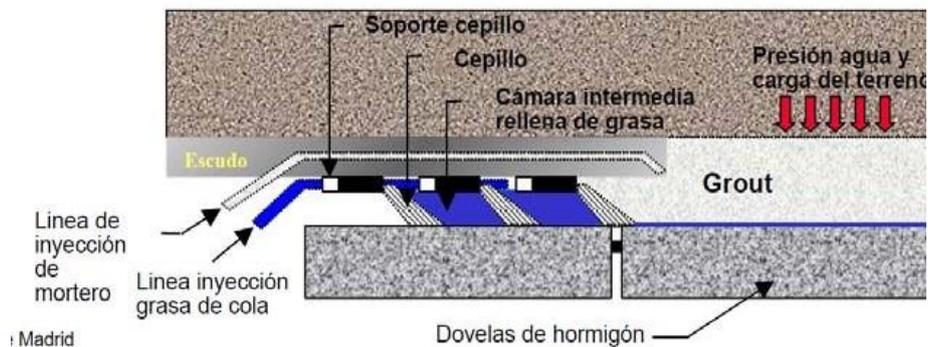


Figura 1.5 Esquema del proceso de inyección a través de la cola del escudo. Fuente: [1]

### 3.1.1 Profundización en las investigaciones que han intentado desarrollar sistemas de sostenimiento empleados con TBM de Escudo a través de terrenos inestables y con grandes sobrepresiones

Para la excavación mediante TBM de Escudo en el caso de rocas dúctiles o que fluyen plásticamente bajo altas presiones (squeezing ground), y a pesar de los

reiterados estudios que se han llevado a cabo por Institutos tecnológicos, Universidades o empresas constructoras ([1] [2] [8] [4] [5]), se llega de forma generalizada a la conclusión de que todavía a fecha de hoy no existe una solución definitiva al problema.

Tras un análisis profundo de investigaciones sobre el tema, es posible afirmar que básicamente sólo existirían dos principios [9] para los sistemas de sostenimiento en excavaciones con TBM de Escudo a través de terrenos inestables y donde existan grandes sobrepresiones (*squeezing rock/ground*): A) Principio de resistencia (*resistance principle*) y B) principio de convergencia (*yielding principle*):

#### A) Principio de resistencia – Sistemas de sostenimiento rígido

La capacidad de resistir y sostener de elementos prefabricados de hormigón puede incrementarse a través de (a) aumentar el grosor de las dovelas, (b) usando materiales de una resistencia superior o (c y d) instalando un arco de hormigón adicional en la parte interior formando un sostenimiento doble. Básicamente, existen cuatro potenciales configuraciones que atienden a este principio:

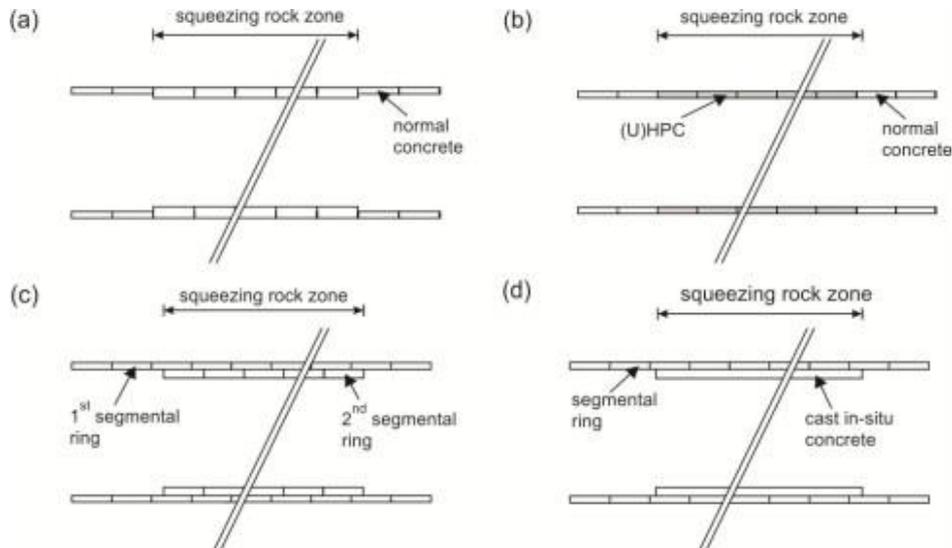


Figura 1.6 (a) Dovelas simples de mayor grosor fabricadas con hormigón convencional; (b) Sostenimiento de dovelas de hormigón de alta (HPC) y ultra alta Resistencia (UHPC); (c) Sostenimiento doble consistentes en dos anillos de elementos prefabricados; (d) Sostenimiento doble consistentes en un anillo de dovelas prefabricadas y un anillo interior de hormigón in situ. Fuente. [10]

*a)* Dovelas simples de mayor grosor fabricadas con hormigón convencional

Estos segmentos de mayor espesor resultan pesados y más difíciles de fabricar, transportar y manejar durante la instalación. Emplear esta estrategia para conseguir un sistema de alta resistencia es ocasiones resulta técnicamente imposible.

*b)* Sostenimiento de dovelas de hormigón de alta (HPC) y ultra alta Resistencia (UHPC)

A través de esta estrategia, el grosor se mantiene constante aumentándose la resistencia a través de las características del hormigón y su resistencia característica [11]. Los principales problemas de este tipo de hormigón especial es su mayor fragilidad debido a su alta densidad, baja resistencia al fuego.

*c)* Sostenimiento doble consistentes en dos anillos de elementos prefabricados

Si bien anillo más exterior se construye de manera convencional, el anillo interior puede necesitar emplear otro eyector. Adicionalmente, al colocarse un anillo sobre otro, los requerimientos respecto al proceso de fabricación y precisión en la colocación son extremadamente altos [12].

*d)* Sostenimiento doble consistentes en un anillo de dovelas prefabricadas y un anillo interior de hormigón in situ

Desde el punto de vista del comportamiento estructural, la diferencia entre este tipo de sostenimiento y el anterior (ver *c*), es que éste desarrolla su capacidad portante después, debido a la instalación posterior de este sostenimiento interior y el tiempo de fraguado del hormigón in situ.

Un intento de crear un concepto basado en esta configuración, empleando también los principios de convergencia son las dovelas discontinuas o *ribbed-segments*. En este caso, se permite una cierta deformación plástica de la roca entre las costillas de unas dovelas de acero discontinuas. En este sistema se permite la deformación de la roca hacia dentro hasta que se completa el sostenimiento con hormigón proyectado. Por tanto, las costillas de acero son la parte rígida del sistema mientras que el espacio entre ellas deja paso a la deformación radial de la roca de los alrededores. El principal problema de este sistema es que en rocas demasiado inestables puede ser inviable al darse una deformación excesiva o no controlable,

además de producirse un retraso en los trabajos al no tratarse de un sistema de sostenimiento definitivo.

El análisis de estos sistemas ha permitido confirmar cómo el empleo de sostenimiento basado en el (A) principio de resistencia para TBM de Escudo a través de terrenos inestables y donde existen grandes sobrepresiones resulta técnica y económicamente inviable, lo que en la actualidad impide emplear este tipo de equipos para enfrentarse a este tipo de escenarios.

Los métodos de mayor aceptación actuales son los sistemas basados en principios de convergencia (B), tanto los métodos tradicionales (actualmente empleados) como los basados en sostenimientos de convergencia compatible (actualmente en etapa experimental). Se procede ahora a hablar de cada uno de ellos.

#### **B) Principio de convergencia – Sistemas de sostenimiento deformable**

Para dar solución a este tema, actualmente se está trabajando, con mayor o menor éxito, en diferentes líneas de investigación. Estas se basan en la idea de trasladar el concepto de “flexibilidad”, de los sostenimientos empleados en la excavación con métodos tradicionales, a los sostenimientos con dovelas prefabricadas. Esto ha dado lugar a la aparición de diferentes conceptos sobre sistemas de dovelas de hormigón de convergencia compatible.

Los sistemas de sostenimiento convergente o flexible se basan en permitir al terreno excavado deformarse de una manera controlada. Esto resulta en una carga menor sobre el sostenimiento. Hay dos tipos básicos de sistemas convergentes o flexibles: a) sistemas deformables tangencialmente o b) sistemas deformables radialmente.

##### *e)* Sistemas de deformación tangencial

Hasta ahora, los **sistemas deformables tangencialmente** con elementos compresibles especiales (hechos de acero o plásticos) han sido empleados en excavación mediante métodos tradicionales [5] [2]. En la excavación con TBM de Escudo, los elementos compresibles deben colocarse en las juntas longitudinales de las dovelas. Los elementos a emplear serían son hiDCon [13], Lining Stress Controller (LSC) [14], Wabe [15] y Meypo [16]. Estos elementos deformables están diseñados para que las características de su curva tensión-deformación se ajusten a la capacidad de soportar carga del revestimiento.

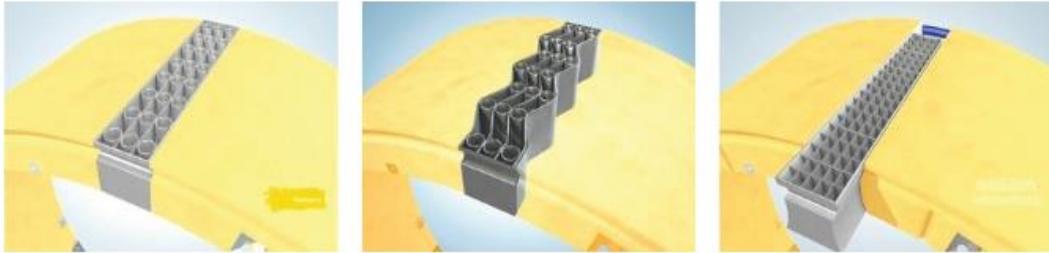


Figura 1.7 Ejemplo gráfico de diferentes soluciones para sistemas de deformación tangencial. Fuente: [6]

Los principales inconvenientes [6] de este sistema son, por un lado, el cambio de la forma que experimentará la sección, que puede resultar incompatible con la función que debe cumplir el túnel (gálibos mínimos, etc.) y por otro, el alto coste de la instalación de estos elementos en términos de tiempo y materiales a emplear, ya que no hay que olvidar que al ser el sostenimiento definitivo las juntas deberían ser estancas. Precisamente por motivos de funcionalidad (por ejemplo, lograr esta total impermeabilidad), la instalación de un anillo interior adicional podría ser necesario en este caso. Sin embargo, ninguno de estos sistemas ha sido empleado en terrenos inestables y que transmiten grandes sobrepresiones (*squeezing rock*) en combinación con TBM de Escudo.

f) Sistemas de deformación radial

Los **sistemas deformables radialmente** consisten en segmentos rígidos de hormigón en combinación con un material compresible o con una capa compresible fijada al extradós de las dovelas de hormigón prefabricadas. En el caso del material compresible, generalmente un mortero, éste debe ser inyectado en el hueco anular directamente tras el escudo, idealmente de manera continua durante el avance.

A través de esta profundización en el estado del arte se ha comprobado que sólo se han desarrollado dos morteros compresibles para el hueco anular: **COMPEX** [17] desarrollado por ROTTER GROUP y **DeCo Grout** [18] creado por HOTCHIEF. A pesar de tratarse de dos productos diferentes por parte de empresas diferentes, ambos desarrollos se basan en el mismo concepto: la creación de un **mortero en base a cemento con partículas de poliestireno expandido como árido**. Sus creadores afirman que las propiedades de estos morteros son tales que, **en condiciones de**

confinamiento lateral, se puede conseguir una compresión mínima del 50% sin que aparezcan fisuras o fracturas.

### 3.1.2 Análisis en profundidad de los morteros compresibles al nivel de desarrollo alcanzado, identificando claramente sus limitaciones, e identificando propuestas para la corrección de las mismas

Los morteros compresibles son aquellos formulados en base a cemento y poliestireno en sustitución de áridos. Las propiedades de estos morteros son tales que, en condiciones de confinamiento lateral, se consigue una compresión de alrededor del 50% sin rotura ni fisuración. La curva de tensión-deformación empieza con un incremento lineal seguido de una zona plana y finalizando con un incremento final de la carga máxima.

Como puede observarse en la siguiente figura, el empleo de esta tipología de mortero, gracias a la capacidad del mismo para deformarse, permite disminuir la presión que realmente llega a las dovelas de hormigón (ver punto de intersección entre la curva de convergencia del terreno y la curva de confinamiento del sostenimiento, destacado con un cuadro rojo), lo que hace que el empleo del sostenimiento rígido se convierta en viable técnica y económicamente.

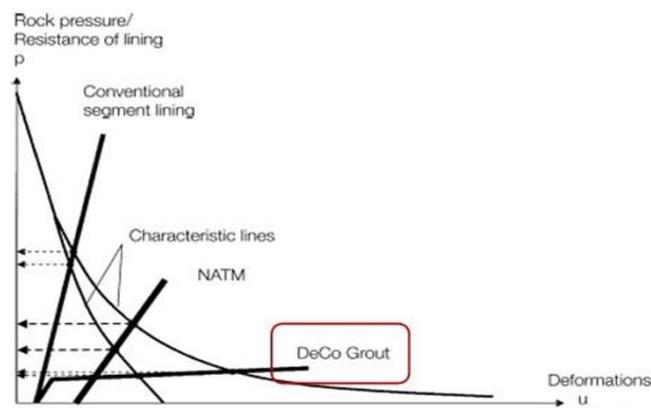


Figura 1.8 Líneas características para diferentes tipologías de sostenimiento.

Fuente: [19]

El proceso de rigidización y endurecimiento del mortero puede ser ajustado a las características de deformación de la roca excavada o terreno excavado. Es posible modificar el mortero de forma que se mantenga compresible durante un periodo substancial de tiempo, variando entre desde menos de un día a entre 21-28 días, dependiendo de los requerimientos.

Sin embargo, estos coinciden en que las configuraciones actuales (COMPEX y DeCo Grout) presentan importantes limitaciones a la hora de ser procesados, los cuales deben ser superados antes de que el nuevo mortero pueda ser utilizado en la excavación mediante TBM de Escudo:

- Problemas a la hora de mezclar el mortero

Mezclar es un problema debido a que las partículas de poliestireno tienen una densidad muy baja, entre 28 y 60 kg/m<sup>3</sup> y la relación agua/cemento debe ser mantenida por debajo de 0,45 para garantizar una estabilidad buena en el largo plazo y una resistencia máxima.

Para proporcionar un buen manejo del mortero debe tener un tiempo de fraguado de un mínimo de tres horas. Para garantizar la estabilidad del revestimiento de dovelas, el mortero debería empezar a endurecerse tan pronto como sea posible después de haber sido inyectado.

Para intentar superar esta limitación, los trabajos ahora se centran en escoger el tamaño de las partículas estratégicamente, modificar el tipo de cemento a uno especialmente fino con un valor Blaine de aproximadamente 5.000cm<sup>2</sup>/g, además de emplear combinación de cementos de diferente reactividad y un importante número de aditivos. Estos trabajos, además de encarecer el producto final de manera que deja de ser atractivo, no terminan en resultar en un mortero de las características necesarias.

- Problemas a la hora de bombear el mortero y para mantener la presión (problemas de sellado)

La baja densidad de las partículas de poliestireno supone un problema a la hora de proceder a su bombeo, ya que puede producirse una deformación no recuperable durante esta fase, no funcionando el mecanismo de compresión como parte del sistema de sostenimiento, con la inseguridad que esto puede suponer.

Por tanto, se alcanza en este punto la conclusión de que los problemas que está mostrando este material residen en su propia naturaleza, razón por la cual la

estrategia investigadora de la presente tesis doctoral consiste en desarrollar una dosificación de mortero radicalmente diferente, movilizando otros mecanismos para lograr la compresibilidad, tal y como se expondrá en el siguiente apartado.

### **3.1.3 Planteamiento para superar las limitaciones que presentan los morteros compresibles desarrollados hasta la fecha. Resumen de la evaluación técnica, económica y medioambiental de los materiales que potencialmente podrían conformar el nuevo mortero compresible en base al planteamiento teórico inicial**

Analizando el fundamento tecnológico que permite conseguir un material compresible a través de un mortero con base a cemento, se concluye con que, después de la rama elástica inicial, la rigidez disminuye debido a la **trituration o compresión de los agregados**. Adicionalmente, a medida que aumenta esta compresión (avance en la rama definida como plástica en el apartado anterior), el volumen de poros internos se agota, produciéndose que la rigidez del material aumente drásticamente de nuevo al finalizar la misma. Es decir, de forma resumida se podría afirmar que la compresibilidad del mortero radica principalmente en dos características del mismo: compresibilidad de los agregados y volumen de poros [20].

Si bien en el caso de los morteros compresibles existentes en base a partículas de poliestireno (EPS) el mecanismo movilizado por los agregados es el de deformación plástica, **se ha identificado que existen otros dos: pandeo elástico o trituration quebradiza**.

En el marco de esta tesis se ha procedido a buscar materiales que podrían representar ambos mecanismos dentro de una potencial configuración de mortero. A continuación, se ofrece un resumen de los aspectos más importantes del análisis llevado a cabo, sobre las potenciales materias primas a considerar y los mecanismos antes mencionados.

#### **Opción A) Mecanismo Pandeo elástico: Elastómero (caucho reciclado)**

Teniendo en cuenta el mecanismo de pandeo elástico y las propiedades mencionadas, se ha considerado que la alternativa al poliestireno podrían ser partículas de polímeros elastoméricos.

En el caso que ocupa esta tesis, considerando que según los datos del último informe de la ETRMA (*European Tyre & Rubber Manufacturers Association*), se generan más de 3.100.000 toneladas de neumáticos usados, emplear el caucho vulcanizado que se obtiene a través de su trituración parece la opción más económica y medioambientalmente sostenible, al dotar de un importante valor agregado a un material que actualmente se considera un residuo.

- Comportamiento mortero con elastómero (caucho reciclado)

El motivo por el que se decide optar por gránulos de caucho procedentes del reciclado de neumáticos es que numerosas investigaciones ponen de manifiesto que gracias a la adición de este material es posible conseguir comportamientos más tenaces del hormigón, exhibiendo una gran capacidad de absorber energía plástica frente a cargas, antes de fracturarse. Como se ha explicado, este es precisamente el comportamiento que se exige a los morteros compresibles.

Como se puede observar en la siguiente figura, gracias a la adición de gránulos de caucho reciclado se consigue pasar del comportamiento de un hormigón normal a una curva tensión deformación más parecida al comportamiento que los investigadores han definido como ideal para esta aplicación.

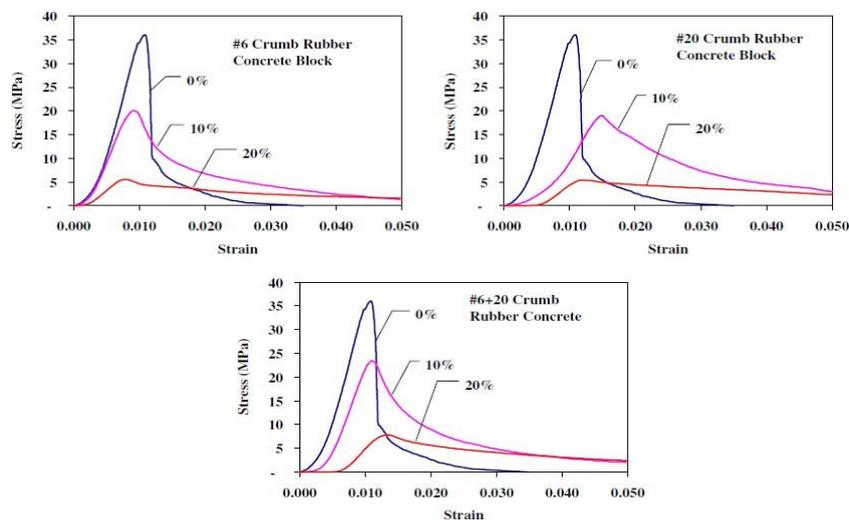


Figura 1.9 Respuesta a esfuerzos de compresión de hormigón con caucho reciclado en diferentes porcentajes. Fuente: [21].

Los grandes desplazamientos y deformaciones que se observan son debidos al hecho de que las partículas de caucho reciclado tienen la capacidad de resistir grandes deformaciones gracias a que absorben mayor cantidad de energía plástica. Dichas partículas actúan como una especie de *muelles* y causan un retardo en el ensanchamiento de las fisuras y evitan la rotura catastrófica que se da en hormigones convencionales.

Por tanto, al sustituir agregados de alta resistencia y rigidez por materiales de alta elasticidad, como es el caso de los gránulos de caucho reciclado, la resistencia del hormigón decrece significativamente, mientras que la ductilidad aumenta, lo mismo que ocurre al agregar las partículas de poliestireno expandido (EPS). Se piensa que actuando sobre la granulometría de estas partículas y su porcentaje se conseguirá llegar a conseguir el comportamiento óptimo necesario.

Por otro lado, además de la naturaleza elástica de los gránulos de caucho, el hecho de emplear caucho reciclado en la formulación del mortero compresible también se explica por hecho de que la adición de este material llevará asociado un mayor porcentaje de aire que se induce de forma natural en estos morteros con la simple incorporación de dichos gránulos.

Respecto a este último hecho, diversos investigadores [22], [23] y [24] argumentan que la no polaridad de los gránulos de caucho repele el agua y, en consecuencia, tiende a atrapar aire en su superficie. Esto se traduce en un aumento del contenido de aire en los hormigones a medida que aumenta el contenido de caucho, incluso sin la necesidad de emplear aditivos inclusores de aire, y en una disminución de la densidad del mismo.

Por otro lado, y conjuntamente a la consideración de este aspecto fundamental, que es el centro del desarrollo, se espera que mediante el diseño de las nuevas dosificaciones se pueda explotar, gracias a la incorporación de caucho reciclado al mortero, otras características muy interesantes para el ámbito que nos ocupa, como es la demostrada mejora de amortiguación de vibraciones y resistencia al impacto o explosión [25] y la mejorada capacidad de absorción/disipación de energía generada por eventos sísmicos [26], que será muy valorada en ciertos escenarios internacionales.

#### **Opción B) Mecanismo trituración quebradiza: Arcilla expandida**

- Comportamiento mortero con agregados triturables

Se encontraron artículos en los que se demostraba como al incorporar esta tipología de partículas, efectivamente es posible pasar del comportamiento de un mortero normal a una curva tensión deformación más parecida al comportamiento que los investigadores han definido como ideal para esta aplicación. A continuación, se muestra estos hechos, a través de la figura 3.14, referida a comportamiento tenso-deformacional de mortero con perlita expandida y comportamiento tenso-deformacional de mortero con arcilla expandida en la figura 3.15.

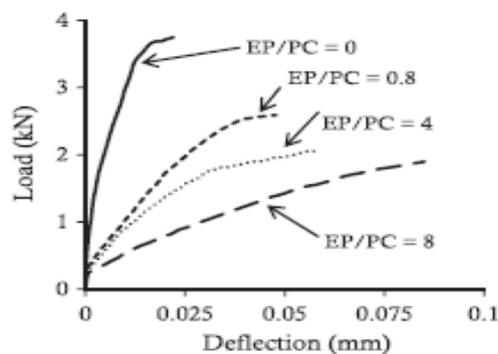


Figura 1.10 Respuesta tensión deformación en ensayo a compresión de mortero con diferentes proporciones de perlita expandida. Fuente: [27]

### Síntesis

Tras analizar las diferentes alternativas que existen actualmente para desarrollar una solución que permita la convergencia compatible entre el conjunto terreno excavado – anillo anular – dovela de hormigón, se ha detectado una importante oportunidad en los materiales de relleno del espacio anular. Dentro de esta familia de soluciones, se han estudiado cuáles son los mecanismos de compresión del mortero que le permitirían desempeñar dicha función, detectando 3 posibles alternativas:

- Mecanismo de compresión por deformación plástica

Este es el mecanismo de compresión que aplican las configuraciones actuales COMPEX Y DeCo Grout. Por lo general, están mostrando problemas graves en dos fases de la puesta en obra del mismo. En primer lugar, estos sistemas tienen carencias a la hora de mezclar el mortero, ya que la diferencia tan amplia de densidades entre el material compresible que usan (poliestireno expandido) y el

resto de componente requeriría de un tiempo de inicio de fraguado de por lo menos 3 horas, algo totalmente incompatible con el escenario a corregir, donde el inicio de fraguado debe ser tan pronto como sea posible tras su inyección. Y, por otra parte, estos morteros dan también problemas a la hora de bombear y mantener la presión (problemas de sellado), ya que de la baja densidad de las partículas de poliestireno puede provocar una deformación no recuperable durante esta fase, provocando que el mecanismo de compresión no funcione como parte del sistema de sostenimiento.

En base a los problemas detectados, se han evaluado en el Estado del Arte otros dos mecanismos de compresión.

- Mecanismo de compresión por pandeo elástico

Este mecanismo de compresión se ejecuta a partir de la inclusión de caucho dentro del mortero. Llegados a este punto, se abre una buena oportunidad de dotar a la solución de un marcado carácter medioambiental y sostenible, considerando la aplicación del mecanismo de compresión por pandeo elástico a partir de la introducción en el mortero de caucho procedente de NFU. Así mismo, el uso de este tipo de material, además de aportar un mecanismo de compresión deseable, aporta otra serie de ventajas que pueden suponer un claro valor añadido para la solución, como sería la capacidad de disipar vibraciones a través de la absorción de energía, resistencia a impacto, o mayor capacidad para generar aire ocluido, parámetro deseable en esta tesitura para ganar un mayor grado de compresibilidad. Las consideraciones anteriores, fueron las razones por las que en la presente tesis doctoral se decidió trabajar con el mecanismo de compresión por pandeo elástico.

- Mecanismo de compresión por trituración quebradiza

Este mecanismo de compresión ha sido también valorado, a tenor de las diferentes investigaciones científicas que aseguraban que este tipo de morteros podrían ofrecer curvas de compresión muy similares a las que se están buscando en el marco de la presente tesis. No obstante, dicho mecanismo de compresión ha sido desechado debido al importante sobre coste económico que supondría emplear perlita o arcilla expandida, del orden de 10 veces superior al caucho NFU, por ejemplo.

### 3.2 INVESTIGACIONES PARA EL DESARROLLO DE MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DE ESCENARIOS Y PROCESOS DE EXCAVACIÓN EMPLEANDO TECNOLOGÍA TBM DE ESCUDO

Como punto de partida del presente apartado, se explicarán a lo largo de las siguientes líneas las principales teorías de convergencia-sostenimiento en base a los trabajos de diferentes autores, tratando de particularizar sobre aquellas excavaciones que tengan lugar en rocas inestables o donde existan grandes sobrepresiones (fenómenos “squeezing ground”). Una vez expuestos dichos antecedentes teóricos, se comentarán los distintos desarrollos en materia de modelización matemática que se han realizado hasta el momento para tratar de aplicar y simular, numéricamente, los conceptos previamente presentados.

#### **3.2.1 Revisión de las principales teorías de convergencia-sostenimiento en terrenos inestables o sometidos a importantes sobrepresiones**

En este punto, el objetivo perseguido es hacer hincapié en la influencia y consideración que debe existir a la hora de llevar a cabo ciertas simplificaciones, buscando que a la hora de desarrollar el modelo numérico sea posible asegurar que se están considerando los escenarios a modelizar de manera correcta. En este marco, existen dos formas de enfocar la problemática considerada:

a. Hipótesis consideradas

Hipótesis de deformación plana

A este respecto, para estimar cuales serían las características de un sistema de sostenimiento de convergencia compatible (por ejemplo, la cantidad de sobreexcavación necesaria, ...), el planteamiento más común a la hora de llevar a cabo los cálculos geomecánicos es considerar la sección transversal del túnel muy alejada del frente del túnel, así como asumir condiciones de deformación plana. Donde hay simetría rotacional, el problema matemático de deformación plana se vuelve unidimensional. Así, la conocida como línea característica del terreno (también conocida por “ground response curve” [28] o “curva de respuesta del terreno” en castellano) expresa la relación entre la tensión radial  $p$  y el desplazamiento radial  $u$  del terreno en los límites de la excavación.



A través de la figura se pueden extraer dos conclusiones derivadas de la comparación de los dos enfoques antes descritos (simplificación considerando deformación plana vs modelo numérico que considera cómo se distribuyen realmente las tensiones cuando se está llevando a cabo la excavación en este tipo de terrenos):

- Por un lado, se observa que los puntos verdaderos de equilibrio (los puntos B y B' en la Figura, obtenidos por los modelos numéricos que emplean cálculos espaciales axisimétricos) estarán localizados sobre la curva respuesta del terreno (obtenida bajo condiciones de deformaciones planas).
- Por otro lado, que la presión final del terreno será mayor cuando actúe una presión inferior a la de fluencia en los soportes (los puntos B y B' en la figura se corresponden con presiones de fluencia de  $p_y$  y  $p'_y$  respectivamente).

c. Profundización en el análisis de diferentes situaciones y combinaciones terreno-tipología de sostenimiento

Como ya se ha presentado, básicamente existen dos tipologías de sostenimiento para la excavación de túneles [29]: los que atienden al principio de resistencia y los que se basan en principio de deformación. Los sistemas rígidos pueden ser considerados como sistemas que siguen el principio de resistencia, debido a que son sistemas prácticamente rígidos que tienen que ser lo suficientemente resistentes para soportar la presión que la roca ejerce sobre el sostenimiento. En el principio de deformación, la presión de la roca y, por tanto, el espesor de las dovelas puede ser reducido permitiendo deformaciones.

En este apartado se hará una revisión bibliográfica de distintos estudios y situaciones reales que nos permitan obtener los distintos parámetros a considerar a la hora de diseñar un revestimiento de un túnel en distintas situaciones.

#### **Mezge et al** [30]

Numerosos autores son los que han estimado mediante distintas metodologías las presiones que el suelo ejercerá sobre un revestimiento. Como Mezge et Al [30], quienes realizaron un estudio comparativo de las limitaciones de aplicación de sistemas rígidos y deformables para túneles excavados con TBM en suelos altamente comprimidos (squeezing ground). Los autores compararon un revestimiento rígido con un revestimiento deformable para dos rocas de distinta

calidad que vienen definidas por su módulo de elasticidad  $E$  y su resistencia a compresión en dos profundidades distintas.

Los resultados obtenidos por estos autores son mostrados en la siguiente figura. Los puntos marcados corresponden la presión final en sostenimiento  $p_r$ , y al desplazamiento de la roca para cada sistema de sostenimiento. Para entender mejor las diferencias entre las distintas condiciones geotécnicas también se han añadido las líneas características del suelo.

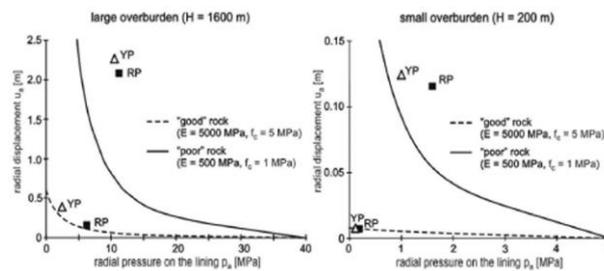


Figura 1.13 Líneas características del suelo y puntos de equilibrio en los distintos casos considerados. Fuente: [1]

### Catieni & Anagnostou [5]

Otros autores como Catieni & Anagnostou [5], cuyo trabajo ha sido comentado en apartados anteriores, obtuvieron unos valores de presión y deformación a partir de modelos numéricos para un suelo dado y distintos sostenimientos. En la siguiente figura se observa la curva característica del suelo y los puntos de equilibrio para los distintos sostenimientos. De los resultados se deduce que los soportes rígidos tienen que soportar mayores presiones.

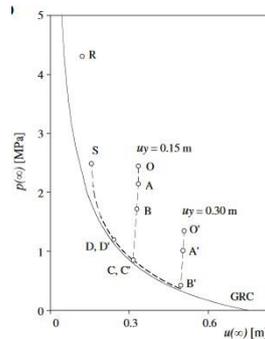


Figura 1.14 Curva característica del suelo y los puntos de equilibrio para los distintos sostenimientos. Fuente: [5]

### 3.2.2 Revisión de los modelos numéricos existentes en literatura científica para la simulación de la excavación mecánica de túneles

En el presente apartado se realiza una síntesis de los principales modelos numéricos recopilados en la literatura científica existente para la modelización completa en 3D del proceso de excavación mecánica de túneles, considerando fenómenos de *squeezing* o la influencia de las deformaciones diferidas en la convergencia radial del túnel.

**Zhao et al.** [31]

Aquí se recogen los principales aspectos publicados por Zhao et al. [31] en su estudio 'A Completely 3D Model for the Simulation of Mechanized Tunnel Excavation'. La motivación de esta investigación no es otra que la de reproducir el comportamiento tensodeformacional que se da en el terreno durante la excavación y tras la colocación del revestimiento en túneles ejecutados mediante TBM de escudo a grandes profundidades. El planteamiento del problema es, por tanto, muy similar al necesario para el modelo del nuevo material con la diferencia de que donde se busca conocer de forma lo más precisa posible el estado tensión-deformación es en el elemento terreno y no en el revestimiento.

- Definición geométrica

Se asume la existencia de un plano vertical de simetría que pasa por la directriz del túnel. Se ha generado una geometría de 'dominio cilíndrico' con el objetivo de reducir el número de elementos finitos

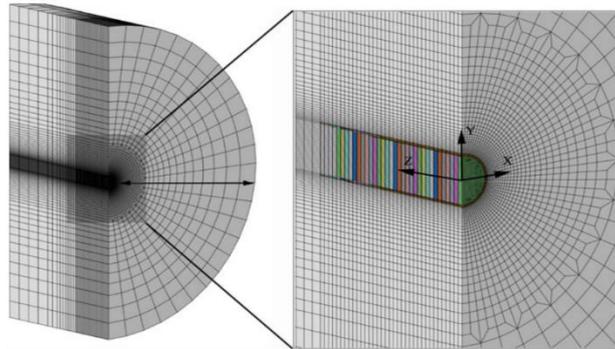


Figura 1.15 Mallado 3D en la fase inicial. Fuente: Zhao et al. [31]

➤ Mallado

La densidad del mallado elegida, en la dirección longitudinal, ha sido de con elementos de **arista media máxima 1 metro** en el entorno de la excavación, aumentando progresivamente hacia los contornos exteriores del modelo.

Condiciones de contorno

Una vez creada la geometría, se establecieron las siguientes condiciones de contorno:

- En el contorno exterior circular, se coartaron los desplazamientos verticales (Y) y horizontales (X).
- En el contorno vertical correspondiente al plano de simetría, los desplazamientos horizontales fueron impedidos (X)
- En las caras transversales extremas del modelo, los desplazamientos longitudinales – en la dirección del eje del túnel – también se impidieron (Z)

➤ Modelización de los principales elementos del TBM

- **Escudos** –frontal y trasero-. Están modelados con elementos placa aplicados en el contorno de la excavación y con la rigidez propia del acero.
- **Cabezal de corte.** Se ha modelado también con elementos placa con las propiedades del acero y ejerciendo una presión en la dirección longitudinal determinada –debida al avance del TBM-
- **Relleno.** Este es el lugar que pretende ocupar el nuevo material que se desarrolla en la presente tesis. En una excavación convencional como la presentada en [4], este relleno puede ser desde gravas hasta mortero de cemento. Se ha

modelado con elementos sólidos –hexaedros- y con las propiedades dependiendo del material que se trate.

- **Revestimiento.** Se ha introducido como elementos placa, con las propiedades del hormigón correspondiente. Las juntas entre anillos no se han tenido en cuenta.
- **Fijaciones.** Los sistemas de fijación del TBM, se han modelizado como elementos placa en el borde de la excavación. Se han dispuesto a una determinada distancia de la cara frontal y una presión determinada –la que ejerce la tuneladora contra el contorno- aplicada sobre ellos.
- **Gatos de presión.** Los hidráulicos que empujan contra el revestimiento y causan el avance de la tuneladora se han aplicado como una presión en el contorno, sobre el último anillo de dovelas aplicado.

➤ Avance de la tuneladora

Se ha modelizado mediante el método ‘step-by-step’. Para cada uno de los pasos o fases de carga, se ha establecido que el avance de la excavación sea de 1 metro. El paso de 1 metro tiene las ventajas siguientes según los autores:

- Reproduce el fenómeno del avance continuo de la tuneladora con un buen número de aproximaciones discretas.
- Mejora la convergencia de la solución del modelo de comportamiento elastoplástico –se verá más adelante-.
- Supone una solución de equilibrio entre exactitud de resultados y coste computacional.

Los aspectos a tener en cuenta en la modelización del avance son:

- Las fases constructivas y el número total de fases o pasos de carga –*load steps*- a implementar dependerán de la geometría de la excavación, del tipo de TBM y del terreno.
- La longitud de la construcción debe ser suficiente como para permitir alcanzar una regularización del estado tenso-deformacional. Debe tenerse en cuenta a estos efectos que los primeros metros de avance de la tuneladora no representarán estados tenso-deformacionales fiables. En otras palabras, debe dejarse un periodo de ‘calentamiento’ del modelo donde los primeros resultados no deben tenerse en cuenta.
- Modelización del comportamiento del macizo

Debido a la gran dificultad de escoger un modelo constitutivo que reproduzca fielmente el comportamiento de la roca, los autores dejan abierta la posibilidad de elegir al implementador el que considere, a su criterio, más adecuado. Aquí reaparece el carácter genérico que los autores pretendían abordar con la presente investigación. Eso sí, recomiendan que cualquiera de esos modelos debe ser compatible con las siguientes hipótesis:

- Macizo rocoso **continuo**
- Material **homogéneo**
- Material **isótropo**

Por lo que respecta a la reproducción del fenómeno '*squeezing*', debe tenerse en cuenta que la roca presenta una respuesta dependiente del tiempo. Este pasa por ser uno de los puntos más complejos de la tesis ya que resulta extremadamente complicado encontrar un modelo tenso-deformacional que reproduzca con precisión los efectos reológicos de la roca. Es por ello que se adoptan distintas simplificaciones en función de si lo que se busca conocer son efectos a largo plazo o a corto plazo. El estudio llevado a cabo por Zhao et al. [31] se centra en las tensiones producidas en la roca, el propio TBM y el revestimiento en las zonas próximas a la excavación. Es por ello que justifican la omisión de los efectos dependientes del tiempo y asumen un comportamiento elástico perfectamente plástico según el criterio de Mohr-Coulomb. De esta forma sí que se produce redistribución de tensiones con el tiempo, pero no debidas a efectos reológicos, sino al propio avance de la tuneladora y al cambio en las condiciones de borde del túnel.

- Resultados

Como resultados del cálculo, se obtiene la distribución de tensiones y la zona plástica próxima al contorno de la excavación.

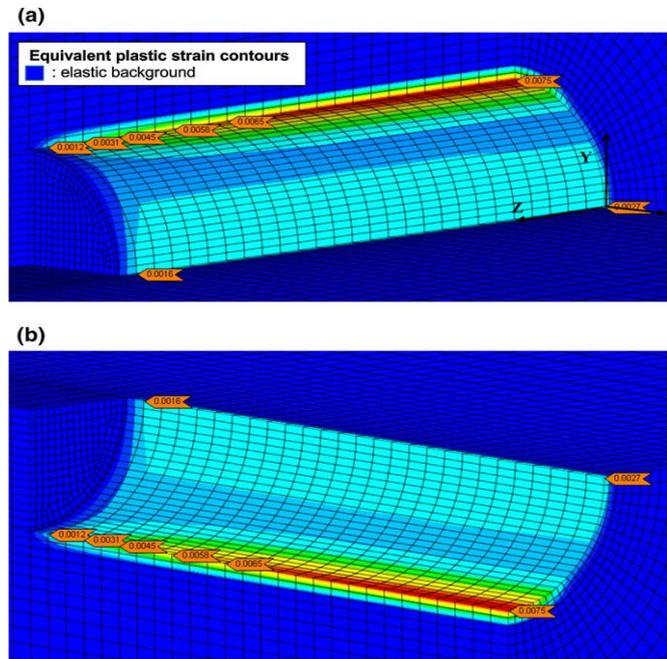


Figura 1.16 Resultados del cálculo tenso-deformacional del modelo. Contorno plastificado. Fuente: Zhao et al. [31]

- Síntesis

Puede verse que los resultados arrojados por el cálculo corresponden razonablemente con el comportamiento que cabría esperar para la perforación en un medio elastoplástico y, además, se muestra tanto en la representación gráfica como en el diagrama de distribución de tensiones en los diferentes cortes que la solución presenta continuidad y no parece haber signos de anomalías. Es decir, se trata de una solución precisa a un problema complejo y que encajaría perfectamente en el modelo para el desarrollo del nuevo mortero.

Aun así, como ya se citó en párrafos anteriores, el objetivo de la investigación llevada a cabo por Zhao et al. [31] se aleja en algunos puntos del planteamiento inicial. En ella se ha buscado conocer la distribución de tensiones en los elementos del túnel, pero desde un punto de vista más **focalizado en la precisión de resultados en el terreno**. En el caso que ocupa la presente tesis, se pretende conocer el comportamiento del nuevo mortero compresible frente a las presiones ejercidas por el terreno tras su excavación. Es decir, **el modelo no necesita conocer con exactitud las tensiones ni su distribución en la roca**, bastaría con movernos en

órdenes de magnitud de las mismas que resultasen razonables. Además, salvo el preproceso –geometría, condiciones de contorno, etc.–, el problema se ha planteado a corto plazo –mucho más centrado en el proceso de excavación que en lo que ocurre después–, mientras que lo que a nosotros **nos interesa conocer es qué ocurre justo a partir de la excavación**, por lo que será conveniente trabajar con un **modelo de terreno que dependa del tiempo**.

En cualquier caso, se trata de un modelo muy completo –mucho más de lo que se necesitará para el mortero– que sienta las bases y **plantea una serie de hipótesis ya validadas por la construcción real del túnel** – y además en condiciones extremas, bajo los Alpes – que serán de utilidad en la realización del modelo.

#### Modelo Chungski Yoo [32]

El segundo modelo estudiado y que aborda la excavación de túneles mediante simulación por ordenador es el propuesto por Chungsik Yoo [32]. En él, se expone un caso de excavación en túnel mediante el ‘Nuevo método austríaco’ o NATM. Se trata de un túnel mucho más superficial, con terreno estratificado y no emplea TBM. Puede aparentar que se aleja mucho de la solución que se busca, pero lo que resulta interesante para la preparación del modelo es el preproceso.

- Definición geométrica y mallado

Se muestra a continuación la geometría global del modelo. Se consideran coartados los movimientos perpendiculares a los planos verticales que lo delimitan.

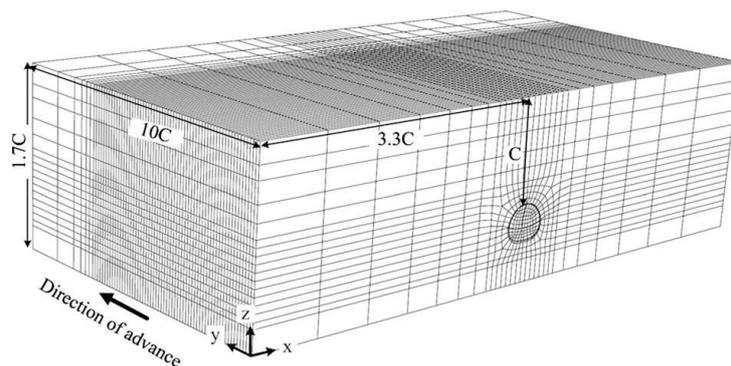


Figura 1.17 Geometría global del modelo. Fuente: Yoo [32]

- Síntesis

Los dos modelos vistos hasta el momento resuelven tres puntos importantes para la introducción del elemento terreno y del nuevo modelo en general a implementar. Se resumen a continuación:

**Dimensiones globales.** Para evitar influencia del contorno y de superficie en la dirección de avance de la tuneladora, una dimensión mínima de 15-20 diámetros. En sentido transversal no menos de 10 diámetros.

**Coacciones en los contornos.** Impedir sólo los desplazamientos transversales a las caras límite del modelo resulta suficiente.

**Elementos finitos.** Para el terreno, resulta suficiente con elementos sólidos tridimensionales de 8 nodos.

### **Barla y Bogna [33]**

El objetivo la presente investigación no es presentar un nuevo modelo de túnel. De algún modo, los dos modelos anteriores han establecido la base para lo que se podría denominar 'preproceso'. Los próximos subapartados abordarán un problema mucho más complejo desde el punto de vista del diseño y es asumir el comportamiento del terreno con un determinado modelo tensodeformacional.

Este apartado recoge algunos de los principios o consideraciones que pueden ayudar a tomar una decisión sobre cómo representar el modelo. Concretamente, está basado en una publicación del Dr. Giovanni Barla junto con Stefania Borgna del *Politecnico di Torino* titulada '*Numerical modelling of squeezing behaviour in tunnels*' [33].

- Aproximaciones al comportamiento del terreno. corto y largo plazo

Los autores establecen, en el inicio de la publicación, que los dos factores más importantes que influyen en el '*squeezing*' son:

- El inicio de la fluencia en la masa de roca, determinado por los parámetros de la resistencia a corte de la misma y su relación con las tensiones inducidas.
- El comportamiento dependiente del tiempo.

Se puede considerar que el primer punto viene relacionado con el comportamiento a '**corto plazo**' – ya se vio esta hipótesis en el desarrollo del modelo de Zhao et al. [31] - y como se puede ver en sus resultados, bajo una serie de hipótesis

ya citadas –continuidad, homogeneidad e isotropía- resulta adecuada la aplicación de un **modelo elastoplástico**.

Por lo que respecta al segundo punto, los autores añaden la viscoelasticidad al modelo anterior, resultando un comportamiento **elasto-viscoplástico**.

Según los resultados obtenidos en diferentes ensayos de fluencia en laboratorio, se ha podido establecer una correlación entre la tensión desviadora aplicada en la matriz rocosa y su comportamiento.

- Síntesis

En el estudio se comparan también las distribuciones de tensiones respecto a la distancia con el eje del túnel - distancias radiales – y se observa que, resulta mucho más próximo al comportamiento real del material, la consideración de que la tensión  $\sigma_a$  sea un 75% de la tensión desviadora de pico en rotura. Sin embargo, es frecuente encontrar en la literatura especializada, que este valor puede oscilar en función de la composición de la roca, de su estado de disgregación, humedad, etc. llegando a presentarse efectos reológicos desde sólo el 50% del desviador en rotura. Por ello, parece razonable considerar no un valor fijo, sino un rango de valores porcentuales sobre la presión de rotura comprendida entre el 50% y el 75%.

Es decir, para modelizar el comportamiento de la roca, si se va a plantear una **presión en el terreno del orden del 0.5/0.6 veces la presión de pico, deberán tenerse en cuenta los efectos diferidos en el tiempo** y no será suficiente con un modelo elastoplástico convencional.

### **3.2.3 Bases para la modelización a desarrollar. Aproximación a las condiciones de contorno y escenarios a considerar. Síntesis sobre la modelización matemática.**

El propósito de este punto es sentar las bases para una precisa modelización de la solución a implementar. A continuación, se exponen las principales consideraciones alcanzadas a partir de la literatura científica anteriormente expuesta.

#### a. Aproximación a condiciones de contorno y escenarios

Para exponer las conclusiones respecto a cuáles son los principales factores a tener en cuenta, se ha escogido la siguiente figura porque en ella se plasma de manera clara las conclusiones de otros muchos autores consultados. En ella se

especifican de manera gráfica los diferentes factores que pueden influir en el proceso y que, en consecuencia, se deben considerar en la modelización.

En este sentido, dentro de la tabla considerada se definen dos reglas diferentes de asignación relativas a la forma y al color de las células.

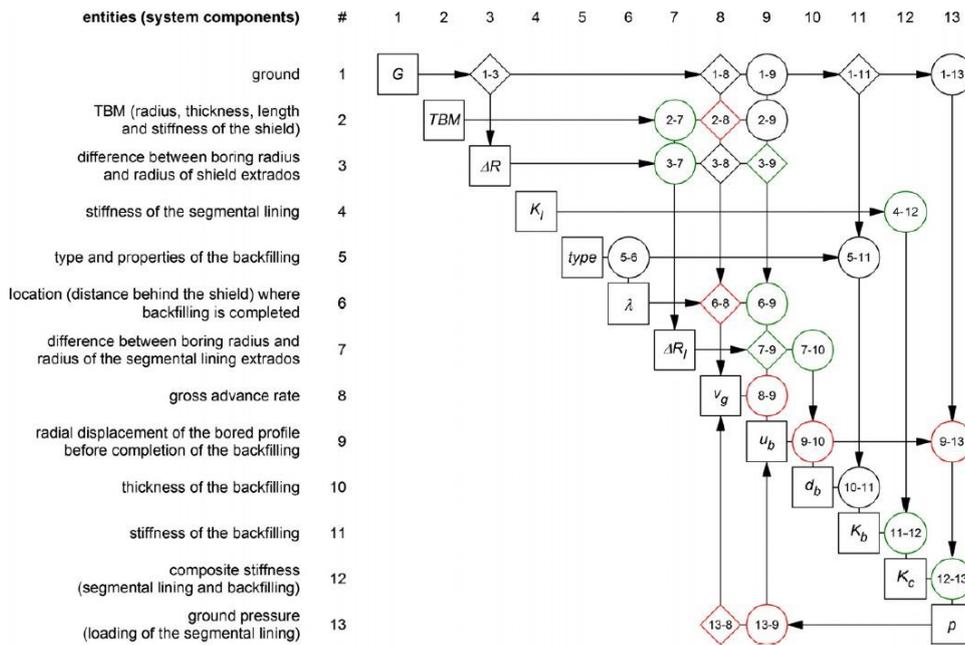


Figura 1.18 Tabla de interacción entre los distintos factores que influyen en la presión que el terreno ejerce sobre el túnel. Fuente. [3]

Se procede a continuación a definir los resultados del análisis realizado respecto a cada uno de los factores, y las interacciones que deben tenerse en cuenta:

- Rigidez compuesta

La presión del terreno “p” que actúa sobre una dovela, con el hueco del trasdós relleno, depende de las características del terreno (1-13) y de la rigidez “K<sub>c</sub>” del túnel (12-13), que a su vez depende de “K<sub>l</sub>” (dovelas) (4-12) y “K<sub>b</sub>” (relleno) (11-12). Al contrario de lo que sucede con la rigidez de las dovelas, conocida a priori, la del relleno ha de ser hallada en base a sus propiedades materiales (4-11), su espesor (10-11) y el tipo de terreno (1-11).

- Espesor del relleno

El hueco que queda entre el perfil excavado y el trasdós de la dovela (7-10) constituye el espacio que posteriormente será rellenado. Ahora bien, desde que se ejecuta la perforación hasta que se dispone el material transcurre un periodo de tiempo durante el cual se produce un desplazamiento radial de las paredes excavadas, que disminuye el espesor del hueco (9-10).

Podría suceder que no se produzca dicho desplazamiento, permitiendo introducir una cantidad máxima de relleno, o bien todo lo contrario, que el desplazamiento sea rápido y cierre el hueco.

- Tamaño del hueco radial

El hueco que queda entre el terreno y el escudo " $\Delta R$ " tal como se aprecia en la figura, no es el mismo que el relleno " $\Delta R_i$ ", comentado antes. La diferencia estriba en que el primero abarca desde el terreno hasta el trasdós del escudo, pero el segundo va desde la pared al trasdós de las dovelas. Así pues, " $\Delta R_i$ " será mayor si aumentamos " $\Delta R$ " (3-7), aunque también dependerá del espesor " $d_s$ " del escudo (2-7) y el hueco entre escudo-dovela:

$$\Delta R_i = \Delta R + d_s + t \quad \text{Ec. (1.1)}$$

- Desplazamiento radial de la sección perforada

Afecta al espesor del relleno (9-10) así como a la presión que el terreno acabará ejerciendo sobre el túnel (9-13) pues, en general, cuanto más se descompriman las paredes menor presión se transmite. Los factores que condicionan, principalmente, al desplazamiento radial de la sección son: las características del terreno (1-9), la longitud " $L$ " del escudo (2-9), y la distancia tras ésta a la que se dispone el relleno " $\lambda$ " (6-9).

- Ratio de avance

El avance de la TBM está muy ligado a las deformaciones del terreno (8-9). Si éstas se producen en el área de la máquina la presión que ejercerán sobre ella ralentizarán su movimiento, pero si además producen altas presiones sobre las dovelas es posible que sea necesario ir reparándolas, lo que también ralentiza la marcha, pudiendo incluso que llegar a detenerla. Para evitar los problemas anteriores se suele sobre- excavar la sección, pero ello también supone un ritmo menor al tener que perforar una sección mayor.

- Cargas sobre el perfil longitudinal

La sobre-excavación, a nivel de cargas, tiene un efecto positivo sobre el túnel (3-9), pues cuanto mayor es el hueco, más tardará en cerrarse por deformación de las paredes excavadas. Es importante destacar que, tal como se aprecia en la figura cuando se cierra dicho hueco, ya sea por el desplazamiento del terreno o bien tras haber sido rellenado, se forma un arco que alivia la acción del terreno bajo él, a cambio de aumentarla en sus extremos.

b. Síntesis de la modelización matemática

La principal conclusión es que el modelo matemático, en base a la experiencia de otras investigaciones, puede desarrollarse con simetría axial, considerando cilíndrico el túnel. Se ha escogido la para representar el esquema que se va a seguir para desarrollar los cálculos incluidos dentro del proceso de modelización.

Se asume que en la modelización se representarán excavaciones con TBM de Escudo que estarán dispuesto en profundidad, atravesando secciones de terreno homogéneo e isótropo, y se encontrará sometido a la presión uniforme e hidrostática del terreno. El modelo considerará constante el hueco entre el escudo y el terreno, así como el que queda entre dovela y terreno, teniendo ambos sección de anillo circular. El peso de la tuneladora se puede despreciar. Una consecuencia de la simetría es que se tendrán en consideración únicamente fuerzas normales a las dovelas, cuando en realidad también se producen fenómenos de flexión, así pues, el modelo con simetría axial es, en general, más rígido que la realidad. Una simplificación válida para considerar los efectos de los momentos flectores en el predimensionamiento es emplear altos coeficientes de seguridad.

Otras conclusiones respecto al terreno, es que se puede modelar como linealmente elástico y perfectamente plástico obedeciendo al criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Para reducir la complejidad del problema, la dependencia temporal del comportamiento del suelo se puede ignorar. De esta forma el aumento de la presión sobre el túnel se asocia únicamente al avance de las paredes excavadas.

En cuanto a las condiciones de contorno que se considerarán en la modelización, se ha comprobado a través de la bibliografía que es una de las labores de mayor trascendencia dentro de la elaboración del modelo. En este sentido se debe indicar que las secciones que se encontrarán durante la excavación no serán homogéneas, pues pueden contener diferentes elementos en función de su localización. De este modo, en la siguiente imagen se pueden observar dos secciones

diferenciadas dentro de la excavación del túnel. La primera de ellas, A – A', se refiere al escudo de la tuneladora, mientras que la segunda, B – B', hace lo propio para el túnel de dovelas.

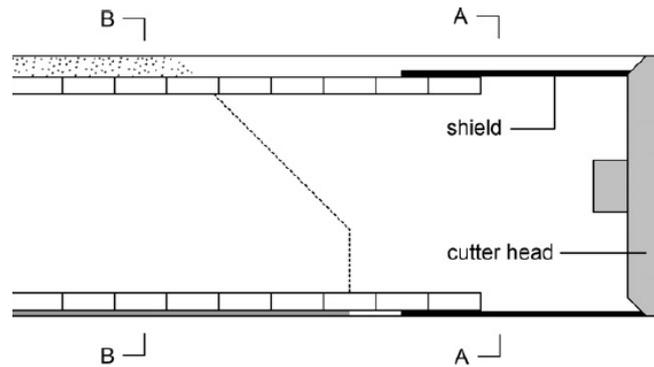


Figura 1.19 Diferentes secciones a tener en consideración durante la excavación.

Fuente: [8].

De acuerdo a estudios previos, las condiciones de contorno para el escudo de la tuneladora (sección A de la Figura 2.62) de se pueden expresar de la siguiente manera:

$$p(y) = \begin{cases} 0 & \text{if } u(y) - u(0) \leq \Delta R \\ K_s(u(y) - u(0) - \Delta R) & \text{if } u(y) - u(0) > \Delta R \end{cases} \text{ (for } 0 \leq y \leq L),$$

Ec. (1.2)

Donde: “p” es la presión que el terreno desarrolla sobre el escudo “u” es el desplazamiento radial del contorno excavado

“u(0)” es la pre-deformación del terreno en el frente del túnel “L” es la longitud del escudo

“ΔR” es la sobre-excavación (hueco entre pared excavada y el escudo) “Ks” es la rigidez del escudo

Las condiciones de contorno para el túnel de dovelas (sección B) serán similares, ahora bien, variarán en función de si las deformaciones de las paredes cierran el hueco antes de realizar el relleno o no. Para el primer caso:

$$\text{for } u_b \geq \Delta R_l \text{ and } y > L,$$

$$p(y) = \begin{cases} 0 & \text{if } u(y) - u(0) \leq \Delta R_l \\ K_l(u(y) - u(0) - \Delta R_l) & \text{if } u(y) - u(0) > \Delta R_l \end{cases}$$

Ec. (1.3)

En este caso la rigidez a considerar “Kl” es la propia de las dovelas. El resto de los parámetros se mencionaron anteriormente. Por otro lado, si ha sido posible realizar el relleno del hueco que queda entre las paredes excavadas y las dovelas, las condiciones de contorno resultan:

$$\text{for } u_b < \Delta R_l, p(y) = \begin{cases} 0 & \text{if } L < y \leq L + \lambda \\ K_c(u(y) - u(L + \lambda)) & \text{if } y > L + \lambda \end{cases} \quad \text{Ec. (1.4)}$$

Donde “Kc” se refiere a la rigidez conjunta de las dovelas y el material de relleno; y “λ” es la distancia que va desde el final del escudo hasta el frente del relleno.

Los datos necesarios, procedentes de ensayos que se llevarán a cabo como parte de la tesis, se dividen en diferentes grupos:

- Datos de entrenamiento. Son los datos empleados en el ajuste de los parámetros de la red neuronal. Han de ser representativos del total de datos, por lo que normalmente se seleccionan aleatoriamente.
- Datos de validación. Se emplean después de cada iteración en el proceso de entrenamiento, para comprobar si se produce el sobreaprendizaje.
- Datos de test. Sólo se emplean una vez finalizado el entrenamiento.

La división de los datos es normalmente un 80% de datos de entrenamiento, un 10% de validación y un 10% de test, aunque la elección de dichos porcentajes depende del número de datos disponible y de su distribución.

Por tanto, va a ser preciso que a la hora de plantear el diseño de experimentos o el número simulaciones llevadas a cabo mediante la modelización se tenga en cuenta que estas deben disponer de un cierto volumen mínimo de datos, estando sujetos estos planteamientos a las características y necesidades de la propia red concebida para el análisis.





**4. TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN:  
PLANTEAMIENTO, DESARROLLO, ENSAYO Y  
OBTENCIÓN DE LAS NUEVAS  
DOSIFICACIONES DE MORTERO  
COMPRESIBLE**



---

**TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN: PLANTEAMIENTO, DESARROLLO,  
ENSAYO Y OBTENCIÓN DE LAS NUEVAS DOSIFICACIONES DE  
MORTERO COMPRESIBLE**

En el presente apartado se van a desarrollar los trabajos de investigación llevados a cabo para la obtención del nuevo mortero compresible. Es importante mencionar que dicho plan investigador no se planteó para la obtención de un resultado definitivo (dosificación concreta), sino que fue diseñado para obtener como resultado entre 3 y 5 fórmulas que someter posteriormente a análisis en el modelo numérico programado para simular la excavación mediante TBM de Escudo en terrenos inestables, ya que la retroalimentación entre los resultados de laboratorio y los resultados del modelo numérico es la base del desarrollo de la presente tesis.

Para dar respuesta al apartado se seguirá la siguiente estructura. En primer lugar, se analizarán los requisitos que se solicitarán al nuevo material. Este alcance es necesario para plantear, a colación, los ensayos pertinentes, así como los materiales adecuados para el trabajo en laboratorio del nuevo mortero compresible.

A continuación, se expondrá el plan de ensayos diseñado, así como la propia ejecución del mismo. Importante mencionar en este campo el ensayo de resistencia a la compresión confinada, ensayo clave para conocer cómo se comportará el nuevo material bajo situación de confinamiento, pero que no cuenta con normativa y/o procedimiento previo. El planteamiento y concepción de dicho ensayo, también se incluirá en este punto del documento.

Finalmente, se recopilarán los resultados alcanzados y se realizará una evaluación de los mismos, para concluir con una valoración multicriterio que permita seleccionar aquellas fórmulas de mayor interés.

#### 4.1 REQUISITOS A EXIGIR AL NUEVO MATERIAL. ENSAYOS Y MATERIALES PARA SU OBTENCIÓN

##### 4.1.1 Requisitos a exigir al nuevo mortero compresible

El mortero diseñado en esta tesis debe contar con una serie de prestaciones que permitan su total desempeño como mezcla de relleno del espacio anular entre dovelas y terreno excavado. Previamente a comentar los materiales que lo pueden componer, es importante destacar que se va a dosificar un mortero para ser inyectable y que, por tanto, además de una buena capacidad de deformación que le permita asimilar los esfuerzos introducidos por el terreno, la mezcla debe contar con elementos que faciliten su bombeo.

Es importante que la mezcla cuente con la consistencia y trabajabilidad suficiente para el relleno del hueco durante el avance de la puesta en obra, por tanto, resulta fundamental encontrar una relación agua / material cementante (cemento, cenizas volantes, humo de sílice...) correcta. Encontrar el contenido en agua adecuado es uno de los principales hándicaps de la dosificación del mortero, pues deberá ser el suficiente para que se permita el bombeo de la mezcla sin que se produzca segregación, al mismo tiempo que no resulte excesivo y acabe desembocando en problemas de retracción.

La segregación o exudación debe eliminarse para que no se bloqueen las líneas de inyección del mortero, en este sentido, pueden incluirse oclusores de aire que además favorezcan otros aspectos como la compresibilidad. Por su parte, la retracción debe estar limitada y controlada durante y después del endurecimiento, considerando así la posibilidad de añadir cenizas volantes, materiales con capacidades hidráulicas o puzolanas de bajo calor de hidratación.

De manera habitual a este tipo de morteros se les exige un rápido alcance de las resistencias, para evitar así posibles asentamientos. En este caso se está buscando una deformación controlada que no produzca fisuras, y que además responda de manera dúctil cuando el mortero deba responder a cualquier solicitud externa.

De otro modo, deben preverse los riesgos del lavado producido por el agua que se infiltre desde el macizo de roca excavado. Esto sería posible mediante algún pretratamiento de las partículas de caucho de NFU, que por ejemplo premezclar los

gránulos de NFU con la masa cementante previamente a la adición de agua de amasado.

Finalmente, la mezcla dosificada debe proporcionar un contorno homogéneo, estable y de alta permeabilidad de las dovelas de hormigón a largo plazo, aspecto que se analizará a partir de ensayos de laboratorio y modelización numérica.

Como síntesis de los párrafos anteriores, se concluye que el mortero deberá poseer 4 características básicas o requisitos: compresibilidad, trabajabilidad, bombeabilidad y estabilidad. Se procede a comentar estas propiedades con mayor profundidad.

- **Compresibilidad**

La compresibilidad es la propiedad de un mortero, ya endurecido, para deformarse a compresión. Las propiedades de los morteros compresibles deben permitir que en situaciones de confinamiento lateral se pueda conseguir una compresión cercana al 50 % sin llegar a romper o fisurarse.

Atendiendo al comportamiento tenso-deformacional ideal de mortero, hallado a partir de una restricción total de la deformación lateral necesaria para cumplir adecuadamente con la función para la cual se crea, se observa lo siguiente. Inicialmente existe una importante relación entre tensión y deformación, con un creciente aumento de las tensiones y bajas deformaciones simultáneamente. En el momento en que se alcance el límite de compresión el material comienza a comportarse de manera plástica, esto es, aunque las tensiones se mantengan el espécimen se deforma hasta prácticamente un 50 %. Una vez concluye esta segunda etapa, y tras haber reducido parte del volumen, no han aparecido fisuras que invaliden el comportamiento del mortero gracias al comportamiento dúctil que este presenta [34].

En consecuencia, se ha considerado sustituir la totalidad de los agregados, o parte, por gránulos de caucho procedente de NFU, obteniendo así un comportamiento más dúctil gracias al mecanismo de pandeo elástico introducido por el elastómero. Con la adición de este material, además se conseguirá que el mortero sea capaz de absorber una mayor cantidad de energía plástica frente a cargas antes de romperse, capacidad demandada en los morteros compresibles.

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 catastrófica que se da en morteros convencionales. 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 del mismo. Actuando sobre la granulometría del NFU y su porcentaje de inclusión en la mezcla será posible alcanzar el comportamiento óptimo requerido.

No obstante, es este concepto el cuál le confiere al hormigón su mayor capacidad compresible y por ende su mayor ventaja, aquel que puede suponer un riesgo principal en cuanto al colapso interno y repentino del material. Si bien el NFU es un material elástico y, efectivamente, admite compresiones con deformación de manera que luego las recupera (algo que no sucede en la matriz cementosa), también es cierto que transmite sollicitaciones diferidas a la matriz de cemento que, en caso de que no se provea algún mecanismo para que la matriz cementosa, rígida por definición, las pueda asumir, puede generar una serie de tensiones y presiones internas que acaben por fisurar o romper el material. Se puede concluir, por tanto, que el mortero con caucho NFU tiene una buena capacidad para deformarse bajo una sollicitación de compresión, generando una serie de tensiones internas en el interior de la pasta de cemento que favorecen la aparición de microfisuras en la interfaz árido – pasta [35], [36] y [37].



Figura 1.20 Microfisura entre partículas de NFU. Fuente [35].

Es por esto que para hacer viable el añadido de caucho NFU al material, y que por tanto el nuevo mortero adquiera la capacidad de ser compresible, se proveerá al mortero una cantidad medida y controlada de aire ocluido en su interior, que consiga aliviar las tensiones internas de las piezas de mortero una vez se recuperen de un proceso de compresión en el cual las partículas de NFU no dañen la pasta de cemento que las envuelve.

- **Trabajabilidad**

La trabajabilidad o docilidad del mortero se considera la propiedad que mide su capacidad para ser colocado y consolidado adecuadamente, y para darle el acabado correcto sin riesgo de segregación [34].

Esta propiedad engloba conceptos como cohesión, moldeabilidad o compactación. La trabajabilidad de la mezcla puede modificarse por diversos factores, tales como la composición, forma de las partículas y proporciones de la arena, la cantidad de cemento, la presencia de aire ocluido, los aditivos o la consistencia de la mezcla.

La docilidad o trabajabilidad depende de los siguientes factores [34]:

- Cantidad de agua de amasado. La docilidad del mortero aumentará conforme aumente el agua de amasado.
- Granulometría. Son más dóciles las mezclas que cuentan con un mayor número de árido fino. Sin embargo, cuantos más árido fino se necesita más agua de amasado, y por tanto se alcanza una menor resistencia.
- Tipo de áridos. La docilidad mejora con áridos redondeados que con áridos procedentes de machaqueo.
- Contenido en cemento. La docilidad se incrementa con la cantidad de cemento y la finura de este.
- Uso de plastificantes / superplastificantes. Aumentan la docilidad del mortero en caso de igualdad del resto de características.

Un mortero de poca docilidad es más propenso a segregar y mostrar resistencias mecánicas menores de las previstas. Por esta razón y como regla básica, siempre se debe emplear la máxima docilidad compatible con el método de puesta en obra disponible.

- **Bombeabilidad**

Se define la bombeabilidad de un mortero como la facilidad que presenta para ser colocado mediante el uso de una bomba y bajo unas determinadas condiciones, es decir, se conoce como bombeabilidad la capacidad que posee la mezcla para fluir a través de un conducto debido a la presión ejercida por la bomba. Se debe remarcar que la bombeabilidad no es una propiedad intrínseca de la mezcla, sino que se alcanza bajo unas determinadas circunstancias [34].

Para que un mortero se considere bombeable debe reunir ciertas propiedades. En primer lugar, es necesario que permanezca homogéneo, sin segregar, en todas las partes del bombeo. Esto quiere decir que los diferentes componentes que forman la mezcla no deben separarse. En segundo lugar, la mezcla debe poseer una trabajabilidad mínima al finalizar al bombeo. Principalmente esto hace referencia al caso de morteros que pese a poder ser bombeados hasta el punto de colocación, una vez allí no disponen de las propiedades adecuadas como para cumplir con su función.

A la hora de bombear la mezcla del nuevo mortero se deben superar distintos desafíos, tanto generales concernientes al bombeo de cualquier mezcla hormigonada, como intrínsecos de la mezcla diseñada en el marco de esta tesis.

En primer lugar, hay que apuntar que una de las principales causas por la cual el bombeo no se realizaría de manera correcta es por la generación de bloqueos. Los bloqueos se forman de manera habitual en las juntas, donde el cemento puede fluir hacia el exterior provocando una acumulación de áridos. El coste añadido de solucionar un bloqueo de mortero en la tubería es muy elevado. En la siguiente imagen se representa de manera gráfica un bloqueo en una tubería de bombeo de hormigón o mortero.

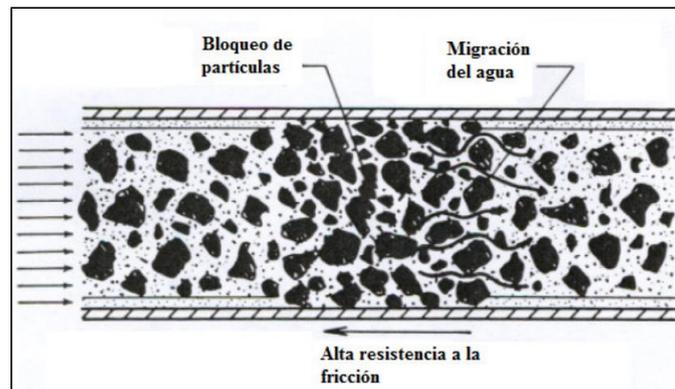


Figura 1.2 Bloqueo en tubería de bombeo de hormigón o mortero. Figura [34]

En la imagen anterior se aprecia como en la zona de bloqueo el agua puede continuar fluyendo, mientras que las partículas se bloquean evitando el flujo adecuado de la mezcla a lo largo de la tubería.

Para evitar que esto suceda se recomienda tomar una serie de precauciones:

- El mortero en estado fresco debe tener buena resistencia a la segregación.
- El tiempo durante el cual el mortero presente una consistencia adecuada para ser colocado debe ser mayor que el tiempo requerido para bombear y colocar.

En cuanto a los problemas propios de la mezcla del nuevo mortero surgen principalmente a causa del añadido de NFU. El problema aparece cuando la mezcla presenta agregado de reducida densidad, como son las partículas de caucho, pudiendo producir así una deformación no recuperable durante la fase de bombeo, ya que no funciona correctamente el mecanismo de compresión como parte del sistema de sostenimiento. Para superar este problema se deberá estudiar detenidamente la fracción elastomérica de mezcla (NFU) para determinar aspectos como la cantidad a incluir o la granulometría.

- **Estabilidad**

La estabilidad del mortero es el desplazamiento o flujo producido en el mortero sin la intervención de fuerzas externas. Se mide a través de la exudación o segregación, analizada a través de medios estándar que permiten comparar estas características entre varias mezclas, siendo necesario encontrar los valores mínimos. Es importante subrayar que estos dos fenómenos no dependen tan sólo del exceso de agua en la mezcla, sino también del contenido en finos y las propiedades adherentes de la pasta [34].

#### **Recopilación de diferencias respecto de un mortero convencional**

En base a la información anterior se elabora a continuación una comparativa entre las características del nuevo mortero compresible con un mortero convencional<sup>2</sup>:

- Las diferencias reológicas se aprecian principalmente durante la fase de vertido y colocación de la mezcla, pero su comportamiento no difiere excesivamente cuando el mortero se encuentre en estado endurecido.
- Para una misma relación agua/cemento, la microestructura e interfase pasta-árido es de menor densidad que en el caso de un mortero convencional.
- A consecuencia del punto anterior, el mortero compresible deberá contar con adiciones como cenizas volantes que mejoren la impermeabilidad de la mezcla.
- Las características propias de las mezclas compresibles favorecen la deformación a compresión hasta un 50 % del tamaño inicial.

- Generalmente estas mezclas cuentan con menor cantidad de cemento, por esta razón se facilitará el curado de la misma.
- Reducción del módulo de elasticidad  $E$  para igual resistencia mecánica  $f_{ck}$ . Esta propiedad es especialmente interesante en el marco de esta tesis, pues para una misma resistencia mecánica la elasticidad del mortero es mayor.

A modo de síntesis, se observa como principalmente son tres las propiedades fundamentales que marcan la diferencia entre el mortero compresible y un mortero convencional. Éstas son la fluidez, la viscosidad y cohesión y la compresibilidad.

La primera de estas propiedades se refiere a la capacidad de desplazarse por el encofrado, forjado, molde o, en este caso, espacio anular entre dovela y terreno excavado. La mezcla debe deslizarse entre las barras de la armadura o vainas de pretensado, rellenando perfectamente todo el contorno del lugar a hormigonar.

La segunda de las propiedades se centra en la segregación de los componentes, la cual trata de evitar garantizando de este modo la deformabilidad uniforme y necesaria en el proceso de vertido de la mezcla.

Finalmente, la tercera de las propiedades hace referencia a la capacidad de la mezcla de deformarse a compresión, esto es, con el movimiento lateral limitado. En este sentido un mortero compresible normalmente puede alcanzar en situación de confinamiento lateral una compresión del 50 % sin rotura ni fisuración.

#### **4.1.2 Ensayos de laboratorio para la verificación de los requisitos a cumplir**

Como se ha visto en el punto anterior, el nuevo mortero compresible debe reunir unas determinadas características en términos de compresibilidad, trabajabilidad, bombeabilidad y estabilidad. Es por esto que la campaña de ensayos de laboratorio se ha diseñado con el objetivo de medir dichas características, en base a los ensayos y planteamientos de diseño que la normativa, o en su defecto, la literatura científica [38], [39] y [40], ofrecen. Algunos de los ensayos pueden ser inherentes a una sola de estas capacidades, o bien a varias de ellas.

Previamente a elaborar un listado de los ensayos de laboratorio que van a componer la campaña, se adjunta a continuación una relación de las propiedades del mortero que será necesario medir y cuantificar para verificar el cumplimiento de las propiedades de compresibilidad, trabajabilidad, bombeabilidad y estabilidad

esperadas. Posteriormente, se indicará cada una de estas propiedades con que ensayo va a ser medida:

**a. Propiedades a caracterizar en el mortero**

✓ **Distribución granulométrica de los áridos empleados**

Si bien esta característica no es propia del mortero en sí, es vital para la futura replicabilidad del material conocer en detalle las curvas granulométricas de los áridos empleados en la dosificación. Dado que la dosificación del mortero se ha desarrollado mediante el método de Bolomey, la dosificación empleada contará con una curva granulométrica que tratará de aproximarse en la mayor medida posible a la curva teórica de dicho método.

Dicha curva granulométrica de la dosificación que resulte de la actual investigación, será clave considerarla como uno de los parámetros relevantes para replicar el material compresible una vez se deba trabajar con diferentes tipologías de áridos, algo totalmente común cuando se trabaja con el hormigón en diferentes emplazamientos, donde para el suministro del material varía el proveedor. Si bien esta circunstancia no atañe al marco de la presente tesis, es un propósito del doctorando que las aportaciones realizadas a la investigación en cuestión tengan en un futuro aplicación a escala industrial, de modo que la curva granulométrica resultante será aportada, en futuros apartados, como uno de los resultados de la investigación

✓ **Propiedades mecánicas**

Como cualquier material que emplea cemento como conglomerante fundamental, se caracterizarán también las resistencias mecánicas ante diferentes tipologías de sollicitación estructural. Los valores mecánicos que obtenga la dosificación resultante servirán para diferentes aplicaciones, siendo la fundamental en el marco de la presente investigación la de caracterizar al material en el posterior proceso de modelización matemática de la excavación. Así mismo, dichas características mecánicas servirán también, como sucede de forma recurrente en el ámbito de la fabricación de mortero y hormigón, a modo de control de calidad del material fabricado.

En cuanto a las prestaciones mecánicas que serán susceptibles de control, se encuentran las siguientes:

- Resistencia a compresión simple

Conocer el valor de resistencia a compresión simple es un medio de control de calidad en la fabricación de morteros y hormigones. Es por ello, que será un parámetro a conocer en el nuevo mortero compresible.

- Resistencia a flexotracción

El nuevo mortero compresible, una vez se aloje en el espacio anular formado por terreno excavado y dovela de hormigón, se encontrará sometido a topo tipo de presiones de índole geotécnico (la propia convergencia del terreno ante su peso propio o las subpresiones freáticas, pueden ser dos de los casos más representativos). Es por esto que el material deberá trabajar bien ante diferentes tipologías de esfuerzos, los cuáles pueden aparecer de forma simultánea, pues en un mismo escenario puede trabajar, además de a compresión, a flexión o tracción.

- Resistencia a compresión confinada

Dado que por regla general el nuevo mortero compresible trabajará mecánicamente en condiciones de confinamiento lateral, se antoja indispensable medir el comportamiento del mortero en situaciones donde, sometido a cargas de compresión, tenga coartado el movimiento lateral.

Los valores obtenidos en el mortero para cada una de las anteriores resistencias ofrecerán certezas en cuanto al grado de compresibilidad del material, pues este se registrará siempre de forma a previa a que los límites mecánicos sean superados, esto es, que el material entre en fase de rotura.

✓ **Propiedades elásticas**

A colación del punto anterior, las prestaciones en cuanto a elasticidad previa rotura del material serán también analizadas. En este sentido, y ante la importante compresibilidad de la que se espera dotar al mortero, será importante conocer su módulo elástico, ya que la potencial capacidad del mortero para converger dependerá de este parámetro en gran medida.

En este sentido, resultará de sumo interés analizar como evoluciona el módulo elástico de las diferentes dosificaciones de mortero en función de su contenido en NFU. El NFU o caucho de neumático, cuenta con un módulo elástico unas 1.000 veces menor que el mortero (27 MPa frente a 27.000 MPa). Si bien cabe pensar que su introducción va a contribuir irremediabilmente a una mejora en cuanto a propiedades elásticas, hay que tener en consideración que en el mortero definitivo dicho material va a tener que integrarse dentro de una matriz de cemento con una

capacidad elástica muy similar a un mortero convencional. Dicha diferencia tan amplia de capacidades elásticas entre ambos materiales provoca que la inclusión del caucho dentro del mortero no sea un proceso trivial, ya que en caso de que no se realice correctamente y no quede integrado dentro de la matriz de cemento, puede dar pie a un material repleto de discontinuidades interiores (cavidades), y continuas oquedades. Dichas oquedades, entonces, pueden comportarse como puntos de falla, donde el material tenga una mayor propensión a generar fisuras y, por ende, romper. Si esto sucede, la capacidad elástica del mortero quedaría claramente mermada, y en consecuencia comprometida su capacidad compresible.

✓ **Propiedades reológicas**

Como se ha visto en el punto precedente dos de las propiedades básicas que debe cumplir el mortero buscado son la bombeabilidad y la trabajabilidad. Dichas características, dependen del comportamiento del material en estado fresco, y es por esto que se tendrán que analizar algunas capacidades del material en esta fase.

En los diferentes ensayos que se van a realizar, el objetivo será verificar que el mortero puede ser fácilmente bombeable desde la tuneladora de escudo, que su inyección en el espacio anular generado entre dovela y terreno se lleve a cabo de forma constante y homogénea, y que una vez inyectado tiene una buena capacidad de relleno, de forma que ocupe todo el volumen de dicha cavidad.

Si bien la anterior reflexión da pie a pensar que la fluidez del material va a ser la propiedad más importante a lograr, su consecución, si se carece de otras características por lo menos tan importantes como ella, aportaría pocas soluciones desde una perspectiva de colocación en obra del material. No cabe duda de que el material debe tener la fluidez necesaria para permitir el bombeo y posterior colocación, pero debe contar también con una viscosidad suficiente como para asegurar la estabilidad y no segregación [41] de los diferentes componentes de la mezcla. Si bien el procedimiento de bombeo de un mortero convencional en un escenario tan complejo como una cavidad interior de un túnel ya tendría ciertas dificultades, estas se ven incrementadas en esta investigación a causa de la diferencia tan importante de densidades entre el NFU incorporado y el resto de materiales.

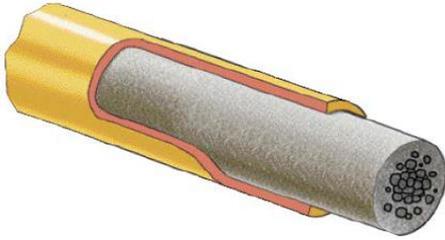


Figura 1.3 Gráfico segregación periférica. Fuente: [41]

Como Es sabido, en el bombeo de cualquier hormigón o mortero se debe tener en consideración posibles problemas de segregación periférica. Dicho tipo de segregación, propicia que las partículas finas del material tiendan a adherirse a las paredes del conducto de bombeo, mientras las partículas gruesas (en este caso NFU), tenderían a circular por la zona central. Dicha problemática, puede verse incluso incrementada en este marco de acción

debido al poco conocimiento que se tiene hasta la fecha sobre el bombeo de mezclas hormigonadas con materiales de tan baja densidad.

Se muestra a continuación un ejemplo de segregación en la zona periférica de un tubo de transporte de diámetro 100 mm.

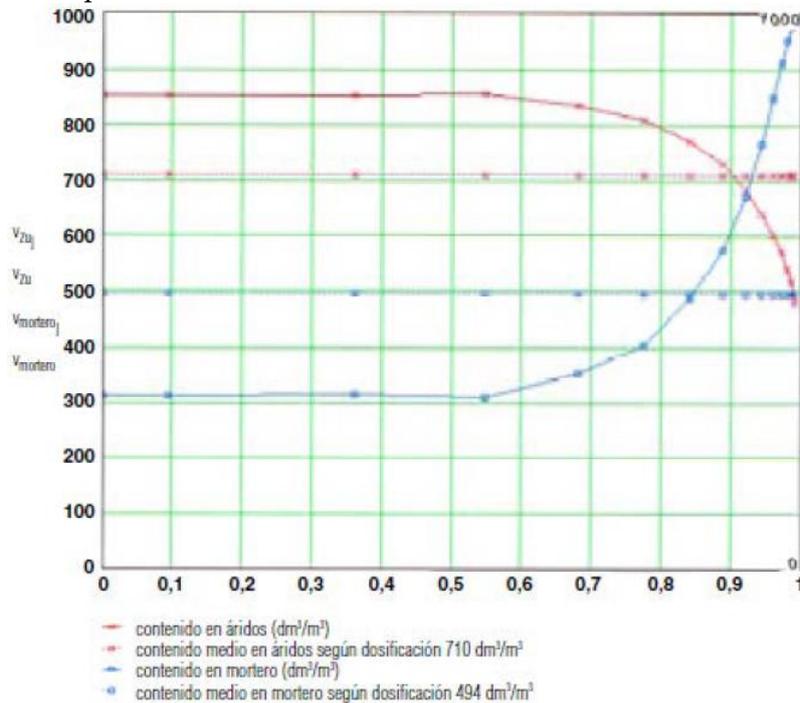


Figura 1.4 Perfil de velocidades ante un problema de segregación periférica.

Fuente: [41]

Para superar esta circunstancia, se debería dotar a la mezcla de la viscosidad y cohesión suficiente como para que no se segregue en el momento del bombeo. Generalmente, se tiende a bombear el hormigón con una consistencia algo más alta (menos fluidez) de la que va a requerir para su colocación, pues la propia presión que ejerce la bomba tiende a disminuir dicha cohesión y a aligerar en cierta medida la viscosidad y cohesión inicial. No obstante, una viscosidad y fluidez excesivas podría propiciar que el material generase problemas en la bomba en el momento del bombeo, o que no se distribuyera de forma idónea y homogénea por el hueco anular. Se entiende, por tanto, que el objetivo en términos reológicos del material será alcanzar una solución de compromiso entre fluidez y viscosidad.

Aun así, e incluso suponiendo que se consigue en el mortero una capacidad óptima para su bombeo, es posible que llegado el momento se debieran adoptar algunas medidas ajenas a la mezcla que facilitaran su colocación. Generalmente, estas medidas suelen ser o bien la extensión de una película lubricante periférica en las paredes del conducto, o bien limitar el diámetro del conducto. Si se adoptase esta segunda medida, habría que tener en cuenta que dicho diámetro siempre debe ser superior a tres veces el tamaño del árido, o componente, de mayor tamaño en la mezcla.

Así mismo, en el proceso de bombeo no se deberá tener en cuenta únicamente la aparición de fenómenos asociados a la segregación periférica que puedan acontecer. La forma en la que el mortero va a avanzar por el interior de la tubería también presenta su singularidad, y es deberá de conocer de antemano para poder planificar su instalación de la mejor forma posible. Pues, cuando el mortero transcurre en dirección ascendente a lo largo de un tubo cilíndrico, se genera una "holgura de cohesión" existente entre los granos, siempre y cuando las juntas de los tubos no ocasionen pérdidas de estanquidad. En el peor de los casos la falta de estanqueidad provoca una disminución de la bombeabilidad, formando un tapón de mortero que reduce la sección y aumenta la resistencia al transporte.

En cambio, en el caso de tuberías de transporte cilíndricas horizontales o inclinadas ligeramente se da un "efecto flotación", el cual hace referencia al asentamiento de los áridos de mayor tamaño que, por pequeño que sea, genera de nuevo contactos en la pared con todo tipo de consecuencias.



Figura 1.5 Codo de tubería roto debido a cizallamiento.

Fuente: [41]

Por último, cuando el mortero circula a través de codos muestra un esfuerzo de flexión y cizallamiento suplementaria. Como un codo muestra más superficie en la curva exterior que un tubo recto, la zona periférica que resulta más rica en finos se hace más delgada en ese punto y más gruesa en la curva interior. La zona central, más espesa, desplaza la zona periférica exterior, más blanda y debilitada, y cambia la dirección por efecto del cizallamiento y la flexión al topar contra la pared, representado así un fuerte desgaste.

De manera local pueden generarse zonas no homogéneas en las que aumenta en gran medida la resistencia al desgaste, pudiendo formarse zonas de rotura.

En la siguiente imagen, se puede ver además el perfil de velocidades característico de un flujo en una situación donde aparecen fenómenos de cizallamiento.

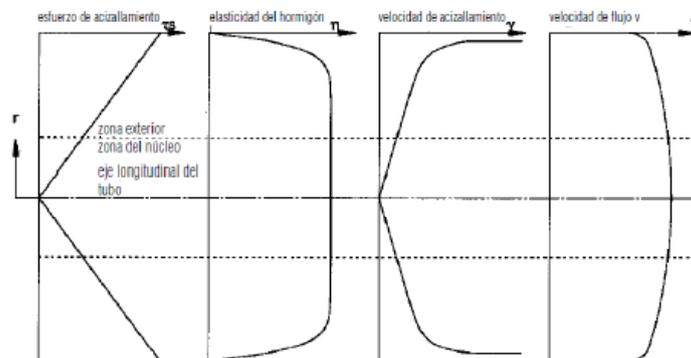


Figura 1.6 Perfil de velocidades ante un problema de cizallamiento. Fuente: [41]

Dados los antecedentes recopilados en las anteriores líneas, queda justificada la necesidad de realizar un profundo análisis de las diferentes propiedades que van a dar información acerca del comportamiento reológico del mortero. En esta tesitura, se plantea conocer las siguientes características del material:

- Consistencia

Dividida en 5 catalogaciones diferentes – seca, plástica, blanda, fluida o líquida –, el valor de la consistencia indicará el valor del escurrimiento ante su propio peso que presentará el mortero. Es importante mencionar en este punto, que dado que parte de los áridos convencionales del mortero se sustituirán por un componente de una densidad mucho menor como es el NFU, los valores de consistencia pueden verse ligeramente distorsionados. Como se ha indicado anteriormente, la consistencia consiste en determinar la capacidad de escurrir bajo su propio peso del mortero. Sustituyendo agregados convencionales por otros de mucho menor peso específico, se estará alterando por tanto el peso propio del mortero, de modo que si bien la pasta de cemento pudiera tener un potencial valor de consistencia, la integración en la misma de dichos agregados de NFU para provocar necesariamente que el ensayo arroje valores inferiores a los que realmente tendrá el mortero.

Dicha consideración deberá ser tenida en cuenta a la hora de valorar los resultados que se obtengan en la futura campaña de ensayos de laboratorio, pues una interpretación errónea de los resultados podría provocar la selección de una mezcla con una excesiva fluidez, que pudiera provocar problemas de segregación.

- Fluidez, viscosidad y capacidad de relleno

Dicha característica permitirá comprobar la viabilidad del nuevo mortero como material de relleno. En este punto, se comprobará si la fluidez de la mezcla, además de asegurar la cohesión de los diferentes elementos, permite también que el material fluya. Un criterio a la hora de seleccionar los mejores resultados cuando se compruebe dicha capacidad, será decantarse por aquellas mezclas que permitan la fluidez, con la máxima viscosidad posible.

- Período de trabajabilidad

El período de trabajabilidad del mortero se entenderá como el tiempo en minutos que tarda el mortero en estado fresco desde un valor de escurrimiento inicial, al último valor de escurrimiento que permite su colocación en condiciones óptimas. Queda indicada por tanto la importancia de conocer dicho valor para el nuevo mortero diseñado, especialmente para su colocación y transporte. Además, el valor de este ensayo será un dato fundamental a la hora de simular el cambio de estado del mortero en la modelización numérica de la estabilidad tras ser instalado.

- Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado de la mezcla serán los minutos que esta tardará en iniciar, primero, y en finalizar, después, su endurecimiento. Dado que una vez se supera al tiempo de inicio de fraguado se produce una pérdida muy importante de trabajabilidad en el mortero, por lo general el período de trabajabilidad de la mezcla suele tener un valor inferior al tiempo de inicio de fraguado.

- ✓ Densidad en estado fresco

Continuando con las propiedades del mortero en estado fresco, se antoja fundamental parametrizar la densidad en estado fresco del material. Además de ser un aspecto significativo a la hora de determinar el peso que transmite el propio relleno al sostenimiento, y un parámetro clave a la hora de ser bombeado, dicho parámetro puede ser utilizado como una primera fase en el control de calidad de la fabricación del mortero. Para una misma fórmula, la densidad una vez se fabrique el mortero debe ser la misma, y posibles variaciones (especialmente una disminución del valor) pueden ser un claro síntoma de error durante el proceso de fabricación.

- ✓ Contenido en aire del mortero fresco

De nuevo, y a colación del parámetro de densidad anterior, será clave medir el contenido en aire del mortero fresco. Como se ha comentado en otros puntos del presente documento, el añadido de caucho NFU al material, además de las consabidas propiedades beneficiosas que se espera atribuya, puede generar una oclusión de aire indeseada. Dicha oclusión vendría generada por la peor adherencia que va a generar el NFU con la matriz de cemento en comparación a un árido convencional, pudiendo propiciar la formación de pequeñas partículas de aire indeseadas. Si bien se requiere un volumen alto de aire en el mortero desde la perspectiva de compresibilidad, se debe tener control de forma recurrente para que en ningún caso supere los valores deseados.

Así mismo, y como se ha expuesto en anteriores puntos, el contenido interior de aire adecuado permitirá al nuevo material asumir las tensiones internas que generará en la interfaz pasta árido, de forma involuntaria, el NFU cuando se recupere de sollicitaciones a compresión.

- ✓ Exudación del mortero

Determinar la cantidad relativa de agua de amasado que es susceptible de exudar en una muestra de mortero fresco da idea de la homogeneidad de la mezcla una vez fabricada, aspecto que puede condicionar la durabilidad de la mezcla o incluso los resultados finales en su colocación. Así mismo, también se considera de interés conocer la exudación del mortero bajo presión. Cuando la mezcla se ubique en el anteriormente mencionado espacio anular, es posible que en muchas ocasiones reciba presiones provenientes de la convergencia del terreno bajo su propio peso, o bien a causa de subpresiones freáticas. Simular este tipo de escenarios en condiciones de laboratorio, será importante para conocer cómo se comportará la mezcla bajo dichas situaciones.

✓ Permeabilidad

El mortero debe garantizar un cierto grado de impermeabilidad, de modo quede asegurada la durabilidad del material en el interior del espacio anular del túnel. Proveniente del terreno excavado, es posible que en determinados escenarios se produzca la filtración de agua de escorrentía o nivel freático. Si esta agua puede penetrar con facilidad en el material, puede provocar que paulatinamente se vaya dañando en el mortero de relleno, que en última instancia pueden afectar también a la dovela rígida de hormigón.

✓ Cambio de longitud/relajación/contracción

El mortero diseñado se va a inyectar en el mencionado espacio anular entre dovela y terreno que irá generando el frente de excavación. Esto supone que el material se ubicará en un espacio de reducido espesor y gran longitud, que bajo determinadas circunstancias puede dar pie a importantes contracciones o cambios de longitud durante el proceso de fraguado. Dichos cambios de longitud pueden provocar diferentes problemas en la funcionalidad de la solución, desde una pérdida en la capacidad de compatibilizar la convergencia del terreno, hasta dañar la propia dovela de hormigón en los casos más graves.

✓ Lavado del mortero

De nuevo se querrá conocer una propiedad del mortero que atiende a su comportamiento en cuanto a funcionalidad y colocación. Como se ha comentado en anteriores líneas, el terreno generado por la excavación puede contar con la presencia de agua de escorrentía o bien nivel freático. En este sentido, se deberá conocer con anterioridad la pérdida de mortero, especialmente cemento y finos, que

puede tener lugar cuando el material entre en contacto con agua en grandes cantidades.

✓ Fricción interna

Como última propiedad a analizar en el nuevo mortero compresible se encuentra la fricción interna del material. Dado que el mortero va a interactuar de forma directa con el terreno o roca donde se va a producir la excavación, se considere de interés también que el nuevo material sea caracterizado también desde el punto de vista de su comportamiento geotécnico. Dicha propiedad será medida a través de su cohesión aparente y ángulo de fricción interno.

b. Ensayos para la caracterización de las propiedades del mortero

Una vez se han presentado las diferentes propiedades del mortero que serán ensayadas en la campaña de laboratorio, se indica a continuación una relación de los ensayos que permitirán medir, parametrizar y cuantificar cada una de ellas. En este punto, es importante indicar que si bien la amplia mayoría de ensayos indicados contará con normativa para llevarlos a cabo, pueden existir algunas pruebas que, dada la singularidad de la investigación, no tengan ningún procedimiento normado. Es aquí donde se recurrirá a la literatura científica para diseñar dichos ensayos, necesarios para obtener el nuevo mortero compresible.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_1	<b>Propiedad medida:</b> Granulometría de los áridos empleados.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-1	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado).
<b>Comentarios:</b> Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.	

Tabla 1.1 Normativa de ensayo de granulometría de los áridos empleados. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_2	<b>Propiedad medida:</b> Compresión simple y flexo tracción del mortero.
--	--

<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-11	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.
<b>Comentarios:</b> Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.	

Tabla 1.2 Normativa de ensayo de compresión simple y flexo tracción del mortero.

Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_3	<b>Propiedad medida:</b> Compresión confinada del mortero.
<b>Código de normativa:</b> No existe normativa al respecto.	<b>Título:</b> -
<p><b>Comentarios:</b> Tal y como se expuso, a priori, se considera que el diseño del ensayo para la evaluación del comportamiento del mortero dentro del conjunto sostenimiento – mortero de relleno – roca/terreno excavado, debe estudiar y considerar correctamente todos los factores clave de cara a determinar con garantías que la respuesta obtenida a través del ensayo diseñado se corresponde con el comportamiento tenso- deformacional de este material dentro del conjunto descrito.</p> <p>Por tanto, para conseguirlo y poder obtener datos que ofrezcan información relevante para la investigación, se tendrá en cuenta que el hueco entre el terreno excavado y el sostenimiento puede ser visto como un sector circular ideal que estará sometido a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Confinamiento en la dirección tangencial debido a la simetría.</li> <li>• Confinamiento en la dirección longitudinal del túnel debido a la extensión del mismo (tensión normal).</li> <li>• Cargado en la dirección radial debido a la convergencia de la roca y el contraste de las dovelas de hormigón que actúan como sostenimiento.</li> </ul> <p>Con la intención de conseguir esta situación, se considera que podría partirse de una configuración de ensayo como la que se muestra a continuación.</p>	

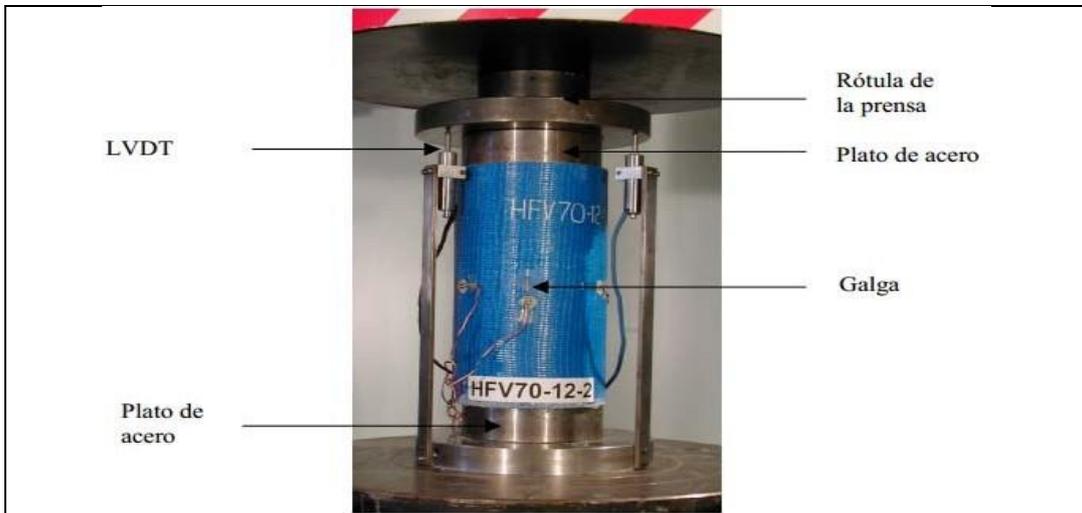


Figura 1.7 Esquema de posible configuración de ensayo de resistencia a compresión confinada (I). Fuente: Elaboración propia.

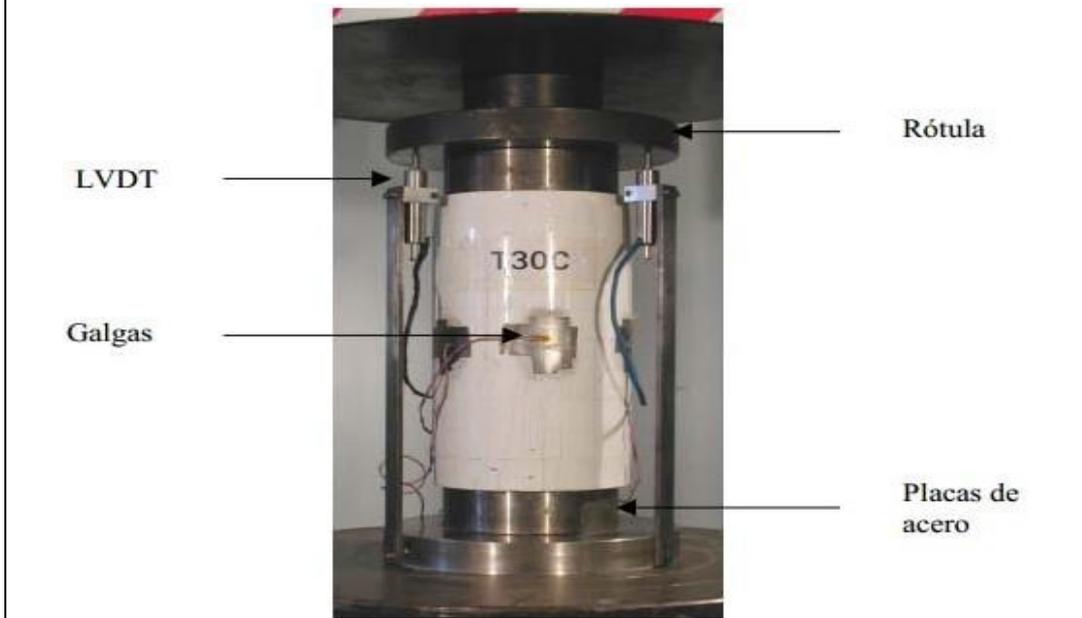


Figura 1.8 Esquema de posible configuración de ensayo de resistencia a compresión confinada (II). Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse, mediante la ejecución de un ensayo de este tipo, el núcleo de mortero está sometido a un estado triaxial de tensiones y el tubo a

tensiones biaxiales. Por lo tanto, la carga correspondiente puede ser considerablemente mayor que la suma separada de las cargas del material que constituye el tubo y hormigón. El nivel de incremento en la carga causada por el efecto del confinamiento del tubo sobre el núcleo de hormigón depende de varios factores, tales como, espesor de tubo de acero, relación de esbeltez y forma de la sección transversal.

Partiendo de lo anterior, se deberá simular la situación de confinamiento real a la que estará sometido el nuevo mortero, mediante la determinación de la tipología de moldes a emplear, sus dimensiones y la forma y velocidad de aplicación de carga.

El dimensionamiento de este ensayo no será por tanto un proceso aleatorio ni valdrán los diseños para otras aplicaciones, ya que deberá fundamentarse en razonamientos y conclusiones que tomen como origen los principios técnicos y resultados de las labores de investigación y estudio de las operaciones mediante TBM de Escudo en diferentes tipologías de terrenos que son base del presente desarrollo.

En general la evaluación de esta característica del hormigón no es una práctica común, pero sí se emplea en algunos usos. Por ejemplo, una técnica actual para el reforzamiento de pilares de hormigón es proceder al confinamiento de los mismos. En los últimos años se ha incrementado el empleo de columnas tubulares de acero rellenas de hormigón en la industria de la construcción en aplicaciones estructurales, especialmente en regiones sísmicas. Esto se debe en parte a sus excelentes propiedades de resistencia sísmica, tales como alta resistencia, alta ductilidad y gran capacidad de absorción de energía. En general, se conoce que la construcción con tubo de acero y hormigón puede resultar en un sistema estructural eficiente.

Sin embargo, la forma de confinar no es única y está probado que el comportamiento del hormigón resulta diferente según como dicho confinamiento se haya materializado (tipo de material, espesor del elemento confinador, ...). Por este motivo los esfuerzos intentan ir más allá del confinamiento con acero, y actualmente se exploran otras posibilidades, como el revestimiento mediante polímeros reforzados con fibra de vidrio, llevándose a cabo para la constatación de su viabilidad para este uso de ensayos de compresión confinada, llevándose a

cabo mediante configuraciones de este ensayo como las que muestran en las siguientes figuras.

Como conclusión del análisis que se han realizado en este apartado, los medios necesarios para la materialización de este ensayo son una prensa que llevara a cabo una compresión axial con un sistema de control que permita la adquisición de la respuesta completa tensión-deformación. Una opción con el fin de obtener el registro de deformaciones longitudinales y transversales durante los ensayos, las probetas es instrumentar con galgas extensométricas y transductores de desplazamiento, tipo LVDT. Las galgas extensométricas se deberían colocar sobre la superficie de la probeta de hormigón, mientras que los transductores de desplazamiento se pondrían entre los platos de carga de la máquina de ensayo. Una opción más factible, barata e igualmente eficaz para desarrollar en ensayo, es trabajar con una camisa de fuerza como elemento confinador de las probetas, a la cual se adscriba un anillo de guarda para medir la deformación que sufre cada una de estas.

Tabla 1.3 Procedimiento adoptado para el ensayo de resistencia a compresión confinada. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_4	<b>Propiedad medida:</b> Módulo elástico.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 83316	<b>Título:</b> Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión
<b>Comentarios:</b> Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.	

Tabla 1.4 Normativa de ensayo de módulo de elasticidad a compresión. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_5	<b>Propiedad medida:</b> Consistencia del mortero.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-3	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)

**Comentarios:** Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.

Tabla 1.5 Normativa de ensayo de consistencia por mesa de sacudidas. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_6	<b>Propiedad medida:</b> Fluidez, viscosidad y capacidad de relleno.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 12350-9	<b>Título:</b> Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V.
<b>Comentarios:</b> Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.	

Tabla 1.6 Normativa de ensayo de capacidad de relleno del mortero. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_7	<b>Propiedad medida:</b> Período de trabajabilidad.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-9	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco.
<b>Comentarios:</b> Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.	

Tabla 1.7 Normativa de ensayo de período de trabajabilidad. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_8	<b>Propiedad medida:</b> Tiempo de fraguado.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 480-2	<b>Título:</b> Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación del tiempo de fraguado.

**Comentarios:** Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.

Tabla 1.8 Normativa de ensayo de tiempo de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_9	<b>Propiedad medida:</b> Densidad en estado fresco.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-6	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.
<b>Comentarios:</b> Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.	

Tabla 1.9 Normativa de ensayo de densidad en estado fresco. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_10	<b>Propiedad medida:</b> Contenido en aire del mortero fresco.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-7	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco.
<b>Comentarios:</b> Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.	

Tabla 1.10 Normativa de ensayo de contenido en aire del mortero fresco. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_11	<b>Propiedad medida:</b> Exudación del mortero.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 480-4	<b>Título:</b> Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 4: Determinación de la exudación del hormigón.

**Comentarios:** Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.

Tabla 1.11 Normativa de ensayo de exudación del mortero. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_12	<b>Propiedad medida:</b> Exudación del mortero bajo presión.
<b>Código de normativa:</b> No existe normativa al respecto.	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado).
<p><b>Comentarios:</b> El objeto es determinar la cantidad relativa de agua de amasado que es susceptible de exudar una muestra de hormigón fresco bajo presión. El fenómeno conocido como exudación se produce en el hormigón o mortero fresco por el ascenso del agua de amasado. El ascenso del agua da origen a conductos capilares, que constituyen posteriormente vías permeables, afectando en consecuencia la impermeabilidad del mortero, especialmente por capilaridad, además de afectar a la homogeneidad del material colocado. Dicho fenómeno, puede verse incrementado y ser, en este sentido más perjudicial, si el material se encuentra presionado.</p> <p>De este modo, se plantea un procedimiento adaptado respecto del ensayo convencional, en el cual se llena el recipiente con una muestra representativa del mortero objeto de ensayo, hasta una altura de 250 mm, se procede a su compactación y se finaliza nivelando la parte superior hasta conseguir una superficie lisa. Se determina el peso de la muestra.</p> <p>Para la realización de este paso, se coloca el mortero en el interior del filtro – prensa de Barold durante 4 minutos y medio bajo la presión de 1 bar. A continuación se adjunta una imagen del citado filtro:</p>	



Figura 1.9 Filtro – prensa de Barold. Fuente: Elaboración propia.

Dicho recipiente se coloca sobre una plataforma o suelo horizontal en un laboratorio donde la temperatura sea de  $20 \pm 2$  °C y la humedad relativa de al menos el 65%. Se mantiene el recipiente con su tapadera durante todo el tiempo que dure el ensayo, excepto cuando se realice la toma de agua.

Se extrae el agua acumulada en la superficie del hormigón por medio de la pipeta a intervalos de 10 min durante los primeros 40 min, y posteriormente cada 30 min hasta que haya cesado la exudación. Después de cada toma de agua se trasvasa el agua a la probeta graduada y se anota la cantidad de agua acumulada.

La exudación se expresa en tanto por ciento de la cantidad de agua total contenida en el hormigón.

Tabla 1.12 Procedimiento adoptado para el ensayo de exudación bajo presión.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_13	<b>Propiedad medida:</b> Permeabilidad.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 83310	<b>Título:</b> Ensayos de hormigón. Determinación de la permeabilidad.
<b>Comentarios:</b> Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.	

Tabla 1.13 Normativa de ensayo de permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_14	<b>Propiedad medida:</b> Cambio de longitud/relajación/contracción.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 13872	<b>Título:</b> Método de ensayo de morteros para igualado y/o nivelado. Determinación de la contracción.
<p><b>Comentarios:</b> Ensayo desarrollado conforme normativa vigente. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido.</p>	

Tabla 1.14 Normativa de ensayo de contracción del mortero. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_15	<b>Propiedad medida:</b> Lavado del mortero.
<b>Código de normativa:</b> Norma BS 8443	<b>Título:</b> Specification for establishing the suitability of special purpose concrete admixtures.
<p><b>Comentarios:</b> Ensayo desarrollado conforme normativa. No se realizó ningún tipo de adaptación ni corrección sobre el procedimiento normado y establecido. Se debe indicar que ante la ausencia de normativa española al respecto, se decidió emplear normativa británica.</p>	

Tabla 1.15 Normativa de ensayo de granulometría de los áridos empleados. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_16	<b>Propiedad medida:</b> Fricción interna.
<b>Código de normativa:</b> No existe normativa al respecto.	<b>Título:</b> -
<p><b>Comentarios:</b> Dado que no se encuentra normativa específica UNE para la medición de dicha propiedad, se decide adaptar un procedimiento a partir del empleo de una celda para ensayo triaxial.</p> <p>Para ello, una muestra de mortero se prepara y cura a 23°C. Dicha muestra no debería ni estar consolidada, ni forzarse su saturación antes del ensayo. Una vez la muestra de mortero queda preparada, se coloca en la celda triaxial y se</p>	

ensaya tanto para determinar su cohesión aparente como el ángulo de fricción interno.

Tabla 1.16 Normativa de ensayo de granulometría de los áridos empleados.

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.1.3 Análisis de los materiales susceptibles de formar parte del nuevo mortero compresible**

Una vez se han seleccionado los ensayos necesarios para llevar a cabo la campaña en laboratorio, se deben seleccionar aquellos materiales que son susceptibles de formar parte de las nuevas dosificaciones elaboradas, en base a sus propiedades intrínsecas. En las próximas líneas se realizará un análisis pormenorizado de dichos materiales, discretizando entre aquellos materiales considerados como básicos para cualquier elaboración de mortero u hormigón, y aquellos otros que se consideren particulares para este desarrollo en cuestión.

a. Materiales básicos para la elaboración del mortero

✓ Cemento

Recurriendo la propia definición que la EHE (Instrucción Española de Hormigón Estructural) [34] proporciona, los cementos son productos artificiales finamente molidos, que amasados con agua forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando pie a productos hidratados, mecánicamente resistentes y estables tanto al aire como bajo el agua, [34]. En función del grado de finura del cemento deseado, existen las siguientes tipologías de cemento:

- Cementos Tipo I: Se utiliza en obras de hormigón o mortero en general cuando en las mismas no se especifique el uso de otro tipo. Debido a una mayor finura libera más calor de hidratación que otros cementos.
- Cementos Tipo II: Cuenta con una moderada resistencia a sulfatos, es el cemento Portland que se utiliza en obras hormigones y morteros expuestos a la acción moderada de los sulfatos o donde se necesite un calor de hidratación moderado.
- Cemento Tipo III: Cuenta con una alta resistencia inicial. Se utilizan cuando se requiere que la estructura reciba carga lo antes posible o desencofrar a los pocos días del vertido.

- Cemento Tipo IV: Se requiere bajo calor de hidratación y que no se produzcan dilataciones durante el fraguado.
- Cemento Tipo V: Elevada resistencia a la acción de los sulfatos.

Debido al amplio conocimiento que existe en relación a este material, el ya consabido rol que juega en cualquier composición de mortero y hormigón, y dado que no es su composición o naturaleza un aspecto relevante ni principal dentro de la investigación, se omitirá mayor información en relación al material.

✓ Áridos

Un factor importante a la hora de realizar la dosificación es escoger correctamente los áridos que vayan a formar parte de la mezcla. Generalmente, estos forman prácticamente el 50-75 % del mortero. Son capaces de disminuir el coste por unidad de volumen de mortero, además de aumentar la resistencia y disminuir o contener las retracciones que puedan tener lugar en el mismo. Para conseguir un mortero estable y económico se debe introducir el máximo posible de áridos y con el mayor tamaño compatible con los demás requisitos que deba alcanzar la mezcla [34].

Los áridos tienen diferentes granulometrías, y en función de ésta los clasificamos como árido fino o árido grueso. No obstante, dado que en esta tesis se va a diseñar un mortero y estos únicamente contienen árido fino, en adelante se centra la descripción en esta tipología. El árido fino o arena es un agregado muy extendido y frecuente en tareas constructivas. La arena, en función de cuál sea su composición contará con distintas características o aplicaciones. La arena propia para la elaboración de mortero es la que se constituye a base de pequeñas partículas de rocas trituradas, especialmente si se trata de rocas silíceas.

Actualmente, la EHE regula [34], o más bien aconseja al respecto, sobre el tamaño de las partículas de arena. En este sentido, ofrece el siguiente huso granulométrico como recomendación, el cual se puede ver en la siguiente figura. Dicha recomendación, será seguida en con atención durante la selección del árido empleado para el desarrollo de la presente tesis doctoral.

Límites	Material retenido acumulado, en % en peso, en los tamices						
	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.125 mm	0.063 mm
Superior	0	4	16	40	70	77	(1)
Inferior	15	38	60	82	94	100	100

Figura 1.21 Huso granulométrico. Fuente. [34]

En la siguiente imagen se representa el huso granulométrico anterior en forma de curva granulométrica. En ella se aprecia en azul la franja que define tanto el límite superior como inferior, y dentro de la cual debe situarse la curva granulométrica del árido fino en cuestión [34].

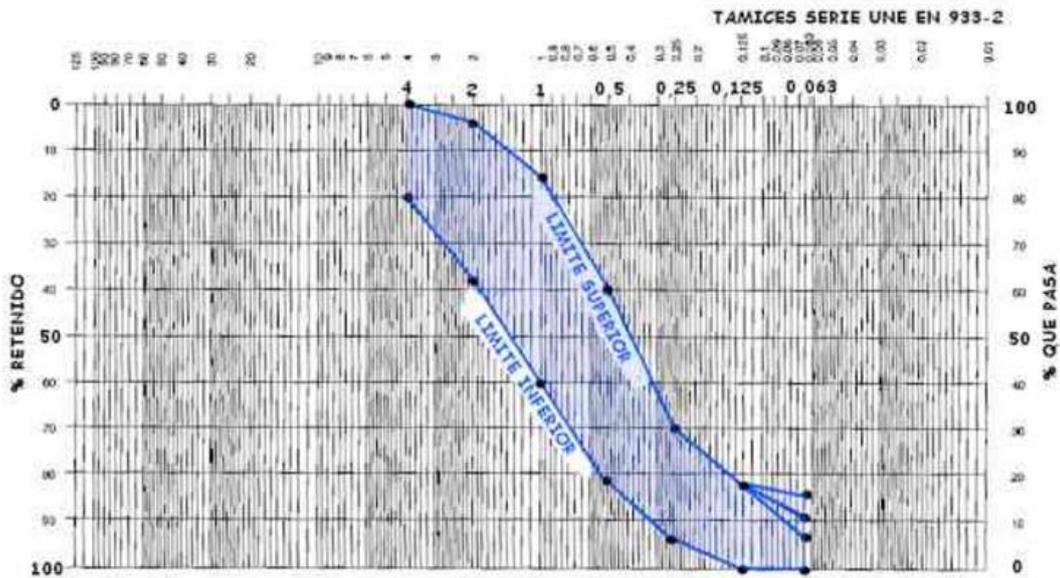


Figura 1.22 Representación huso granulométrico. Fuente: [34].

Con el objetivo de conseguir el número adecuado de finos, se incluirán en el mortero dos tipologías de arenas, de modo que se consiga ajustar la curva granulométrica al máximo posible a la curva de Bolomey. Dichas arenas serán 0/4, y 0/2, lavada y machacada respectivamente.

✓ Caucho NFU

Si bien este material no es un material básico en un mortero u hormigón convencional sí lo es en el mortero compresible que se quiere desarrollar en la

presente investigación, siendo esta la razón por la cual se ubica en el presente apartado.

La densidad de este material sin compactar varía en función del tamaño de los trozos, alcanzando valores de entre 390 y 535 kg/m<sup>3</sup>. La densidad media de este material para rellenos de este material compactado es de 630 y 840 kg/m<sup>3</sup>. Para el material grueso que procede del granulado, con un tamaño comprendido entre 76 y 13 mm, se han alcanzado densidades sin compactar de entre 570 y 730 kg/m<sup>3</sup> para material compactado, [42].

De manera sintetizada, se determina que el NFU es un material de peso reducido, altamente permeable y con una baja capacidad de compactación. Además, presenta una elevada resistencia al corte, tiene una elevada flexibilidad y una buena predisposición a la absorción de vibraciones.

La adición de este material jugará un papel fundamental en la capacidad compresible del mortero, ya que cuenta con una importante capacidad de reducción del módulo de elasticidad de la mezcla, alcanzando en algunos casos valores de hasta el 40% sobre el inicial [43]. Así mismo, también puede provocar un aumento del porcentaje de huecos de la mezcla conforme más volumen de NFU sea añadido. Esto vendría provocado a causa de la peor adherencia del NFU con la pasta de cemento al respecto de un árido convencional [44]. Tanto la reducción del módulo elástico, como el incremento en el porcentaje de huecos, tienen una contribución clara al incremento de la capacidad compresible del mortero. No obstante, esta segunda capacidad debe ser vigilada, pues un incremento excesivo del volumen de huecos puede mermar en gran medida las prestaciones mecánicas del mortero.

Así mismo, la trabajabilidad de la mezcla no se debe ver alterada por el añadido de determinadas cantidades de caucho NFU, pudiendo incluso verse mejorada bajo determinadas circunstancias [45]. Por último, y como valor añadido que podría aportar el material, la inclusión de dicho material podría incrementar la capacidad de atenuación de ruido y vibraciones, esta última en un grado muy alto, hasta alcanzar valores de un 94% [46] y [47].

Por lo que respecta a las resistencias estructurales del material, sí es cierto que se pueden reducir notablemente a causa del añadido de NFU, debido a la mucho menor capacidad portante del mismo frente a un árido convencional. No obstante, y siempre que dicha disminución de resistencias sea controlada, no resulta un

perjuicio en el marco de la presente investigación, pues la capacidad portante del mortero no es un objetivo prioritario.

b. Materiales particulares para la elaboración del mortero

Una vez descritos los materiales básicos para la elaboración del mortero, se procede a describir aquellos otros que resultan particulares de la presente investigación. Se dividirán en dos tipologías, adiciones o aditivos, en función de si su inclusión superará el 5% en total del peso del nuevo material o no. Sobre cada uno de ellos, se realizará una síntesis de las ventajas o inconvenientes que puede provocar su inclusión, finalizando con la selección razonada de los materiales que van a formar parte de la investigación:

A) POSIBLES ADICIONES PARA EL MORTERO COMPRESIBLE

✓ Humo de Sílice

El humo de sílice, conocido también como microsílice o sílice activa, es un producto de carácter inorgánico formado por partículas de geometría esférica de gran finura. El uso de humo de sílice no se puede llevar a cabo de manera arbitraria, pues la EHE especifica unos porcentajes máximos donde se puede actuar y unos cementos determinados donde es compatible. En la siguiente tabla se especifican los porcentajes de sustitución y los cementos donde se puede sustituir, [48]:

Cementos comunes	Cemento Portland con humo de sílice	CEM III/A-D	6 a 10%
	Cemento Portland mixto <sup>(*)</sup>	CEM III/A-M	<10%
		CEM III/B-M	<10%
	Cemento Pozolánico <sup>(**)</sup>	CEM IV/A	<10%
		CEM IV/B	<10%

Figura 1.23 Cementos con adición de humo de sílice. Fuente: [34]

El humo de sílice como sustituto parcial del cemento introduce en la mezcla de mortero una serie de ventajas entre las que se encuentran las siguientes:

- Permite que las resistencias finales alcanzadas por el mortero sean superiores a las de un mortero convencional.
- El humo de sílice reduce la reactividad álcali – sílice, y aumenta la resistencia a sulfatos. De este modo se incrementa considerablemente la durabilidad del mortero, pudiendo obtener un material de altas prestaciones.

- El humo de sílice facilita el bombeo o proyección de la mezcla, factor muy importante en el marco de esta tesis.
- Gracias a su elevado grado de finura, el humo de sílice reduce el riesgo de segregación o exudación. Este factor es importante en situaciones donde el difícil acceso a la mezcla de mortero impida una correcta compactación, como es este caso.
- Además, también aporta una serie de ventajas como permitir el hormigonado submarino o aumentar la impermeabilidad, no obstante, estas propiedades no son de interés para esta tesis.
- La tonelada cuesta poco más de 100 euros, y hay una buena accesibilidad al material.

Por el contrario, el uso del humo de sílice presenta las siguientes desventajas o limitaciones:

- No influye en el tiempo de fraguado, manteniéndose éste prácticamente igual al caso de un cemento convencional.
- Aumenta considerablemente la necesidad de agua.
- No ayuda a la adquisición de resistencias iniciales.
- ✓ Cenizas Volantes

Las cenizas volantes se definen como polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión del carbón pulverizado. El uso de cementos convencionales con cenizas volantes para la dosificación de mortero se regula en la Instrucción EHE, donde además se recogen diferentes recomendaciones para su uso. Los únicos cementos permitidos en la normativa son el CEM II/A-V y CEM II/A-M para el caso de hormigones pretensados.

En la siguiente tabla se indican los cementos que tienen cenizas volantes añadidas según la normativa RC-08 y los rangos de contenido en ceniza asumibles, [49].

Cementos comunes	Cemento Portland con cenizas volantes	CEM II/A-V	6 a 20%	Cenizas volantes silíceas
		CEM II/B-V	21 a 35%	
		CEM II/A-W	6 a 20%	Cenizas volantes calcáreas <sup>(*)</sup>
		CEM II/B-W	21 a 35%	
	Cemento Portland Compuesto	CEM II/A-M	36 a 65%	Escorias horno alto, humo de sílice ≤10%, puzolana natural, cenizas volantes, esquistos calcinados y caliza.
		CEM II/B-M	66 a 80%	
	Cemento Pozolánico	CEM IV/A	11 a 35%	Humo de sílice ≤10%, puzolana natural y cenizas volantes
		CEM IV/B	36 a 55%	
	Cemento Compuesto	CEM V/A	18 a 30%	Puzolana natural y cenizas volantes silíceas
		CEM V/B	31 a 50%	
Cementos especiales	Cemento para usos especiales	ESP VI-1	45 a 75%	Escorias horno alto, puzolana natural ≤ 40% y cenizas volantes

Figura 1.24 Cementos con adición de cenizas volantes. Fuente: [34]

Las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento introducen las siguientes ventajas sobre el mortero:

- La adición de cenizas volantes a la mezcla aumenta la trabajabilidad de la misma, necesitando menor cantidad de agua para alcanzar una docilidad similar a la de un mortero sin cenizas, y consiguiendo una mayor cohesión.
- Gracias a la finura de las cenizas volantes su añadido a la mezcla de hormigón reduce el riesgo de segregación y exudación del mortero.
- El uso de cenizas volantes en el cemento da pie a un mortero más cohesivo, de modo que cuenta con un mayor potencial para ser bombeado o proyectado.
- En el proceso de hidratación el añadido de cenizas volantes reduce el calor de hidratación.
- La durabilidad del mortero aumenta, ya que este material supone un claro aumento de la resistencia frente al ataque por sulfatos y una disminución de la reactividad álcali-sílice, reduciendo la reactividad de los áridos y eliminando la expansión nociva del mortero.
- A largo plazo aumenta el valor de las resistencias finales.
- No genera problemas en cuanto a la corrosión de las armaduras.
- El coste de la tonelada se sitúa en torno a los 50 € y la accesibilidad es elevada.

Por el contrario, el uso de cenizas volantes provoca las siguientes desventajas o limitaciones en el mortero:

- El empleo de cenizas volantes supone un aumento de los tiempos iniciales y finales de fraguado.

- Retarda la adquisición de las resistencias iniciales.
- ✓ Escorias de Alto Horno

En el ámbito de la fabricación de morteros la escoria puede tener dos usos principalmente, árido para mortero y componente de cemento. Para ejercer como árido de mortero se recurre a la escoria cristalizada. Si se puede sustituir por parte del árido de la mezcla, tanto en hormigón como mortero, es porque previamente se ha comprobado que carece de componentes que puedan poner en riesgo la estabilidad de volumen.

Según normativa española, los cementos que contienen escorias quedan clasificados de la manera que se sintetiza en la siguiente tabla:

Tipo de cemento	Denominación	Contenido de escorias de horno alto
Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	6 a 20%
	CEM II/B-S	21 a 35%
Cemento Portland mixto	CEM II/A-M	6 a 20% (*)
	CEM II/B-M	21 a 35% (*)
Cemento con escorias de horno alto	CEM III/A	36 a 65%
	CEM III/B	66 a 80%
	CEM III/C	81 a 95%
Cemento compuesto	CEM V/A	18 a 30%
	CEM V/B	31 a 50%
Cementos para usos especiales	ESP VI-1	45 a 75% (**)

Figura 1.25 Cementos con escorias de alto horno. Fuente: [34]

La sustitución parcial del cemento por escorias de alto horno introduce a la mezcla final del mortero las siguientes ventajas:

- La introducción de escorias de alto horno a la mezcla de mortero reduce las necesidades de agua.
- Los riesgos de exudación y segregación disminuyen al añadir escorias de alto horno debido a la finura del material, eliminando o reduciendo las necesidades de mantenimiento.
- Los morteros con cenizas volantes cuentan con un potencial mayor para ser bombeados o inyectados, aspecto a considerar desde el punto de vista de esta tesis.
- La durabilidad del mortero tiende a aumentar con la adición de escorias de alto horno, ya que aumenta de manera significativa la resistencia a sulfatos y

disminuye la reactividad álcali – sílice, reduciendo la reactividad de los áridos y eliminando la expansión nociva del mortero.

- El coste de la escoria de alto horno para cemento alcanza prácticamente los 120 €, contando con una accesibilidad elevada.

Por el contrario, el uso de escorias de alto horno provoca las siguientes desventajas o inconvenientes en el mortero:

- Los tiempos de fraguado, tanto iniciales como finales, se incrementan considerablemente al añadir escorias de alto horno al mortero.
- No contribuye a la adquisición de resistencias iniciales, y tampoco aumenta la resistencia definitiva una vez ha fraguado la mezcla.

#### Síntesis

Una vez vistas las mejoras o limitaciones que supone la inclusión de las adiciones estudiadas al mortero compresible, se realiza una selección de aquellas que van a someterse a ensayo.

En primer lugar, de los tres posibles sustitutos parciales del cemento, humo de sílice, cenizas volantes y escorias de alto horno, se ha comprobado que estas dos últimas introducen al mortero unas propiedades muy similares, de modo que se considera el humo de sílice definitivamente para someterlo a ensayo a falta de decidir entre las cenizas volantes y escorias de alto horno.

Como se ha podido comprobar anteriormente una de las principales diferencias entre ambas es el precio, siendo aproximadamente el doble de caras las escorias de alto horno que las cenizas volantes. Con la finalidad de que pueda desarrollarse un material competitivo en cuanto a precio, a igualdad de beneficios se tendrá en cuenta este factor.

Además, si bien la EHE si recoge el uso de cementos con adición de escorias de alto horno para fabricar hormigones o morteros, no contempla este material como añadido directo al hormigón o mortero por poder causar problemas de diversa índole. De este modo, y siendo que esta investigación estudia una solución global al problema de las TBM de escudo, para evitar posibles problemas en cuanto a normativa se descarta el uso de escorias de alto horno.

De este modo, serán las cenizas volantes y humo de sílice las adiciones contempladas como sustitutos parciales del cemento.

## B) POSIBLES ADITIVOS PARA EL MORTERO COMPRESIBLE

## ✓ Aditivos inclusores de aire

Mediante un aditivo inclusor de aire se permite generar durante el mezclado del hormigón o mortero un sistema burbujas de reducido tamaño (0,025 – 0,1 mm) espaciadas uniformemente alrededor de toda la masa de la mezcla.

La cantidad de aire a introducir estará directamente relacionada con la protección deseada, aunque generalmente suele ser del 4 – 6 % de aire en volumen. Así mismo, la cantidad de aditivo a utilizar depende la cantidad de aire que se quiera introducir. Aunque esta cantidad variará dependiendo de la marca y el tipo de producto químico, de manera habitual se emplean de 0,5 a 2 ml por cada kg de cemento, [50].

Es importante saber diferenciar entre el aire ocluido y el aire atrapado. Este último se puede producir tanto en el mezclado como en la colocación del mortero, pudiendo ser incluso de un volumen considerable si el vibrado no se ha realizado de manera correcta. No obstante, incluso habiendo vibrado de manera eficiente puede quedar siempre un pequeño volumen de aire, que puede alcanzar el 2 % del volumen. Si bien el aire atrapado suele ser perjudicial a la impermeabilidad del concreto, ya que sus partículas son más grandes y la mayoría están conectadas, el aire ocluido no tiene por qué resultar negativo de cara a la impermeabilidad de la mezcla. Las partículas de aire ocluidas son más pequeñas y rara vez se encuentran conectadas (existe una separación promedio de 0,2 mm en la pasta de cemento), [50].

## ✓ Aditivos plastificantes y superplastificante

Un aditivo plastificante o superplastificante para mortero es un producto químico que mejora las propiedades del mortero en estado fresco, mejorando sus atributos de trabajabilidad o bombeabilidad, a la vez que se incrementa la resistencia mecánica y la durabilidad del producto. Recurriendo a la definición existente en la norma UNE 934-2, [51]:

- Aditivo reductor de agua o plastificante (también conocido como fluidificante): Este aditivo permite, sin variar la consistencia, disminuir el contenido en agua de cualquier mortero, o, sin variar el contenido en agua de la mezcla, incrementar el asiento (cono de Abrams) o el escurrimiento del mortero.
- Aditivo reductor de agua de alta actividad o superplastificante(superfluidificante): Este aditivo permite, sin modificar la

consistencia, disminuir en gran medida el contenido en agua de cualquier mortero, o, sin variar el contenido en agua de la mezcla, incrementar en gran medida el asiento (cono de Abrams) o el escurrimiento del mortero.

Los aditivos plastificantes o superplastificantes son los más característicos de los morteros y hormigones de bombeo. Analizando las características básicas de un mortero bombeable se concluye que la consistencia de la mezcla en estado fresco deberá ser fluida. Alcanzar esta condición puede ser relativamente sencillo aumentando la relación A/C, no obstante, un exceso de agua, además de conducir a una pérdida de resistencia mecánica, puede generar segregación en el mortero. Esta segregación, en una situación convencional se podría evitar con mediante un proceso de compactación eficaz, sin embargo, las características propias de esta tesis impiden que ésta se pudiera llevar a cabo, ya que no hay acceso directo al espacio donde se va a disponer la mezcla (espacio anular entre dovela y terreno excavado). Es por esta razón que la inclusión de un aditivo superplastificante puede resultar importante para que el mortero diseñado en a lo largo de esta tesis cumpla su principal cometido.

✓ Modificadores de fraguado y endurecimiento

Los aditivos modificadores de fraguado y endurecimiento son productos químicos que se adicionan a la pasta del mortero en el momento del amasado, impidiendo, retardando o acelerando el fraguado de los mismos, actuando de este modo sobre el endurecimiento. Estos productos reciben el nombre de inhibidores, retardadores y acelerantes del fraguado, respectivamente, [52].

La utilización de un inhibidor de fraguado puede resultar conveniente bajo determinadas circunstancias donde convenga interrumpir el proceso de fraguado del cemento. Los productos que actúan como inhibidores del fraguado pueden ser por ejemplo los azúcares o los compuestos cálcicos solubles, [52].

El uso de un retardador del fraguado que frene el proceso de hidratación del cemento, respecto de su velocidad normal, resulta conveniente también bajo determinadas circunstancias como son por ejemplo una puesta en obra complicada, como es este caso, o en el transporte de la mezcla largas distancias. En este caso se considera porque el empleo de humo de sílice puede acelerar en exceso el proceso de endurecimiento, de modo que el retardador de fraguado podría ejercer cierto control sobre este suceso, [52].

### Síntesis

Los tres aditivos que se han evaluado 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 es importante en el marco de esta tesis, ya que puede garantizar una fluidez suficiente para proceder al bombeo de la mezcla sin comprometer necesariamente la cohesión del mortero en estado fresco, 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 aumente la compresibilidad del mortero, además de otras facultades añadidas como la resistencia a ciclos hielo – deshielo. Esta facultad también será importante en el marco de esta tesis, donde el objetivo principal es disponer en el espacio anular formado por dovelas y terreno excavado un mortero compresible.

Por último, los modificadores de fraguado se encargan fundamentalmente de aumentar o disminuir los tiempos de fraguado de la mezcla. En función de las circunstancias, o de la adición a la pasta de cemento incluida (cenizas volantes, humo de sílice o escorias de alto horno), se apostará por un aditivo acelerador de fraguado, un aditivo retardador del fraguado o directamente un aditivo inhibidor del fraguado. No obstante, lo habitual en el marco de esta tesis será apostar 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 determina que, si bien el aditivo que más beneficios directos puede ofrecer es el inclusor de aire por mejorar la capacidad de compresibilidad del mortero, los otros dos también cuentan con propiedades muy interesantes para el mortero. De este modo, se propone realizar una combinación entre estos tres aditivos para llevar a cabo las dosificaciones que se ensayarán posteriormente.

#### 4.2 DOSIFICACIONES Y PLAN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

En el presente apartado se va a definir en detalle el plan de ensayos de laboratorio a desarrollar, especificando las dosificaciones que se van a someter a ensayo. Como se ha podido comprobar en el punto precedente son diferentes adiciones y/o aditivos las que pueden formar parte del mortero compresible, siendo por tanto importante, identificar aquellas que en mayor medida van a contribuir al logro de las propiedades definitivas buscadas. En este mismo sentido, no sólo se deberá definir la tipología o combinación de aditivos y/o adiciones, sino que también habrá que indicar las cantidades en las que estas pasarán a formar parte de la mezcla.

De este modo, el apartado se estructurará en dos bloques diferentes. En el primero de ellos se especificarán las cantidades y proporciones definitivas en peso de los materiales seleccionados anteriormente. Mientras, en el segundo bloque se obtendrán las dosificaciones definitivas para someter a ensayo. En cuanto a dicha selección de dosificaciones, es importante mencionar que dado el alto nivel de variables de partida con las que cuenta la investigación, se hará uso de un método estadístico conocido como “Diseño Factorial de Experimentos – Taguchi”, el cual establece una combinación de máxima representatividad entre las diferentes variables, obteniendo una relación optimizada en cuanto a combinaciones diferentes a ensayar. Con el objetivo de que dicho método Taguchi pueda ser aplicado, en el primer bloque del apartado, donde se definen las cantidades y proporciones de los materiales, quedarán predefinidas todas las variables que actúan en la investigación, así como los niveles a los que actúa cada una de ellas.

#### **4.2.1 Cantidades y proporciones en peso de los materiales seleccionados. Selección de variables y niveles**

El cometido principal de este apartado es determinar las cantidades que se van a incluir de cada uno de los materiales considerados en el apartado anterior. De este modo, y en base a la literatura científica y normativa existente, existen una serie de directrices a la hora de dosificar un mortero de estas características. Sobre estas recomendaciones se realizarán de manera justificada los pertinentes cambios que se consideran necesarios para encontrar en la mezcla las propiedades demandadas en las premisas iniciales.

- a. Estudio de las cantidades recomendadas de cada material para la dosificación

Como punto de partida para decidir las cantidades de los elementos básicos del mortero, cemento y árido, se toman las recomendaciones de la EFNARC (Federación europea dedicada a sistemas específicos de hormigón y productos químicos), quién elaboró el documento "*Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunneling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock*", [53] donde se comentaba el fenómeno de la inestabilidad del terreno blando o rocoso en el espacio anular entre terreno excavado y dovelas de hormigón para el caso de empleo de las TBM de escudo, junto a las directrices habituales y ampliamente empleadas en España de la EHE [34]. En el documento se establecen diferentes especificaciones sobre los materiales que pueden servir de relleno de este espacio anular, indicando que para los materiales hormigonados el cemento en ningún caso podría ser inferior a 300 kg/m<sup>3</sup> de hormigón. A continuación, se comentan de manera individualizada los materiales considerados:

✓ Cemento

El cemento, según el documento anterior de la EFNARC, no puede ser inferior en ningún caso a los 300 kg/m<sup>3</sup>. De otro modo, hay que recordar que una de las premisas de partida del mortero es que este resulte compresible, de modo que se trata de encontrar un material con una densidad baja y que resulte ligero, aunque esto pueda suponer una pérdida de resistencia estructural, cualidad que de otra parte no es imprescindible para este caso concreto de aplicación. De este modo, se ha decidido fijar la cantidad de cemento para las dosificaciones a ensayar en 380 kg/m<sup>3</sup>, de modo que cumpla la recomendación de la EFNARC, pero no contribuya a obtener una mezcla excesivamente pesada o densa. Dicha cantidad, cumpliría también con las especificaciones consideradas en la EHE [34].

Sin embargo, en el caso del cemento no solo hay que valorar la cantidad de cemento a incluir, sino también el tipo de cemento que se pretende utilizar. En este sentido, se han valorado los 5 tipos que existen (CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV y CEM V). En este caso, y para escoger la mejor opción, se seleccionarán 3 de ellos para someter a ensayo. Dado que uno de los factores limitantes en esta tesis es el potencial de bombeo de la mezcla, es importante aparte de considerar la fluidez necesaria, tener en cuenta el tamaño de los gránulos de cemento. De este modo, se escogerán aquellos de mayor finura de manera que no generen atascos en el conducto de bombeo.

Estos cementos serán el CEM 52,5 N, CEM 52,5 R y CEM 42,5 R. La diferencia entre los dos cementos de resistencia características de 52,5 MPa radica en que uno adquirirá las resistencias iniciales de manera rápida, y otro lo hará de manera normal. Se debe entender, que dichos cementos serán en todo caso el material base con el que se procederá a mezclar, cuando corresponda, el humo de sílice o las cenizas volantes. Una vez se tenga la pasta definitiva cementante, se le dará una nomenclatura según se indica en la Instrucción para la Recepción de Cementos RC-16.

✓ Árido

En base a la cantidad de cemento añadida a la mezcla se considera el árido que se debe incorporar al mortero. Como se ha comentado anteriormente, para que el material pueda cumplir con las propiedades compresibles no deberá contar con una elevada densidad ni resultar muy pesado, de modo que se tratará de incorporar la mínima cantidad posible de árido. Así mismo hay que recordar que uno de los componentes clave de la mezcla será el NFU, el cual va a sustituir necesariamente de manera parcial, o incluso total el árido dispuesto en el mortero.

Para determinar la cantidad adicionada de árido se ha tomado como guía la proporción en volumen respecto al total, considerándola conservadora para conseguir realmente la función que se le exige, la cual podría estar cercana al 50 %.

Teniendo en cuenta la densidad de la arena empleada habitualmente en la fabricación de morteros, esta cantidad estaría cercana a los 1.750 kg para fabricar un metro cúbico del nuevo mortero. Dicha cantidad, surgirá en conjunto de la arena 0/4 y 0/2 empleada para la dosificación.

✓ Cenizas volantes y Humo de Sílice

Como se ha comentado anteriormente, estos materiales se van a emplear como sustitutos parciales del cemento. El objetivo, es conseguir una pasta de cemento con unas prestaciones mejoradas respecto una convencional, desde un punto de vista técnico. La cantidad a añadir de cada una de las adiciones, se decidirá siempre en función de las indicaciones que aporte la normativa en vigor al respecto, la cual se ha adjuntado en el apartado anterior.

En este sentido, cuando las Cenizas volantes entren en acción, se añadirán sustituyendo hasta un 35% del cemento base añadido. De este modo, se dará pie a una pasta de "Cemento Portland con cenizas volantes", de nomenclatura base CEM

II/B-V. Por lo que respecta al Humo de sílice, se añadirá apurando su máximo porcentaje de aplicación, esto es, un 10% sobre el cemento base añadido. En dicho caso, el cemento sería CEM II/A-D. De este modo se ensayarán tres pastas de cemento, una formada únicamente por cemento convencional, y otras dos mixtas entre cemento convencional y cenizas volantes en un caso, y humo de sílice en el otro.

✓ Caucho NFU

Como se ha indicado en puntos anteriores la función principal del neumático fuera de uso en esta tesis es conferir a la mezcla las propiedades compresibles necesarias para que se desempeñe perfectamente como relleno del espacio anular entre terreno excavado y dovelas de hormigón. El NFU entrará en la mezcla como sustituto del árido, en este caso arena, convencional.

La introducción de NFU en el mortero supone una pérdida necesaria de resistencias estructurales, no obstante este aspecto no es decisivo en el desarrollo de la tesis, pesando más la consecución de una mezcla elástica que una mezcla resistente. Además, la menor adherencia del caucho procedente de NFU con la pasta de cemento introduce en el mortero mayor una cantidad mayor de aire ocluido, aspecto favorable ya que para garantizar la compresibilidad de la mezcla se pretende conseguir un mortero que una vez fraguado tenga más de un 25 % de aire ocluido. De este modo los porcentajes de sustitución de árido por NFU serán muy elevados, considerando tres distintos del 50, 75 y 100 %.

✓ Aditivo inclusor de aire

El aditivo inclusor de aire permite introducir una cantidad controlada de aire en la mezcla, de manera que una vez haya fraguado el mortero aumente la cantidad de huecos ocluidos. Con esta medida se pretende alcanzar el 25 % de volumen de aire en el mortero, factor que se ha fijado en las premisas iniciales de la tesis para lograr un material que maximice su compresibilidad.

El aditivo inclusor de aire resultará necesario para que el mortero endurecido consiga el suficiente aire ocluido para resultar verdaderamente compresible. De este modo se evidencia la necesidad de contar con este aditivo para dosificar el mortero, así pues, en las dosificaciones ensayadas se probará con el aditivo inclusor de aire

actuando en solitario, o con el aditivo inclusor en compañía de otros aditivos que se verán a continuación.

La cantidad de aditivo introducida será de 2,5% cuando se incluya en solitario, y de 1,5% cuando se incluya en la dosificación acompañado de otros aditivos.

✓ Aditivo plastificante/superplastificante

Esta tipología de aditivo se utiliza para mejorar las propiedades del mortero en estado fresco, incrementando de este modo sus atributos de trabajabilidad o bombeabilidad, al mismo tiempo que aumentan las resistencias mecánicas y la durabilidad del producto. Según la EHE, el cometido de este aditivo es disminuir el contenido en agua de la mezcla sin variar la consistencia, o bien incrementar el asiento en cono de Abrams sin variar el contenido en agua.

Se propone probar la introducción del aditivo junto al aditivo inclusor de aire, no actuando en ninguna de las dosificaciones probadas en solitario debido a la necesidad del primero para conseguir las propiedades de compresibilidad del mortero. La cantidad de aditivo plastificante/superplastificante añadida al mortero será de 1% sobre la mezcla.

✓ Aditivo modificador de fraguado

En el marco de esta tesis, donde se necesita que la mezcla introducida en el relleno anular formado por terreno excavado y dovelas de hormigón adquiera resistencias rápidamente para entrar en carga lo antes posible, serán los aditivos aceleradores de fraguado los empleados. De igual manera que ha sucedido en el caso anterior, este aditivo no se introducirá en solitario, actuando siempre en compañía del aditivo inclusor de aire, que se ha considerado como el más necesario de cara a conseguir en el mortero las propiedades deseadas y establecidas en las premisas de partida de la presente tesis.

Este aditivo se añadirá en una cantidad del 1% sobre el peso total del mortero.

b. Selección de variables y niveles definitivos de cada una de ellas

En este momento ya son conocidos los materiales que se van a emplear para realizar las dosificaciones, así como las cantidades que se van a introducir en la mezcla de cada uno de ellos. No obstante, sigue habiendo incógnitas acerca de las dosificaciones que se deben ensayar.

De este modo, habrá que especificar una serie de aspectos previamente a la elaboración de las dosificaciones a ensayar. En primer lugar, se deberá determinar qué resistencia característica del cemento se va a utilizar, independientemente de que este actúe en solitario o junto a alguna de las adiciones consideradas. En segundo lugar, habrá que determinar qué pasta de cemento va a utilizarse (por pasta de cemento se entiende el cemento convencional más la adición incluida). En tercer lugar, habrá que determinar el porcentaje de árido que se va a sustituir por NFU, y finalmente, se deberá especificar la manera en que se utilizarán los aditivos químicos incluidos en la dosificación.

En este punto se comentarán en mayor profundidad las variables de la dosificación que se han comentado en la introducción del apartado. Sobre cada una de las variables se indicarán también los niveles que la componen.

<b>Variable:</b>	Resistencia característica del cemento Portland utilizado
<b>Descripción:</b>	Tal y como se ha comentado anteriormente, se barajan tres tipologías de resistencia característica del cemento, cada una de ellas con características de adquisición rápida de resistencias o protección frente a ambientes agresivos. Estas serían: <i>CEM 52,5 N</i> , <i>CEM 52,5 R</i> y <i>CEM 42,5R</i> .
<b>Niveles:</b>	3

Tabla 1.17 Variable 1. Resistencia característica del cemento Portland empleado.

Fuente: Elaboración propia.

<b>Variable:</b>	Pasta de cemento
<b>Descripción:</b>	<p>Anteriormente se han comentado dos posibles materiales como adición a la pasta de cemento: cenizas volantes y humo de sílice. Cada uno de estos componentes aporta unas propiedades al mortero, si bien coinciden en algunas ocasiones hay otras en las que no, por este motivo se ensayarán ambas adiciones para determinar aquella que resulte más beneficiosa.</p> <p>Igualmente, también cabe considerar la posibilidad de que el añadido de estos materiales no mejore las propiedades que ya tiene de por sí el cemento convencional. Así pues, se valora también tomar como uno de los niveles de esta variable.</p>

	De este modo los niveles que componen la variable "Pasta de cemento definitiva" son tres: <i>pasta de cemento formada en exclusiva por cemento Portland (CEM I), pasta de cemento formada por cemento Portland y cenizas volantes (CEM II/B-V), y pasta de cemento formada por cemento Portland y humo de sílice (CEM II/A-D).</i>
<b>Niveles:</b>	3

Tabla 1.18 Variable 2. Pasta de cemento. Fuente: Elaboración propia.

<b>Variable:</b>	Aditivos químicos
<b>Descripción:</b>	<p>Especialmente se indica que el aditivo inclusor de aire es el que puede aportar mayores ventajas dentro del marco de esta tesis. De este modo, se propone que este aditivo esté presente en todas las dosificaciones ensayadas, actuando unas veces en solitario y otras en compañía de alguno de los otros dos aditivos evaluados: plastificante/superplastificante y modificador de fraguado.</p> <p>En este sentido, se determina que la variable "Aditivos químicos" presenta tres niveles: <i>Aditivo inclusor de aire actuando en solitario, aditivo inclusor de aire junto aditivo plastificante/superplastificante y aditivo inclusor de aire junto a modificador de fraguado.</i></p>
<b>Niveles:</b>	3

Tabla 1.19 Variable 3. Aditivos químicos. Fuente: Elaboración propia.

<b>Variable:</b>	Porcentaje de árido sustituido por NFU
<b>Descripción:</b>	<p>En el caso concreto de esta tesis, donde al mortero no se le exige ninguna competencia estructural, es posible sustituir el 100 % del árido 0/4 por caucho procedente de neumático fuera de uso, no obstante, y tratando en todo momento de obtener un producto de coste reducido, se ensayarán porcentajes de sustitución menores que permitan abaratar el producto. Así mismo se incide en que el verdadero ahorro económico reside en encontrar una solución global al problema de la excavación con tuneladora TBM de escudo en terrenos rocosos e inestables, por lo que tan sólo se</p>

	<p>aceptará una dosificación que no sustituya el 100 % de árido por NFU en caso de que el comportamiento elástico de ésta permita adquirir unas propiedades compresibles idénticas a las que se alcanzarían sustituyendo todo el árido por caucho de NFU.</p> <p>Por tanto, la variable “Porcentaje del árido sustituido por NFU” contará con tres niveles: “Sustitución del 50 % de árido, sustitución del 75 % del árido y sustitución del 100 % del árido”.</p>
<b>Niveles:</b>	3

Tabla 1.20 Variable 4. Porcentaje de sustitución de árido por NFU. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se concluye que para realizar las dosificaciones a ensayar existen 4 variables actuando cada una de ellas a tres niveles.

Resistencia característica del cemento Portland utilizado	CEM 52,5 N
	CEM 52,5 R
	CEM 42,5R
Pasta de cemento	Pasta de cemento formada en exclusiva por cemento Portland (CEM I)
	Pasta de cemento formada por cemento Portland y cenizas volantes (CEM II/B-V)
	Pasta de cemento formada por cemento Portland y Humo de sílice (CEM II/A-D)
Aditivos químicos	Aditivo inclusor de aire actuando en solitario
	Aditivo inclusor de aire junto aditivo plastificante/superplastificante
	Aditivo inclusor de aire junto a modificador de fraguado
Porcentaje de árido sustituido por NFU	Sustitución del 50 % del árido 0/4
	Sustitución del 75 % del árido 0/4
	Sustitución del 100 % del árido 0/4

Tabla 1.21 Síntesis final de variables y niveles de cada una de ellas para el diseño factorial de experimentos. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2 Diseño factorial de experimentos Taguchi – plan de ensayos de laboratorio

Para realizar el diseño de experimentos se recurre al modelo factorial de 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. [54].

Los diseños de Taguchi utilizan arreglos ortogonales que estiman los efectos de cada factor según la media y la variación de la respuesta. Un arreglo ortogonal representa un diseño balanceado, de modo que los niveles de los factores se ponderarían equitativamente. Así pues, cada uno de los factores se evalúa independientemente del resto de factores, de modo que el efecto originado por un factor no influye en la estimación de otro [54].

El modelo de Taguchi cuenta con una serie de modelos preestablecidos para un número concreto de variables y sus correspondientes niveles. Para estos casos existen matrices ya desarrolladas que permiten conocer tanto el número de experimentos o pruebas a realizar, como la combinación de variables y niveles que tiene lugar en cada uno de estos experimentos.

La situación de 4 variables a 3 niveles que se da en esta tesis se encuentra en el cupo de combinaciones que ya están desarrolladas, siendo la matriz base la siguiente:

L9 3 <sup>4</sup>				
Run	Columns			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tabla 1.22 Matriz de experimentos de Taguchi L9 (3<sup>4</sup>). Fuente: Elaboración propia.

Los 4 números (1, 2, 3 y 4) que hay bajo el término 'Columns' hacen referencia a las 4 variables que se han considerado para este caso particular. Bajo de cada uno de estos números se observa una columna de 9 unidades donde se repiten los números 1, 2 y 3, correspondientes a los 3 niveles que existen de cada una de las variables. Mientras, la columna 'Run' representa los experimentos, dosificaciones en este caso, que se deben llevar a cabo.

Para este caso particular de aplicación del método de Taguchi se han considerado de la siguiente manera las distintas variables y niveles.

		Variable			
		1	2	3	4
		Resistencia característica	Pasta de cemento	Aditivos químicos	%NFU
Nivel	1	CEM 52,5 N	CEM II/B-V	Incluser	100
	2	CEM 52,5 R	CEM II/A-D	Incluser + superplastificante	75
	3	CEM 42,5R	CEM I	Incluser + acelerante	50

Tabla 1.23 Variables y niveles para la aplicación del modelo de Taguchi. Fuente: Elaboración propia.

De este modo, el modelo Taguchi para este caso en concreto quedaría de la siguiente manera:

N <sup>o</sup> Dosificación	Resistencia característica	Pasta de cemento	Aditivos químicos	%NFU
1	CEM 52,5 N	CEM II/B-V	Incluser	100
2	CEM 52,5 N	CEM II/A-D	Incluser + superplastificante	75
3	CEM 52,5 N	CEM I	Incluser + acelerante	50
4	CEM 52,5 R	CEM II/B-V	Incluser + superplastificante	50

5	CEM 52,5 R	CEM II/A-D	Inclisor + acelerante	100
6	CEM 52,5 R	CEM I	Inclisor	75
7	CEM 42,5R	CEM II/B-V	Inclisor + acelerante	75
8	CEM 42,5R	CEM II/A-D	Inclisor	50
9	CEM 42,5R	CEM I	Inclisor + superplastificante	100

Tabla 1.24 Dosificaciones a ensayar a partir del modelo de Taguchi. Fuente:  
Elaboración propia.

Se comprobará que hay 9 propuestas de dosificación que combinan los niveles de cada una de las 4 variables consideradas, dando pie a 9 dosificaciones diferentes. Gracias al modelo factorial de experimentos de Taguchi se puede conocer la influencia que tendrá sobre el mortero cada uno de los materiales, así como la cantidad del mismo que se incluye, a partir de un número reducido de dosificaciones totalmente asumible.

Una vez conocemos la composición que tendrá cada una de ellas ya se pueden indicar exactamente los materiales y cantidades que compondrán cada una de estas 9 fórmulas. Como se ha indicado en otros puntos del presente documento, el criterio de dosificación empleado ha seguido el método de Bolomey, no obstante, dado que en el mortero se ha incluido un material como el caucho NFU, se han debido de adoptar algunas simplificaciones especialmente a la hora de ajustar la curva de Bolomey.

Por seguir un hilo coherente en la exposición del proceso de dosificación, a continuación, y a modo de paréntesis, se expondrán los resultados del ensayo granulométrico realizado a los materiales que van a formar parte de la mezcla. De este modo, los resultados obtenidos para el ensayo Tesis\_UCM\_1 han sido los siguientes:

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_1	<b>Propiedad medida:</b> Granulometría de los áridos empleados.
---------------------------------------	---

<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-1	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado).		
<b>Resultados:</b>			
Los resultados alcanzados en términos de análisis granulométrico han sido los siguientes			
TAMIZ	arena 0/4	arena 0/2	NFU
31,5	100	100	100
25	100	100	100
20	100	100	100
16	100	100	100
12	100	100	100
10	100	100	100
8	100	100	100
4	99	99	100
2	68	91	0
1	45	80	0
0,5	25	70	0
0,25	16	59	0
0,125	5	32	0
0,063	3	16	0
Modulo Granulométrico	3,42	1,69	5
humedad	8	8	2

Tabla 1.25 Resultados del ensayo Tesis\_UCAM\_1. Fuente: Elaboración propia.

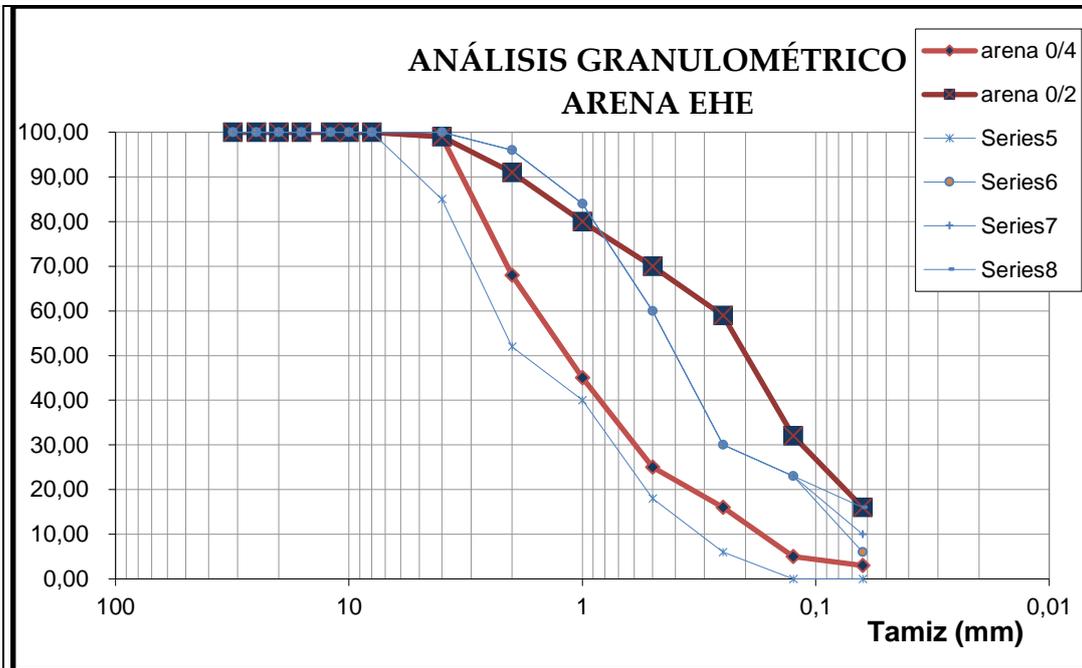


Figura 1.26 Curva granulométrica de las arenas según huso granulométrico EHE.  
Fuente: Elaboración propia.

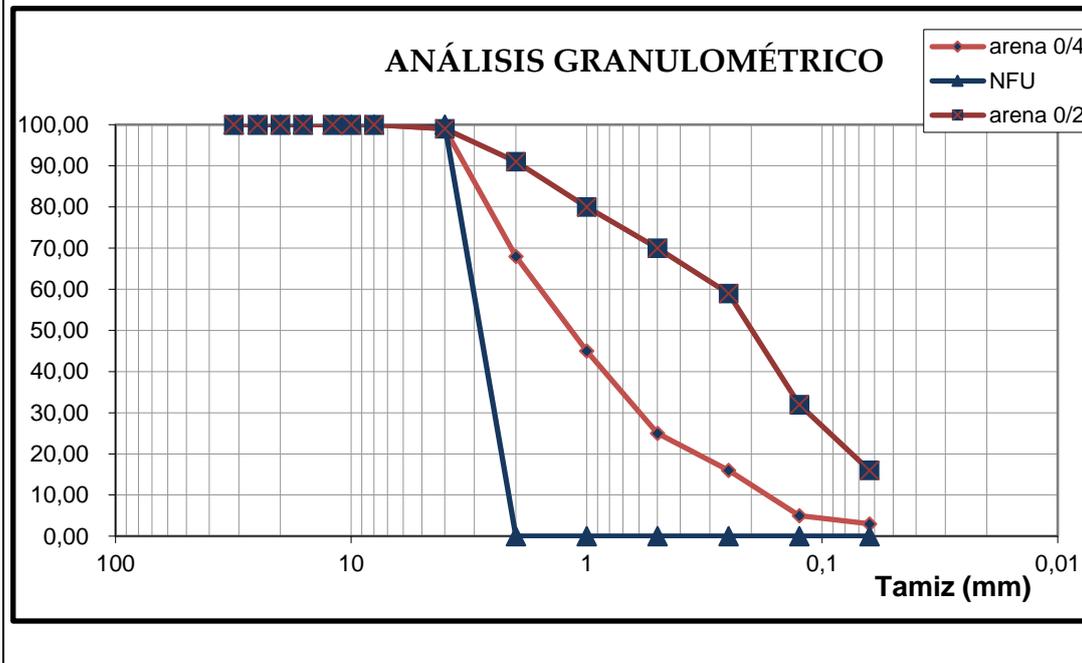


Figura 1.27 Curva granulométrica de los áridos. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, a la par que se desarrolló este primer ensayo, se obtuvieron todas las densidades de los diferentes materiales que forman parte de la dosificación. Estas se adjuntan en la siguiente tabla:

Material	Densidad (kg/m3)
Cemento (independiente del tipo)	3,1
Cenizas Volantes	2,66
Humo de Sílice	2,66
Arenas (ambas tipologías)	2,6
NFU	0,3

Figura 1.28 Resultados de densidades obtenidas.

Figura 1.29 Resultados globales ensayo Tesis\_UCAM\_1. Fuente: Elaboración propia.

Una vez comentado este ensayo y volviendo al proceso de dosificación, se adjunta a continuación la tabla resultante del proceso de formulación mediante el método Bolomey, así como la forma en que la granulometría de áridos resultante se ajusta a su curva.

			HUSOS RECOMENDADOS			
			TAMIZ	Bolomey 20	Bolomey 12	Prop. Tesis
valores de <b>a (Bolomey)</b>			<b>cemento (Kg)</b>			
Rodado	seco- plastico	<b>10</b>	<b>a (Bolomey)</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	
	Blanda	<b>11</b>	31,5	100	100	100
	Fluida	<b>12</b>	25	100	100	100
Machacado	Seco- plastico	<b>12</b>	20	100	100	100
	Blando	<b>13</b>	16	91	100	100
	Fluida	<b>14</b>	12	81	100	100
			10	75	93	100

8	68	84	100
4	52	64	100
2	41	49	83
1	33	39	77
0,5	28	32	73
0,25	24	26	67
0,125	21	23	54
0,063	19	20	46
<b>sup. especifica</b>	<b>835</b>	<b>928</b>	<b>2004</b>
%	100	111	240

Tabla 1.26 Título de la Tabla. Fuente: Elaboración propia a partir de [55]. Fuente: Elaboración propia.

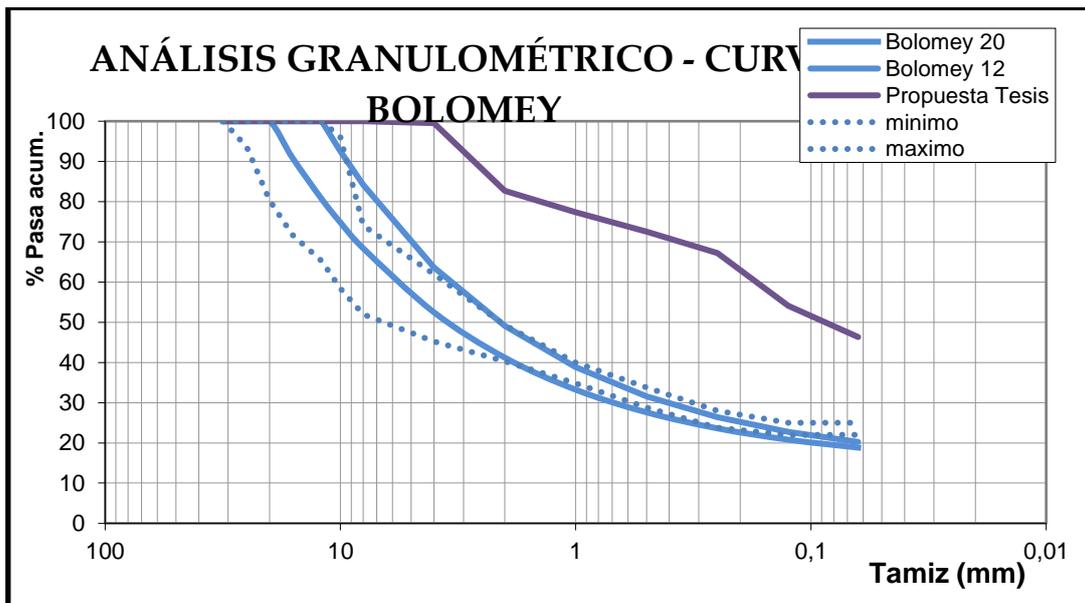


Figura 1.30 Título de la Figura. Fuente: Elaboración propia a partir de [56] y [55]

Como se puede ver en la gráfica anterior, la curva resultante de la granulometría empleada se desajusta claramente del huso que propone el método Bolomey. Esto sucede a causa del empleo de caucho NFU, ya que este material no sigue una granulometría uniforme si no que mantiene un tamaño fijo. Esta circunstancia es la que provoca el desvío de la curva respecto de la teórica de

Bolomey. No obstante, dado que la curva obtenida, al menos, sí replica la forma de la curva teórica de Bolomey aún desplazada de su área de acción, se ha considerado aceptable este resultado.

#### **Parámetros de control adicionales**

Adicionalmente, para el análisis de cada una de las dosificaciones que se van a someter a ensayo, y como medida adicional de control, se van a medir diferentes parámetros inherentes a la misma. Estos parámetros deberán ajustarse entre unos valores determinados, los cuáles deben entenderse como una pauta orientativa, no una regla que se deba cumplir en su totalidad. Dichos intervalos, son propuestos por el doctorando, como medida interna de control de dichas propiedades. A continuación, queda justificada su elección:

- Volumen de mortero, tamiz 1 mm

Este parámetro es un indicador del volumen del mortero que discurre por el tamiz de 1 mm. Es útil conocer dicho volumen porque ofrece información sobre que parte de la mezcla va a estar formada mayoritariamente por el cemento en sí y las partículas más finas de la arena. Dicha parte del mortero es la que mayor poder cohesionante va a tener, de forma que aporta información sobre la futura estabilidad del material una vez se trabaje en estado fresco. En este caso, donde se está añadiendo un material anómalo a la dosificación como el NFU, cobra mayor importancia conocer el valor de dicha variable.

El intervalo deseado se encuentra entre 727 – 827 l/m<sup>3</sup>.

- Contenido en finos inferior a 0,063

Como se ha comentado en otros puntos de la memoria, se va a requerir en el mortero una determinada viscosidad, que impida la flotación de las partículas de NFU hacia la superficie mientras la mezcla esté todavía en estado fresco. Dicha viscosidad, se conseguirá en gran medida gracias a los finos que aportará la arena triturada al mortero, y es por ello que se entiende como muy importante conocer el contenido en finos inferiores a 0,063 por metro cúbico de dosificación.

El intervalo deseado se encuentra entre 465 – 663 kg/m<sup>3</sup>.

- Volumen de arena en el mortero

En cuanto al volumen de arena en el mortero, se empleará dicho valor para controlar de nuevo la estabilidad de la mezcla. En algunas de las dosificaciones se

va a proceder a sustituir la totalidad del árido 0/4 por caucho NFU, de modo que, aunque las propiedades elásticas se vayan a ver claramente mejoradas, la estabilidad puede verse comprometida en algunos escenarios.

El intervalo deseado se encontrará entre 20 – 40 %.

- Relación de agua finos en volumen

De nuevo, en relación a la viscosidad deseada en la dosificación se va a volver a medir una propiedad con una alta influencia en ella, esto es, la relación de agua con los finos totales que va a tener la mezcla.

Dicho parámetro deberá encontrarse en el intervalo 0,75 – 1-

#### **Dosificaciones definitivas para plan de ensayos de laboratorio**

Una vez definidas las variables relevantes en la investigación y sus diferentes niveles, así como su combinación más representativa siguiendo los criterios estadísticos de la metodología de Taguchi, se presentan a continuación las dosificaciones definitivas a someter a ensayo. Para cada una de ellas, se indicarán también sus correspondientes parámetros adicionales de control:

#### **Nº Dosificación: 1**

DT_01			
Material		Unidades	Cantidad
CEM II/B-V 52,5 N		kg	363
Arena lavada (0/4)		kg	0
Arena triturada (0/2)		kg	530
Caucho NFU		kg	158
Agua		l	113
Aditivos	Inclusor	%	2,5

Tabla 1.27 DT\_01. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades del mortero			
Parámetros	Unidades	Valores	
		Deseados	Obtenidos
Volumen de mortero, tamiz 1 mm	l/m <sup>3</sup>	727-872	907,85
Contenido en finos inferior a 0,063	kg/m <sup>3</sup>	465-663	466,02
Volumen de arena en el mortero	%	20 – 40	16,78
Relación agua finos en volumen	-	0,75 – 1	0,24

Tabla 1.28 Parámetros de control DT\_01. Fuente: Elaboración propia.

**Nº Dosificación: 2**

DT_02			
Material	Unidades	Cantidad	
CEM II/A-D 52,5 N	kg	376	
Arena lavada (0/4)	kg	937,5	
Arena triturada (0/2)	kg	530	
Caucho NFU	kg	39	
Agua	l	113	
Aditivos	Inclusor	%	1,5
	Superplas.	%	1

Tabla 1.29 DT\_02. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades del mortero			
Parámetros	Unidades	Valores	
		Deseados	Obtenidos
Volumen de mortero, tamiz 1 mm	l/m <sup>3</sup>	727-872	759,62
Contenido en finos inferior a 0,063	kg/m <sup>3</sup>	465-663	480,89
Volumen de arena en el mortero	%	20 – 40	39,34
Relación agua finos en volumen	-	0,75 – 1	0,79

Tabla 1.30 Parámetros de control DT\_02. Fuente: Elaboración propia.

**Nº Dosificación: 3**

DT_03			
Material	Unidades	Cantidad	
CEM I 52,5 N	kg	380	
Arena lavada (0/4)	kg	625	
Arena triturada (0/2)	kg	530	
Caucho NFU	kg	79	
Agua	l	113	
Aditivos	Inclusor	%	1,5
	Acelerante	%	1

Tabla 1.31 DT\_03. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades del mortero			
Parámetros	Unidades	Valores	
		Deseados	Obtenidos
Volumen de mortero, tamiz 1 mm	<i>l/m3</i>	727-872	833,94
Contenido en finos inferior a 0,063	<i>kg/m3</i>	465-663	554,27
Volumen de arena en el mortero	%	20 – 40	29,98
Relación agua finos en volumen	-	0,75 – 1	0,47

Tabla 1.32 Parámetros de control DT\_03. Fuente: Elaboración propia.

**Nº Dosificación: 4**

DT_04			
Material	Unidades	Cantidad	
CEM II/B-V 52,5 R	<i>kg</i>	366	
Arena lavada (0/4)	<i>kg</i>	625	
Arena triturada (0/2)	<i>kg</i>	530	
Caucho NFU	<i>kg</i>	78	
Agua	<i>l</i>	113	
Aditivos	Incluser	%	1,5
	Superplas.	%	1

Tabla 1.33 DT\_04. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades del mortero			
Parámetros	Unidades	Valores	
		Deseados	Obtenidos
Volumen de mortero, tamiz 1 mm	<i>l/m3</i>	727-872	784,82
Contenido en finos inferior a 0,063	<i>kg/m3</i>	465-663	403,27
Volumen de arena en el mortero	%	20 – 40	31,86
Relación agua finos en volumen	-	0,75 – 1	0,54

Tabla 1.34 Parámetros de control DT\_04. Fuente: Elaboración propia.

**Nº Dosificación: 5**

DT_05
-------

Material	Unidades	Cantidad	
CEM II/A-D 52,5 R	kg	376	
Arena lavada (0/4)	kg	0	
Arena triturada (0/2)	kg	530	
Caucho NFU	kg	158	
Agua	l	113	
Aditivos	Inclisor	%	1,5
	Acelerante	%	1

Tabla 1.35 DT\_05. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades del mortero			
Parámetros	Unidades	Valores	
		Deseados	Obtenidos
Volumen de mortero, tamiz 1 mm	l/m <sup>3</sup>	727-872	940,5
Contenido en finos inferior a 0,063	kg/m <sup>3</sup>	465-663	573,02
Volumen de arena en el mortero	%	20 – 40	16,2
Relación agua finos en volumen	-	0,75 – 1	0,23

Tabla 1.36 Parámetros de control DT\_05. Fuente: Elaboración propia.

**Nº Dosificación: 6**

DT_06			
Material	Unidades	Cantidad	
CEM I 52,5 R	kg	380	
Arena lavada (0/4)	kg	937,5	
Arena triturada (0/2)	kg	530	
Caucho NFU	kg	39	
Agua	l	113	
Aditivos	Inclisor	%	2,5

Tabla 1.37 DT\_06. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades del mortero		
Parámetros	Unidades	Valores

		Deseados	Obtenidos
Volumen de mortero, tamiz 1 mm	<i>l/m3</i>	727-872	772,43
Contenido en finos inferior a 0,063	<i>kg/m3</i>	465-663	522,89
Volumen de arena en el mortero	%	20 – 40	38,69
Relación agua finos en volumen	-	0,75 – 1	0,75

Tabla 1.38 Parámetros de control DT\_06. Fuente: Elaboración propia.

**Nº Dosificación: 7**

DT_07			
Material	Unidades	Cantidad	
CEM II/B-V 42,5 R	<i>kg</i>	366	
Arena lavada (0/4)	<i>kg</i>	937,5	
Arena triturada (0/2)	<i>kg</i>	530	
Caucho NFU	<i>kg</i>	39	
Agua	<i>l</i>	113	
Aditivos	Incluser	%	1,5
	Acelerante	%	1

Tabla 1.39 DT\_07. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades del mortero			
Parámetros	Unidades	Valores	
		Deseados	Obtenidos
Volumen de mortero, tamiz 1 mm	<i>l/m3</i>	727-872	726,65
Contenido en finos inferior a 0,063	<i>kg/m3</i>	465-663	372,89
Volumen de arena en el mortero	%	20 – 40	41,13
Relación agua finos en volumen	-	0,75 – 1	0,91

Tabla 1.40 Parámetros de control DT\_07. Fuente: Elaboración propia.

**Nº Dosificación: 8**

DT_08			
Material		Unidades	Cantidad
CEM II/A-D 42,5 R		kg	376
Arena lavada (0/4)		kg	625
Arena triturada (0/2)		kg	530
Caucho NFU		kg	79
Agua		l	113
Aditivos	Inclusor	%	2,5

Tabla 1.41 DT\_08. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades del mortero			
Parámetros	Unidades	Valores	
		Deseados	Obtenidos
Volumen de mortero, tamiz 1 mm	l/m <sup>3</sup>	727-872	820,81
Contenido en finos inferior a 0,063	kg/m <sup>3</sup>	465-663	511,27
Volumen de arena en el mortero	%	20 – 40	30,46
Relación agua finos en volumen	-	0,75 – 1	0,49

Tabla 1.42 Parámetros de control DT\_08. Fuente: Elaboración propia.

**Nº Dosificación: 9**

DT_09			
Material		Unidades	Cantidad
CEM I 42,5 R		kg	380
Arena lavada (0/4)		kg	0
Arena triturada (0/2)		kg	530
Caucho NFU		kg	158
Agua		l	113
Aditivos	Inclusor	%	1,5
	Superplas.	%	1

Tabla 1.43 DT\_09. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades del mortero
-------------------------

Parámetros	Unidades	Valores	
		Deseados	Obtenidos
Volumen de mortero, tamiz 1 mm	<i>l/m3</i>	727-872	953,63
Contenido en finos inferior a 0,063	<i>kg/m3</i>	465-663	616,02
Volumen de arena en el mortero	%	20 – 40	15,98
Relación agua finos en volumen	-	0,75 – 1	0,22

Tabla 1.44 Parámetros de control DT\_09. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se adjunta la tabla de dosificación general, donde se pueden comprobar todos los materiales que se van a emplear en la campaña de ensayos de laboratorio, así como las cantidades resultantes de cada uno de ellos en función de cada dosificación:

Material	Ud.	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	DOSIFICACIONES									
			DT_ 01	DT_ 02	DT_ 03	DT_ 04	DT_ 05	DT_ 06	DT_ 07	DT_ 08	DT_ 09	
CEM 52,5 N	<i>kg</i>	3,1	230	338	380	-	-	-	-	-	-	
CEM 52,5 R	<i>kg</i>	3,1	-	-	-	230	338	380	-	-	-	
CEM 42,5 R	<i>kg</i>	3,1	-	-	-	-	-	-	230	338	380	
Humo de Sílice	<i>kg</i>	2,6	-	38	-	-	38	-	-	38	-	
Cenizas Volantes	<i>kg</i>	2,6	133	-	-	133	-	-	133	-	-	
Arena lavada (0/4)	<i>kg</i>	2,66	-	937, 5	625	625	-	937, 5	937, 5	625	-	
Arena triturada (0/2)	<i>kg</i>	2,66	530	530	530	530	530	530	530	530	530	
Caucho NFU	<i>kg</i>	0,3	158	39	79	79	158	39	39	79	158	
Agua	<i>l</i>	1	113	113	113	113	113	113	113	113	113	
Aditivos	Incluser	%	-	2,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5
	Superplast ificante	%	-	-	1	-	1	-	-	-	-	1
	Acelerante	%	-	-	-	1	-	1	-	1	-	-

Tabla 1.45 Recopilación de dosificaciones a ensayar. Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3 Ejecución del plan de ensayos de laboratorio y obtención de resultados

En el presente apartado se van a recopilar los resultados alcanzados por cada una de las dosificaciones planteadas, en cada uno de los ensayos seleccionados. Por cada ensayo, se aportará además una valoración acerca de los resultados obtenidos, tratando de analizar de forma razonada los valores obtenidos en función de la dosificación planteada. Así mismo, y en el momento en que cada ensayo haya sido evaluado, se van a trazar comparativas entre los resultados alcanzados por las dosificaciones entre 2 o más ensayos donde los resultados puedan tener correlación. Especialmente, se analizarán de forma conjunta aquellos ensayos con una incidencia notable en las propiedades compresibles y bombeables del nuevo mortero a desarrollar.

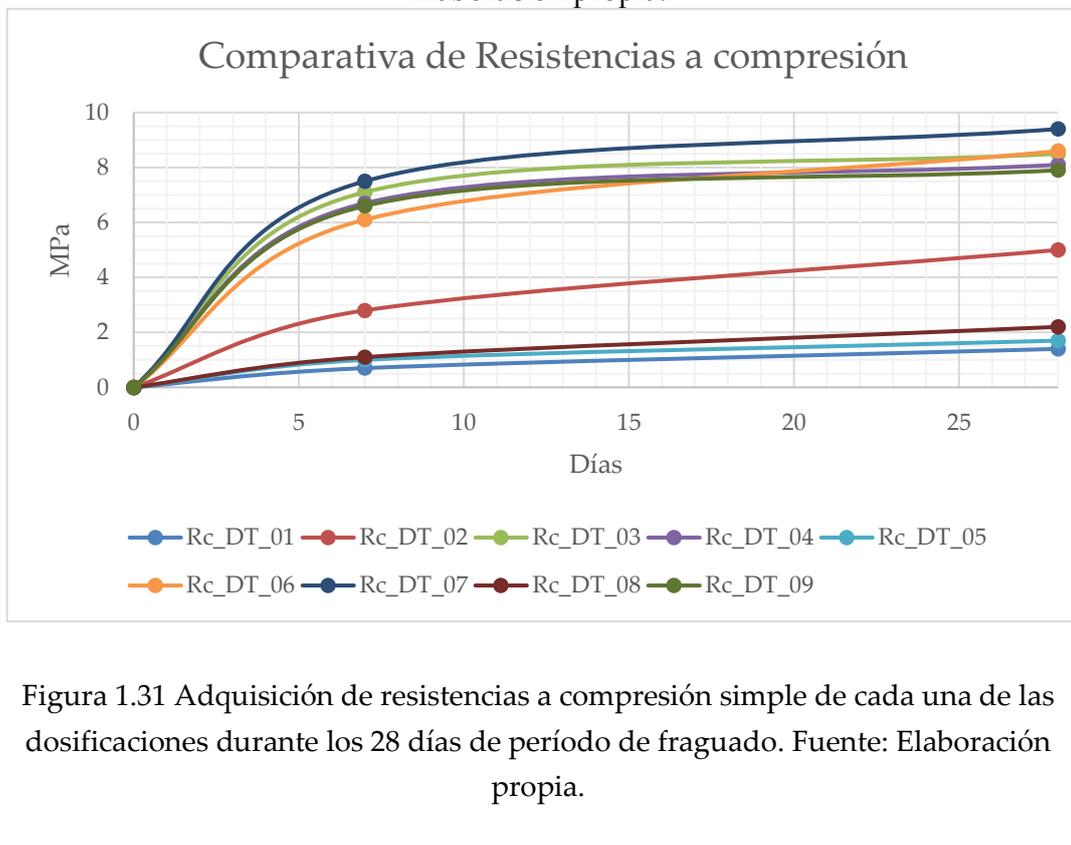
Resultados de laboratorio

Los resultados obtenidos en la campaña de ensayos han sido los siguientes:

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_2	<b>Propiedad medida:</b> Compresión simple y flexo tracción del mortero.																
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-11	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.																
<p><b>Resultados:</b></p> <p><b><u>Ensayo de Resistencia a compresión simple:</u></b> se dispone a continuación la tabla de resultados, así como la representación gráfica de los mismos. Dicha representación, es especialmente importante en este punto, pues permite visualizar la adquisición de resistencias de cada una de las dosificaciones durante los 28 días que dura el período de fraguado.</p>																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Ensayo de Resistencia a compresión (Mpa)</th> </tr> <tr> <th></th> <th>7 días</th> <th>28 días</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DT_01</td> <td>0,7</td> <td>1,4</td> </tr> <tr> <td>DT_02</td> <td>2,8</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>DT_03</td> <td>7,1</td> <td>8,5</td> </tr> </tbody> </table>			Ensayo de Resistencia a compresión (Mpa)				7 días	28 días	DT_01	0,7	1,4	DT_02	2,8	5	DT_03	7,1	8,5
Ensayo de Resistencia a compresión (Mpa)																	
	7 días	28 días															
DT_01	0,7	1,4															
DT_02	2,8	5															
DT_03	7,1	8,5															

DT_04	6,7	7,5
DT_05	1	1,7
DT_06	6,1	8,6
DT_07	7,5	9,4
DT_08	1,1	2,2
DT_09	6,6	7,9

Tabla 1.46 Resultado del ensayo de resistencia a compresión simple. Fuente: Elaboración propia.



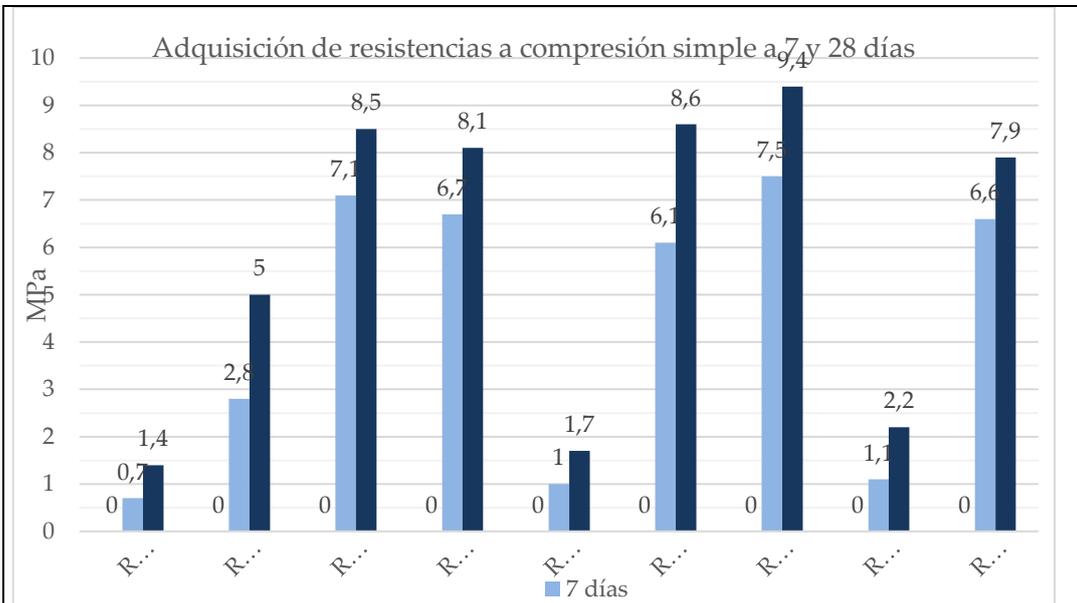


Figura 1.32 Comparativa de la adquisición de resistencias a compresión simple del mortero a 7 y 28 días. Fuente: Elaboración propia.

**Ensayo de Resistencia a flexo tracción:** de igual forma a como se ha procedido en el caso anterior, se dispone a continuación la tabla de resultados, así como la representación gráfica de los mismos.

	Ensayo de Resistencia a flexotracción (Mpa)	
	7 días	28 días
DT_01	0,5	0,7
DT_02	1,2	2,8
DT_03	3	3,6
DT_04	2,4	2,5
DT_05	0,6	0,7
DT_06	2,7	2,8
DT_07	3,1	3,6
DT_08	0,5	0,9
DT_09	2,5	2,9

Tabla 1.47 Resultado del ensayo de resistencia a flexo tracción. Fuente: Elaboración propia.

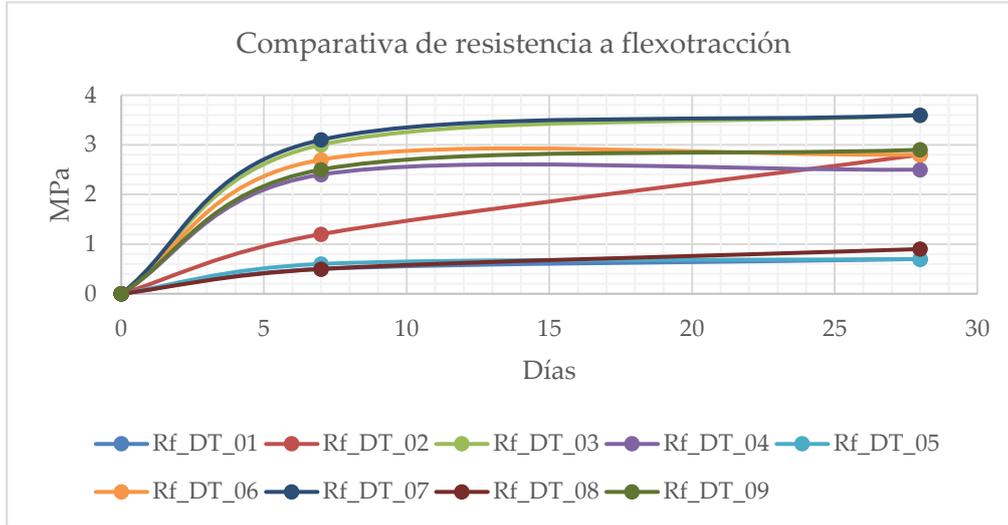


Figura 1.33 Adquisición de resistencias a flexo tracción de cada una de las dosificaciones durante los 28 días de período de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

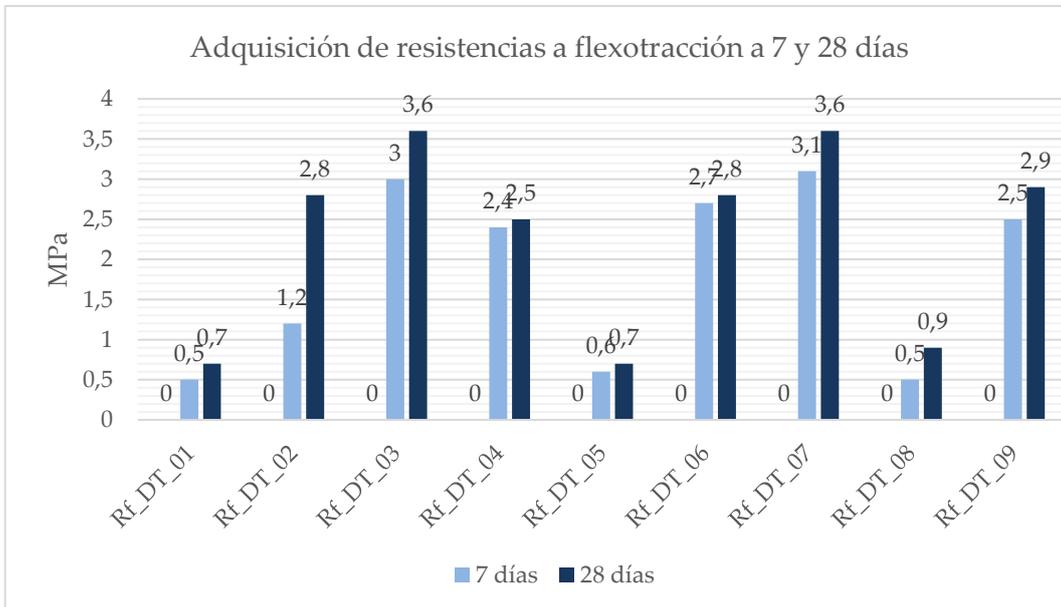


Figura 1.34 Comparativa de la adquisición de resistencias flexo tracción del mortero a 7 y 28 días. Fuente: Elaboración propia.

**Valoración:**

Los resultados anteriores ofrecen información de sumo interés acerca de las dosificaciones analizadas. Dado que son diversos los aspectos a analizar, se dividen en los siguientes ítems:

Valores de resistencia absoluta

Figura 1.35 Caso de flotabilidad del NFU.  
Fuente: Elaboración propia.

De forma general, se aprecia una cierta correspondencia entre los ensayos de resistencia a compresión y flexo tracción, encontrando que aquellas mezclas que ofrecen buenos resultados para un ensayo, los replican para el siguiente. Como era lógico pensar de antemano, aquellas mezclas con mayor cantidad de NFU en su interior son la que han proporcionado unos resultados más bajos en el ensayo. Dicha caída en la obtención de resistencias finales, se achaca



Figura 1.36 Planos de rotura en las probetas ensayadas.  
Fuente: Elaboración propia.

a dos factores fundamentalmente. 1) La mucho menor capacidad portante del NFU frente a un árido convencional, pues la densidad de uno y otro es de 0,3 VS 2,66 kg/m<sup>3</sup>. Si bien esta consecuencia ya se preveía de antemano, pues la literatura científica habla en profundidad sobre ello, no existe de forma previa tanta información sobre la segunda cuestión. 2) La adherencia del NFU a la pasta de cemento es sumamente débil, en comparación a la adherencia que transmite un árido convencional. Dicha falta de adherencia, provoca dos cosas en la matriz interior de cemento. En primer lugar, provoca la formación de burbujas de aire en la interfaz matriz de cemento – NFU. Dichas burbujas de aire, se consideran una oclusión indeseada, que genera una discontinuidad interna en la matriz de hormigón idónea para generar puntos de falla. En segundo lugar, provoca que aun cuando no se haya formado aire, la

interfaz cemento – NFU actúe como un plano de rotura, propiciando que el material falle por dichos puntos de forma recurrente.

Por otra parte, se ha comprobado como aquellas dosificaciones que han incluido a modo de adición el Humo de Sílice no han obtenido buenos resultados en cuanto a resistencias mecánicas. El Humo de Sílice es una adición, por lo general, sumamente útil para incrementar la adquisición de resistencias mecánicas en hormigones y morteros, y sin embargo esta vez no ha funcionado de la forma esperada. Esto ha sucedido, porque el Humo de Sílice se utiliza de forma habitual para densificar la matriz interna de cemento, tratando de cerrar con las micro esferas de sílice todos los poros y pequeñas discontinuidades generadas en la matriz de mortero. Para materiales de alta densidad (cuando las resistencias mecánicas sí son decisivas) tiende a funcionar de una forma muy potente, pero para un material compresible, con tanta necesidad de aire ocluido de entorno un 25%, no ha resultado. Se concluye que la combinación de un mortero de tan baja densidad, con un material que ha tratado de potenciar la densidad en aquellos puntos donde sí se encontrasen continuidades en la matriz de cemento, no ha resultado efectivo. Se han obtenido mejores resultados en aquellas mezclas que han empleado cemento con Cenizas Volantes, o simplemente cemento en solitario.

#### Adquisición de resistencias

En cuanto a la velocidad en la adquisición de resistencias, no se ha apreciado una diferencia notable entre aquellas dosificaciones que llevaban incorporado acelerante de fraguado y aquellas que no lo llevaban (a excepción de la dosificación 2). Dicho resultado puede deberse al volumen de finos tan elevado que se ha dispuesto en las dosificaciones para conseguir una buena viscosidad



Figura 1.37 Ensayo de resistencia a flexo tracción. Fuente: Elaboración propia.

que asegurase la estabilidad del NFU dentro de la mezcla. Si bien las relaciones de A/C utilizadas no han sido extremadamente bajas (del orden de 0,3), un volumen de finos tan elevado tiende a absorber una cantidad de agua de suma importancia. Dicha absorción de agua, puede haber reducido la cantidad de agua efectiva en la dosificación (aquella que surge de la diferencia del agua añadida y el agua absorbida), y por tanto, haber restado a los aditivos campo de acción para poder aportar sus propiedades sobre el mortero. Por este motivo, es por el que se alcanzan rápidas resistencias iniciales de forma indistinta cuando se usa acelerante a cuando no se usa.

#### Síntesis

Si bien la adquisición de resistencias mecánicas elevadas no era una de las premisas básicas de partida de la investigación, es importante mencionar que una resistencia mínima se va a requerir para poder resistir la compatibilidad de convergencias impuesta por el terreno excavado. Es por esto, que los resultados de estos dos ensayos serán tanto más deseables cuanto mayores hayan sido los valores de resistencia adquiridos.

Tabla 1.48 Normativa de ensayo de compresión simple y flexo tracción del mortero. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_3	<b>Propiedad medida:</b> Compresión confinada del mortero.								
<b>Código de normativa:</b> No existe normativa al respecto.	<b>Título:</b> -								
<p><b>Resultados:</b></p> <p><u>Ensayo de Resistencia a compresión confinada y anillo de guarda:</u> de nuevo se adjuntará la tabla de resultados numéricos, acompañada de gráficas que permitan interpretar de forma visual los resultados. Para este caso, se trazará una comparativa visual entre los valores de resistencia a compresión confinada adquiridos, y la deformación del anillo de guarda dispuesto para su control</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td colspan="2">Ensayo de Resistencia a compresión confinada (Mpa)</td> <td colspan="2">Deformación con anillo de guarda (mm)</td> </tr> <tr> <td>7 días</td> <td>28 días</td> <td>7 días</td> <td>28 días</td> </tr> </table>		Ensayo de Resistencia a compresión confinada (Mpa)		Deformación con anillo de guarda (mm)		7 días	28 días	7 días	28 días
Ensayo de Resistencia a compresión confinada (Mpa)		Deformación con anillo de guarda (mm)							
7 días	28 días	7 días	28 días						

DT_01	81,9	104,1	2,26	2,23
DT_02	85	107,9	2,55	2,15
DT_03	94	152,3	0,52	0,57
DT_04	136,1	168,6	2,09	1,82
DT_05	86	126,6	0,27	1,13
DT_06	133,9	197,6	3,97	6,75
DT_07	133,1	205,6	1,67	2,97
DT_08	94,9	125,4	1,78	2,68
DT_09	61,5	133,1	2,21	2,37

Tabla 1.49 Resultado del ensayo de resistencia a compresión confinada. Fuente: Elaboración propia.

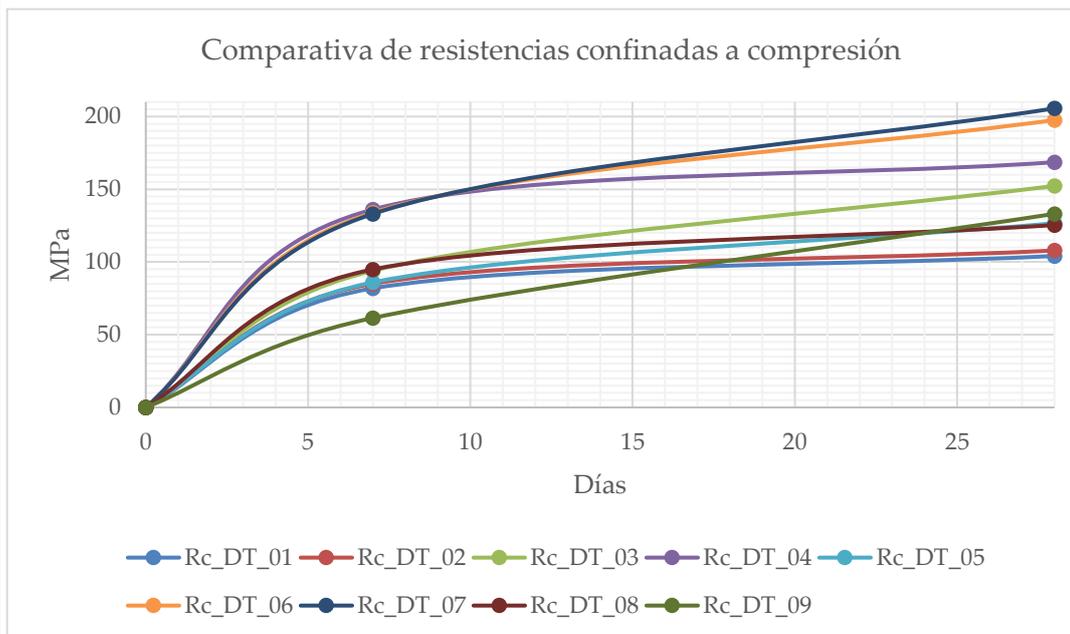


Figura 1.38 Adquisición de resistencias compresión confinada de cada una de las dosificaciones durante los 28 días de período de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

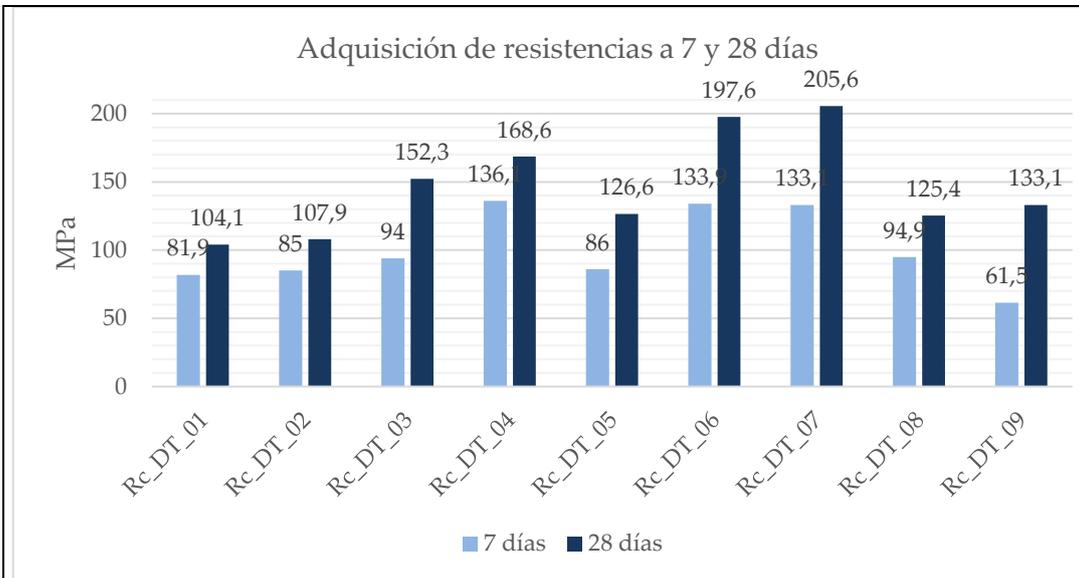


Figura 1.39 Comparativa de la adquisición de resistencias a compresión confinada del mortero a 7 y 28 días. Fuente: Elaboración propia.

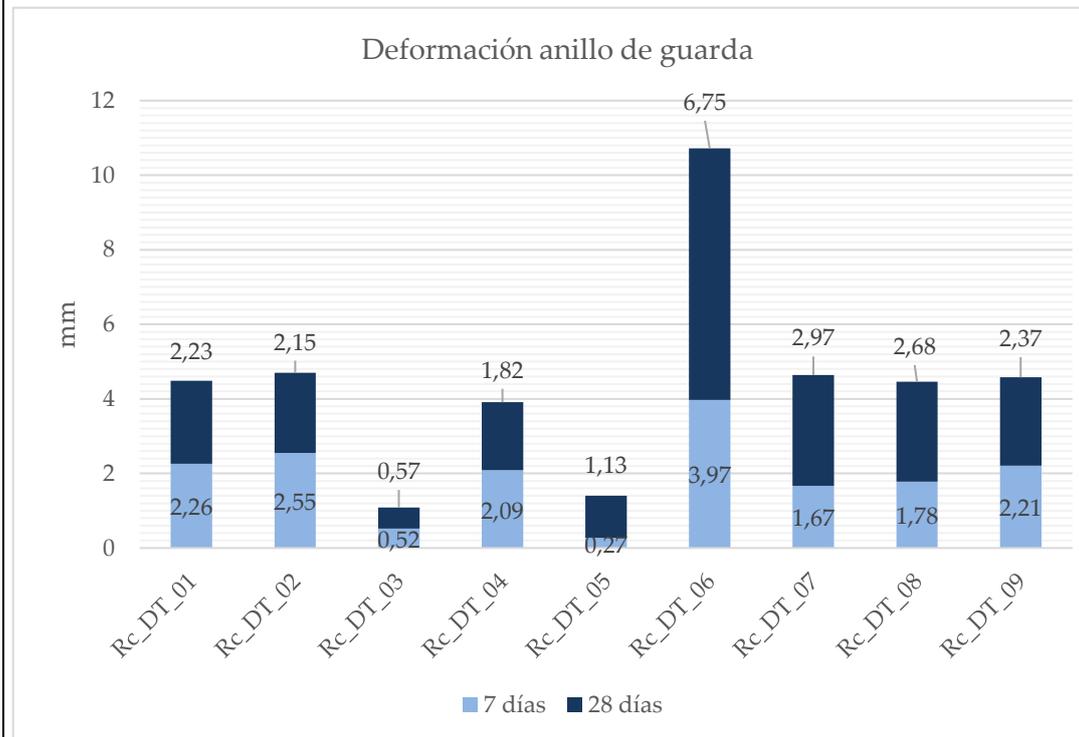


Figura 1.40 Comparativa de la deformación del anillo de guarda a 7 y 28 días. Fuente: Elaboración propia.

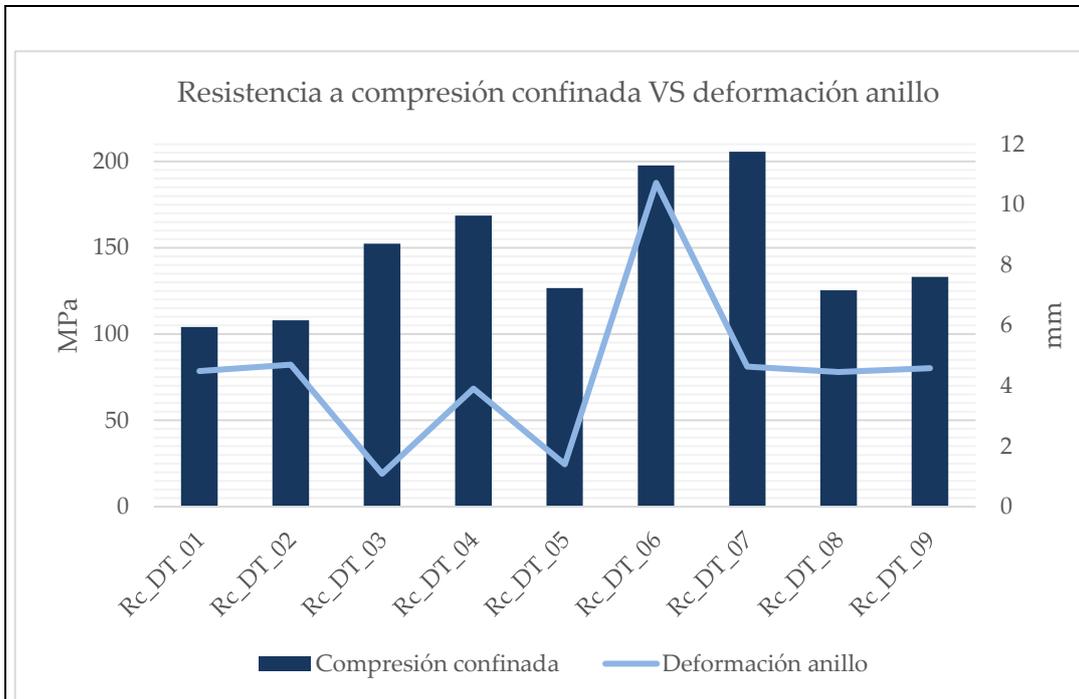


Figura 1.41 Resultados cruzados del ensayo de resistencia a compresión confinada, y la deformación del anillo de guarda. Fuente: Elaboración propia.

**Valoración:**

Los resultados del ensayo anterior se van a analizar desde la doble perspectiva que ofrece el poseer valores de resistencia a compresión confinada, así como la deformación del anillo de guarda.

Valores de resistencia absoluta

Se aprecia con claridad como las dosificaciones ensayadas replican el comportamiento respecto al ensayo de compresión simple precedente, siendo las mismas fórmulas aquellas que arrojan mejores resultados. En cambio, sí se ha detectado un muy notable incremento de los valores absolutos de resistencia a compresión, gracias a la situación de confinamiento aplicada. A modo de ejemplo, se puede ver como los 9,4 MPa a compresión simple alcanzados por la mezcla número 7, se han transformado en 205,6 MPa en este nuevo ensayo. Dicho incremento de valores de resistencia se considera muy positivo, pues la situación de confinamiento será en la que trabajará el mortero en su futura ubicación.

#### Adquisición de resistencias

En este sentido, sí se ha notado una variación respecto del patrón de comportamiento anterior, pues las dosificaciones han logrado – en porcentaje – una mayor adquisición de resistencia a partir del séptimo día de fraguado. Este hecho se ha asociado a la protección frente a la rotura transversal que ha ofrecido el refuerzo lateral ubicado para realizar el ensayo, pues ha mitigado el efecto de los planos de rotura o discontinuidades internas generados por la mala adherencia del NFU con el mortero.

#### Deformación anillo de guarda

Esta parte es la de mayor interés del ensayo, pues permite observar cual ha sido la deformación de la probeta confinada previa a la rotura. A la hora de valorar este ensayo, se ha considerado como positivo que la probeta de hormigón consiguiera una deformación notable previa a rotura, la cual estaría asociada a la adquisición de buenas propiedades elásticas por parte del mortero. En caso de que una determinada dosificación lograra una elevada resistencia a compresión confinada, pero muy poca deformación en el anillo, se podría entender que dicha dosificación mantiene todavía una rigidez alta, y que por tanto no sería óptima



Figura 1.42 Ensayo de resistencia a compresión confinada, con anillo de guarda al centro. Fuente: Elaboración propia.

para llevar a cabo la compatibilización de convergencias. Sería en cambio más deseable una dosificación que, aun alcanzando menores resistencias a la compresión confinada permitiera más deformación en el anillo, pues actuaría de una forma más idónea a la hora de compatibilizar las deformaciones del terreno. En este punto, destacan los resultados de la dosificación número 6, pues prácticamente duplica los valores de deformación respecto al resto de mezclas, manteniendo a la vez unos valores de resistencia a compresión confinada altos. En menor medida, otras dosificaciones como la número 7 también han alcanzado buenos resultados en este ensayo, pues consiguiendo muy altas resistencias (superiores a 200 MPa) han permitido deformaciones notables en el anillo.

#### Síntesis

A la hora de valorar los resultados de dicho ensayo, se valorará una relación de compromiso entre las resistencias alcanzadas y la deformación permitida en el anillo. Ambos factores jugarán un papel clave una vez el mortero se instale en su ubicación definitiva, y por tanto ambos se deberán analizar en las dosificaciones. Previo a valorar que dosificaciones resultan idóneas frente a otras en el presente ensayo, se valora de forma muy positiva los resultados generales desde esta doble perspectiva.

Tabla 1.50 Procedimiento adoptado para el ensayo de resistencia a compresión confinada. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_4	<b>Propiedad medida:</b> Módulo elástico.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 83316	<b>Título:</b> Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión

**Resultados:**

**Ensayo de módulo elástico del hormigón:** siguiendo las pautas anteriores, se muestran los valores absolutos, medidos en GPa, obtenidos para cada dosificación, y posteriormente se representan estos de forma visual.

	Módulo Elástico (GPa)
DT_01	7,5
DT_02	2,2
DT_03	5,7
DT_04	5,4
DT_05	1,9
DT_06	2,1
DT_07	9,4
DT_08	1,1
DT_09	5,1

Tabla 1.51 Resultado del ensayo de módulo elástico del mortero. Fuente: Elaboración propia.

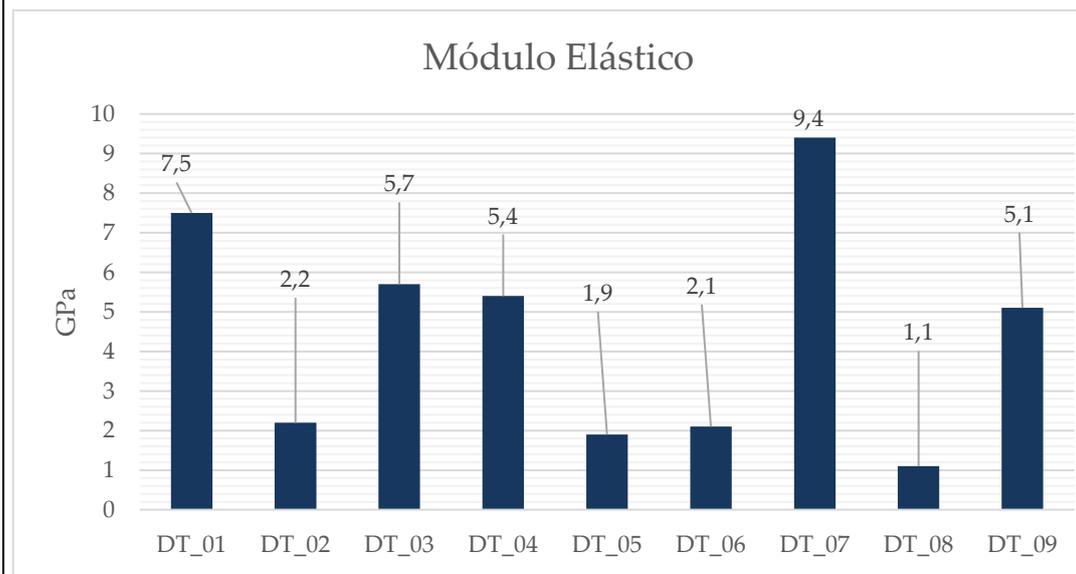


Figura 1.43 Módulo elástico del mortero para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

**Valoración:**

Tras una primera evaluación acerca de los resultados alcanzados en el ensayo de módulo elástico, se aprecia que no existen diferencias sustanciales entre los valores obtenidos por las diferentes dosificaciones. Los valores de módulo elástico se encuentran dentro del rango 1,14 – 1,65 GPa, siendo todos estos unos resultados que indican que las dosificaciones ensayadas cuentan con un buen comportamiento elástico (la elasticidad del material es tanto mayor cuanto más bajo es el valor del módulo elástico). Dentro de este intervalo de resultados, tampoco se encuentra una correlación clara entre el valor de módulo elástico obtenida y la cantidad de NFU añadida al mortero, pues los resultados divergen para cada caso en cuestión. A modo de ejemplo, se puede comprobar como los dos valores de módulo elástico más bajos (aquellas mezclas más elásticas), corresponden a las dosificaciones 5 y 8. Cada una de estas dos fórmulas sustituye una cantidad de arena 0/4 del 75 y 100% por NFU, de modo que tampoco se puede asociar de forma clara que una mayor cantidad de NFU tenga porqué ofrecer mejores resultados en cuanto a elasticidad. Así mismo, la mezcla con un mayor valor de módulo elástico es la dosificación 3, que cuenta, igual que la 8, con una sustitución de NFU del 75%. De cualquier modo, el rango de variación de resultados es tan reducido que se antoja complicado poder ubicar algún patrón de comportamiento respecto a esta variable.

Es interesante así mismo realizar una comparativa entre los valores obtenidos en este ensayo, con los que se han obtenido en la deformación del anillo de guarda en la prueba a compresión confinada. Realizar dicha comparación cruzada puede aportar información un tanto más relevante en cuanto al comportamiento elástico de las mezclas, pues en este caso se pueden correlacionar con una situación límite de rotura, aunque sea a compresión confinada. A continuación, se adjunta la comparativa de resultados.

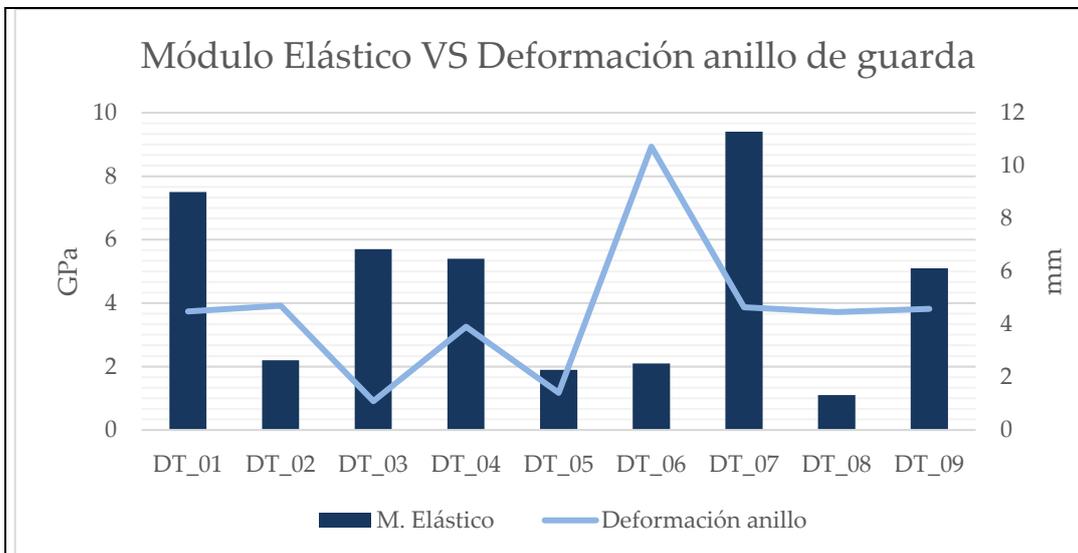


Figura 1.44 Comparativa del ensayo de módulo elástico con la deformación del anillo de guarda. Fuente: Elaboración propia.

A simple vista se puede comprobar como la dosificación 6 sería la que mejores resultados ofrece desde una perspectiva de la elasticidad del material. Pues además del excelente resultado cosechado en cuanto a la deformación conseguida en el anillo de guarda previa rotura, aún también un valor aceptable en cuanto a módulo elástico. Otras dosificaciones como la 7, con buen resultado en deformación de anillo, se puede observar que pierden en cuanto a la elasticidad a tenor de estos resultados.

### Síntesis

Los resultados del presente ensayo serán tanto más deseables cuanto menor sea el valor del módulo elástico alcanzado, pues esto supondrá que la mezcla resultará más elástica. Conseguir una buena elasticidad en el material, resultará decisivo para alcanzar una buena compatibilidad de convergencias entre el terreno excavado y la dovela de hormigón.

Tabla 1.52 Normativa de ensayo de módulo de elasticidad a compresión.

Número de ensayo: Tesis_UCAM_5	Propiedad medida: Consistencia del mortero.
-----------------------------------	---

<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-3	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)																																					
<p><b>Resultados:</b></p> <p><u>Ensayo de consistencia del hormigón:</u> previo a analizar los resultados alcanzados para el ensayo de consistencia, se indica la forma de interpretar los valores obtenidos. La consistencia del mortero se designará en función de los centímetros que descienda la mezcla sometida a ensayo en la mesa de sacudidas, designando: consistencia seca 0 a 2 cm, consistencia plástica 3 a 5 cm, consistencia blanda 6 a 9 cm, consistencia fluida de 10 a 15 cm, y consistencia líquida de 16 a 20 cm. Los valores alcanzados fueron los siguientes:</p> <table border="1" data-bbox="564 1025 1046 1626"> <thead> <tr> <th colspan="3" data-bbox="724 1025 1046 1077">Ensayo de consistencia</th> </tr> <tr> <th colspan="3" data-bbox="724 1077 1046 1128">en estado fresco (cm)</th> </tr> <tr> <th data-bbox="724 1128 884 1167">Medición</th> <th colspan="2" data-bbox="884 1128 1046 1167">Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="564 1167 724 1211">DT_01</td> <td data-bbox="724 1167 884 1211">16,9</td> <td data-bbox="884 1167 1046 1211"><i>Líquida</i></td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1211 724 1256">DT_02</td> <td data-bbox="724 1211 884 1256">15,8</td> <td data-bbox="884 1211 1046 1256"><i>Fluida</i></td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1256 724 1301">DT_03</td> <td data-bbox="724 1256 884 1301">16,1</td> <td data-bbox="884 1256 1046 1301"><i>Líquida</i></td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1301 724 1346">DT_04</td> <td data-bbox="724 1301 884 1346">15,8</td> <td data-bbox="884 1301 1046 1346"><i>Fluida</i></td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1346 724 1391">DT_05</td> <td data-bbox="724 1346 884 1391">15,7</td> <td data-bbox="884 1346 1046 1391"><i>Fluida</i></td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1391 724 1435">DT_06</td> <td data-bbox="724 1391 884 1435">16,6</td> <td data-bbox="884 1391 1046 1435"><i>Líquida</i></td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1435 724 1480">DT_07</td> <td data-bbox="724 1435 884 1480">17,3</td> <td data-bbox="884 1435 1046 1480"><i>Líquida</i></td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1480 724 1525">DT_08</td> <td data-bbox="724 1480 884 1525">16,3</td> <td data-bbox="884 1480 1046 1525"><i>Líquida</i></td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1525 724 1626">DT_09</td> <td data-bbox="724 1525 884 1626">19,8</td> <td data-bbox="884 1525 1046 1626"><i>Líquida</i></td> </tr> </tbody> </table> <p data-bbox="268 1637 1343 1720">Tabla 1.53 Resultado del ensayo de consistencia del mortero. Fuente: Elaboración propia.</p>			Ensayo de consistencia			en estado fresco (cm)			Medición	Resultado		DT_01	16,9	<i>Líquida</i>	DT_02	15,8	<i>Fluida</i>	DT_03	16,1	<i>Líquida</i>	DT_04	15,8	<i>Fluida</i>	DT_05	15,7	<i>Fluida</i>	DT_06	16,6	<i>Líquida</i>	DT_07	17,3	<i>Líquida</i>	DT_08	16,3	<i>Líquida</i>	DT_09	19,8	<i>Líquida</i>
Ensayo de consistencia																																						
en estado fresco (cm)																																						
Medición	Resultado																																					
DT_01	16,9	<i>Líquida</i>																																				
DT_02	15,8	<i>Fluida</i>																																				
DT_03	16,1	<i>Líquida</i>																																				
DT_04	15,8	<i>Fluida</i>																																				
DT_05	15,7	<i>Fluida</i>																																				
DT_06	16,6	<i>Líquida</i>																																				
DT_07	17,3	<i>Líquida</i>																																				
DT_08	16,3	<i>Líquida</i>																																				
DT_09	19,8	<i>Líquida</i>																																				

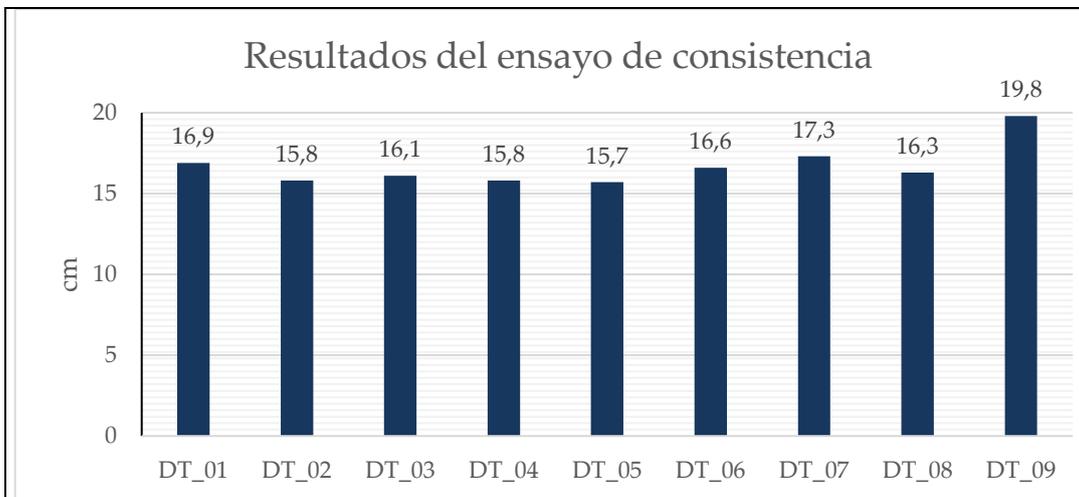


Figura 1.45 Consistencia del mortero para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

#### Valoración:

Los resultados del presente ensayo se han considerado positivos desde una perspectiva de la fluidez alcanzada. Como se ha comentado en anteriores puntos de la presente tesis doctoral, para que la mezcla de mortero se coloque de forma óptima en el hueco anular formado por la excavación se requiere de una fluidez suficiente, de forma que el bombeo y relleno se realice de forma idónea. En este caso, todas las mezclas han conseguido una consistencia fluida o líquida, de modo que este requisito quedará cumplido independientemente de cual sea la dosificación final seleccionada.



Figura 1.46 Ensayo en mesa de sacudidas. Fuente: Elaboración propia.

Analizando los valores de consistencia obtenidos por cada una de las dosificaciones anteriores se observa, como por otra parte era esperable, que el mejor resultado lo ha cosechado una dosificación (la 9) que incluía en su fórmula aditivo superplastificante. En este sentido, se ha visto como ante igualdad de adición de este aditivo, ha proporcionado un resultado más fluido aquella

dosificación cuya parte cementante estaba formada exclusivamente por cemento, y no por otras adiciones como las Cenizas Volantes o el Humo de Sílice. Esto ha sucedido a causa de la enorme demanda de agua (absorción) que generan estos dos materiales, de forma que el agua efectiva final ha resultado un tanto menor, y por ende, el material en estado fresco haya perdido consistencia.

#### Síntesis

Los resultados de este ensayo resultan más óptimos desde la perspectiva de la presente investigación a mayor fluidez obtenida. Si bien todas las fórmulas ensayadas cumplirán en estos términos, pues oscilan entre consistencias fluidas y líquidas, se primará en la valoración multicriterio aquellas que hayan conseguido un grado de fluidez superior, y se encuentren dentro del rango de la consistencia líquida.

Tabla 1.54 Normativa de ensayo de consistencia por mesa de sacudidas. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_6	<b>Propiedad medida:</b> Fluidez, viscosidad y capacidad de relleno.														
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 12350-9	<b>Título:</b> Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V.														
<p><b>Resultados:</b></p> <p><b>Ensayo de embudo en "V":</b> como se indica en la normativa preceptiva de este ensayo, se han tomado dos valores de vaciado de embudo para cada una de las dosificaciones. Como valor definitivo para cada fórmula se contabilizó la media entre ambas medidas. Los resultados son los que se adjuntan a continuación.</p>															
<table border="1"> <tr> <td colspan="3">Ensayo de embudo en</td> </tr> <tr> <td colspan="3">V (s)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Medición</td> <td>Resultado</td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">DT_01</td> <td style="text-align: center;">40,7</td> <td rowspan="2" style="text-align: center;">39,35</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">38</td> </tr> </table>			Ensayo de embudo en			V (s)				Medición	Resultado	DT_01	40,7	39,35	38
Ensayo de embudo en															
V (s)															
	Medición	Resultado													
DT_01	40,7	39,35													
	38														

DT_02	14,6	15,985
	17,37	
DT_03	12,63	13,085
	13,54	
DT_04	10,99	11,765
	12,54	
DT_05	13,2	14,235
	15,27	
DT_06	14,03	15,07
	16,11	
DT_07	9,25	9,79
	10,33	
DT_08	11,63	10,44
	9,25	
DT_09	7,63	8,37
	9,11	

Tabla 1.55 Resultado del ensayo de embudo en V. Fuente: Elaboración propia.

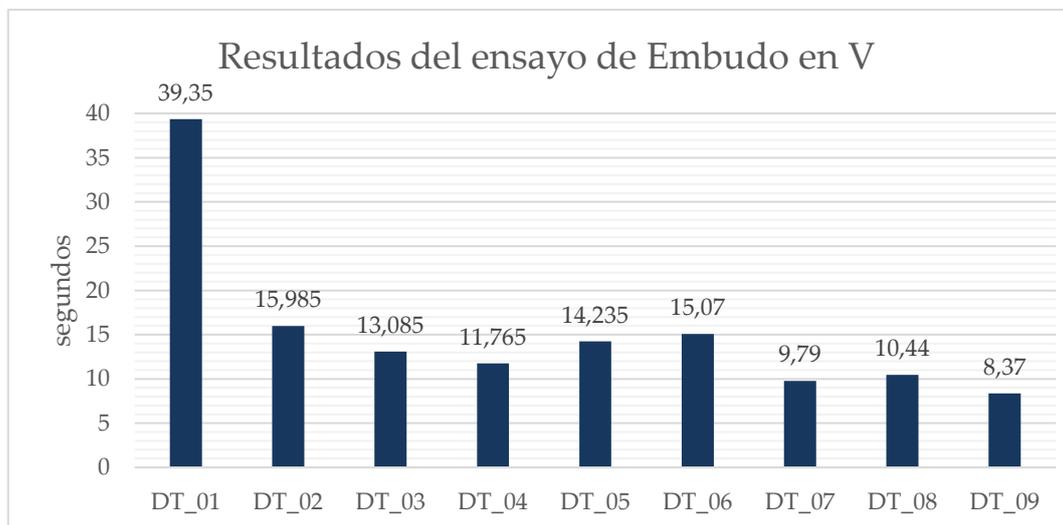


Figura 1.47 Resultados de Embudo en V para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

**Valoración:**

Previo a la valoración del presente ensayo, se debe indicar que en relación a los tiempos de vaciado del embudo estos se clasifican como muy satisfactorios si resultan menores a 8 segundos, y como aceptables si son inferiores a 25 segundos. No obstante, para este caso en concreto, se deben considerar además otros dos aspectos que pueden influir en gran medida en el análisis de los valores alcanzados. 1) Viscosidad del mortero. Como se ha comentado en otros puntos de la tesis, se ha buscado una viscosidad lo suficientemente alta en el mortero para garantizar la estabilidad del NFU dentro del material en estado fresco. Dicha viscosidad más alta de lo habitual, necesaria para evitar la flotación de dichas partículas de neumático, provoca que los tiempos de vaciado puedan resultar ligeramente superiores a una mezcla convencional. Y 2) Densidad del NFU. Si en este ensayo se mide la capacidad del mortero de vaciarse dentro del embudo, el peso propio del mortero influye directamente en la rapidez con la que el material pueda fluir a través de dicho equipo. En este sentido, y ante la clara reducción del peso propio del mortero que supone sustituir porciones tan elevadas de árido por caucho de neumático, es comprensible que la velocidad de vaciado del embudo se haya podido ver limitada en este sentido.

Analizando los resultados teniendo en cuenta todos los condicionantes anteriores, se detecta rápidamente como hay una dosificación – la 1 – que excede con claridad los límites marcados por el ensayo. En cambio, hay otras dos mezclas como la 9 y la 7 que oscilan muy cercanas a los 8 segundos de vaciado considerados como idóneos.

Por trazar un análisis más detallado del presente ensayo, se realiza a continuación una comparación de los resultados obtenidos con los resultados de consistencia, de forma que se puede ver de forma integrada los resultados de dos de los ensayos que mejor definen el comportamiento en estado fresco del mortero.

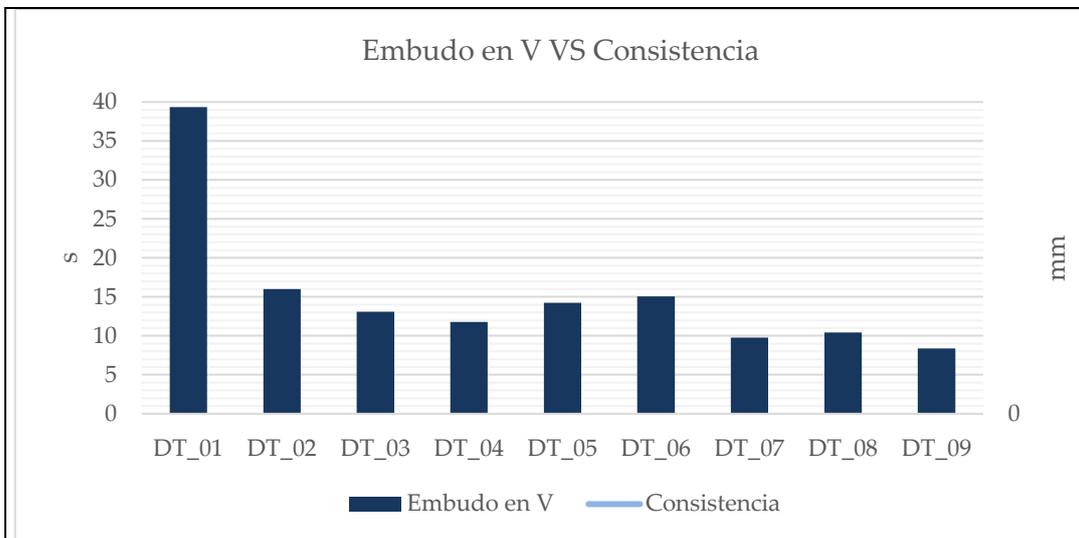


Figura 1.48 Comparativa de resultados entre el ensayo de Embudo en V y consistencia. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver del gráfico anterior, es especialmente positivo el resultado alcanzado para la dosificación 9. Pues de forma coherente, se puede comprobar como la dosificación que logra la mayor fluidez de todas las ensayadas, es también la que logra vaciar el Embudo en un tiempo menor. En segundo lugar, también destaca de forma positiva el resultado alcanzado para la dosificación 7, pues adquiere buenos resultados en términos de compromiso entre ambos ensayos.

Síntesis

Los resultados del presente ensayo se considerarán positivos a menor tiempo de vaciado del Embudo en V. Así mismo, el resultado que ha sobrepasado los 25 segundos de vaciado será descartado para la realización de la comparativa multicriterio.

Tabla 1.56 Normativa de ensayo de capacidad de relleno del mortero. Fuente: Elaboración propia.

Número de ensayo:	Propiedad medida:	Período de
Tesis_UCAM_7	trabajabilidad.	

<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-9	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco.																																											
<p><b>Resultados:</b></p> <p><u>Ensayo de período de trabajabilidad</u>": de forma idéntica a como se ha procedido en el caso anterior, y siendo esta una característica habitual de los ensayos que miden propiedades reológicas en hormigones y morteros, se vuelve a adoptar como resultado definitivo el valor medio de las dos medidas realizadas.</p> <table border="1" data-bbox="564 891 1046 1854"> <thead> <tr> <th colspan="3" data-bbox="727 891 1046 969">Trabajabilidad (h)</th> </tr> <tr> <th data-bbox="564 969 727 1014"></th> <th data-bbox="727 969 887 1014">Medición</th> <th data-bbox="887 969 1046 1014">Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="564 1014 727 1111" rowspan="2">DT_01</td> <td data-bbox="727 1014 887 1059">9,5</td> <td data-bbox="887 1014 1046 1111" rowspan="2">9,5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="727 1059 887 1111">9,5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1111 727 1207" rowspan="2">DT_02</td> <td data-bbox="727 1111 887 1155">5,75</td> <td data-bbox="887 1111 1046 1207" rowspan="2">5,625</td> </tr> <tr> <td data-bbox="727 1155 887 1207">5,5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1207 727 1303" rowspan="2">DT_03</td> <td data-bbox="727 1207 887 1252">7</td> <td data-bbox="887 1207 1046 1303" rowspan="2">7,165</td> </tr> <tr> <td data-bbox="727 1252 887 1303">7,33</td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1303 727 1400" rowspan="2">DT_04</td> <td data-bbox="727 1303 887 1348">10,5</td> <td data-bbox="887 1303 1046 1400" rowspan="2">10</td> </tr> <tr> <td data-bbox="727 1348 887 1400">9,5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1400 727 1496" rowspan="2">DT_05</td> <td data-bbox="727 1400 887 1444">10</td> <td data-bbox="887 1400 1046 1496" rowspan="2">10</td> </tr> <tr> <td data-bbox="727 1444 887 1496">10</td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1496 727 1592" rowspan="2">DT_06</td> <td data-bbox="727 1496 887 1541">8,33</td> <td data-bbox="887 1496 1046 1592" rowspan="2">7,915</td> </tr> <tr> <td data-bbox="727 1541 887 1592">7,5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1592 727 1688" rowspan="2">DT_07</td> <td data-bbox="727 1592 887 1637">9,5</td> <td data-bbox="887 1592 1046 1688" rowspan="2">9,5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="727 1637 887 1688">9,5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1688 727 1785" rowspan="2">DT_08</td> <td data-bbox="727 1688 887 1733">11,5</td> <td data-bbox="887 1688 1046 1785" rowspan="2">11,25</td> </tr> <tr> <td data-bbox="727 1733 887 1785">11</td> </tr> <tr> <td data-bbox="564 1785 727 1881" rowspan="2">DT_09</td> <td data-bbox="727 1785 887 1830">8,66</td> <td data-bbox="887 1785 1046 1881" rowspan="2">8,58</td> </tr> <tr> <td data-bbox="727 1830 887 1881">8,5</td> </tr> </tbody> </table>			Trabajabilidad (h)				Medición	Resultado	DT_01	9,5	9,5	9,5	DT_02	5,75	5,625	5,5	DT_03	7	7,165	7,33	DT_04	10,5	10	9,5	DT_05	10	10	10	DT_06	8,33	7,915	7,5	DT_07	9,5	9,5	9,5	DT_08	11,5	11,25	11	DT_09	8,66	8,58	8,5
Trabajabilidad (h)																																												
	Medición	Resultado																																										
DT_01	9,5	9,5																																										
	9,5																																											
DT_02	5,75	5,625																																										
	5,5																																											
DT_03	7	7,165																																										
	7,33																																											
DT_04	10,5	10																																										
	9,5																																											
DT_05	10	10																																										
	10																																											
DT_06	8,33	7,915																																										
	7,5																																											
DT_07	9,5	9,5																																										
	9,5																																											
DT_08	11,5	11,25																																										
	11																																											
DT_09	8,66	8,58																																										
	8,5																																											
Tabla 1.57 Resultado del ensayo de embudo en V. Fuente: Elaboración propia.																																												

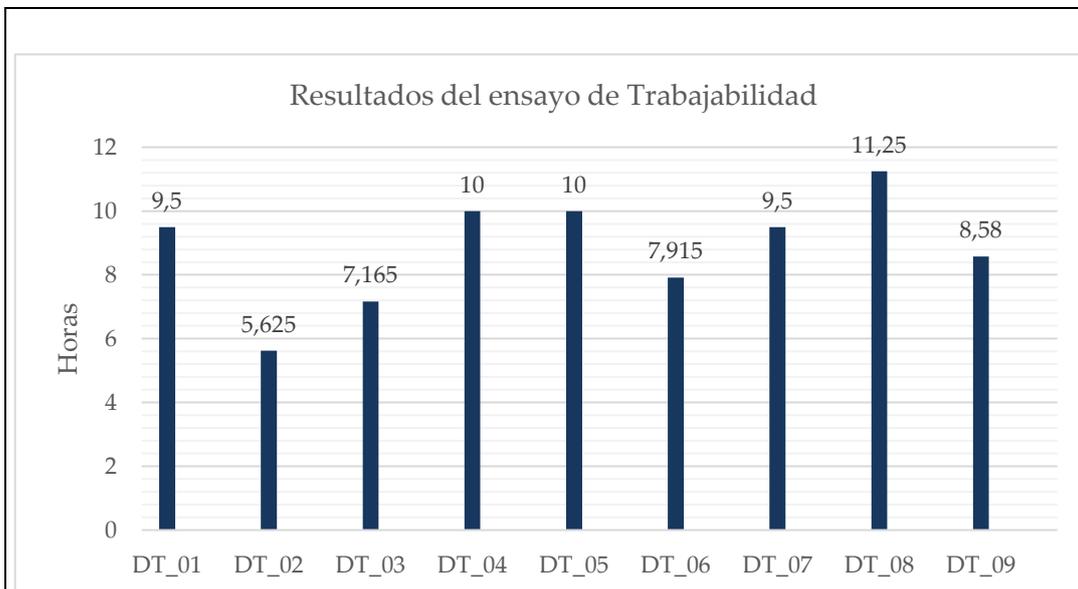


Figura 1.49 Resultados trabajabilidad para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

#### **Valoración:**

Analizar la trabajabilidad del material es importante de cara a conocer el tiempo del que se dispone para ubicar la mezcla de mortero en el interior del espacio anular, pues se requiere que la mezcla conceda el tiempo necesario para ser fabricada y transportada en la tuneladora de Escudo mientras excava, al mismo tiempo que se necesita que una vez colocada en el espacio anular endurezca de forma rápida. En este sentido, los resultados del presente ensayo adquirirán mayor profundidad en su análisis cuando se crucen con los resultados del ensayo de tiempo de fraguado. No obstante, se pueden trazar diferentes conclusiones inherentes al resultado de este ensayo.

#### Influencia de los aditivos añadidos en la dosificación

Se puede comprobar cómo no se ha obtenido una influencia directa con el uso de aditivos acelerante de fraguado en los resultados de la dosificación. La explicación a este suceso, se asocia a la importante cantidad de aditivo incluso de aire que se adicionó a cada una de las mezclas, la cual puede haber alterado en cierta medida el efecto de este aditivo. Se puede observar también que algunos de los resultados que mayores horas de trabajabilidad han logrado, se asocian a

mezclas que únicamente incorporan aditivo inclusor, de forma que sí se ha logrado cierta mejora en cuanto a los tiempos de endurecimiento cuando se añade acelerante o, en todo caso, superplastificante.

#### Síntesis

Los resultados del presente ensayo se evaluarán en conjunto a los obtenidos para el ensayo posterior, relacionado con los tiempos de inicio y final de fraguado.

Tabla 1.58 Normativa de ensayo de período de trabajabilidad. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_8	<b>Propiedad medida:</b> Tiempo de fraguado.		
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 480-2	<b>Título:</b> Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación del tiempo de fraguado.		
<b>Resultados:</b>			
<b>Ensayo de tiempo de fraguado":</b> en este caso, se debe indicar, que para cada dosificación se determinará el tiempo tanto de inicio de fraguado como de final del mismo.			
		Tiempo de fraguado (h)	
		Medición	Resultado
DT_01	Inicio	11	10,83
		10,66	
	Fin	24	22
		20	
DT_02	Inicio	4,8	4,565
		4,33	
	Fin	10	9,5
		9	
DT_03	Inicio	6	5,55
		5,1	
	Fin	8	8
		8	

			8	
DT_04	Inicio		9,1	9,475
			9,85	
	Fin		9,1	9,55
			10	
DT_05	Inicio		9,75	9,425
			9,1	
	Fin		21	20
			19	
DT_06	Inicio		8	8,25
			8,5	
	Fin		10,75	10,425
			10,1	
DT_07	Inicio		9,75	9,125
			8,5	
	Fin		12,5	12,25
			12	
DT_08	Inicio		11	10,75
			10,5	
	Fin		17	15,5
			14	
DT_09	Inicio		9	8,875
			8,75	
	Fin		10,9	10,95
			11	

Tabla 1.59 Resultado del ensayo de tiempo de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

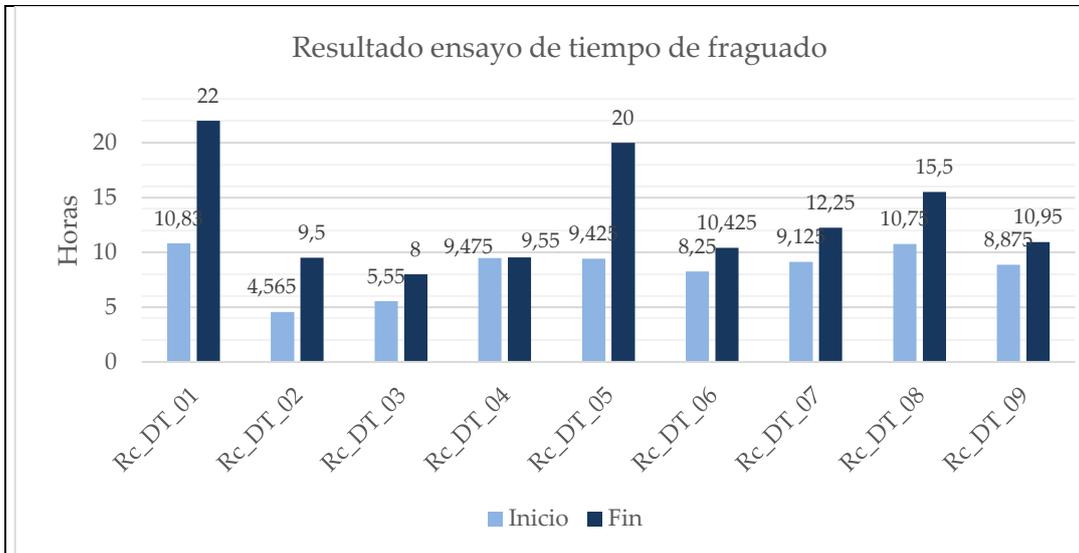


Figura 1.50 Resultados tiempo de fraguado para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

### Valoración:

Como se ha mencionado anteriormente la valoración de los resultados alcanzados para el presente ensayo se complementará con los valores obtenidos en el ensayo precedente, vinculado a las horas de trabajabilidad del mortero. No obstante, y por lo que respecta a este ensayo en concreto, se realizarán previamente algunas valoraciones.

#### Diferencia entre tiempos de inicio y final de fraguado

Desde un enfoque de condiciones perfectas, el mortero compresible diseñado en la presente tesis doctoral debiera aguantar unas horas su inicio de fraguado, de modo que dé tiempo a una correcta colocación y bombeo, pero en el momento en que este ha sido colocado en el espacio anular, debiera de fraguar y endurecer con toda la rapidez posible. Es por esto, que desde la perspectiva de los tiempos de fraguado una dosificación será tanto más óptima cuanto menos diferencia haya entre sus



Figura 1.51 Ejecución de ensayo de tiempo de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

tiempos de final e inicio de fraguado. En este sentido, algunas de las mezclas anteriores quedarán descartadas de cara a la valoración multi criterio a realizar, como por ejemplo la 1, la 5 y la 8, como casos más claros. Por el contrario, algunas de las dosificaciones, especialmente la 4, cumplirían a la perfección con dicho cometido.

#### Comparativa cruzada con el ensayo de trabajabilidad

A continuación, se va a adjuntar una tabla donde se integren los resultados de los ensayos de trabajabilidad y tiempos de fraguado, de modo que la valoración de los resultados de ambas pruebas se entregue de forma conjunta.

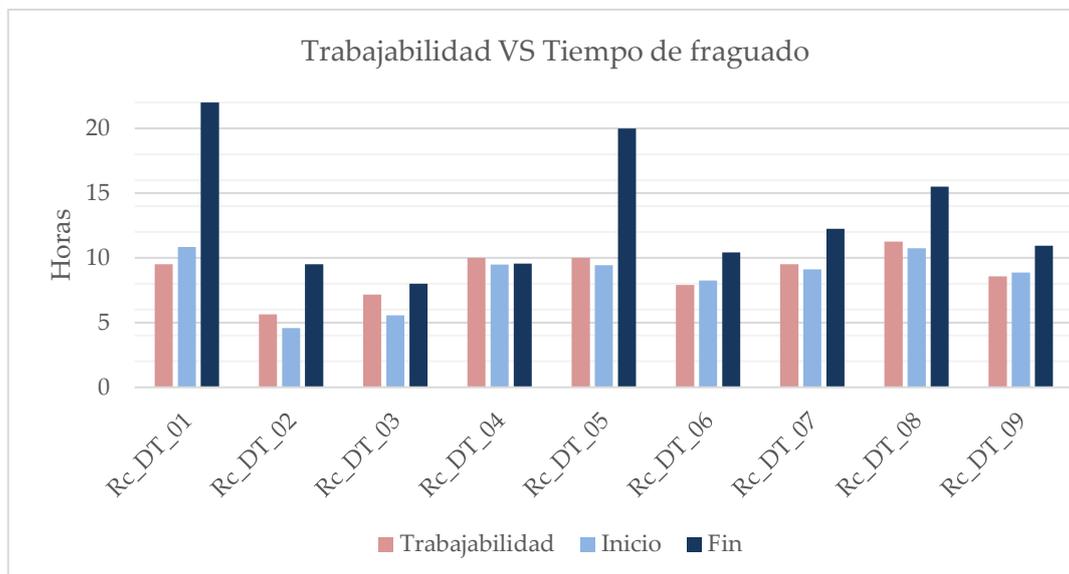


Figura 1.52 Comparativa entre los resultados de los ensayos de trabajabilidad y tiempos de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

Como primera impresión de los resultados adjuntados en la siguiente tabla se aprecia que para algunas dosificaciones la trabajabilidad del mortero parece igualar y/o superar el tiempo final de fraguado. No obstante, bien merece este suceso ser matizado de forma previa a valorar los resultados. Se debe entender que ambas pruebas se llevaron a cabo empleando diferentes amasadas de una misma dosificación. Dicha diferencia en las amasadas, unida al factor humano del doctorando en sus trabajos de laboratorio, propicia que se puedan detectar ciertos

desajustes entre ambas lecturas. Dichos desajustes cobran especial calado en aquellas mezclas donde los tiempos de inicio y final de fraguado difieren en escasa magnitud, y es por esto que, para estos casos, se debe interpretar en hipótesis de máximos el valor de la trabajabilidad del material como intermedio entre los tiempos de inicio y final del fraguado.

Teniendo esto en consideración se observa como las dosificaciones 4, 6 y 7, especialmente esta primera, han conseguido muy buenos resultados para los ensayos de trabajabilidad y fraguado, pues conceden un margen horario óptimo previo al inicio del fraguado donde desempeñar las tareas de vertido en TBM de Escudo, almacenaje en TBM de Escudo y bombeo. Al mismo tiempo que cubren con suma rapidez la etapa entre el inicio y el final del fraguado. Otras dosificaciones, como por ejemplo la 3, si bien tendrían tiempos entre fraguado adecuados inician el mismo demasiado rápido, suponiendo esto un riesgo de cara a una correcta colocación del material

#### Síntesis

En el momento de valorar los resultados de estos dos ensayos, se verificará que el tiempo entre inicio y final de fraguado es el más reducido posible, siempre y cuando la mezcla de mortero comience a fraguar con el suficiente margen como para que su colocación sea la adecuada.

Tabla 1.60 Normativa de ensayo de tiempo de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_9	<b>Propiedad medida:</b> Densidad en estado fresco.				
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-6	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.				
<p><b>Resultados:</b></p> <p><b><u>Ensayo de densidad:</u></b> como parámetro relevante para el entendimiento de otros resultados obtenidos en diferentes ensayos se calculan las densidades en estado fresco para cada una de las dosificaciones. Los resultados son los siguientes.</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td></td> <td>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</td> </tr> <tr> <td>DT_01</td> <td>1,38</td> </tr> </table>			Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	DT_01	1,38
	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )				
DT_01	1,38				

DT_02	1,36
DT_03	1,65
DT_04	1,39
DT_05	1,21
DT_06	1,31
DT_07	1,59
DT_08	1,14
DT_09	1,44

Tabla 1.61 Resultado del ensayo de densidad. Fuente: Elaboración propia.

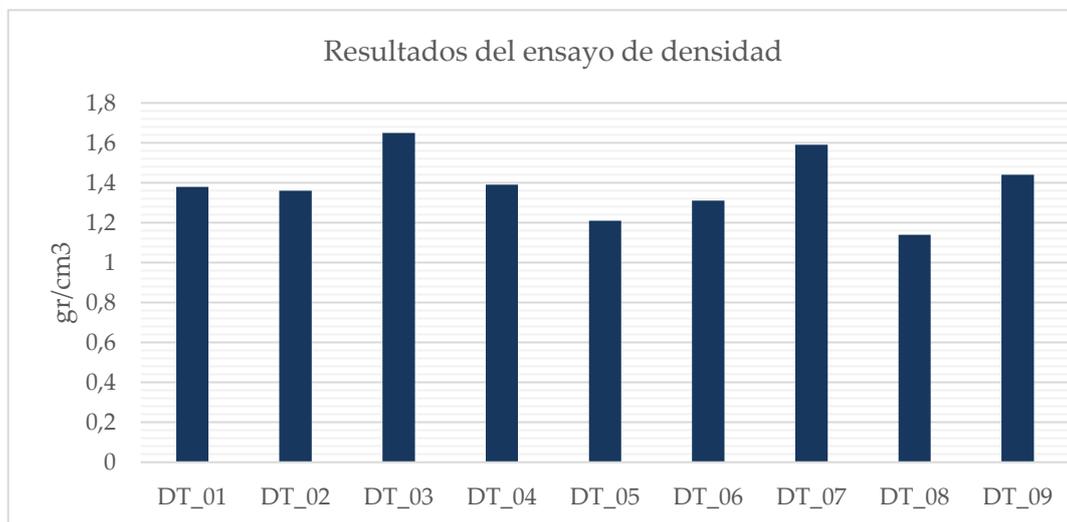


Figura 1.53 Resultados tiempo de densidad para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

**Valoración:**

La densidad en estado fresco resulta un interesante parámetro de control de la fabricación de las diferentes dosificaciones planteadas. Verificar que su valor se cumple de forma esperada, es una buena medida para comprobar que la amasada se ha desarrollado de forma óptima, y que no ha ocurrido ningún suceso en el momento de mezclado que, por ejemplo, provoque una inclusión indeseada

de aire que pueda derivar en potenciales oquedades con su consecuente pérdida de resistencia.

Como resultaba previsible, se ha detectado una tendencia a alcanzar menores densidades en aquellas fórmulas donde se ha sustituido la totalidad de la arena 0/4 por caucho NFU (por ejemplo, la 5), o bien en aquellas donde el aditivo inclusor de aire se ha añadido en su máximo porcentaje (por ejemplo, la 8). En cambio, se ha comprobado una tendencia alcista para aquellas dosificaciones que han sustituido menores cantidades de arena 0/4 por NFU o bien no han incorporado el aditivo inclusor de aire en su máximo porcentaje, como ha sido el caso de la 7.

#### Síntesis

Los resultados de densidad en estado fresco se van a considerar como un parámetro de control efectivo a la hora de verificar una correcta amasada de las diferentes dosificaciones, pero no van a incluirse en el proceso de selección. La razón es que los valores de densidad en estado fresco influyen de forma decisiva en otros ensayos como resistencias mecánicas o volumen de huecos, con una interpretación más clara en términos de idoneidad de la mezcla para cumplir el cometido que le ocupa.



Figura 1.54 Pesaje de probeta en estado fresco para obtención de densidad. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.62 Normativa de ensayo de densidad en estado fresco. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_10	<b>Propiedad medida:</b> Contenido en aire del mortero fresco.
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 1015-7	<b>Título:</b> Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco.
<b>Resultados:</b>	

Ensayo de contenido en aire: parámetro clave para conseguir la compresibilidad deseada en el mortero. De nuevo, se tomaron dos muestras por dosificación. Se adjuntan a continuación los resultados.

	Contenido en aire (%)	
	Medición	Resultado
DT_01	38,1	36,095
	34,09	
DT_02	18,18	20,455
	22,73	
DT_03	18,18	19,315
	20,45	
DT_04	32,5	29,345
	26,19	
DT_05	40	40,225
	40,45	
DT_06	28,57	30,235
	31,9	
DT_07	23,81	25,54
	27,27	
DT_08	47,62	43,13
	38,64	
DT_09	38,1	34,96
	31,82	

Tabla 1.63 Resultado del ensayo de contenido en aire. Fuente: Elaboración propia.

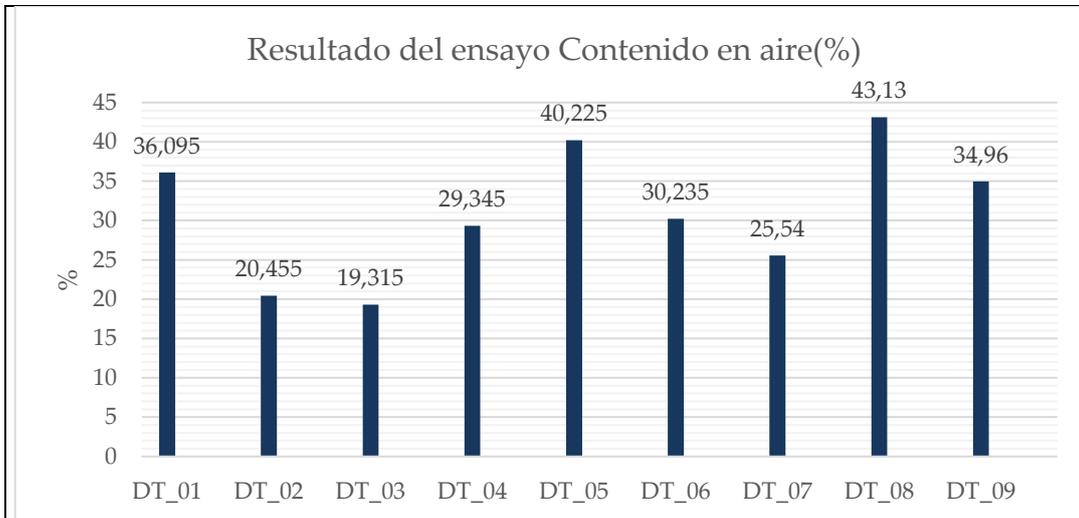


Figura 1.55 Resultados contenido en aire para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

#### Valoración:

El contenido en aire de un mortero u hormigón convencional rara vez supera valores comprendidos entre el 4 – 5 %, por lo menos de forma deseada. En este caso de estudio, debido al propósito de obtención de un mortero compresible, el porcentaje de aire ocluido en el material se busca que esté entorno a valores de un 25%. De este modo, aquellas dosificaciones que se alejen por arriba de dicho valor pueden tener una pérdida excesiva de capacidad portante que les impida compatibilizar las convergencias del terreno excavado, mientras que aquellas otras dosificaciones que se hayan quedado excesivamente por debajo pueden perder mucha capacidad de compresión transmitiendo excesivos esfuerzos a las dovelas de hormigón colocadas.

Siguiendo esta premisa, se observa de forma satisfactoria como son varias las dosificaciones que han alcanzado valores cercanos al 25% de aire ocluido, siendo especialmente positivo el resultado obtenido para la dosificación 7, la cual ha conseguido un 25,54% de volumen de aire en su interior. Así mismo, otras mezclas como la 2, la 4 o la 6, también han logrado buenas aproximaciones. Se puede comprobar, como tres de estas dosificaciones son las que han sustituido una cantidad de un 50% de la arena 0/4 por NFU, pudiendo concluir que dicha

cantidad de caucho puede resultar adecuada para la obtención del volumen de huecos deseado.

#### Síntesis

Para la valoración de los resultados alcanzados en este ensayo, se seleccionarán las dosificaciones por orden de proximidad al valor de 25% de volumen interno de aire tomando valores absolutos, esto es, sin necesidad de encontrarse por arriba o por debajo de dicha cifra.

Tabla 1.64 Normativa de ensayo de contenido en aire del mortero fresco. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_11 y Tesis_UCAM:12	<b>Propiedad medida:</b> Exudación del mortero simple y bajo presión.			
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 480-4	<b>Título:</b> Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 4: Determinación de la exudación del hormigón.			
<b>Resultados:</b>				
<u><b>Ensayo exudación simple y exudación bajo presión:</b></u> dada la interrelación existente entre ambas pruebas, los resultados se van a exponer de manera conjunta. Como era previsible, los resultados del ensayo de exudación bajo presión han sido notablemente superiores a los obtenidos para el ensayo de exudación simple.				
Exudación (%)				
	Simple		Bajo presión	
DT_01	1,17	1,2	14,27	14,21
	1,23		14,15	
DT_02	0	0,285	1,98	2,515
	0,57		3,05	
DT_03	1,82	1,695	12,09	12,575
	1,57		13,06	
DT_04	2,16	2,41	11,8	12,615
	2,66		13,43	
DT_05	1,27	1,52	22,34	20,285

		1,77		18,23	
DT_06		0,8	0,935	5,77	6
		1,07		6,23	
DT_07		0	0,11	7,2	8,65
		0,22		10,1	
DT_08		1,96	2,695	5,45	7,78
		3,43		10,11	
DT_09		0,53	0,635	14,09	12,58
		0,74		11,07	

Tabla 1.65 Resultado del ensayo de exudación simple y bajo presión. Fuente: Elaboración propia.

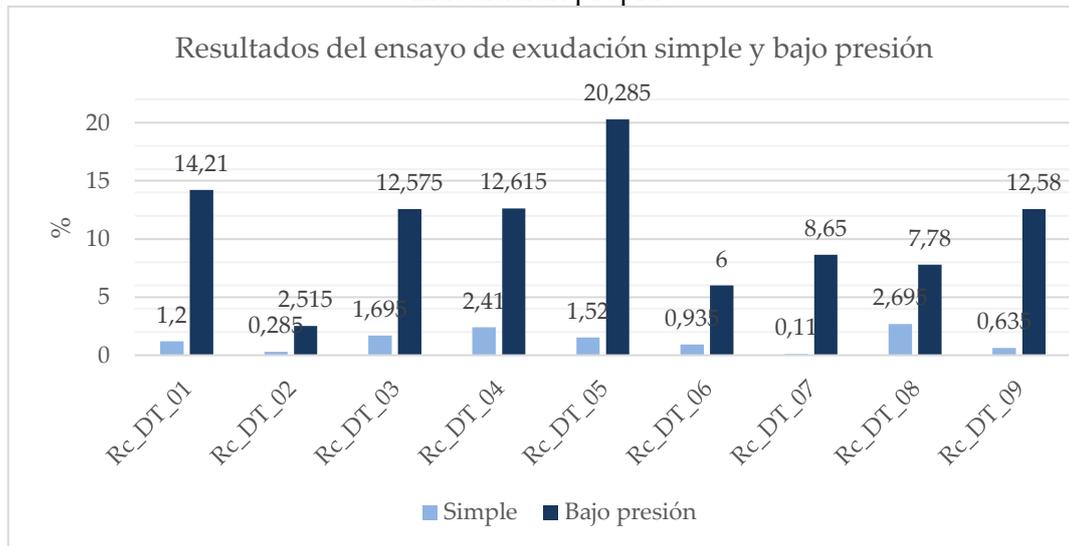


Figura 1.56 Resultados de ensayo de exudación simple y bajo presión para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

**Valoración:**

Los resultados de los ensayos de exudación simple y exudación bajo presión se van a analizar de forma conjunta de modo que se pueda encontrar un patrón de comportamiento general de cada una de las dosificaciones frente a los diferentes procesos de exudación que pueden tener lugar. De este modo, se ha comprobado como no en todos los casos los resultados han seguido criterios de proporcionalidad entre ambos resultados, encontrando dosificaciones que, si bien no han arrojado valores especialmente altos o significativos para alguno de los tipos de exudación, sí lo han hecho para el otro. A modo de ejemplo, se puede ver el caso de las dosificaciones 6 y 7. Si bien la primera tiene un valor casi 9 veces más alto de exudación simple, la exudación bajo presión es sobre un 25% menor. Otro caso de ejemplo son las dosificaciones 8 y 9. Donde la primera de estas dosificaciones arroja valores claramente más altos a exudación simple, mientras que son claramente inferiores a exudación bajo presión. A continuación, se comentan algunos de los resultados de ensayo de forma más particularizada:

#### Influencia de la cantidad de NFU en la exudación

De forma muy significativa se ha comprobado como una sustitución mayor de arena 0/4 por caucho NFU conlleva de forma directa una mayor exudación bajo presión. Las dosificaciones 1 y 5 (sustituyen la cantidad máxima de 0/4 por NFU) son aquellas que, con diferencia, mayores valores de exudación bajo presión arrojan. Así mismo, la dosificación 9 también bajo este escenario, sería la 4 dosificación más afectada por las condiciones de presión. De forma contraria, las mezclas con un menor contenido de NFU, como 2, 6 y 7, son de las que menores problemas presentan en este sentido. Dicho comportamiento sucede debido a la nula higroscopicidad del NFU, de modo que el volumen que ocupa este material dentro de la mezcla de hormigón no tiene capacidad para absorber ninguna cantidad de agua. En cambio, a mayores cantidades de 0/4, material que sí tiene cierta capacidad de absorción, el agua efectiva que queda para reaccionar con el cemento se reduce. Dicha diferencia entre volumen de agua efectiva, es la que



Figura 1.57 Ensayo de exudación bajo presión.

Fuente: Elaboración propia.

provoca que bajo condiciones de confinamiento se produzca un mayor porcentaje de exudación.

#### Síntesis

Dado que el mortero compresible a desarrollar se concibe para trabajar en condiciones donde reciba sobrepresiones externas de forma constante, a la hora de valorar el presente ensayo se decide dotar de mayor peso a los resultados de exudación bajo presión. De este modo, a la hora de clasificar las dosificaciones por orden de resultado, se entregará una valoración conjunta de ambas pruebas donde la prueba bajo presión reunirá el 75% del peso, y la prueba en condiciones simples el 25% restante.

Tabla 1.66 Normativa de ensayo de exudación del mortero. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_13	<b>Propiedad medida:</b> Permeabilidad.																								
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 83310	<b>Título:</b> Ensayos de hormigón. Determinación de la permeabilidad.																								
<p><b>Resultados:</b></p> <p><b>Ensayo de permeabilidad:</b> los resultados del ensayo se ofrecen de idéntica forma a como se ha procedido en las líneas precedentes.</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="2">Permeabilidad (cm/s x 10<sup>-6</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">DT_01</td> <td>165,18</td> <td rowspan="2">162,77</td> </tr> <tr> <td>160,36</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_02</td> <td>115,34</td> <td rowspan="2">149,545</td> </tr> <tr> <td>183,75</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_03</td> <td>3,18</td> <td rowspan="2">6,7</td> </tr> <tr> <td>10,22</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_04</td> <td>80,27</td> <td rowspan="2">101,945</td> </tr> <tr> <td>123,62</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_05</td> <td>10,9</td> <td rowspan="2">27,05</td> </tr> <tr> <td>43,2</td> </tr> </tbody> </table>				Permeabilidad (cm/s x 10 <sup>-6</sup> )		DT_01	165,18	162,77	160,36	DT_02	115,34	149,545	183,75	DT_03	3,18	6,7	10,22	DT_04	80,27	101,945	123,62	DT_05	10,9	27,05	43,2
	Permeabilidad (cm/s x 10 <sup>-6</sup> )																								
DT_01	165,18	162,77																							
	160,36																								
DT_02	115,34	149,545																							
	183,75																								
DT_03	3,18	6,7																							
	10,22																								
DT_04	80,27	101,945																							
	123,62																								
DT_05	10,9	27,05																							
	43,2																								

DT_06	183,47	199,505
	215,54	
DT_07	11,64	28,495
	45,35	
DT_08	333,56	298,485
	263,41	
DT_09	5,47	9,4
	13,33	

Tabla 1.67 Resultado del ensayo de permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.

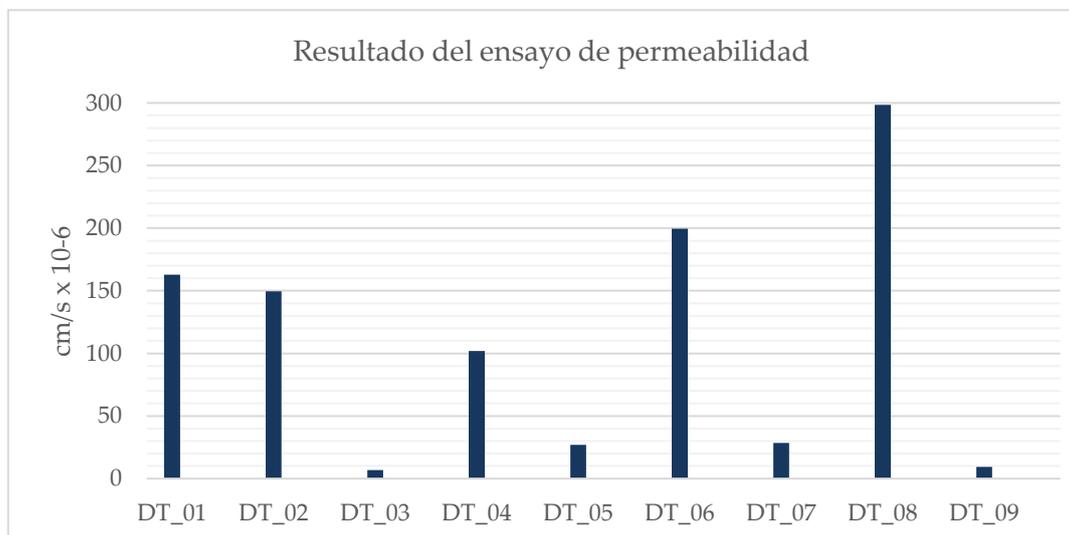


Figura 1.58 Resultados de ensayo de exudación simple y bajo presión para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

#### Valoración:

A través del terreno que paulatinamente se va excavando en la construcción de un túnel, es frecuente la aparición de agua infiltrada que, finalmente, puede acabar por dañar las dovelas de hormigón colocadas generando sobre el túnel filtraciones indeseadas. Así mismo, este escenario se puede ver agravado en el caso de suceden sobre el territorio circundante al túnel lluvias intensas, que terminen por generar escorrentías interiores en el terreno que afecten de manera más grave todavía a la construcción. En este sentido, la oportunidad que brinda la colocación

de un mortero entre el terreno excavado y las dovelas de hormigón se debe aprovechar para proteger a estas últimas lo máximo posible de filtraciones indeseadas de agua.

Es por esto, que en la campaña de ensayos realizada se llevó también a cabo una prueba para medir la permeabilidad de cada una de las dosificaciones. Entre las dos variables que mayor influencia podían generar en este parámetro, cantidad de NFU y aditivo inclusor de aire, se comprobó como esta última era la que contribuía de forma decisiva a incrementar su valor. De este modo, las dosificaciones 1, 6 y 8 obtuvieron con claridad los resultados más altos en cuanto a permeabilidad, siendo también aquellas mezclas que incorporaban inclusor de aire en el máximo porcentaje. No se obtuvo, en cambio, algún tipo de correlación entre la permeabilidad de las dosificaciones y la cantidad de NFU, probablemente por el efecto tan directo que ya introducía el aditivo inclusor incorporado.

#### Volumen de huecos VS Permeabilidad

Un análisis interesante llegados a este punto, reside en trazar una comparativa cruzada entre el resultado del ensayo de volumen de huecos y el ensayo de permeabilidad, de modo que se pueda comprobar que dosificaciones consiguen una menor permeabilidad, pero manteniendo su volumen de huecos cercano a los valores deseados. En la siguiente gráfica, se muestran los resultados:



Figura 1.59 Celda para el sistema automático de 4 presiones de determinación de la permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.

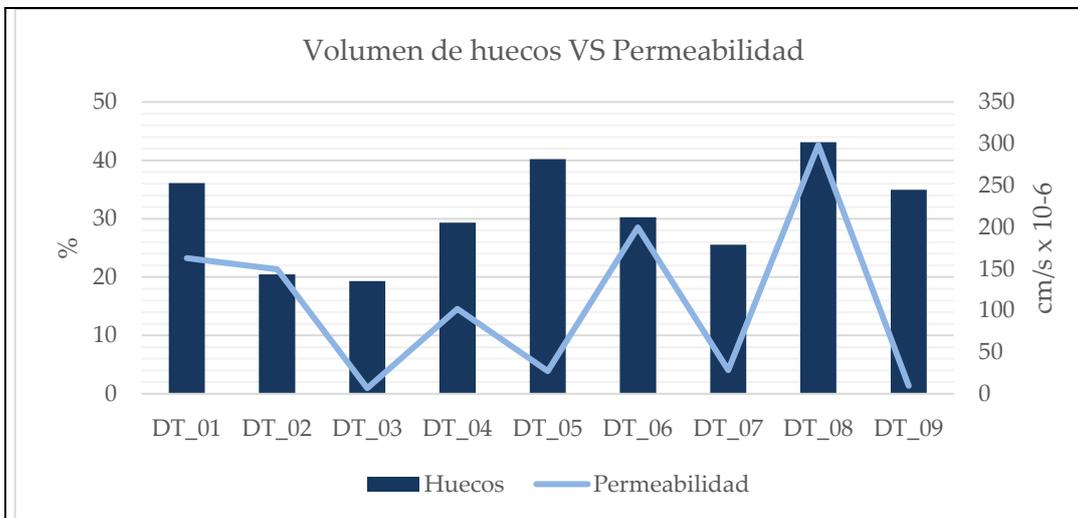


Figura 1.60 Comparativa entre los resultados de los ensayos de volumen de huecos y permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.

De la anterior gráfica se puede desprender valoraciones muy interesantes, siendo especialmente positivos los resultados que han alcanzado las dosificaciones 3 y 7. Se puede comprobar, como ambas mezclas han sido de las que han conseguido un volumen interno de huecos más cercano al buscado 25%, al mismo tiempo que mantienen unos valores muy bajos en cuanto a permeabilidad. Estos resultados son óptimos en cuanto se comparan con otras mezclas, como por ejemplo la 6, que si bien ha conseguido obtener un volumen de huecos cercano al óptimo, dicho volumen ha llevado asociado un importante incremento de la permeabilidad de la mezcla. En cuanto a las dosificaciones 3 y 7 mencionadas en líneas anteriores, se puede comprobar como comparten estructura en cuanto a química de los aditivos, pues ambos cuentan con inductor de aire y acelerante del fraguado. Dicho factor, puede haber resultado clave a la hora de aunar buenos resultados en estas dos pruebas. Así mismo, también se pone de manifiesto que ninguna de estas dos fórmulas incluye la cantidad máxima de NFU dosificada.

#### Síntesis

Como valoración final, y tal y como se ha indicado en líneas anteriores, se considerarán tanto más positivos los valores de este ensayo cuanto más baja sea la permeabilidad alcanzada por las dosificaciones analizadas.

Tabla 1.68 Normativa de ensayo de permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_14	<b>Propiedad medida:</b> Cambio de longitud/relajación/contracción.		
<b>Código de normativa:</b> UNE EN 13872	<b>Título:</b> Método de ensayo de morteros para igualado y/o nivelado. Determinación de la contracción.		
<b>Resultados:</b>			
<u>Ensayo de cambio de longitud:</u> se debe tener en cuenta que los resultados de este ensayo, proporcionados en valores absolutos, deben indicar también si el cambio de longitud detectado ha tenido lugar en términos de relajación (expansividad del mortero) o contracción.			
	Cambio de longitud (mm)		
	Medida		Dirección
DT_01	0,31	0,335	Expansividad
	0,36		
DT_02	0,45	0,346	Expansividad
	0,31		
	0,28		
DT_03	0,22	0,19	Expansividad
	0,17		
	0,18		
DT_04	0,22	0,24	Expansividad
	0,19		
	0,31		
DT_05	0,29	0,283	Expansividad
	0,23		
	0,33		
DT_06	0,4	0,43	Expansividad
	0,37		
	0,52		
DT_07	0,13	0,136	Expansividad
	0,1		
	0,18		

DT_08	0,22	0,18	Expansividad
	0,15		
	0,17		
DT_09	0,06	0,106	Expansividad
	0,13		
	0,13		

Tabla 1.69 Resultado del ensayo de cambio de longitud. Fuente: Elaboración propia.

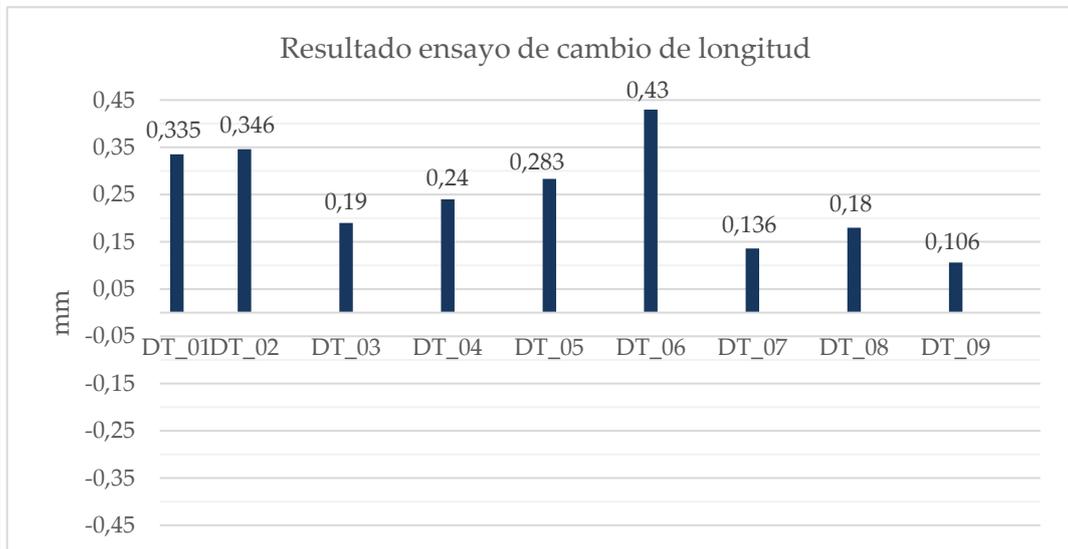


Figura 1.61 Resultados de ensayo de cambio de longitud para cada una de las dosificaciones ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

#### Valoración:

El ensayo de cambio de longitud se realiza para comprobar los posibles cambios de dimensiones que puede experimentar el mortero en su proceso de fraguado y endurecimiento en el momento en que es colocado en el espacio anular formado por el terreno excavado y la dovela de hormigón. Dicho parámetro es importante controlarlo, pues variaciones excesivas de longitud podrían terminar por dañar la propiedad dovela generando fisuras y en última instancia algún tipo de fractura en el hormigón.

En el análisis del ensayo, el primer paso es verificar si el cambio de longitud se produce en términos de contracción o de expansión. Para este caso concreto, todas las dosificaciones experimentan cambios de longitud expansivos. Dicho resultado es coherente con el tipo de dosificaciones que se han empleado, donde coexiste una baja relación de agua/cemento con una amplia cantidad de finos. Así mismo, y para tratarse de un mortero, la alta cantidad de cemento añadida también ha contribuido a incrementar en gran medida el calor de hidratación de cada una de las fórmulas durante el proceso de fraguado y endurecimiento.



Figura 1.62 Ensayo de cambio de longitud. Fuente: Elaboración propia.

Referente a los valores alcanzados, se puede comprobar como todas las dosificaciones, por lo general, se encuentran dentro de un mismo orden de magnitud. Destaca únicamente el valor de expansión de la dosificación 6, por ser claramente superior al resto de dosificaciones. Dicho valor puede haber sido alto, debido a la actuación conjunta de una masa cementante formada exclusivamente por cemento (alto calor de hidratación), y el aditivo inclusor de aire en su máximo porcentaje de adición. Respecto al calor de hidratación adquirido por las diferentes masas cementantes que se han añadido a ensayo, se debe indicar que la presencia de humo de sílice, y especialmente de cenizas volantes, contribuye a minimizar al calor de hidratación que experimenta la mezcla de mortero mientras endurece, tal y como se puede ver por ejemplo en el caso de la mezcla 7.

#### Síntesis

La valoración de este ensayo se realizará considerando como más positivas aquellas fórmulas que menos mm de expansión hayan obtenido en el ensayo. Serán por tanto menos deseables de cara al cometido que ocupa la presente investigación, las dosificaciones que mayores valores de expansión arrojen, debido a los posibles daños que puedan generar sobre las dovelas rígidas de hormigón.

Tabla 1.70 Normativa de ensayo de contracción del mortero. Fuente: Elaboración propia.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_15	<b>Propiedad medida:</b> Lavado del mortero.																																								
<b>Código de normativa:</b> Norma BS 8443	<b>Título:</b> Specification for establishing the suitability of special purpose concrete admixtures.																																								
<p><b>Resultados:</b></p> <p><u>Ensayo de lavado del mortero:</u> los resultados obtenidos para el ensayo se muestran a continuación.</p>																																									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Lavado del mortero (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">DT_01</td> <td>5,19</td> <td rowspan="2">5,57</td> </tr> <tr> <td>5,95</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_02</td> <td>0,96</td> <td rowspan="2">1,61</td> </tr> <tr> <td>2,26</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_03</td> <td>8,74</td> <td rowspan="2">8,675</td> </tr> <tr> <td>8,61</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_04</td> <td>3,67</td> <td rowspan="2">2,405</td> </tr> <tr> <td>1,14</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_05</td> <td>5,43</td> <td rowspan="2">7,165</td> </tr> <tr> <td>8,9</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_06</td> <td>5,19</td> <td rowspan="2">5,48</td> </tr> <tr> <td>5,77</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_07</td> <td>3,84</td> <td rowspan="2">3,63</td> </tr> <tr> <td>3,42</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_08</td> <td>12,95</td> <td rowspan="2">9,82</td> </tr> <tr> <td>6,69</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DT_09</td> <td>1,06</td> <td rowspan="2">1,765</td> </tr> <tr> <td>2,47</td> </tr> </tbody> </table>		Lavado del mortero (%)			DT_01	5,19	5,57	5,95	DT_02	0,96	1,61	2,26	DT_03	8,74	8,675	8,61	DT_04	3,67	2,405	1,14	DT_05	5,43	7,165	8,9	DT_06	5,19	5,48	5,77	DT_07	3,84	3,63	3,42	DT_08	12,95	9,82	6,69	DT_09	1,06	1,765	2,47
Lavado del mortero (%)																																									
DT_01	5,19	5,57																																							
	5,95																																								
DT_02	0,96	1,61																																							
	2,26																																								
DT_03	8,74	8,675																																							
	8,61																																								
DT_04	3,67	2,405																																							
	1,14																																								
DT_05	5,43	7,165																																							
	8,9																																								
DT_06	5,19	5,48																																							
	5,77																																								
DT_07	3,84	3,63																																							
	3,42																																								
DT_08	12,95	9,82																																							
	6,69																																								
DT_09	1,06	1,765																																							
	2,47																																								
<p>Tabla 1.71 Resultado del ensayo de lavado del mortero. Fuente: Elaboración propia.</p>																																									

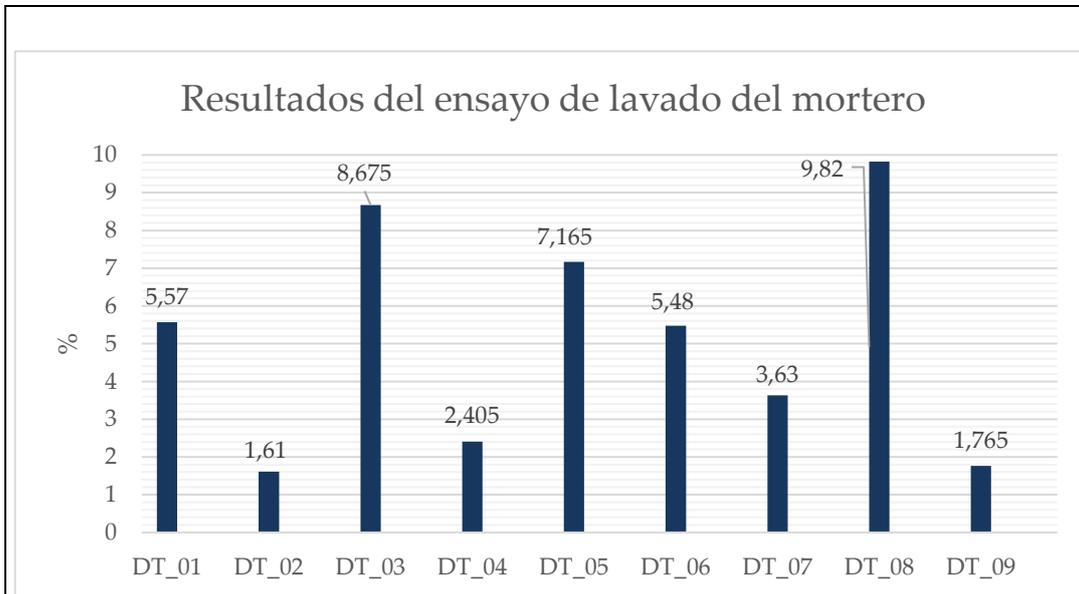


Figura 1.63 Resultados de ensayo de lavado del mortero. Fuente: Elaboración propia.

#### Valoración:

Una de las propiedades que será importante conocer de cara a asegurar que el mortero pueda ser colocado de forma óptima será el lavado del mismo en presencia de agua. Durante el proceso de inyección del mortero en el espacio anular formado por terreno excavado y dovelas, puede ser habitual que existan acumulaciones de agua proveniente de nivel freático o escorrentía. Dicho volumen de agua, puede ser sumamente perjudicial para el mortero en estado fresco, especialmente en términos de lavado de finos y cemento. Desde esta perspectiva, los resultados del ensayo se analizan para conocer que dosificaciones se han comportado mejor en cuanto a esta variable de análisis,



Figura 1.64 Determinación de la pérdida por lavado. Fuente: Elaboración propia.

identificando aquellas que menos porcentaje de masa han perdido por lavado.

Observando la tabla anterior, se puede comprobar como son 3 las dosificaciones que mejores resultados han obtenido con claridad: la 2, 4 y 9. Analizando estas dosificaciones, se comprueba como todas ellas son las que incluían en su fórmula aditivo superplastificante. Dicho aditivo, ha provocado una reacción mayor del cemento añadido, generando de este modo una mezcla más estable y con menos partículas de cemento libres que pudieran ser lavadas. Dicha comprobación, se tendrá en cuenta en futuras investigaciones dada su contribución.

#### Síntesis

Para la valoración del presente ensayo, se considerará tanto más óptimo un resultado cuanto menor porcentaje de masa haya sido lavado.

Tabla 1.72 Normativa de ensayo de granulometría de los áridos empleados.

<b>Número de ensayo:</b> Tesis_UCAM_16	<b>Propiedad medida:</b> Fricción interna.	
<b>Código de normativa:</b> No existe normativa al respecto.	<b>Título:</b> -	
<p><b>Resultados:</b></p> <p><b><u>Fricción interna:</u></b> los resultados de este ensayo se muestran a partir de dos parámetros, como son la Cohesión, medida en N/mm<sup>2</sup>, y el Ángulo de rozamiento (°).</p>		
	Fricción interna	
	Cohesión (N/mm <sup>2</sup> )	Ángulo rozamiento (°)
DT_01	0,41	45
DT_02	0,53	33
DT_03	2,1	31
DT_04	0,68	39
DT_05	0	0
DT_06	1,38	41
DT_07	3,09	25

DT_08	0,59	39
DT_09	2,31	32

Tabla 1.73 Resultado del ensayo de fricción interna. Fuente: Elaboración propia.

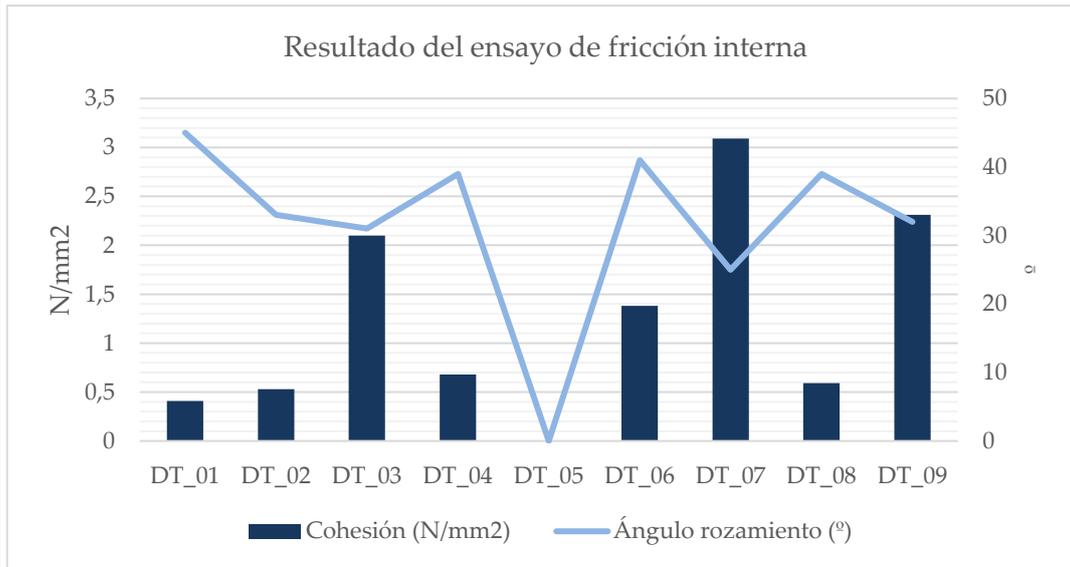


Figura 1.65 Resultados de ensayo de fricción interna del mortero. Fuente: Elaboración propia.

**Valoración:**

En la ejecución del ensayo de fricción interna se han determinado aquellas fórmulas que cuentan con una mayor cohesión. En este sentido, además del parámetro de cohesión asociado a cada dosificación, se ha valorado también el ángulo de rozamiento.



Figura 1.66 Testigo ensayado en prensa triaxial. Fuente: Elaboración propia.



Figura 1.67 Celda para ensayo triaxial (izquierda) y prensa triaxial (derecha). Fuente: Elaboración propia.

De entre los resultados obtenidos, destaca de forma positiva el alcanzado para la dosificación 7. Dicha mezcla, contaba en su fórmula con la cantidad mínima de NFU añadida en este plan de ensayos, factor que puede haber sido clave para lograr una buena cohesión interna. Así mismo, se ha visto como las dosificaciones que contaban con aditivo inclusor de aire en su máximo porcentaje han visto muy minorada su cohesión interna. Estos han sido los casos de la dosificación 1, 8, y especialmente 6, la cual, si bien no ha obtenido un resultado especialmente bajo en comparación con otras fórmulas, sí ha visto muy minorada su cohesión tratándose de una dosificación que contaba con el menor contenido en NFU. Como dato a mencionar en el presente ensayo, la dosificación 5 fue incapaz de ofrecer resultados, pese haberse replicado el ensayo en dos ocasiones. El alto contenido en NFU, aunque no generó el mismo problema en otras fórmulas, se achacó como el principal responsable de esta casuística.

#### Síntesis

En la valoración de este ensayo se considerarán como más positivas aquellas dosificaciones que mayor cohesión interna y ángulo de rozamiento hayan conseguido.

Tabla 1.74 Normativa de ensayo de granulometría de los áridos empleados.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.4 Evaluación de resultados y selección de dosificaciones definitivas

Una vez se han expuesto y comentado los resultados de la campaña de ensayos de laboratorio llevada a cabo, se deben seleccionar aquellas dosificaciones que mejores prestaciones ofrezcan para el cometido de ser inyectadas en el espacio anular formado por terreno excavado y dovela de hormigón. Como medida base, se han valorado todas las dosificaciones para cada uno de los ensayos concediendo 1 punto a la que peor resultado haya obtenido en la prueba, y 9 a la que mejores prestaciones hayan alcanzado.

Sin embargo, dicho planteamiento puede sufrir variaciones bajo determinadas circunstancias. Pueden existir ensayos, donde dos dosificaciones hayan alcanzado muy buenos resultados existiendo una diferencia de decimales en cuanto a los valores obtenidos. Dicha diferencia, puede no significar una mejora sustancial entre una dosificación u otra, de modo que, para estos casos, y siempre bajo el criterio del doctorando, se habrá puntuado a las dos dosificaciones aspirantes con el mismo valor. De otro modo, y por ejemplo poniendo como caso el ensayo de consistencia, no se establecerán diferencias de puntuación entre distintos valores para una misma catalogación de consistencia, otorgando el mismo puntaje a todas las dosificaciones que entren dentro de un determinado rango.

Así mismo, es una premisa que la mezcla o mezclas finalmente seleccionadas deban reunir las propiedades que resulten de mayor interés dentro del ámbito de la investigación que ocupa la presente Tesis Doctoral. De este modo, y a fin conceder mayor importancia en la valoración multicriterio a los resultados de los ensayos que midan propiedades más importantes para el mortero, se ha mayorado el peso que van a tener algunos ensayos en la evaluación final. Es por esto, que se han establecido 3 grupos de ensayos: Ensayos sin ningún tipo de mayoración, ensayos mayorados mediante un coeficiente '3', y ensayos que se han mayorado mediante un coeficiente '5'. Con esta medida se ha conseguido aumentar el peso de cada ensayo en proporción a la importancia que tiene la propiedad ensayada en el nuevo material. A continuación, se comentan y justifican las diferentes mayoraciones consideradas:

#### Ensayos mayorados mediante coeficiente 5

Estos son los ensayos que miden las propiedades básicas que debe poseer el mortero. Se ha comentado a lo largo de la tesis que la mezcla debe ser bombeable en estado fresco y compresible una vez haya fraguado. En este sentido, existen 5 ensayos que atienden directamente a estas dos características. Desde el punto de vista de la bombeabilidad de la mezcla son el ensayo de consistencia y el ensayo de embudo en V, que mide la capacidad de relleno del mortero en estado fresco, aquellos que mejor pueden definir la capacidad de la mezcla. Respecto a la compresibilidad del mortero endurecido, el ensayo de elasticidad, el ensayo de resistencia a compresión confiada y el ensayo de volumen de huecos valoran fielmente esta capacidad.

#### Ensayos mayorados mediante coeficiente 3

En este bloque se han considerado aquellos ensayos que evalúen propiedades que puedan afectar a las propiedades básicas demandadas en el nuevo mortero de forma indirecta. Concretamente se han considerado los ensayos de trabajabilidad y fraguado, exudación bajo presión, flexo tracción, anillo de guarda y cambio de longitud. Los resultados de los ensayos de trabajabilidad y tiempos de fraguado pueden tener una influencia importante en el bombeo de la mezcla de mortero. Para planificar la metodología de bombeo es necesario conocer el inicio y final del fraguado, además, tener constancia del período de trabajabilidad permitirá a los técnicos tener más información para el diseño del plan de bombeo.

Respecto del ensayo de exudación bajo presión, dado que la mezcla instalada va a estar bajo la carga que el terreno convergiendo transmita, es importante controlar la exudación que puede experimentar bajo estas circunstancias, ya que un exceso en la misma podría provocar un aumento no deseado del volumen de huecos a causa de la formación de constantes redes de capilares. Por lo que respecta al ensayo de flexo tracción, el mortero ubicado en su emplazamiento definitivo va a estar sometido a cargas de diferentes direcciones, de modo que para algunas secciones del mismo puede trabajar bajo estas dos sollicitaciones. Es por esto, que también se incluye dicho ensayo en el cupo.

Atendiendo al anillo de guarda y el cambio de longitud, son dos pruebas que aportan información acerca de los desplazamientos que admitirá el mortero o que bien va a experimentar durante el proceso de fraguado, de modo que sus valores son importantes para asegurar que el mortero no provoca daños sobre las dovelas de hormigón, rígidas por definición.

A continuación, se adjuntan las tablas que dan origen a la valoración multicriterio de los ensayos:

	DT_01	DT_02	DT_03	DT_04	DT_05	DT_06	DT_07	DT_08	DT_09
Compresión simple	1	4	8	5	2	8	9	3	6
Flexo tracción	2	7	9	4	2	7	9	3	5
Compresión Confinada	1	2	6	7	4	8	9	3	5
Anillo Guarda	6	4	1	3	2	9	7	7	6
Módulo Elástico	2	6	3	4	8	7	1	9	5
Consistencia	9	6	9	6	6	9	9	9	9
Embudo en V	1	5	5	5	5	5	8	5	8
Trabajabilidad y fraguado	1	4	5	9	2	8	7	3	6
Contenido aire	3	7	5	8	2	6	9	1	4
Exudación simple/presión	3	9	4	3	1	8	7	6	5
Permeabilidad	3	4	9	5	7	2	6	1	8
Cambio longitud	3	2	6	5	4	1	8	7	9

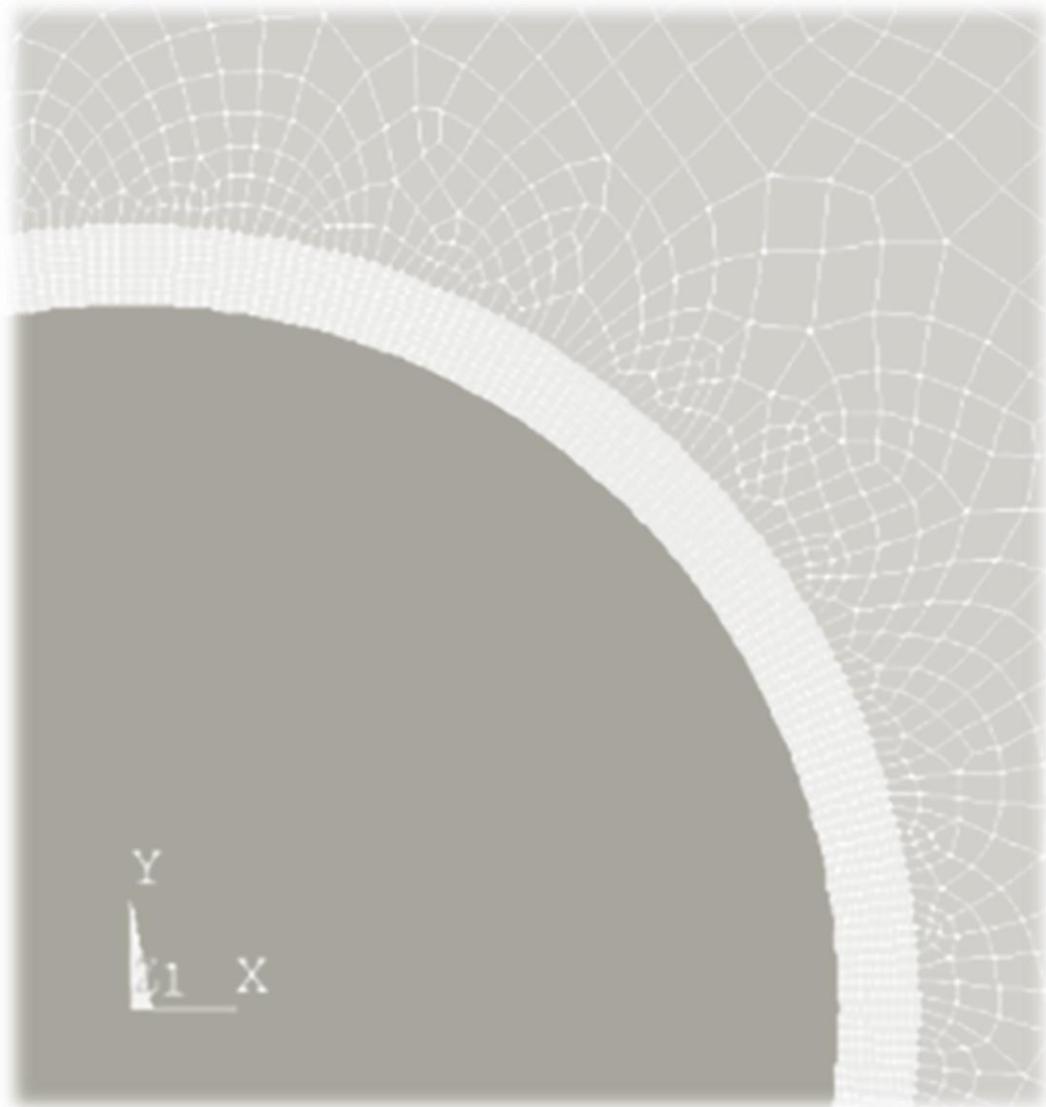
Lavado	4	9	2	7	3	5	6	1	8
Fricción Interna	2	3	7	5	0	6	9	4	8

Tabla 1.75 Clasificación de resultados. Fuente: Elaboración propia. Fuente:  
Elaboración propia.

	DT_01	DT_02	DT_03	DT_04	DT_05	DT_06	DT_07	DT_08	DT_09
Compresión simple	1	4	8	5	2	8	9	3	6
Flexo tracción	6	21	27	12	6	21	27	9	15
Compresión Confinada	5	10	30	35	20	40	45	15	25
Anillo Guarda	18	12	3	9	6	27	21	21	18
Módulo Elástico	25	30	5	20	40	35	10	45	15
Consistencia	45	30	45	30	30	45	45	45	45
Embudo en V	5	25	25	25	25	25	40	25	40
Trabajabilidad y fraguado	3	12	15	27	6	24	21	9	18
Contenido aire	15	35	25	40	10	30	45	5	20
Exudación simple/presión	9	27	12	9	3	24	21	18	15
Permeabilidad	3	4	9	5	7	2	6	1	8
Cambio longitud	9	6	18	15	12	3	24	21	27
Lavado	4	9	2	7	3	5	6	1	8
Fricción Interna	2	3	7	5	0	6	9	4	8
<b>TOTAL</b>	<b>135</b>	<b>228</b>	<b>241</b>	<b>244</b>	<b>170</b>	<b>295</b>	<b>324</b>	<b>222</b>	<b>278</b>

*Tabla 1.76 Matriz multicriterio de análisis de los resultados de laboratorio. Fuente: Elaboración propia a partir de [55]*

De la anterior tabla se puede comprobar como son las dosificaciones 7, 6 y 9, por este orden, aquellas que han logrado mejores resultados tras la campaña de ensayos de laboratorio llevada a cabo. Dichos resultados, serán posteriormente cotejados con los resultados de la modelización matemática elaborada a continuación.



**5. MODELO NUMÉRICO SISTEMA: ANILLO  
DOVELAS – MORTERO COMPRESIBLE – ROCA  
EXCAVADA**



## **MODELO NUMÉRICO SISTEMA: ANILLO DOVELAS – MORTERO COMPRESIBLE – ROCA EXCAVADA**

En el presente apartado se expone el modelo numérico desarrollado para la simulación de los diferentes escenarios de excavación dovelas – mortero compresible – roca excavada. Mediante la herramienta matemática desarrollada se podrá simular el comportamiento de las diferentes dosificaciones de mortero desarrolladas en los apartados precedentes, de modo que se pueda seleccionar finalmente aquellas dosificaciones que mejor se desempeñen como relleno del espacio anular.

Este bloque de la tesis doctoral se dividirá en 4 subapartados. En primer lugar, se comentarán las consideraciones pertinentes a las condiciones de contorno y geometría global del sistema. En segundo lugar, se analizará la modelización matemática del conjunto, diseñando la simulación de diferentes escenarios. Posteriormente se analizarán los resultados obtenidos, y se valorará el comportamiento de las diferentes dosificaciones de mortero caracterizadas en laboratorio. Y, por último, se establecerán una serie de síntesis y consideraciones sobre el modelo, comentando también las hipótesis y simplificaciones adoptadas para su desarrollo.

### 5.1 CONDICIONES DE CONTORNO Y GEOMETRÍA GLOBAL DEL SISTEMA

El presente apartado se estructurará presentando en primer lugar los distintos materiales que formarán parte del modelo, y posteriormente, la alternativa escogida en cuanto a geometría, dimensiones y vinculaciones con el exterior tras un análisis detallado del estado del arte presentado anteriormente.

#### a. Materiales intervinientes en la excavación

Debe considerarse en el marco del planteamiento general del modelo, que se busca resolver el estado tenso – deformacional de un elemento concreto – revestimiento de dovelas – tras la excavación de un túnel, por lo que la secuencia de montaje del modelo es similar a la que se seguiría en un cálculo convencional de estructuras. A diferencia de éste, en el modelo a construir, el terreno no asume un papel puramente contextual – como pueda ser el del referencial en un cálculo de edificación – sino que forma parte de la propia ‘estructura’ a calcular, siendo

un elemento transmisor de esfuerzos y deformaciones. Es decir, el propio terreno formará parte del cuerpo resistente frente a las acciones que soliciten al conjunto. Dicho esto, procede presentar los principales aspectos de cada uno de los materiales:

➤ Terreno y nivel freático

La solución buscada en esta tesis pretende abarcar el problema de la excavación mediante TBM en rocas susceptibles de presentar fluencia –squeezing rocks- con carácter general, no para una tipología concreta de roca.

El fenómeno de ‘squeezing’ suele darse en rocas ‘blandas’ o con alto grado de meteorización. Pueden ser calcarenitas, argilitas, margas o incluso suelos cohesivos muy compactos. El abanico de densidades para estas rocas oscila entre los 2100-2600 kg/m<sup>3</sup>, el coeficiente de Poisson entre 0.2 y 0.3, el módulo de Young (E) entre 1-10 GPa y el módulo de corte (G) en el entorno de 1-3 GPa. Estos valores son orientativos y, debido a la variabilidad ya comentada en las propiedades del terreno, pueden no ser los adecuados para un caso concreto.

Por lo que respecta al nivel freático, de llegar a ser introducido, se hará como una presión actuante proporcional a la profundidad y a la densidad aproximada del agua de 1000 kg/m<sup>3</sup>.

➤ Tuneladora: cabeza de corte y escudo

Por lo que respecta al material principal que conforma la tuneladora, éste es acero. La parte cilíndrica correspondiente al escudo puede asumirse como compuesta por acero de módulo elástico o de Young de 210.000 MPa y densidad 7850 kg/m<sup>3</sup>.

En referencia al cabezal de corte, su modelización desde el punto de vista de un elemento formado por un único material resulta imprecisa ya que se compone de distintas partes con diferentes materiales –widia, carbono, acero de alta resistencia, etc-. Además, su naturaleza dinámica – rotación para el corte – hace que difiera del resto de elementos en su papel en el modelo, aproximándose más a una sollicitación que a un elemento compuesto por uno o varios materiales.

Tendría mucho más sentido mantener la precisión en cuanto a elementos y materiales se refiere en el cabezal de corte si el objetivo de la tesis fuese conocer el comportamiento tenso-deformacional del mismo durante el proceso de excavación.

Dado que no es el caso, puede empezar a intuirse que tal vez se pueda sustituir el cabezal de corte por una acción sobre el modelo, más que un elemento del mismo. En esta línea avanzarán las simplificaciones a aplicar en el cálculo, como se verá más adelante.

➤ Dovelas prefabricadas de hormigón

En términos de material, las dovelas prefabricadas presentan poca variabilidad. Los valores adoptados para la caracterización del material son los siguientes:

- Densidad: 2500 kg/m<sup>3</sup>
- Módulo de Young: 31 GPa [57]
- Coef. de Poisson: 0.25 [57]

El hormigón de las dovelas es armado y estas se fabrican en central previa colocación, lo que confiere un alto grado de confianza en sus propiedades físicas y mecánicas para el cálculo.

➤ Mortero compresible para relleno

Se trata del material prototipo a comprobar. Consiste en un mortero convencional de cemento con un determinado porcentaje – a comprobar distintas dosificaciones en el cálculo – de esqueleto mineral sustituido por partículas de NFU – neumáticos fuera de uso-. Los porcentajes a analizar en el modelo oscilan entre el 50 % y el 100 % de la arena 0/4 añadida.

b. Geometría global del modelo

En las siguientes líneas, se comentará el modelo adoptado para la simulación del escenario, además de las dimensiones del mismo y las condiciones de vinculación adoptadas.

➤ Modelo adoptado

Se adoptará un modelo cilíndrico tridimensional [58], [59] y [60] . Pese a que todas las hipótesis realizadas con el fin de obtener un modelo abierto a un caso general –sobre el cual se pueden definir distintos escenarios particulares como se verá más adelante – permitirían emplear un modelo axisimétrico –por simetría de geometría y carga, homogeneidad y continuidad-, este no permitiría obtener una distribución espacial de las tensiones ni en el nuevo mortero ni en los elementos de revestimiento.

La característica principal de las excavaciones en túnel es que conceptualmente resulta fácil asociarlas a cilindros, rectos o curvos, debido a tratarse de obras lineales -1D- cuya sección transversal suele presentar formas muy próximas a la circular. En caso de terrenos homogéneos e isótropos, donde las condiciones resultan parecidas en las tres dimensiones es muy popular adoptar modelos donde tanto el túnel como el terreno adoptan una morfología tubular cilíndrica. Otra ventaja de las formas cilíndricas es que, si el túnel tiene sección circular, se puede trabajar el modelo con un sistema de referencia cilíndrico, que simplifica notablemente la implementación del mismo y permite conocer algunos valores habituales de estudio –como las tensiones de placa y membrana en las dovelas – que en una geometría cartesiana serían más complejas de obtener debido a la forma del elemento.

No se empleará un cilindro completo, por adoptarse dichas hipótesis de simetría. Se empleará una cuarta parte del cilindro comprendida entre los planos horizontal y vertical que pasan por el eje del túnel. Ello permitirá reducir notablemente el coste computacional sin perder precisión en los resultados. El hecho de usar una amplitud de  $90^\circ$  y no menor es para poder obtener el estado tensodeformacional alejado de posibles apoyos. En otras materias, como en el estudio del hormigón armado o el acero, se considera que las tensiones alcanzan una distribución uniforme y sin influencia de los contornos a una distancia de los mismos próxima al espesor de dicho material. Es decir, si se emplean espesores para cada capa de 3 metros, comienza a ser razonable estudiar las tensiones a una distancia de 3 metros del último apoyo. Un abanico de  $90^\circ$  asegura un número suficiente de puntos dentro del rango de distancia mínima respecto a los planos de simetría donde se impondrán los límites del modelo.

➤ Dimensiones

Las dimensiones del modelo vienen condicionadas por la condición de ser suficientes como para que la influencia de las restricciones en los bordes no afecte a los resultados tenso-deformacionales buscados. El criterio de dimensionamiento viene dado por experiencias previas y oscila dentro de unos valores relativamente cerrados que se pueden encontrar en la bibliografía – [60], [31] y [32] - entre otros –, siendo estas directrices ampliamente aceptadas por la comunidad científica.

Puntualizar de nuevo que en un terreno susceptible de presentar el fenómeno de 'squeezing', es necesario, al menos, quince diámetros de excavación en la dirección longitudinal y diez diámetros en dirección transversal para evitar la influencia de las condiciones de borde.

Al tratarse de un modelo con simetría vertical y horizontal de geometría y carga se trabajará con un cuarto de sección para evitar, como se expuso anteriormente, sobrecargar el modelo de elementos que no van a aportar una mejora significativa de los resultados y sí un coste de computación mucho mayor.

➤ Condiciones de vinculación

Se dispondrán apoyos simples – sólo se impedirá el desplazamiento en una dirección – de forma que se impida el desplazamiento en perpendicular a los planos limitantes, pero se permita la convergencia radial. La acción gravitatoria y empujes del terreno serán tenidos en cuenta como una presión uniforme en la dirección radial. No se dotará, por tanto, al terreno de peso propio. Este es uno de los puntos característicos de este modelo donde más se manifiesta su carácter genérico.

La introducción del peso propio podría romper la homogeneidad de carga que intenta comprimir el terreno contra el revestimiento,

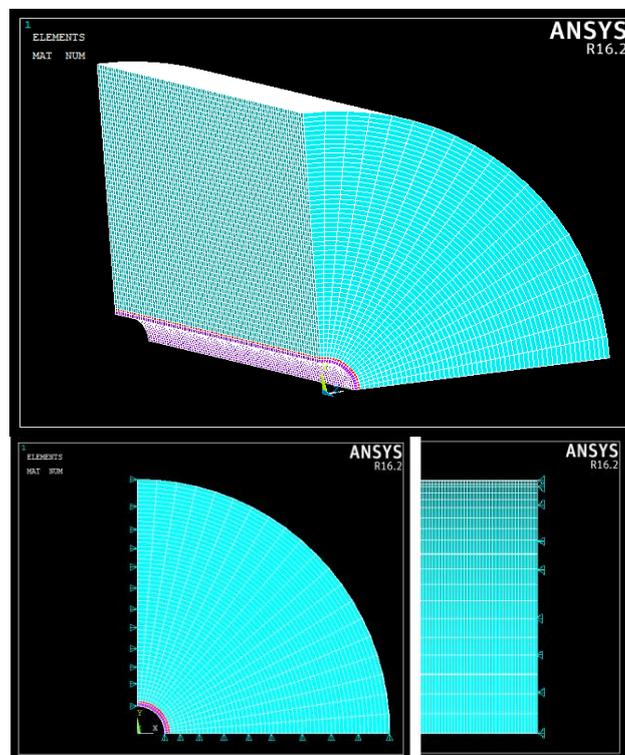


Figura 1.68 Perspectiva del modelo completo (arriba) y esquema de las condiciones de vinculación del modelo con el exterior (abajo).

Fuente: Elaboración propia.

maquillando el resultado de la distribución de tensiones sobre el mismo, que ya no se debería únicamente al comportamiento general del mortero, sino a los efectos del gradiente de presiones inducido por la gravedad.

## 5.2 MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL CONJUNTO. SIMULACIÓN DE VARIOS ESCENARIOS

El objetivo del presente apartado es establecer una serie de escenarios diferenciados a procesar numéricamente con el fin de someter virtualmente a las distintas mezclas ensayadas del nuevo mortero a un abanico de sollicitaciones que reproduzcan los principales entornos en los que se espera aplicar la solución. De este modo se pretende, como fin último, marcar una serie de criterios los cuales, en función de a qué entorno de los ensayados se asemeje mejor el de puesta en obra, permitan elaborar unas recomendaciones sencillas en relación a qué dosificación es más conveniente emplear para dicho túnel.

Dado que, como se dijo en etapas anteriores, la finalidad de la tesis es estudiar la respuesta de un nuevo material y no el análisis estructural de los túneles profundos se ha considerado razonable, además de suponer un importante ahorro computacional, estudiar el conjunto de factores –o ‘variables’ como se les denominará en adelante- que gobiernan el problema de la convergencia del terreno sobre el revestimiento del túnel. Se buscará, a continuación, determinar una serie de parámetros –el menor número de ellos posible-, que permita reducir todo el abanico de casos esperables –podría considerarse infinidad de ellos- a una batería de modelos gobernados por un reducido conjunto de parámetros de forma que sea posible caracterizar y contrastar las distintas dosificaciones del nuevo mortero. De algún modo, la forma de actuar seguiría la filosofía que se adopta en los análisis de sensibilidad una vez se conocen las variables de entorno de un problema dado.

A continuación, se muestran los parámetros elegidos para controlar las variables del entorno que regulan el comportamiento del ‘squeezing ground’ y su agrupación en los diferentes casos de estudio a plantear:

- Diámetro de excavación

Se ha adoptado un diámetro único de 9 metros, denominado en adelante D. Dado que se empleará TBM de escudo simple, se ha propuesto una longitud aproximada de la coraza de 11 metros (L) [61].

➤ Características mecánicas del terreno

Se han adoptado tres tipologías de roca [57] y [62]:

- R1: Representativa de rocas más duras –calizas o areniscas- con:
  - $\sigma_{ci} = 50$  MPa,
  - $m_i = 17$  \*correspondería a una arenisca media
- R2: Representativa de una roca media –pizarras, margas o lutitas compactas-:
  - $\sigma_{ci} = 25$  MPa,
  - $m_i = 25$  \*correspondería a una pizarra competente
- R3: Representativa de una roca más débil –argilitas o margas medias-:
  - $\sigma_{ci} = 10$  MPa,
  - $m_i = 7$  \*correspondería a una marga media

Además, se han adoptado tres grados de daño para cada tipología:

- G85: Correspondería a un GSI de 85. Muy buen estado.
- G50: Correspondería a un GSI de 50. Degradación media.
- G25: Correspondería a un GSI de 25. Degradación elevada.

De este modo, resultaría un total de 9 combinaciones posibles [3 x 3]

➤ Velocidad de avance de la tuneladora

Se han establecido un total de 5 velocidades de avance de la tuneladora 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- [63], [64] y [65]:

- V1: 6m/h       $t_1 = 2$  h
- V2: 4.5 m/h     $t_2 = 2.5$  h
- V3: 3 m/h       $t_3 = 4$  h
- V4: 1.5 m/h     $t_4 = 8$  h
- V5: 0.5 m/h     $t_5 = 22$  h

Las velocidades y tiempos de retardo no originan nuevos escenarios de análisis ya que se ha considerado que son directamente dependientes de las 9 combinaciones anteriores.

➤ Presión inicial del terreno

Se ha establecido una presión uniforme radial 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 y Marinos [62], [66] y [67] y considerando como apoyo y complemento otras investigaciones [68], se predice un grado de convergencia severa –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 2000 m – las excavaciones actuales no sobrepasan esta cifra – o la resistencia a compresión simple del material.

Esto resulta en una presión diferente para cada escenario –denominadas de P1 a P9- y sus resultados pueden verse a continuación.

➤ Otros parámetros

Existen otros parámetros que deben ser modelizados para la correcta implementación del modelo. Estos son: sobreexcavación, espesores de mortero y revestimiento y tipología resistente del hormigón de revestimiento. Se ha optado por mantener constantes estos valores en todos los escenarios de estudio.

- Sobreexcavación (Se1): Incremento de 0.15 metros el diámetro de la excavación.
- Espesor inicial de capa de mortero (e1): 0.25 metros.
- Espesor de la capa de revestimiento (e2): 0.40 metros.

Todo esto resulta en un diámetro interior aproximado del túnel de 8.5 metros –a falta de los efectos de convergencia- y de 9.15 metros excavados realmente.

➤ Comprobación a corto y largo plazo

El seguimiento de la evolución tenso-deformacional del hormigón de revestimiento se ha realizado en diferentes espacios temporales. Debe recordarse que para cada escenario se ha considerado que el TBM avanza a velocidades diferentes, lo que afecta al retraso en el tiempo de aplicación del mortero compresible, así como en la distancia recorrida por el cabezal de excavación desde

la aplicación del mismo hasta que se considera que este es capaz de asumir cierto grado tensional – se ha tomado un retardo en el endurecimiento del mortero superior al inicio de fraguado e inferior a 28 días -.

Los puntos de control tenso-deformacional se han tomado desde dos puntos de vista:

- Corto plazo: primeros instantes tras la instalación del revestimiento. Podría considerarse durante el periodo de excavación. Se tomarán valores cada paso de excavación del TBM, es decir, cada vez que el TBM avanzaba una distancia de 1 metro.
- Largo plazo: se controlarán los valores a vez y media la duración total de la excavación, al doble y al triple de dicho tiempo. Por último, al mes, seis meses, año, dos años y cinco años tras finalizar la excavación.

➤ Diagrama de escenarios

El resultado de combinar todos los factores anteriores como se ha razonado en los epígrafes superiores es de 9 escenarios distintos determinados por la tipología de terreno y su grado de deterioro.

Se muestra a continuación el diagrama síntesis de todo este proceso:

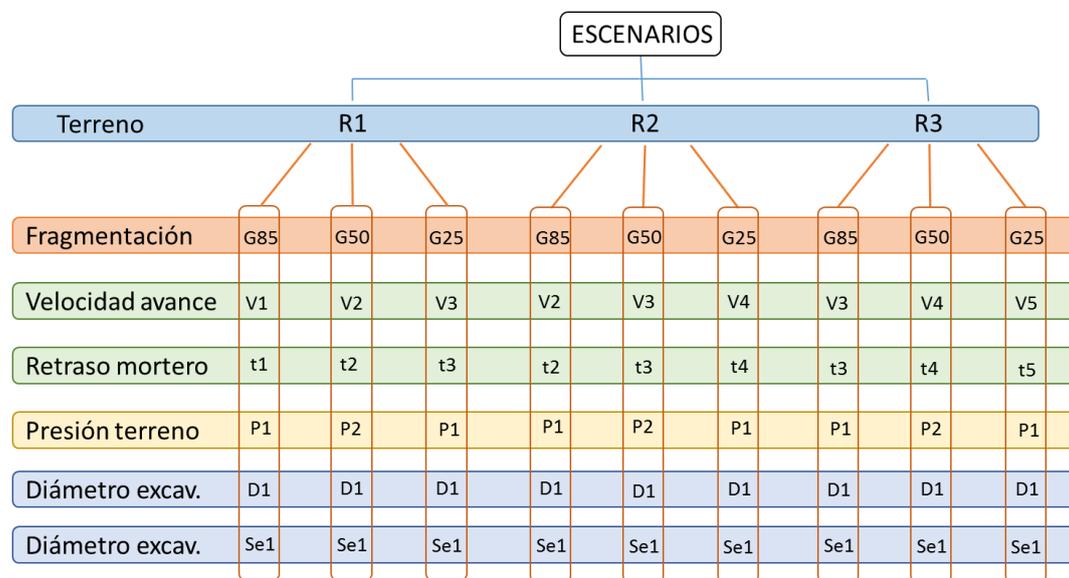


Figura 1.69 Síntesis de escenarios planteados. Fuente: Elaboración propia.

### 5.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES SOBRE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MORTERO CARACTERIZADAS EN LABORATORIO

El objeto del presente apartado es la exposición y análisis de resultados obtenidos tras el procesado del modelo numérico que simula la respuesta de las distintas dosificaciones frente a las solicitaciones de los escenarios planteados en etapas anteriores. Se han procesado un total de nueve escenarios de solicitud y diez mezclas de mortero distintas, resultando un total de noventa casos de cálculo.

#### a. Consideraciones generales

A continuación, se comentarán los aspectos generales sobre el funcionamiento del modelo y que consideraciones deben ser tenidas en cuenta a la hora de interpretar los resultados en posteriores etapas.

#### ➤ Funcionamiento del modelo

Uno de los aspectos que han condicionado el control de resultados y el propio comportamiento del terreno solicitando al revestimiento es que el cálculo se ha realizado en hipótesis de deformación plana. El modelo se ha planteado como un conjunto de secciones contiguas de espesor igual al paso de excavación del TBM – considerado 1 metro -. La única deformación permitida para el sistema era la radial, de forma que la presión externa sólo podía originar la convergencia de terreno, revestimiento y mortero hacia el eje longitudinal del túnel.

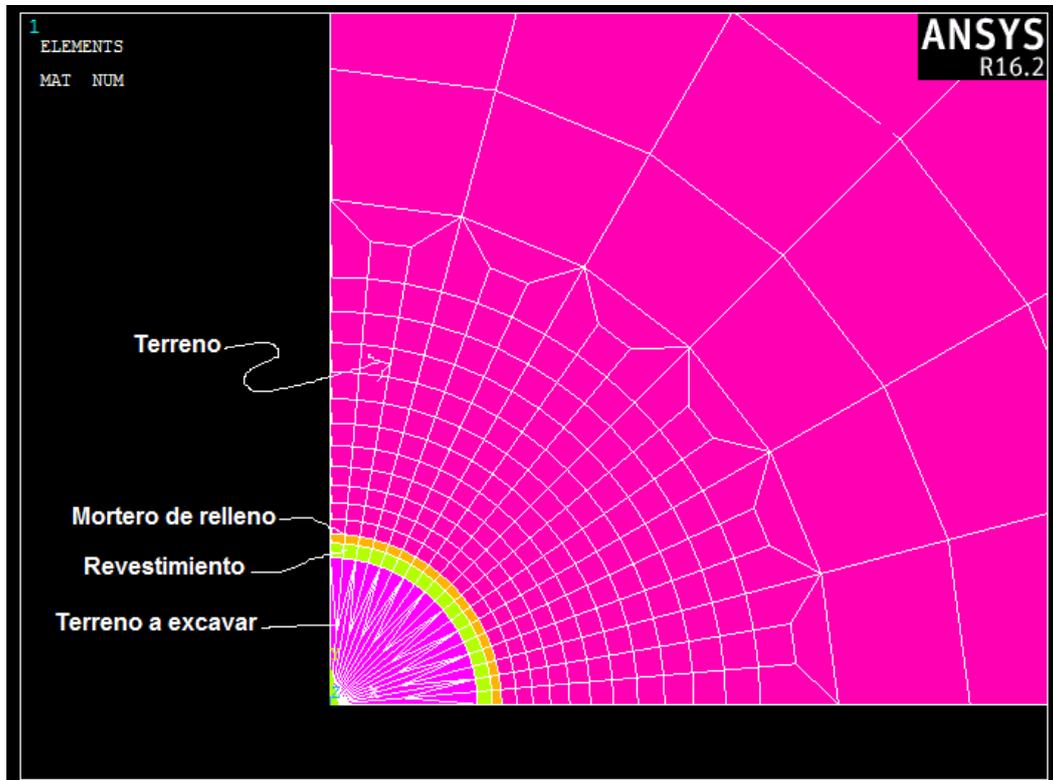


Figura 1.70 Sección transversal del túnel en el modelo. Fuente: Elaboración propia.

La hipótesis de deformación plana implica que la sección mantendrá sus caras a la misma distancia del plano medio constantemente por lo que necesariamente aparecerán tensiones longitudinales – ley de Hooke generalizada -

El modelo se ha planteado como una única presión externa que comprime radialmente a todos los elementos y que, por la naturaleza no lineal del terreno que se ha introducido, se ha considerado realizar un pre proceso que incluía un periodo de regularización de tensiones previo al inicio de la excavación. De este modo, el inicio de excavación supone la ‘ruptura’ de ese equilibrio inicial que el resto de los elementos del modelo intentan subsanar mediante la aparición de un campo de tensiones tridimensional. Más adelante podrá verse, en términos tensionales, cómo ha respondido el terreno a la excavación. Es por ello que se ha adoptado dicha hipótesis de deformación plana puesto que se espera que las secciones no se salgan

de su plano, pero sí movilizan tensiones longitudinales motivadas por el resto del bloque de terreno.

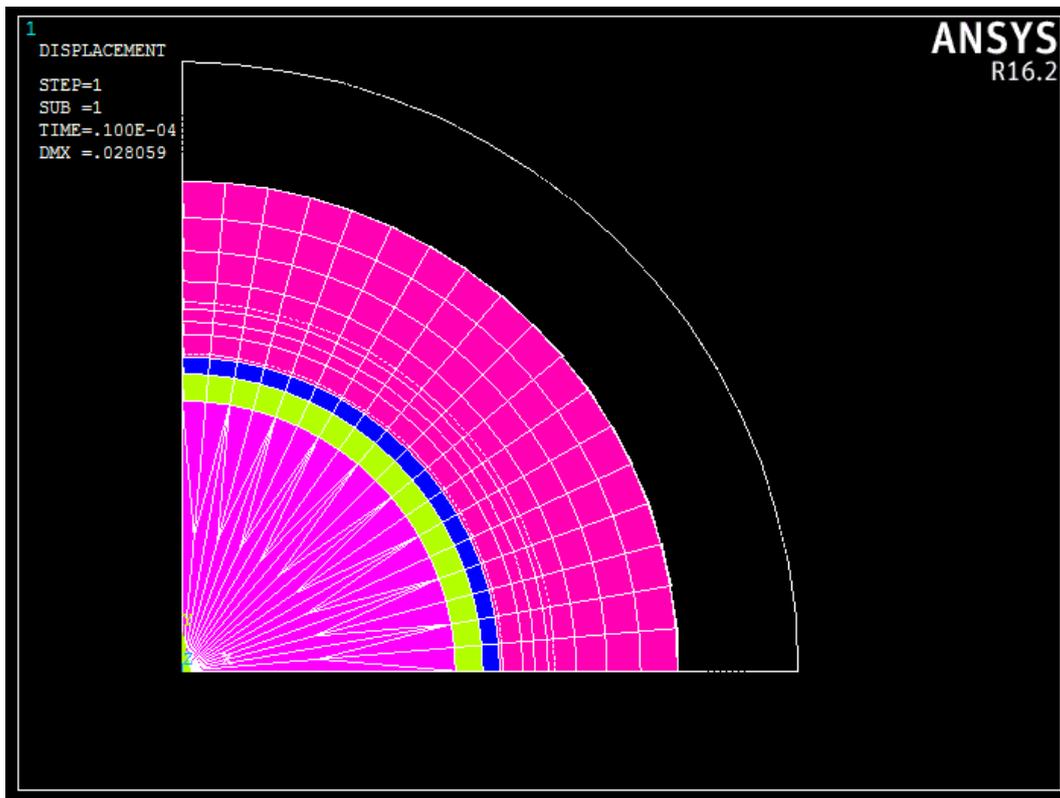


Figura 1.71 Sección transversal deformada del túnel en el modelo – no a escala.

Fuente: Elaboración propia.

Se muestra a continuación la evolución del campo tenso-deformacional obtenido al paso del TBM. Puede apreciarse, en términos de intensidad tensional – es decir, la tensión media en cada elemento en 3D- cómo aparecen tensiones no despreciables por delante del frente de excavación, lo que corrobora la importancia de emplear un modelo de estas características en lugar de uno bidimensional o axisimétrico.

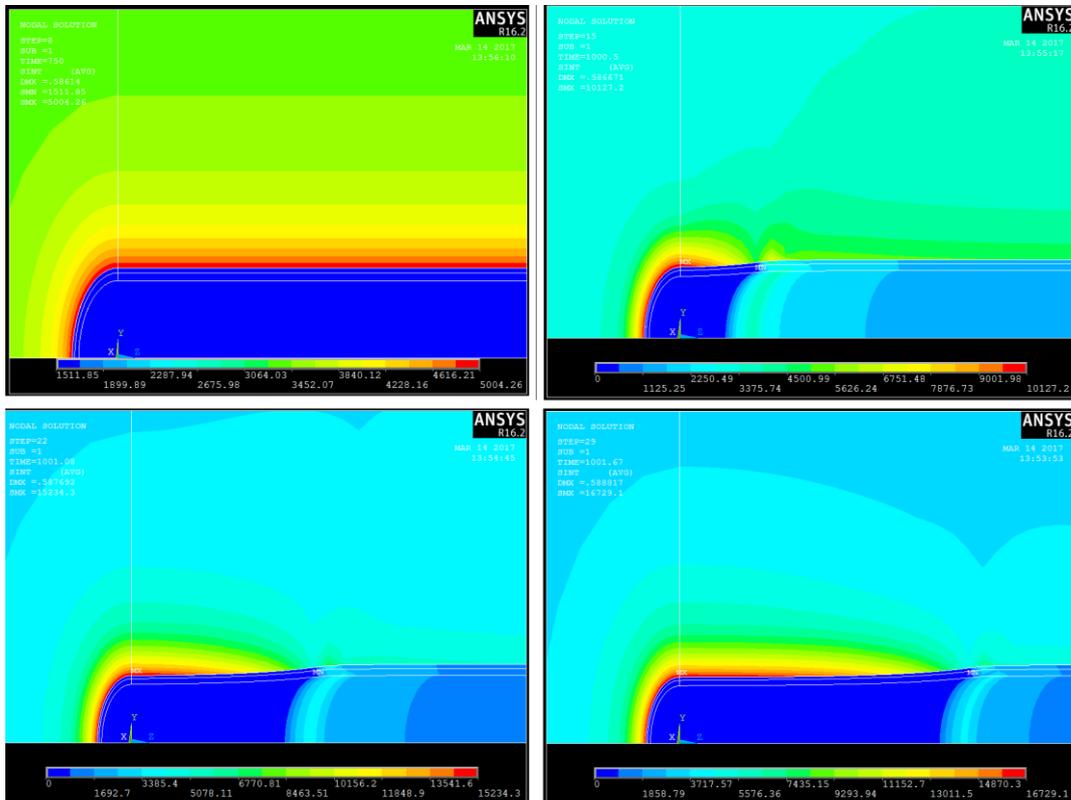


Figura 1.72 Evolución de las tensiones de Von Mises y deformación en los elementos según el avance del TBM. Fuente: Elaboración propia.

➤ Limitaciones del modelo

La complejidad del modelo viene dada principalmente por dos factores: la no linealidad del comportamiento del terreno y modelizar la evolución tenso-deformacional del conjunto en el tiempo según el avance del TBM. Además, es necesario activar y desactivar elementos e incorporar nuevos materiales entre los distintos pasos de carga –dovelas, mortero, etc.-.

A pesar de dicha complejidad respecto a un modelo estructural estático convencional, la salida de resultados debe obedecer a uno de los enunciados que se ha venido repitiendo desde las primeras fases de la tesis: “se debe realizar un estudio comparativo entre las tensiones obtenidas en el revestimiento para distintas dosificaciones de mortero con unos valores de convergencia dados”. Es decir, únicamente es necesario conocer el desplazamiento radial y la tensión en

unos determinados puntos de control para poder caracterizar la respuesta de cada mezcla.

Además, si se tiene en cuenta las hipótesis establecidas– sólo actúa una carga radial uniforme y los materiales son homogéneos e isotrópicos – parece razonable reducir el número de puntos de control a uno único, ya que el campo de tensiones y desplazamientos originados será radial por simetría.

Las condiciones que debe cumplir dicho punto de control es que debe ser representativo de una sección cualquiera – la distribución uniforme y radial de tensiones y deformaciones así lo garantiza - y que debe estar lo suficientemente alejado de los contornos como para no verse afectado por los mismos.

En pruebas preliminares con modelos reducidos se ha observado que se obtienen valores representativos en puntos situados a una distancia mínima de  $1/8$  de la longitud total del túnel. Además, cuanto más próximo esté el punto de control a la cara transversal por la que se inicie la excavación, más pasos de carga se registrarán en la salida de resultados. Por tanto, la sección óptima para la toma de valores se hallará a  $1/8$  de la longitud total más próximo a la cara de inicio de excavación.

Para evitar posibles afecciones con los contornos longitudinales, el punto de control se ha establecido a  $45^\circ$  de ambas caras, es decir en la bisectriz del ángulo que forman.

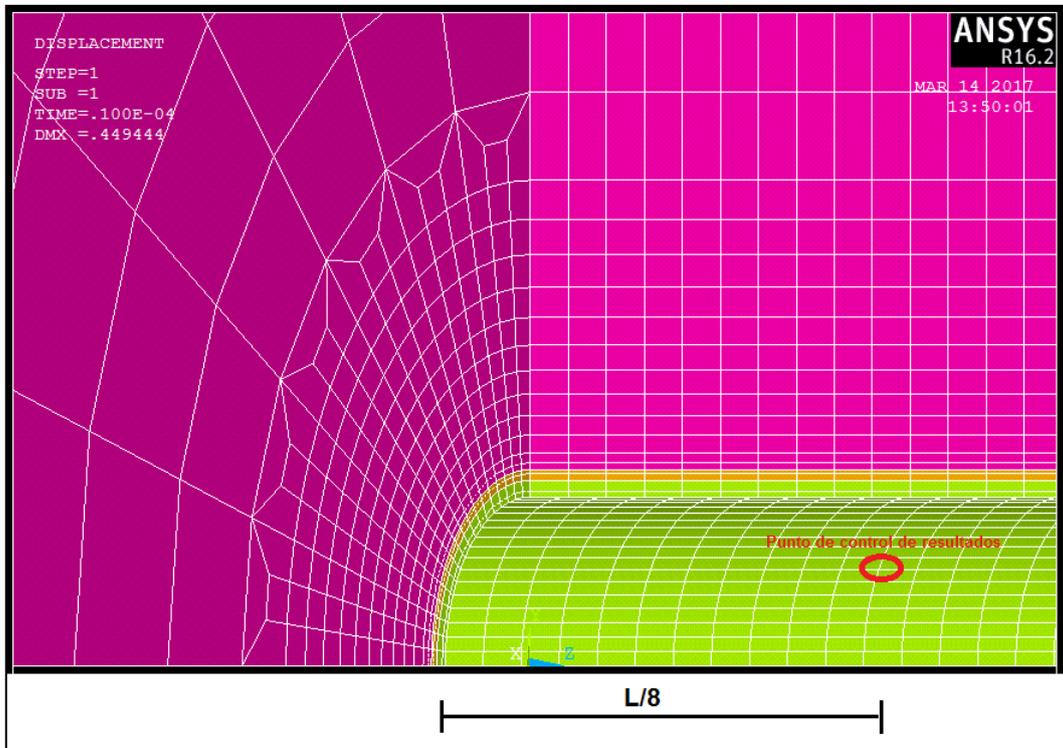


Figura 1.73 Ubicación del punto de control de resultados de tensión y convergencia. Fuente: Elaboración propia.

Con todo lo anterior, el lector puede deducir que se ha empleado un modelo complejo para poder captar la evolución tenso-deformacional sufrida por sus distintos componentes, el procedimiento constructivo y la respuesta temporal del revestimiento. Ello, como era de esperar, conlleva un elevado coste computacional para una salida de datos tan sencilla como es la obtención de una serie de valores de convergencia y las tensiones asociadas a ella. Es por ello que se han adoptado una serie de consideraciones que conviene exponer antes de mostrar la salida de resultados:

No se ha considerado criterio de rotura de ningún material. Para un modelo de esta envergadura supondría añadir más efectos no lineales que consumirían un elevado tiempo de computación y no aportarían información relevante para caracterizar las dosificaciones. Si bien es cierto, se ha buscado que los resultados de tensiones máximas se muevan dentro de intervalos razonables para su aplicación – p.ej. permanecer en la rama elástica de los elementos de hormigón -.

- En los resultados mostrados a continuación no se ha tenido en cuenta el tiempo previo al inicio de la excavación. Es decir, el denominado 'periodo de calentamiento' no aparece reflejado en los resultados puesto que no es de interés para conocer la evolución tensional en el revestimiento.
- Igualmente, no resulta de interés el estado de tensiones y deformaciones previo al inicio de la excavación. Es decir, los resultados tomarán como origen temporal el instante en el que se instala el revestimiento.
- No se han considerado efectos reológicos del hormigón ni del mortero. Se considera que las propiedades mecánicas de los mismos permanecen constantes una vez han endurecido.
- La combinación de elementos viscoelásticos con la técnica de 'Birth & death' y materiales que modificasen su módulo elástico con el tiempo no es posible para el programa empleado por lo que se ha simulado el endurecimiento del mortero con una presión radial hacia el exterior aplicada en la pared del terreno excavado. Una vez se ha activado -'birth'- el elemento revestimiento, éste debe comportarse como un material elástico lineal durante el resto del análisis.
- Sobre la interpretación de resultados

A la vista de lo anterior es de esperar lo siguiente:

  - El origen de tiempos y el número de pasos de carga no coincide con la propia excavación, sino que está referida al instante en el que se activa el elemento de revestimiento junto al mortero ya endurecido.
  - Pueden aparecer valores en las convergencias muy superiores a los esperables por experiencias previas plasmadas en la literatura. Ya se comentó, a la hora de plantear los nueve escenarios distintos que la presión exterior del terreno se establecía de forma lineal y directamente proporcional al peso específico del mismo y a la profundidad. De este modo, se obvian los fenómenos de arqueo, pudiendo sobrevalorar las presiones que se darían en un caso real. Existen formas de subsanar este efecto, pero complican el modelo y no afectan al estudio comparativo entre distintos materiales ya que los escenarios son comunes para todos ellos.
  - No se ha buscado reproducir fielmente una situación o conjunto de situaciones reales. Para ello sería necesario conocer con detalle la geología del entorno a modelizar y ese punto de vista se aleja del de poder caracterizar unos nuevos materiales frente a unas determinadas sollicitaciones. Si bien es cierto, todas

las hipótesis y valores adoptados hasta el momento ya se demostró que se mueven dentro de órdenes de magnitud aceptables para un escenario real. Por ello, el lector debe interpretar los resultados que se muestran en los posteriores apartados desde el punto de vista comparativo entre la respuesta de las distintas dosificaciones, no buscando la exactitud en tensiones y deformaciones que cabría esperar en un modelo que reprodujera una situación real concreta.

b. Resultados en los desplazamientos

Antes de comenzar con la exposición de resultados conviene recordar los escenarios planteados, así como las distintas mezclas analizadas desde el punto de vista de las propiedades mecánicas:

➤ Escenarios

Escenario	Roca	GSI	E (GPa)	G (Gpa)	$\nu$
E1	R1	85	53,03	21,21	0,25
E2	R1	50	7,07	2,83	0,25
E3	R1	25	1,68	0,67	0,25
E4	R2	85	37,49	15,00	0,25
E5	R2	50	5,00	2,00	0,25
E6	R2	25	1,19	0,47	0,25
E7	R3	85	23,71	9,49	0,25
E8	R3	50	3,16	1,26	0,25
E9	R3	25	0,75	0,30	0,25

Tabla 1.77 Síntesis de escenarios. Fuente: Elaboración propia.

De cara a nombrar las dosificaciones, se debe indicar que para simplificar la nomenclatura de cada una de ellas en el software ANSYS la terminología DT\_0x se ha sustituido por Mx. Siendo x el número correspondiente a cada una de las propuestas. A continuación, se indica el módulo elástico y el coeficiente de Poisson de cada una de las dosificaciones:

Dosificación	E (GPa)	$\nu$
M1	7,50	0,2
M2	2,20	0,2
M3	5,70	0,2
M4	5,40	0,2
M5	1,90	0,2
M6	2,10	0,2
M7	9,40	0,2
M8	1,10	0,2
M9	5,10	0,2
Convencional	5,00	0,2

Tabla 1.78 Síntesis de dosificaciones: módulo elástico y Poisson. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que respecta a los desplazamientos, como se dijo anteriormente, sólo puede producirse convergencia radial hacia el eje longitudinal del túnel. Las convergencias obtenidas para cada escenario y dosificación se muestran a continuación:

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
<b>M1</b>	-2,01955	-15,162	-24	-1,42882	-8,05636	-9,14278	-3,38926	-5,12848	-7,22774
<b>M2</b>	-2,01961	-15,161	-23,999	-1,42887	-8,05575	-9,14127	-3,38926	-5,1276	-7,22748
<b>M3</b>	-2,02E+00	-15,162	-24	-1,42881	-8,05614	-9,1423	-3,38922	-5,12818	-7,22753
<b>M4</b>	-2,01954	-15,162	-24	-1,42881	-8,0561	-9,14222	-3,38922	-5,12813	-7,2275
<b>M5</b>	-2,01964	-15,161	-23,999	-1,4289	-8,05573	-9,14116	-3,38929	-5,12756	-7,22757
<b>M6</b>	-2,01962	-15,161	-23,999	-1,42888	-8,05574	-9,14123	-3,38927	-5,12758	-7,22751
<b>M7</b>	-2,01956	-15,162	-24,001	-1,42884	-8,0566	-9,14326	-3,38931	-5,12879	-7,22799
<b>M8</b>	-2,01976	-15,162	-23,999	-1,42905	-8,05576	-9,14083	-3,38946	-5,12748	-7,22809
<b>M9</b>	-2,01954	-15,162	-24	-1,42881	-8,05607	-9,14214	-3,38921	-5,12808	-7,22747
<b>M_CONV</b>	-2,01955	-15,162	-24	-1,42881	-8,05605	-9,14211	-3,38921	-5,12807	-7,22746

Tabla 1.79 Convergencias obtenidas – en cm- para cada escenario y dosificación. Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse que, como era de esperar, las convergencias no sufren apenas variación – del orden de centésimas de milímetro - con las dosificaciones, pero sí según el tipo de roca. Es decir, se ha conseguido el efecto deseado en el planteamiento de la tesis de reducir todas las variables que gobiernan el problema

del 'squeezing ground' a una batería de escenarios representados, cada uno de ellos, por una convergencia o sollicitación única para el mortero compresible. De este modo, aunque la respuesta del túnel propuesto no coincida exactamente con lo que sucedería en la realidad, todas las mezclas parten en igualdad de condiciones desde el punto de vista de la sollicitación.

Por tanto, se puede asociar cada escenario a una única convergencia final según se muestra a continuación:

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Converg. (cm)	2,02	15,16	24,00	1,43	8,06	9,14	3,39	5,13	7,23
Conv. Relativa (%)	0,434	3,261	5,161	0,307	1,732	1,966	0,729	1,103	1,554

Tabla 1.80 Convergencias representativas de cada escenario. Fuente: Elaboración propia.

Se entiende por convergencia relativa al cociente entre la convergencia absoluta y el radio de la excavación en porcentaje.

#### c. Resultados de tensiones

Por lo que respecta a los resultados de las tensiones, se ha obtenido la tensión media equivalente en un punto intermedio del revestimiento según el criterio de Von Mises. Se distinguen dos situaciones, corto plazo y largo plazo. Se considerará corto plazo el periodo necesario hasta la regularización de tensiones – aproximadamente la duración de la excavación – y largo plazo se han tomado distintos puntos de control hasta los cinco años tras finalizar la excavación.

La distinción de resultados a corto y largo plazo viene muy condicionada por el tiempo de relajación que se le imponga al amortiguador del modelo de Maxwell que representa al terreno. Éste a su vez depende de la viscosidad del mismo y resulta un parámetro muy difícil de medir en la realidad. Es por ello que el valor adoptado para dicha viscosidad/periodo de relajación es el principal condicionante de la velocidad de convergencia del terreno y, por tanto, de la respuesta tenso-deformacional de los elementos de hormigón destinados a contenerla. Una vez más se debió plantear un valor representativo, basado en la literatura existente –ya que se trata de un planteamiento general, no de unas condiciones geológicas específicas- y ello puede conllevar a asumir resultados que, para un caso real, podrían alejarse de los que allí se obtendrían.

Dado que no existen referencias sólidas sobre cómo estimar dicha viscosidad de la roca – al depender el fenómeno de fluencia de múltiples variables – para cada uno de los escenarios planteados, se optó por considerar un tiempo de relajación de 1000 días – aproximadamente 3 años – en todos ellos.

Si bien es cierto que la incertidumbre aquí asumida plantea dichos problemas, también lo es que, una vez más, las condiciones de sollicitación son comunes para todas las mezclas y ello no influye en caracterizar y comparar su comportamiento – sí que influiría en la velocidad de convergencia, tensiones obtenidas y duración del periodo de estabilización de tensiones, pero no en cuál de todas responde más favorablemente frente a la fluencia del terreno -.

La respuesta tensional obtenida en ANSYS, para un escenario y mezcla cualesquiera, para el tiempo completo de procesado, tiene un aspecto similar al siguiente:

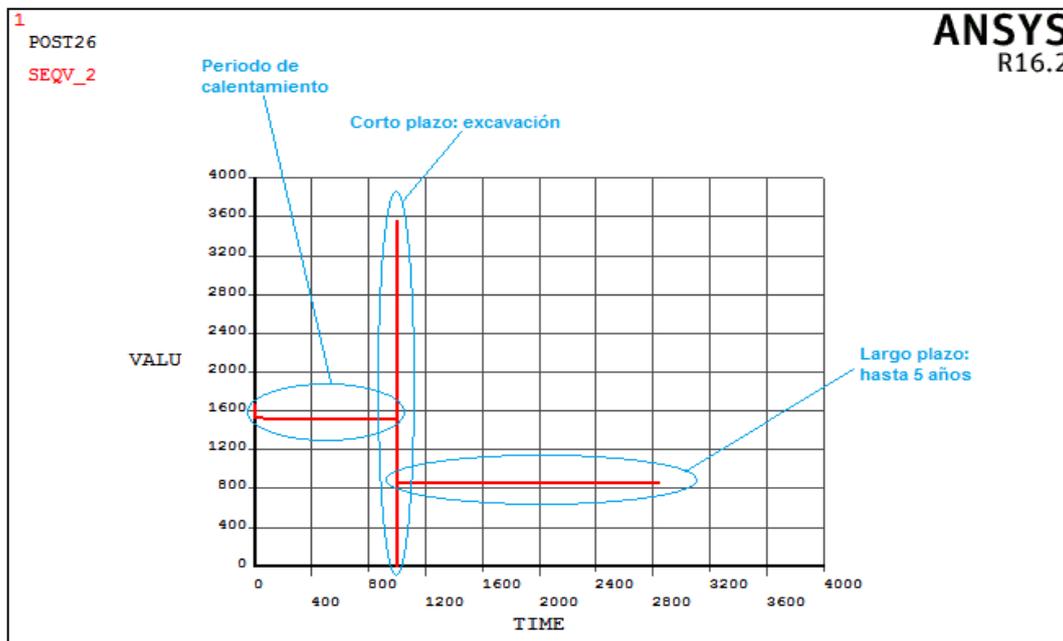


Figura 1.74 Tensión de Von Mises en el revestimiento para E9 y M\_CONV durante todo el proceso de simulación numérica. Distintas etapas para el análisis de resultados. ANSYS APDL. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior puede apreciarse la evolución de tensiones durante el proceso completo. Para la presente tesis sólo resultará de interés el espacio temporal que comprende las dos últimas fases. Ampliando los resultados anteriores para sólo el periodo de ‘corto plazo’ se obtiene la siguiente gráfica:

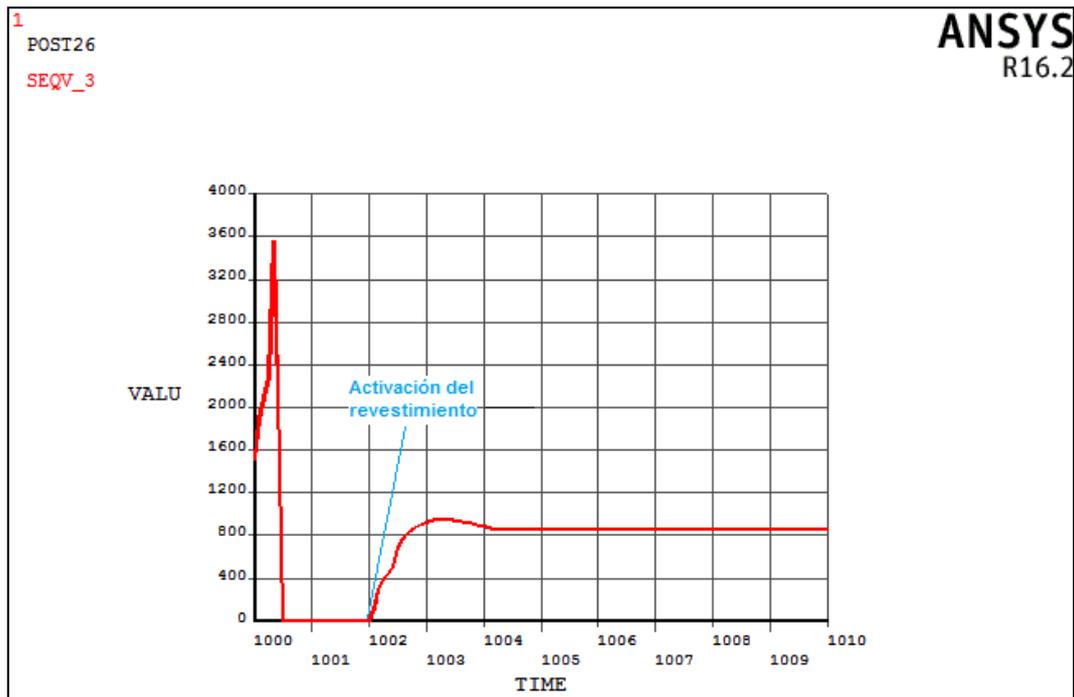


Figura 1.75 Evolución de tensiones de Von Mises durante los primeros días de vida del revestimiento. Fuente: Elaboración propia.

Como puede verse en la figura anterior, la técnica del ‘Birth & Death’ hace que aparezcan tensiones anteriores al periodo de instalación del mortero y revestimiento. Esto se debe a que durante el periodo de ‘calentamiento del modelo’, el terreno se comprime por la actuación de la presión externa. Estos resultados no son relevantes para el desarrollo de la solución puesto que no corresponden al material ‘hormigón’ de las dovelas.

Puede observarse como las tensiones se anulan al paso del cabezal de corte y vuelven a adquirir valores no nulos posteriormente. Son los resultados a partir de este instante los que resultan de interés ya que estos sí corresponderán a la tensión de Von Mises dada en el revestimiento. También se aprecia que tras un breve

periodo de tiempo las tensiones se estabilizan. Esto se debe a que la convergencia se produce rápidamente y podría variarse modificando el tiempo de relajación antes mencionado.

A la vista de lo anterior parece razonable mostrar los resultados distinguiendo entre corto plazo –mediante los valores obtenidos en el tiempo- y un único valor representativo final del largo plazo, ya que las tensiones se estabilizan rápidamente y no es necesario plantear su evolución temporal –prácticamente nula-.

### Corto plazo

Se mostrarán a continuación los resultados obtenidos para corto plazo. En primer lugar, la evolución tensional mezcla a mezcla para cada escenario y, seguidamente, el resumen comparativo de todos ellos obteniendo ya las dosificaciones que menos tensión han conseguido inferir en el revestimiento.

Para cada mezcla, la respuesta tensional en cada escenario ha sido la siguiente:

#### ○ DOSIFICACIÓN M1

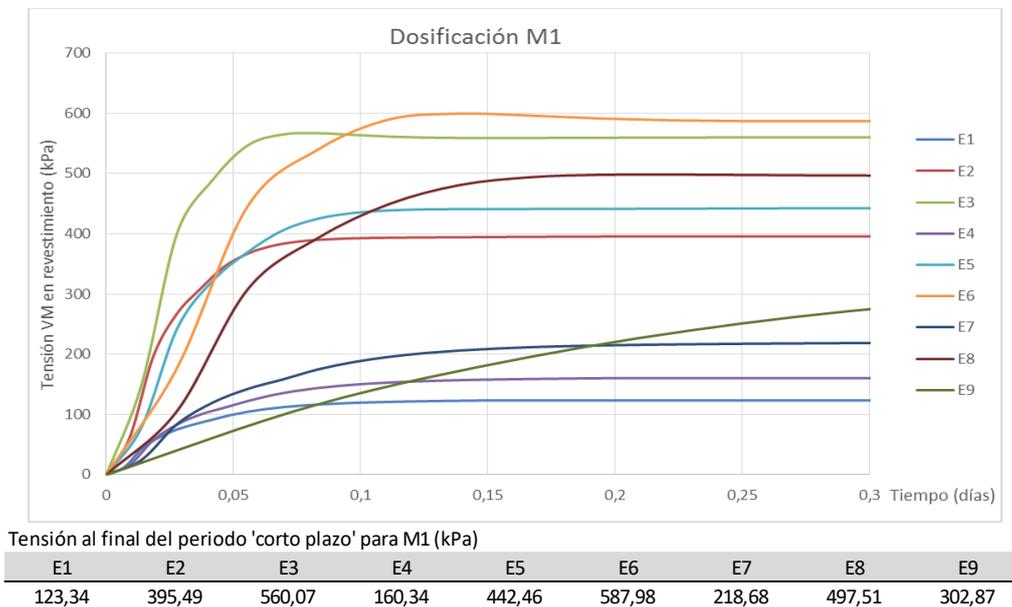


Figura 1.76 Tensiones en cada escenario para M1 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.

○ DOSIFICACIÓN M2

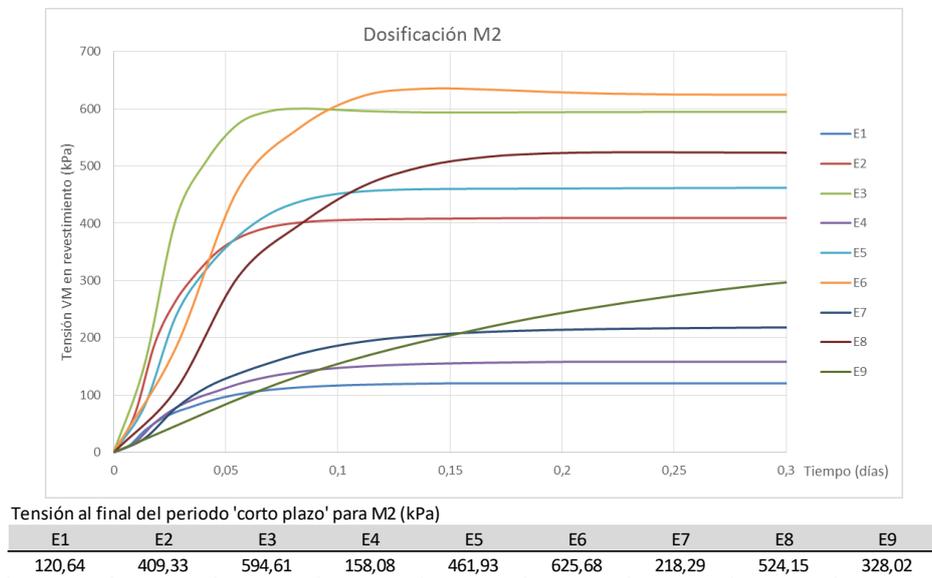


Figura 1.77 Tensiones en cada escenario para M2 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.

○ DOSIFICACIÓN M3

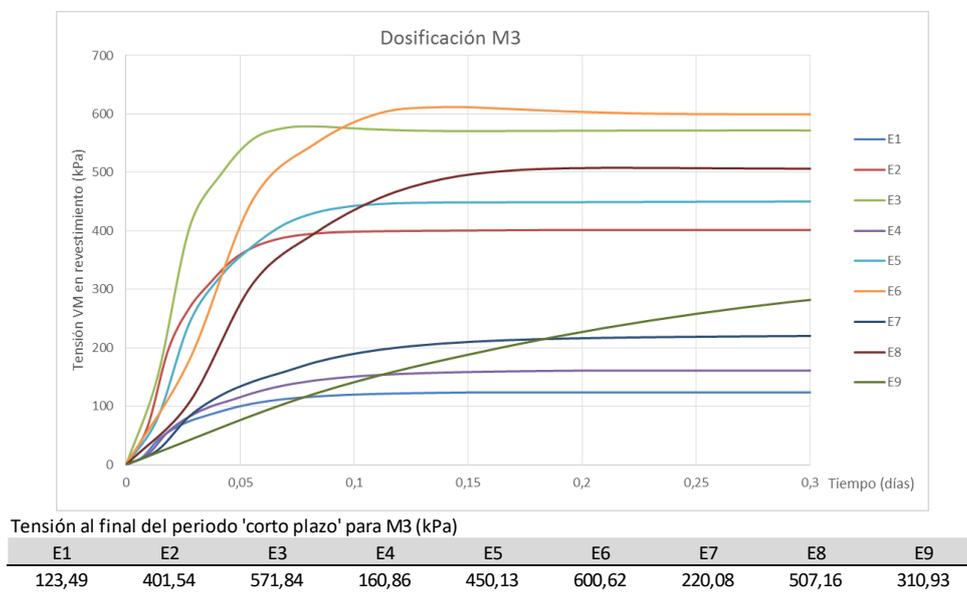
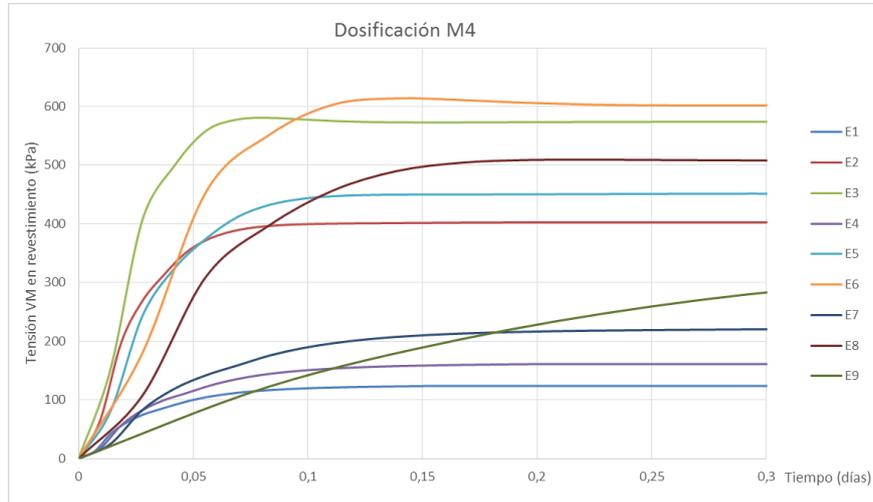


Figura 1.78 Tensiones en cada escenario para M3 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.

○ DOSIFICACIÓN M4

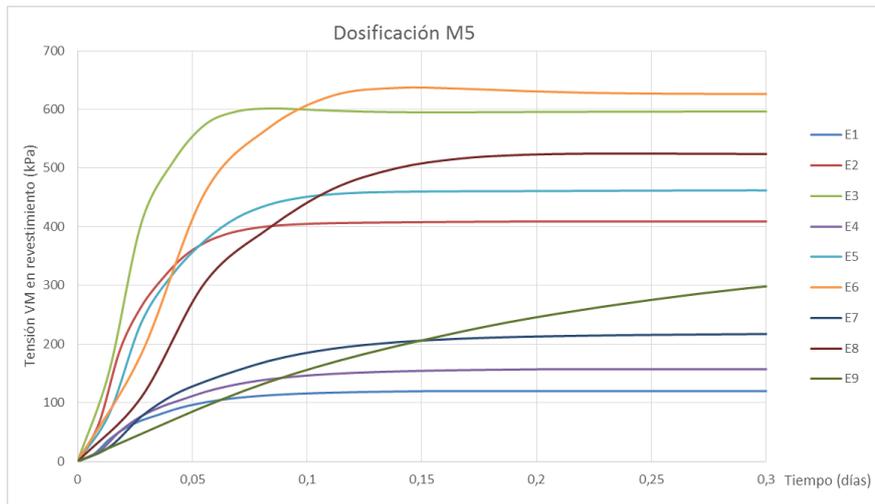


Tensión al final del periodo 'corto plazo' para M4 (kPa)

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
123,47	402,51	573,84	160,9	451,39	602,77	220,25	508,78	312,32

Figura 1.79 Tensiones en cada escenario para M4 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.

○ DOSIFICACIÓN M5

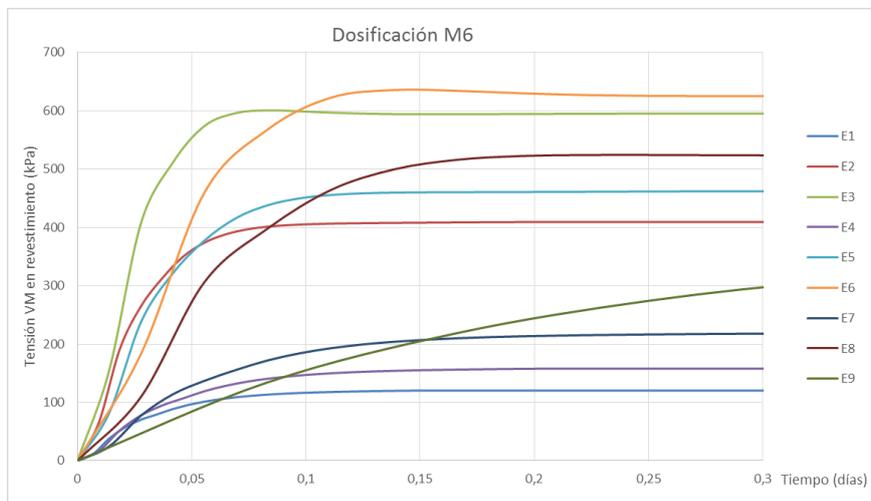


Tensión al final del periodo 'corto plazo' para M5 (kPa)

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
119,64	408,84	596,13	156,93	461,92	627,54	217,03	524,83	329,61

Figura 1.80 Tensiones en cada escenario para M5 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.

○ DOSIFICACIÓN M6

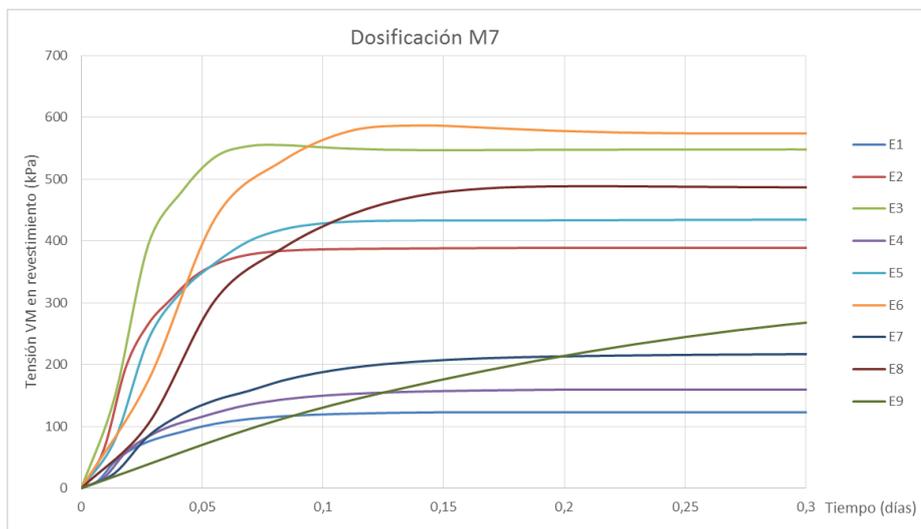


Tensión al final del periodo 'corto plazo' para M6 (kPa)

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
120,34	409,22	595,14	157,74	461,98	626,32	217,93	524,42	328,55

Figura 1.81 Tensiones en cada escenario para M6 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.

○ DOSIFICACIÓN M7

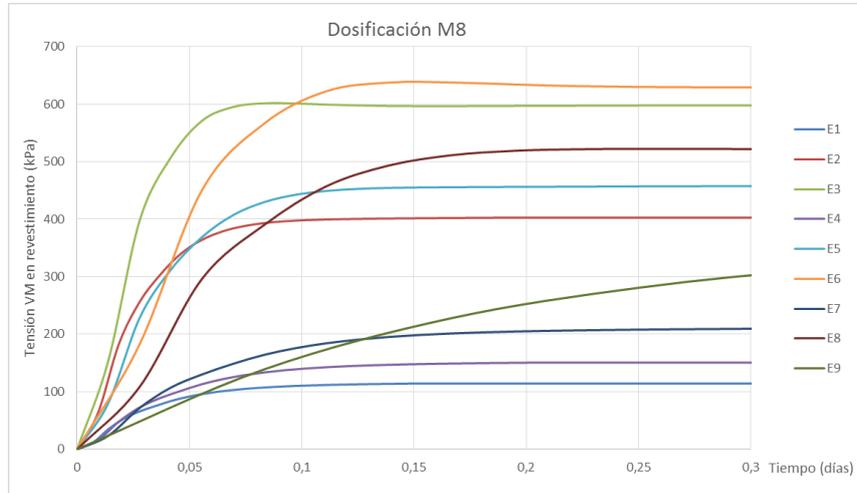


Tensión al final del periodo 'corto plazo' para M7 (kPa)

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
122,92	389,01	548,11	159,49	434,41	575,19	216,87	487,58	294,81

Figura 1.82 Tensiones en cada escenario para M7 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.

o DOSIFICACIÓN M8

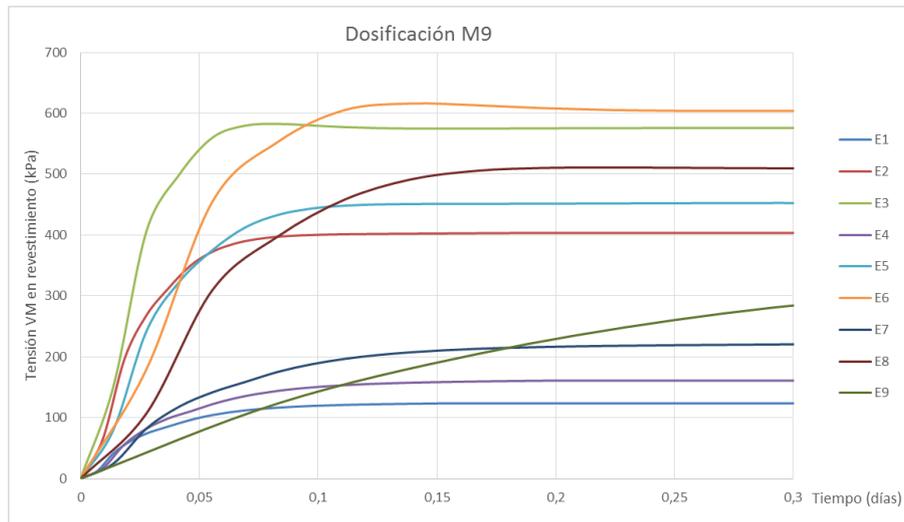


Tensión al final del periodo 'corto plazo' para M8 (kPa)

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
114,24	402,78	597,69	150,47	457,52	630,57	209,49	523	333,92

Figura 1.83 Tensiones en cada escenario para M8 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.

o DOSIFICACIÓN M9

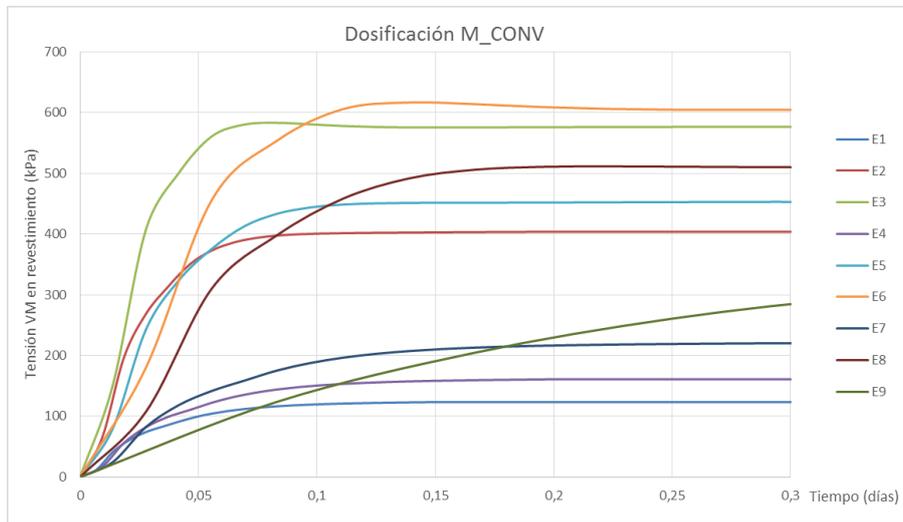


Tensión al final del periodo 'corto plazo' para M9 (kPa)

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
123,44	403,46	575,85	160,91	452,64	604,93	220,4	510,39	313,72

Figura 1.84 Tensiones en cada escenario para M9 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.

○ DOSIFICACIÓN M\_CONV



Tensión al final del periodo 'corto plazo' para M\_CONV (kPa)

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
123,42	403,78	576,51	160,91	453,05	605,65	220,44	510,92	314,19

Figura 1.85 Tensiones en cada escenario para 9 – corto plazo -. Fuente: Elaboración propia.

○ COMPARACIÓN DE RESULTADOS

La síntesis de las gráficas anteriores y, por tanto, uno de los puntos más relevantes de la tesis se muestra a continuación. Aparecen remarcadas las mezclas que mejor se han comportado en cada escenario. Se muestran las tensiones transmitidas al revestimiento en kPa:

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
M1	123,34	395,49	560,07	160,34	442,46	587,98	218,68	497,51	302,87
M2	120,64	409,33	594,61	158,08	461,93	625,68	218,29	524,15	328,02
M3	123,49	401,54	571,84	160,86	450,13	600,62	220,08	507,16	310,93
M4	123,47	402,51	573,84	160,9	451,39	602,77	220,25	508,78	312,32
M5	119,64	408,84	596,13	156,93	461,92	627,54	217,03	524,83	329,61
M6	120,34	409,22	595,14	157,74	461,98	626,32	217,93	524,42	328,55
M7	122,92	389,01	548,11	159,49	434,41	575,19	216,87	487,58	294,81
M8	114,24	402,78	597,69	150,47	457,52	630,57	209,49	523	333,92
M9	123,44	403,46	575,85	160,91	452,64	604,93	220,4	510,39	313,72
M_CONV	123,42	403,78	576,51	160,91	453,05	605,65	220,44	510,92	314,19

Figura 1.86 Relación de tensiones para mezclas y escenarios – en kPa – a corto plazo. Fuente: Elaboración propia.

- Largo plazo

Por las propiedades con las que se ha configurado la respuesta del modelo a la presión externa – viscosidad y tiempo de relajación -, la mayor parte de la convergencia se moviliza en las primeras horas de vida del mortero y revestimiento – como puede apreciarse en las gráficas anteriores-. Esto se traduce en que las tensiones y deformaciones no sufrirán grandes cambios tras finalizar el periodo de excavación. Por este motivo se ha optado por presentar a continuación el resumen de resultados para el valor final de las tensiones tras todo el periodo de estudios.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
M1	123,61	395,28	560,03	160,52	442,3	587,96	218,66	497,42	302,85
M2	120,95	409,08	594,56	158,31	461,73	625,64	218,33	524,03	328,01
M3	123,77	401,31	571,8	161,05	449,96	600,59	220,07	507,06	310,91
M4	123,76	402,29	573,79	161,09	451,22	602,74	220,25	508,67	312,3
M5	119,97	408,58	596,07	157,17	461,72	627,5	217,08	524,7	329,59
M6	120,66	408,97	595,09	157,97	461,78	626,28	217,97	524,29	328,53
M7	123,18	388,8	548,07	159,65	434,26	575,16	216,83	487,49	294,79
M8	114,58	402,51	597,62	150,74	457,29	630,53	209,57	522,86	333,9
M9	123,72	403,24	575,8	161,11	452,46	604,9	220,4	510,28	313,7
M_CONV	123,71	403,55	576,47	161,11	452,87	605,62	220,44	510,82	314,17

Figura 1.87 Relación de tensiones para mezclas y escenarios – en kPa – a largo plazo. Fuente: Elaboración propia.

Puede apreciarse que la diferencia en tensiones es reducida y que las mezclas que mejor comportamiento han presentado a corto plazo también lo hacen durante el periodo posterior.

d. Relaciones tensión – convergencia

Si se opta por excluir la variable tiempo del problema de la convergencia – no se hace distinción entre corto y largo plazo – y se normaliza la información mostrada en los puntos anteriores caracterizando el comportamiento de los morteros según el ratio tensión transmitida por unidad de desplazamiento – tensión/desplazamiento -, es posible obtener un segundo indicador que muestre qué mezcla presenta mayor eficiencia en el alivio de tensiones ya que se unifican todos los escenarios.

Para ello se tomará como valor de referencia de las tensiones el último obtenido tras el procedimiento de cálculo, de modo que se comparará la tensión y

convergencia al final de todo el proceso. El ratio se ha expresado en tanto por uno respecto al valor mínimo de tensión obtenido en cada escenario.

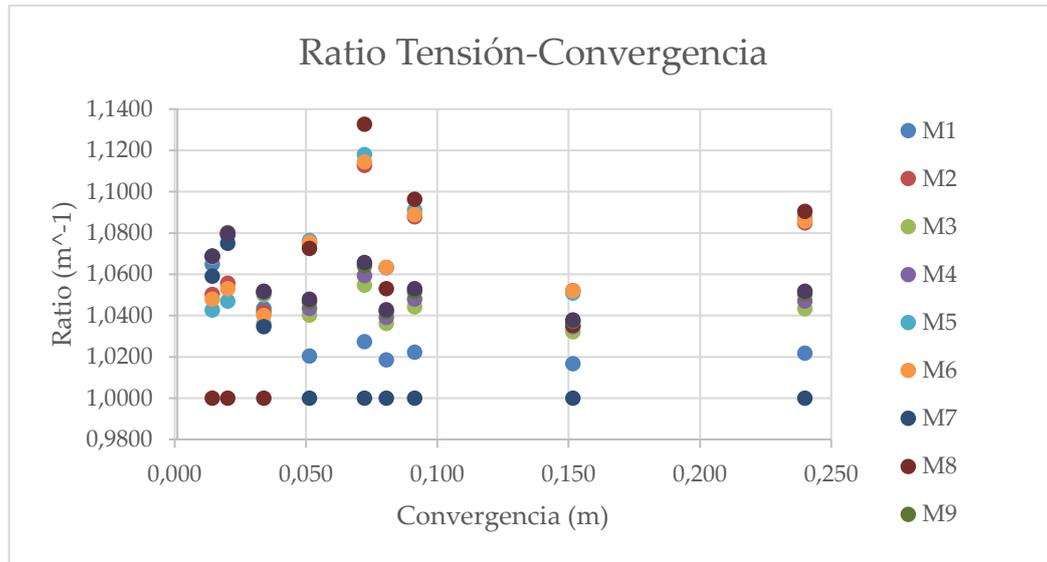


Figura 1.88 Ratio tensión-convergencia para cada mezcla y escenario en tanto por uno. Fuente: Elaboración propia.

		Convergencias (m)									
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	
Ratio Tensión / Convergencia (m <sup>-1</sup> )	M1	0,020	0,152	0,240	0,014	0,081	0,091	0,034	0,051	0,072	
	M2	1,0788	1,0167	1,0218	1,0649	1,0185	1,0223	1,0434	1,0204	1,0273	
	M3	1,0556	1,0522	1,0848	1,0502	1,0633	1,0878	1,0418	1,0750	1,1127	
	M4	1,0802	1,0322	1,0433	1,0684	1,0362	1,0442	1,0501	1,0401	1,0547	
	M5	1,0801	1,0347	1,0469	1,0687	1,0391	1,0480	1,0510	1,0434	1,0594	
	M6	1,0470	1,0509	1,0876	1,0427	1,0632	1,0910	1,0358	1,0763	1,1181	
	M7	1,0531	1,0519	1,0858	1,0480	1,0634	1,0889	1,0401	1,0755	1,1145	
	M8	1,0751	1,0000	1,0000	1,0591	1,0000	1,0000	1,0346	1,0000	1,0000	
	M9	1,0000	1,0353	1,0904	1,0000	1,0530	1,0963	1,0000	1,0726	1,1327	
	M_CONV	1,0798	1,0371	1,0506	1,0688	1,0419	1,0517	1,0517	1,0467	1,0641	
	1,0797	1,0379	1,0518	1,0688	1,0429	1,0530	1,0519	1,0479	1,0657		

Figura 1.89 Ratio tensión-convergencia para cada mezcla y escenario en tanto por uno. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados anteriores, como era de esperar, coinciden con los obtenidos para los valores absolutos de tensiones y convergencia radial, pero en este caso, permiten establecer una variabilidad entre mezclas y comparar cuánto mejor es la óptima obtenida respecto del resto.

Cabe señalar que, para los tres grupos de terreno, cuanto más deformable resulta la roca mejor respuesta otorga la dosificación M7. Obsérvese que la eficiencia mejora –la diferencia con el resto de mezclas aumenta– para dicha mezcla al pasar de los escenarios E2 a E3, E4 a E5 y E8 a E9. Si ordenamos los escenarios por módulo de elasticidad de la roca, de mayor a menor, observamos que la mezcla 7 mejora su comportamiento a medida que el terreno resulta menos competente – más susceptible de presentar fluencia–.

Puede verse a continuación, tras reordenar las columnas de la tabla anterior, atendiendo a los módulos de elasticidad, de mayor a menor, este fenómeno. Se define un coeficiente ' $\alpha$ ' que obtiene el valor promedio del ratio tensión-convergencia de todos los valores no seleccionados como óptimo. De este modo, es posible comparar cómo empeora la respuesta conjunta del grupo respecto al valor óptimo a medida que varía el módulo elástico del suelo:

		Escenarios								
		E1	E4	E7	E2	E5	E8	E3	E6	E9
E (Gpa)		53,03	37,49	23,71	7,07	5	3,16	1,68	1,19	0,75
Convergencias (m)		0,020	0,014	0,034	0,152	0,081	0,051	0,240	0,091	0,072
Ratio Tensión / Convergencia (m <sup>-1</sup> )	M1	1,0788	1,0649	1,0434	1,0167	1,0185	1,0204	1,0218	1,0223	1,0273
	M2	1,0556	1,0502	1,0418	1,0522	1,0633	1,0750	1,0848	1,0878	1,1127
	M3	1,0802	1,0684	1,0501	1,0322	1,0362	1,0401	1,0433	1,0442	1,0547
	M4	1,0801	1,0687	1,0510	1,0347	1,0391	1,0434	1,0469	1,0480	1,0594
	M5	1,0470	1,0427	1,0358	1,0509	1,0632	1,0763	1,0876	1,0910	1,1181
	M6	1,0531	1,0480	1,0401	1,0519	1,0634	1,0755	1,0858	1,0889	1,1145
	M7	1,0751	1,0591	1,0346	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
	M8	1,0000	1,0000	1,0000	1,0353	1,0530	1,0726	1,0904	1,0963	1,1327
	M9	1,0798	1,0688	1,0517	1,0371	1,0419	1,0467	1,0506	1,0517	1,0641
	M_CONV	1,0797	1,0688	1,0519	1,0379	1,0429	1,0479	1,0518	1,0530	1,0657
$\alpha$		1,070	1,060	1,044	1,039	1,047	1,055	1,063	1,065	1,083

Figura 1.90 Evolución del ratio tensión-convergencia según el módulo de Young del terreno. Fuente: Elaboración propia.

Pueden extraerse varias conclusiones interesantes desde el punto de vista de la adecuación de la mezcla M7 a su aplicación en terrenos deformables:

Pese a que en roca dura (E1-E4-E7) no se trata de la solución óptima según el modelo numérico, la tendencia creciente de  $\alpha$  contrasta con una tendencia decreciente del ratio de M7. Es decir, su tendencia es a mejorar la respuesta – en contra de la tendencia media del conjunto de soluciones no óptimas – a medida que la roca se vuelve menos rígida. Puede verse también como disminuye su diferencia con el valor óptimo.

La tendencia del punto anterior se mantiene durante el resto de escenarios donde, ahora sí, la solución M7 se convierte en la más adecuada.

Es posible determinar, como se mostrará a continuación, un valor de módulo de elasticidad de la roca máximo recomendable para el uso de la solución atendiendo a los resultados numéricos obtenidos. Cabe recordar que se tratará de un resultado teórico sujeto a todas las limitaciones y consideraciones escritas anteriormente por lo que no debe tomarse como un criterio estricto, más bien como un valor orientativo que puede ser de gran utilidad en otras etapas de la tesis.

e. Determinación del rango de aplicación de las mezclas M7 y M8

Para poder determinar a partir de que rigidez del terreno conviene emplear una mezcla u otra se ha decidido recurrir nuevamente a los ratios de cada una de ellas, pero esta vez, manteniendo como valor referencia el de la mezcla 7. De este modo, mientras el valor del nuevo ratio relativo de la mezcla 8 sea inferior a la unidad, convendrá emplear dicha dosificación y viceversa.

El límite se muestra gráficamente a continuación como el punto de intersección entre las dos líneas de tendencia de sendas dosificaciones:

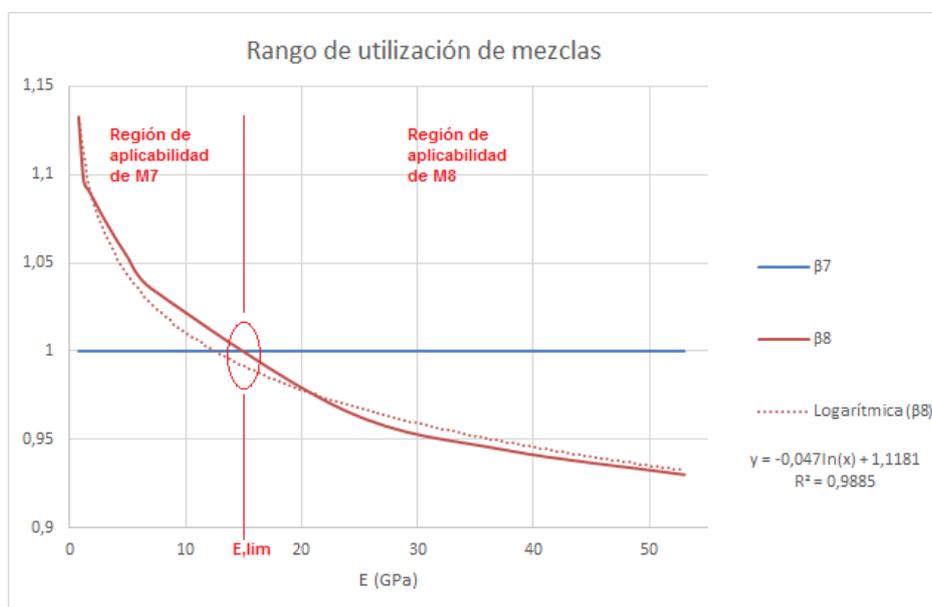


Figura 1.91 Rango teórico de utilización de mezclas. Fuente: Elaboración propia.

El módulo de elasticidad límite se obtiene de intersectar la recta  $\beta 7$  correspondiente al ratio de referencia de M7 con la curva  $\beta 8$ , aproximada por la ecuación logarítmica que se muestra en la figura superior.

El resultado obtenido es **Elim = 12.24 GPa**.

f. Comparación tensional con mortero convencional

Este epígrafe se centrará en cuantificar el incremento de tensiones que supone emplear cada una de las mezclas anteriores en relación a la considerada como mortero convencional 'M\_CONV'.

Para ello se mostrarán dos tablas a continuación. En la primera se expondrá dicha variación tensional en términos absolutos – en kPa – y en la segunda se mostrará en porcentaje respecto a la tensión obtenida por el mortero de comparación. Los datos están referidos a las tensiones finales –largo plazo- ya que la variación respecto a las obtenidas al final de la excavación, como se citó anteriormente, es muy reducida. Se han ordenado los escenarios atendiendo al módulo de elasticidad del terreno, de menor a mayor para una mayor claridad en los resultados. Se ha considerado que un incremento positivo de las tensiones implica una reducción de las mismas, es decir, los resultados mostrados a continuación corresponden al 'alivio' de tensión experimentado por el revestimiento al aplicar cada dosificación en cada uno de los escenarios:

	E1	E4	E7	E2	E5	E8	E3	E6	E9
<b>M_CONV</b>	123,71	161,11	220,44	403,55	452,87	510,82	576,47	605,62	314,17
kPa									
<b>M1</b>	0,1	0,59	1,78	8,27	10,57	13,4	16,44	17,66	11,32
<b>M2</b>	2,76	2,8	2,11	-5,53	-8,86	-13,21	-18,09	-20,02	-13,84
<b>M3</b>	-0,06	0,06	0,37	2,24	2,91	3,76	4,67	5,03	3,26
<b>M4</b>	-0,05	0,02	0,19	1,26	1,65	2,15	2,68	2,88	1,87
<b>M5</b>	3,74	3,94	3,36	-5,03	-8,85	-13,88	-19,6	-21,88	-15,42
<b>M6</b>	3,05	3,14	2,47	-5,42	-8,91	-13,47	-18,62	-20,66	-14,36
<b>M7</b>	0,53	1,46	3,61	14,75	18,61	23,33	28,4	30,46	19,38
<b>M8</b>	9,13	10,37	10,87	1,04	-4,42	-12,04	-21,15	-24,91	-19,73
<b>M9</b>	-0,01	0	0,04	0,31	0,41	0,54	0,67	0,72	0,47

Tabla 1.81 Alivio de tensiones respecto a mortero convencional en kPa. Fuente:

Elaboración propia.

	E1	E4	E7	E2	E5	E8	E3	E6	E9
<b>M_CONV</b>	123,71	161,11	220,44	403,55	452,87	510,82	576,47	605,62	314,17
<b>%</b>									
<b>M1</b>	0,08	0,37	0,81	2,05	2,33	2,62	2,85	2,92	3,60
<b>M2</b>	2,23	1,74	0,96	-1,37	-1,96	-2,59	-3,14	-3,31	-4,41
<b>M3</b>	-0,05	0,04	0,17	0,56	0,64	0,74	0,81	0,83	1,04
<b>M4</b>	-0,04	0,01	0,09	0,31	0,36	0,42	0,46	0,48	0,60
<b>M5</b>	3,02	2,45	1,52	-1,25	-1,95	-2,72	-3,40	-3,61	-4,91
<b>M6</b>	2,47	1,95	1,12	-1,34	-1,97	-2,64	-3,23	-3,41	-4,57
<b>M7</b>	0,43	0,91	1,64	3,66	4,11	4,57	4,93	5,03	6,17
<b>M8</b>	7,38	6,44	4,93	0,26	-0,98	-2,36	-3,67	-4,11	-6,28
<b>M9</b>	-0,01	0,00	0,02	0,08	0,09	0,11	0,12	0,12	0,15

Tabla 1.82 Alivio de tensiones respecto a mortero convencional en %. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos para el alivio de tensiones en el revestimiento se muestran en consonancia con los obtenidos anteriormente. De nuevo, la mezcla M8 se postula como la más apta en roca dura y M7 mejora sus propiedades a medida que pierde rigidez el terreno. En ambos casos, el alivio máximo de tensiones obtenido oscila el 6-7% respecto a un mortero convencional.

g. Síntesis del apartado

Tras procesar el modelo numérico y teniendo en cuenta las hipótesis adoptadas tanto en esta como en fases anteriores, puede concluirse que los resultados son satisfactorios ya que el modelo ha reproducido el comportamiento esperado y no se han detectado anomalías. Además, muestra como la modificación de sus propiedades afecta a la rigidez del mortero y ésta a su vez a la interacción entre el terreno y el revestimiento.

Como era de esperar en un inicio, no todas las mezclas mejoran los resultados en todos los escenarios respecto a una solución convencional pero sí se ha encontrado, en dos de ellas y desde el punto de vista puramente tenso-deformacional, una mejora más que notable respecto a un mortero de 'gap' no modificado.

Para el caso de la mezcla M8, en todos los escenarios de roca competente, la reducción en la tensión media del revestimiento ha sido de, al menos, el 5%. También es cierto que a partir de una rigidez determinada del terreno – estimada en un módulo elástico de 12.2 GPa – resulta mucho más favorable disponer la dosificación M7.

Ésta última dosificación se ha mostrado en todos los escenarios, en mayor o menor medida más favorable que una mezcla convencional y su respuesta mejora a medida que el terreno pierde rigidez – es decir, para condiciones más propensas al ‘squeezing’ -. La mezcla M1 también muestra el mismo patrón de comportamiento que la M7 pero siempre con reducciones de tensión inferiores. La mezcla M7 ha llegado a superar el 6% de disminución de tensiones en los escenarios procesados.

Dado que la aplicabilidad de la solución busca ser competitiva en ámbitos de rigideces bajas del terreno, la solución M7 se postula, desde el punto de vista de la simulación como la óptima de todas las ensayadas y como solución aparentemente apta para sustituir a morteros convencionales de cemento.

#### 5.4 HIPÓTESIS Y SIMPLIFICACIONES ADOPTADAS

Para poder llevar a cabo una simulación que permita caracterizar la respuesta de los nuevos morteros es necesario adoptar una serie de hipótesis y simplificaciones que hagan factible la elaboración de un modelo apto para su procesamiento numérico en un tiempo razonable. De este modo resulta mucho más sencillo para el lector tener un seguimiento de los principales aspectos a considerar en la ‘lectura’ del modelo e interpretación de resultados para poder comprender los criterios de aplicabilidad sobre las mezclas que se expondrán en al final de esta fase. Se detallan a continuación:

a. Reducción a un número finito de escenarios

Ésta se puede considerar como posiblemente la hipótesis con mayor peso del total de las adoptadas ya que es la que permite representar el amplio espectro de casos mediante un número reducido de situaciones tipo, lo que ya permite abordar el problema desde el punto de vista computacional – no es posible simular un número infinito de casos por ordenador-.

Para ello deben adoptarse una serie de simplificaciones ya asumidas y que se resumen como sigue:

- Es posible caracterizar cualquier problema de excavación de túneles o galerías en condiciones de ‘squeezing’ mediante la modelización de una serie de factores. Estos factores son:

- Tipo de roca –litología-,
- Resistencia y estado de fracturación del macizo,
- Orientación de las imperfecciones del macizo –fallas, lajas, fisuras, etc-,
- Estado tensional –sobrecarga-,
- Presiones hidrostáticas,
- Procedimiento constructivo y sistemas de sostenimiento.
- Las únicas variables consideradas en la elaboración del modelo son:
  - Diámetro de la excavación,
  - Características mecánicas de cada tipo de terreno,
  - Índices de estado del macizo rocoso,
  - Velocidad de avance de la tuneladora –tiempo hasta la instalación del revestimiento y relleno de mortero-,
  - Presión actuante en el contorno del modelo o carga

De este modo, el grueso de infinidad de casos se reduce a un número determinado de escenarios donde modificando dichas variables es posible establecer un patrón de respuesta que permita caracterizar a cada una de las mezclas.

b. Condiciones de contorno y geometría global del sistema

Una vez determinadas las variables que van a controlar el problema se deben definir las características físicas del modelo, es decir, qué forma y dimensiones va a tener y cómo se va a vincular ‘al resto del universo’.

- Geometría

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.

En el caso que ocupa la presente tesis – y aquí se presenta uno de los rasgos principales para la correcta interpretación del modelo numérico - se ha considerado que la presión que actúa 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 y ello permite 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 del mismo.

Además, no tener en cuenta la distinta respuesta del terreno en horizontal y vertical no resulta determinante para el desarrollo del modelo ya que el objetivo final es someter a cada dosificación y revestimiento a una determinada presión que evolucionará con el tiempo y que originará en las dovelas un estado tenso-deformacional concreto, pero no resulta relevante la distribución de presiones en el terreno. Es decir, no interesa conocer cómo responderá el terreno en clave y/o en hastiales – este punto sí sería de interés en el modelo de un proyecto de construcción real -, sino que interesa conocer la respuesta del sistema revestimiento-mortero frente a un valor de sollicitación del terreno sin importar dónde éste se produzca.

Aclarado lo anterior, queda por definir las dimensiones y vinculaciones al exterior.

- Dimensiones

Sin ahondar en mayor detalle, las condiciones geométricas vienen dadas, según la literatura existente, para permitir que los puntos de control donde se va a analizar el estado tenso-deformacional esté suficientemente alejado de los contornos y, además, que se permita una correcta redistribución de tensiones tras el paso del TBM.

En resumen, las dimensiones mínimas recomendables para cumplir con lo anterior son:

- Longitud mínima igual a 20 diámetros de la excavación.
- Radio mínimo aproximadamente igual a 15 diámetros de la excavación.

En el caso que ocupa la presente tesis, la longitud adoptada ha sido 80 metros – aprox. 10 diámetros – y un radio exterior igual a 109 metros – aprox. 12 veces el diámetro de la excavación -.

- Condiciones de contorno

Por lo que respecta a las condiciones de contorno, 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°.

Es decir, 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 -.

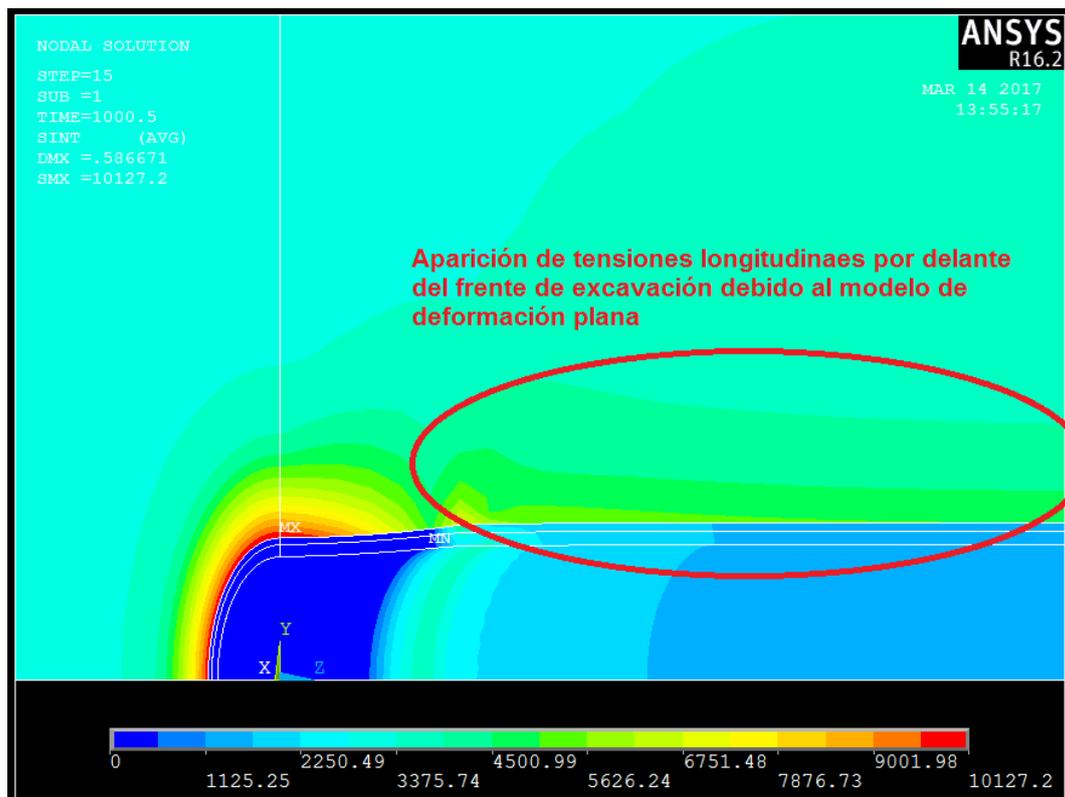


Figura 1.92 Tensiones longitudinales en frente de excavación. Fuente: Elaboración propia.

c. Modelización de materiales

Otro de los puntos donde se asumen necesariamente ciertas hipótesis y simplificaciones de peso es en la modelización de la respuesta de los materiales.

En primer lugar, se asume que todos los materiales son homogéneos e isotrópicos. Esta aproximación, en el caso de un proyecto real de construcción sería discutible pero el enfoque de 'estudio comparativo' citado anteriormente permite asumirlo sin mayor repercusión. Es por ello que se ha considerado suficiente modelizar los materiales como sigue:

- Terreno: material viscoelástico lineal según el modelo de Maxwell. Caracterizado por módulo de Young ( $E$ ), módulo de corte inicial ( $G$ ), coeficiente de Poisson ( $\gamma$ ) y coeficiente de viscosidad dinámica ( $\mu$ ). 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 ( $\gamma$ ).
- Mortero compresible: material elástico lineal. Se caracteriza a través del módulo de Young ( $E$ ) y coeficiente de Poisson ( $\gamma$ ). Puesto que por las dificultades planteadas anteriormente por 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 '*A Completely Model for the Simulation of Mechanized Tunnel Excavation*' del profesor G. Barla del 'Politecnico di Torino'.

Cabe también mencionar que no se han tenido en cuenta posibles efectos de retracción y fluencia ni del hormigón ni del mortero.

#### d. Implementación de escenarios

Para la determinación de los escenarios de cálculo se han adoptado también algunas hipótesis importantes. En este caso han venido 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 a la de comparación -, puede intuirse que el tiempo de computación aumenta rápidamente con el número de escenarios.

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-. Se toman tres posibles alternativas de cada una, resultando un total de 9 combinaciones posibles y reduciendo, por tanto, el análisis final a  $9 \cdot 10 = 90$  casos distintos de estudio.

Por lo que respecta a las presiones en el contorno del modelo, éstas son representativas tanto de la presión ejercida por la roca como del posible incremento de sobrepresiones hidrostáticas y nivel freático –que no se ha considerado como una acción independiente.

Considerar una presión uniforme en el contorno lleva implícito la hipótesis de que la profundidad es lo suficientemente elevada como para que la diferencia de presiones entre la clave de la sección y la contrabóveda sea despreciable frente al valor medio de la presión en ambas.

e. Sobre el registro de resultados

- Ubicación del punto de control de resultados

Tras realizar numerosas pruebas con modelos reducidos, se comprobó que tanto tensiones como deformaciones se regularizaban a diferentes distancias de los contornos frontal y dorsal del modelo tras introducir el desequilibrio ocasionado por el TBM. En los casos de roca con mayores presiones y velocidades de avance, la influencia de los contornos resultaba mayor que en aquellos con menor presión y velocidades más lentas. En cualquier caso, se comprobó que los resultados eran aceptables a partir de  $1/8$  de la longitud total del túnel contando desde cualquiera de los dos planos límite. Para obtener el mayor número de pasos de carga registrados interesa que el control se realice lo más próximo a la cara dorsal del túnel posible –es decir, al emboquille de entrada del TBM- ya que para cada avance de 1 metro de la misma se calculará la solución del modelo. Es por ello que se ha establecido que los resultados se obtengan a dicha distancia  $L/8$  del plano dorsal.

Para evitar cualquier tipo de influencia de los contornos horizontal y vertical, se ha establecido que el punto de control esté a  $45^\circ$  de cualquiera de ambos planos.

Dicho punto de control corresponderá al plano medio del revestimiento de dovelas prefabricadas.

- Salida de resultados

Pese a la complejidad del modelo para poder ‘captar’ la evolución del campo de tensiones y deformaciones durante la evolución de la excavación y construcción del túnel, los resultados estrictamente necesarios para poder llevar a cabo el estudio comparativo son sencillos. Se ha decidido obtener las componentes cilíndricas de tensión en el revestimiento y la tensión de Von Mises en el plano medio del revestimiento como elemento de comparación y su evolución en el tiempo. Además, también referido a la variable tiempo, se ha registrado la evolución de la convergencia radial en el mismo punto.

- f. Síntesis de consideraciones previas al procesado

Las consideraciones previas al procesado, extraídas a lo largo de la consulta de la bibliografía son las siguientes:

- Sólo variando los parámetros resistentes –módulo de Young, Poisson, módulo de corte, viscosidad, etc.- que caracterizan a cada material interviniente en el modelo y el factor tiempo se abarca un abanico de posibilidades que barren el conjunto de escenarios que pueden darse en un túnel profundo excavado con TBM.
- Tanto por imposición del programa de cálculo –ANSYS- como para poder representar adecuadamente la evolución del campo tenso-deformacional con el avance de la tuneladora se ha decidido emplear, para todos los materiales del modelo, elementos finitos tipo hexágono de 20 nodos.
- La combinación de elementos con propiedades viscoelásticas y la técnica ‘birth&death’ no son compatibles por lo que en los elementos que representen al terreno que va a ser excavado deberá disponerse un material elástico lineal con las características elásticas del resto del material definido por el modelo de Maxwell.
- Previo al inicio de la excavación se establecerá, en el cálculo, un periodo de ‘calentamiento’ del modelo destinado a regularizar las tensiones y deformaciones y, en definitiva, a proporcionar al terreno un estado de compresión que dará lugar más tarde, con la excavación, a una convergencia radial progresiva en el tiempo y que será causa de todos los efectos ya descritos sobre el revestimiento.
- Debido a la existencia de dicho ‘periodo de calentamiento’, el origen temporal a partir del cual se mostrarán los resultados de tensiones y deformaciones en el revestimiento se fijará en el instante de instalación de dicho elemento con el mortero ya endurecido.

## g. Interpretación de resultados

En el presente apartado se buscará analizar con más detalle los mismos con el fin de poder dar una lectura integral de todo el trabajo realizado hasta el momento. Se pretende establecer unos criterios base que permitan enfocar el tratamiento de la información obtenida tanto en la fase de dosificación del nuevo material como en la fase de modelización de la excavación.

Las propiedades mecánicas de las mezclas ensayadas, a efectos de introducción en el modelo numérico se muestran a continuación:

Dosificación	E (GPa)	$\nu$
M1	7,50	0,2
M2	2,20	0,2
M3	5,70	0,2
M4	5,40	0,2
M5	1,90	0,2
M6	2,10	0,2
M7	9,40	0,2
M8	1,10	0,2
M9	5,10	0,2
Convencional	5,00	0,2

Tabla 1.83 Síntesis de dosificaciones. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra la información más relevante obtenida en el post-procesado de los resultados:

- Al ordenar los resultados de tensión de Von Mises en el revestimiento en relación con la convergencia y normalizarlos tomando como valor de referencia unidad la tensión menor acaecida en cada caso, ordenando los escenarios de mayor a menor rigidez del terreno se obtiene:

		Escenarios								
		E1	E4	E7	E2	E5	E8	E3	E6	E9
E (Gpa)		53,03	37,49	23,71	7,07	5	3,16	1,68	1,19	0,75
Convergencias (m)		0,020	0,014	0,034	0,152	0,081	0,051	0,240	0,091	0,072
Ratio Tensión /Convergencia (m <sup>-1</sup> )	M1	1,0788	1,0649	1,0434	1,0167	1,0185	1,0204	1,0218	1,0223	1,0273
	M2	1,0556	1,0502	1,0418	1,0522	1,0633	1,0750	1,0848	1,0878	1,1127
	M3	1,0802	1,0684	1,0501	1,0322	1,0362	1,0401	1,0433	1,0442	1,0547
	M4	1,0801	1,0687	1,0510	1,0347	1,0391	1,0434	1,0469	1,0480	1,0594
	M5	1,0470	1,0427	1,0358	1,0509	1,0632	1,0763	1,0876	1,0910	1,1181
	M6	1,0531	1,0480	1,0401	1,0519	1,0634	1,0755	1,0858	1,0889	1,1145
	M7	1,0751	1,0591	1,0346	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
	M8	1,0000	1,0000	1,0000	1,0353	1,0530	1,0726	1,0904	1,0963	1,1327
	M9	1,0798	1,0688	1,0517	1,0371	1,0419	1,0467	1,0506	1,0517	1,0641
	M_CONV	1,0797	1,0688	1,0519	1,0379	1,0429	1,0479	1,0518	1,0530	1,0657
$\alpha$		1,070	1,060	1,044	1,039	1,047	1,055	1,063	1,065	1,083

Tabla 1.84 Evolución del ratio tensión-convergencia según el módulo de Young del terreno. Fuente: Elaboración propia.

Donde se puede observar que la respuesta óptima de entre todas las mezclas ensayadas y la convencional se da, efectivamente, para las dosificaciones M7 y M8.

- La desviación media del resto de mezclas respecto de la mezcla óptima en cada escenario puede verse en la última fila de la tabla anterior y representada como ' $\alpha$ '.

Cabe destacar que, de las dos mezclas con mejores resultados, la única que en todo momento mantiene valores más favorables respecto a un mortero convencional es la mezcla M7.

- Se muestra una clara tendencia de la muestra M7 a mejorar su respuesta a medida que el terreno pierde rigidez – obsérvese la tendencia creciente del valor medio ' $\alpha$ ' y también cómo aumentan los valores del resto de dosificaciones respecto a la unidad a medida que desciende el módulo elástico del terreno-. Esta conclusión también se muestra de forma clara en los porcentajes. Es decir, la mezcla M7 mejora más rápido que el resto la respuesta del revestimiento cuanto más favorable es el terreno a condiciones de '*squeezing*'.
- Atendiendo a los resultados mostrados en las tablas anteriores, si se observa con atención la tendencia a mejorar o empeorar la respuesta en el revestimiento con el descenso de rigidez del terreno – lo que supone leer los valores de las tablas por filas de izquierda a derecha – es posible realizar las siguientes lecturas:

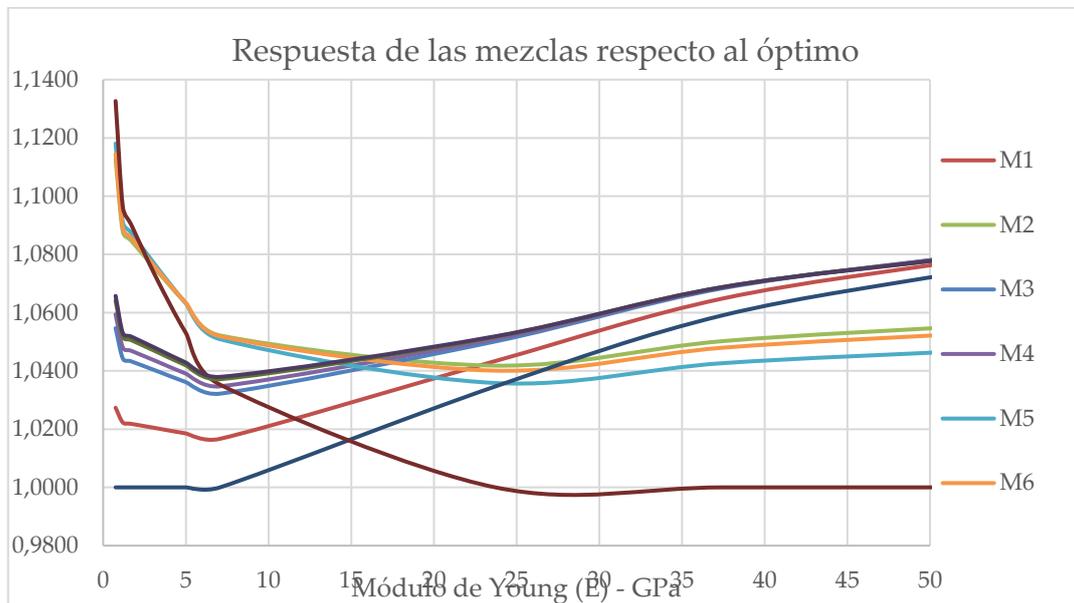


Figura 1.93 Respuesta de las mezclas respecto a la óptima –valor unidad- según el módulo de elasticidad del terreno. Fuente: Elaboración propia.

- Es posible distinguir dos familias de mezclas. Por una parte, las que presentan un comportamiento más apto en terrenos con menor rigidez – mezclas M1, M4, M9, M3, M7 y M\_CONV- y, por otra, las que producen mayor alivio de tensiones en rocas más rígidas – M2, M6, M5 y M8-.
- La mezcla M7 se comporta como cabría esperar en un mortero convencional pero mejorando sus propiedades en hasta un 6% de la tensión transmitida al revestimiento.
- En cualquiera de los casos, ninguna mezcla mejora los resultados de M7 y M8 y es posible determinar una rigidez del terreno tal que suponga el límite entre la adecuación óptima de una u otra.

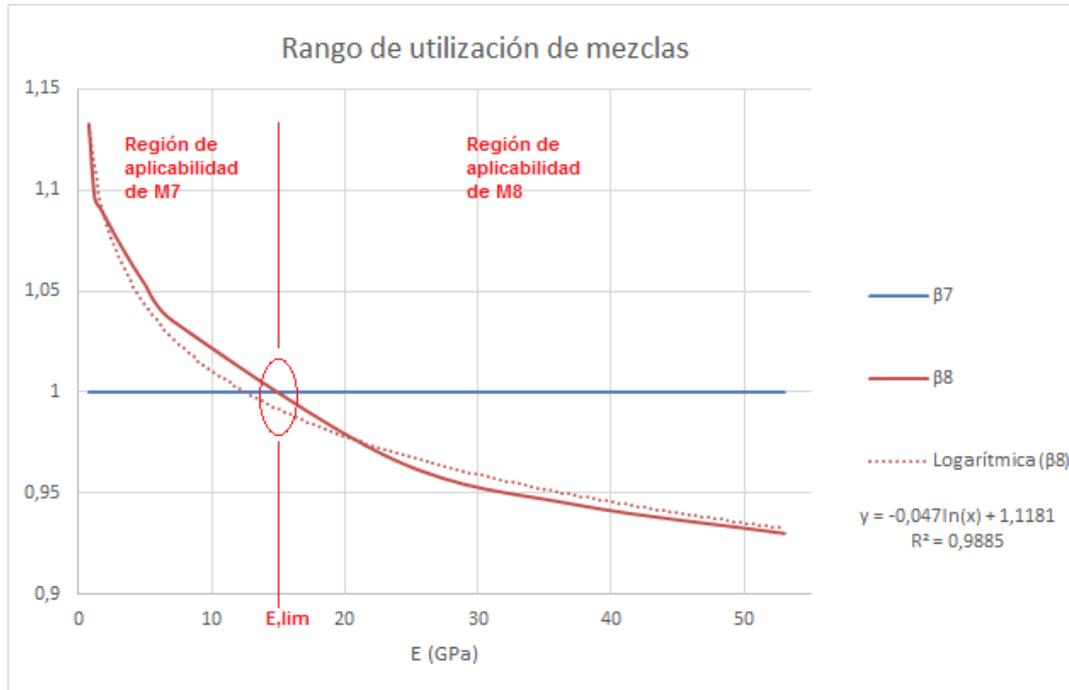


Figura 1.94 Rango teórico de utilización de mezcla. Fuente: Elaboración propia.

El módulo de elasticidad máximo del terreno para el que resulta óptima la dosificación M7 según la curva aproximada mostrada en la figura anterior, tomando como valor de referencia 1, y constante el ratio de la mezcla M7, es 12.24 GPa.

- El criterio de Hoek & Marinos ( [62], [66] y [67]) que evalúa el riesgo de fluencia en función de la convergencia esperable durante la construcción del túnel obtenemos que para valores inferiores al 1% no se considera riesgo de 'squeezing'.

Los resultados obtenidos en para la convergencia absoluta y relativa son los siguientes:

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Converg. (cm)	2,02	15,16	24,00	1,43	8,06	9,14	3,39	5,13	7,23
Conv. Relativa (%)	0,434	3,261	5,161	0,307	1,732	1,966	0,729	1,103	1,554

Figura 1.95 Convergencias representativas de cada escenario. Fuente: Elaboración propia.

Clase	Porcentaje de convergencia $\epsilon$	Condiciones de Fluencia
A	< 1%	No hay problemas de fluencia
B	1% - 2,5%	Fluencia Ligera: Problemas de sostenimiento resueltos mediante gunita y bulones.
C	2,5% - 5%	Fluencia Moderada: Problemas de sostenimiento resueltos mediante cerchas ligeras, gunita y bulones.
D	5% - 10%	Fluencia Severa: Sostenimientos pesados. Problemas de estabilidad en el frente. Paraguas de micropilotes
E	>10%	Fluencia Extrema: Sostenimientos especiales. Problemas importantes de estabilidad en el frente de excavación.

Figura 1.96 Criterio de fluencia de Hoek y Marinis (2000). Fuente: [59], [63] y [64]

Resulta interesante la apreciación de que según el criterio de Hoek& Marinis ( [59], [63] y [64]), para las convergencias dadas en los escenarios E1, E4 y E7 – aquéllos donde se comporta mejor la mezcla M8 y las de respuesta similar a ella -, no se considera riesgo potencial de fluencia de roca. Es decir, el ámbito para el que se ha concebido el nuevo mortero correspondería para convergencias superiores al 1%, situaciones en las que la dosificación M7 presenta una mejora notable respecto a una solución convencional y llegando a superar el 6% de alivio de tensiones sobre el revestimiento en las situaciones de roca con bajo módulo elástico.

- La mezcla M7 se confirma, desde el punto de vista del análisis numérico como la idónea de las ensayadas en condiciones hasta de fluencia “Severa” – según Hoek& Marinis ( [59], [63] y [64] ) convergencias entre el 5 % y el 10 % del diámetro del túnel – donde habitualmente se necesitan sistemas de sostenimientos pesados y refuerzo de micropilotes en el frente de excavación.

Relacionando la convergencia relativa (%) obtenida para cada escenario con el módulo de elasticidad de sus respectivos terrenos se obtiene un gráfico como el que sigue:

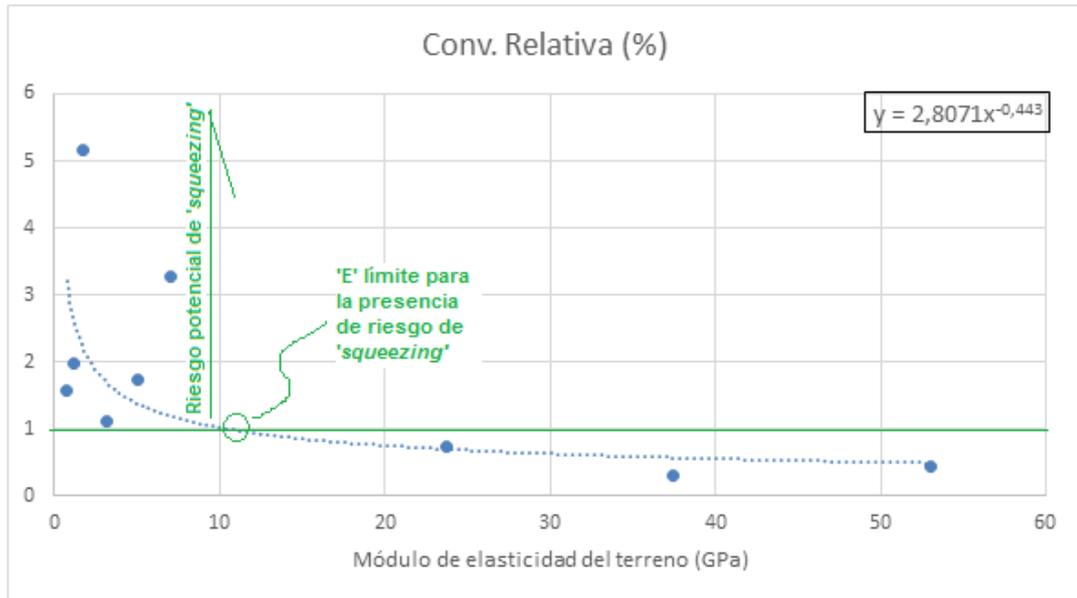


Figura 1.97 Convergencia relativa de cada escenario vs. módulo de elasticidad del terreno. Fuente: Elaboración propia.

De donde, a través de la ecuación de la línea de tendencia es posible obtener aproximadamente el valor del módulo de elasticidad del terreno hasta el cual se incurre en riesgo de fluencia según Hoek& Marinos ( [62], [66] y [67]) – leve, moderada, severa o extrema -. Dicho módulo es el correspondiente a la intersección de la horizontal 1 % con la línea de tendencia en la gráfica anterior, cuyo valor es de 10.27 Gpa. Es decir, mientras el terreno no supere teóricamente los 10.27 GPa, según el modelo realizado se estará incurriendo en algún tipo de riesgo de fluencia.

Si se compara el rango de aplicación óptima de la mezcla M7 con el rango de valores de módulo de elasticidad del terreno para el cual se obtendría un mínimo riesgo de fluencia – “Fluencia ligera” según Hoek& Marinos – se obtiene lo siguiente:

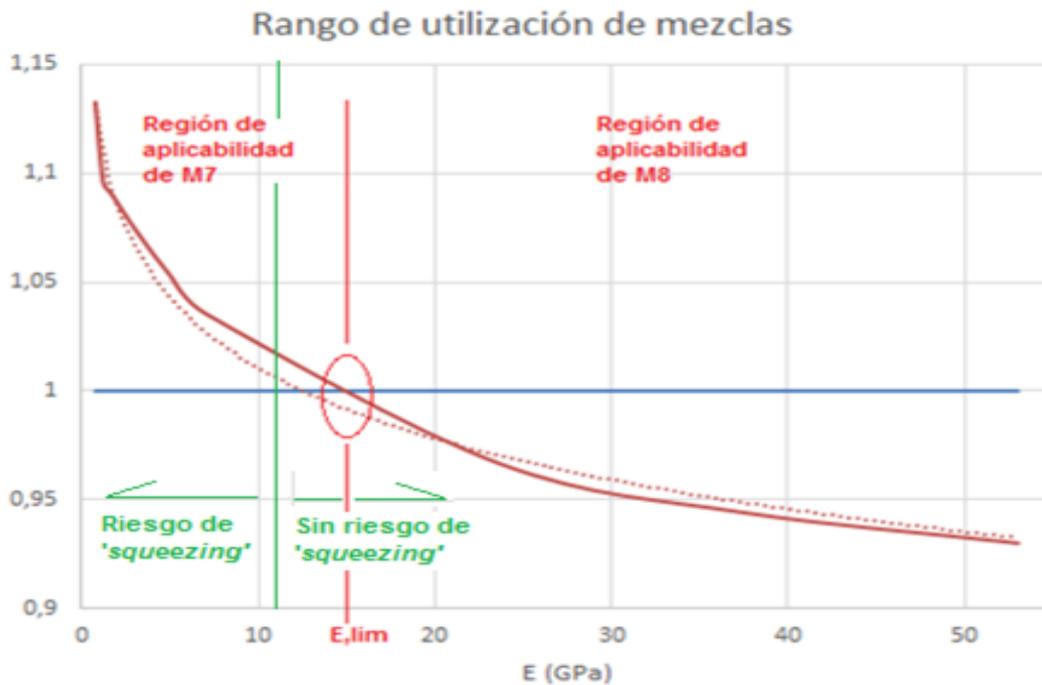


Figura 1.98 Superposición de rango de utilización óptima de M7 y riesgo de 'squeezing' según el módulo de elasticidad del terreno. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de la gráfica mostrada en la figura, se deduce una de las conclusiones más importantes de la fase de desarrollo del modelo numérico y es que la dosificación M7 se muestra como la solución óptima en todo el rango de valores de rigidez del terreno donde es posible que se dé la fluencia del mismo en condiciones de excavación. Además, aunque las ganancias no son tan notables, la dosificación M7 se postula como una buena alternativa a los morteros convencionales para terrenos en los cuales los valores de convergencia esperados sean inferiores al 1% pero el terreno no se caracterice por ser especialmente rígido.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la fase de desarrollo de la dosificación, se determinó que la dosificación 7 – denominada como M7 – era la que mejor aproximación había conseguido al índice de huecos deseado – 25.54% obtenido frente al 25 % previsto como óptimo – del total de las mezclas ensayadas.

Satisfactoriamente, esta dosificación también ha ofrecido muy buenos resultados en otros ensayos como el de exudación y segregación y aquellos

referidos a las competencias estructurales, siendo la dosificación que conseguía una mejor resistencia a compresión confinada, propiedades fundamentales teniendo en cuenta el ámbito de trabajo del mortero.

Es por ello que, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la segunda fase de la tesis y los arrojados por el modelo numérico puede afirmarse que la dosificación M7 es la mejor opción de las ensayadas para cumplir con la finalidad prevista de en esta tesis.



## **6. DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**



## DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una vez se ha concluido la investigación que ha motivado el desarrollo de la presente tesis doctoral, se van a comentar las conclusiones que ha alcanzado el doctorando en relación a los resultados de la misma. La investigación planteada partió de unos objetivos concretos – especificados al inicio del documento –, y de una metodología de trabajo diseñada para su obtención. Dado el volumen del trabajo realizado, se considera coherente basarse en dichos objetivos para la redacción de las conclusiones alcanzadas, verificando punto por punto que todos ellos se han cumplido de forma satisfactoria.

Debido al nexo permanente que ha existido durante todo el trabajo desarrollado entre los objetivos de la Tesis Doctoral y la metodología planteada, previo a comentar el grado de cumplimiento de los objetivos de partida se va a repasar sucintamente el planteamiento metodológico, apuntando algunas consideraciones acerca de su aplicación práctica.

Se debe recordar que la metodología planteada al inicio de la investigación se ha compuesto de cuatro hitos o fases de cumplimiento, donde se han ido superando paulatinamente diferentes etapas clave para lograr el objetivo general del doctorando. La metodología planteada, descrita en el presente documento en dos grandes bloques relativos a los trabajos de laboratorio y a la modelización matemática, ha guiado el trabajo del doctorando a través de los hitos *Identificación de los requisitos físicos, químicos y mecánicos a imponer al nuevo material*, *Validación de las herramientas que permitan verificar el nivel de cumplimiento de los requisitos establecidos por parte del nuevo material*, *Dosificación del nuevo material*, y *Análisis de los distintos escenarios en los que se puede incorporar esta solución*.

Se puede comprobar como en todo momento la metodología diseñada al inicio de la Tesis ha permitido seguir una secuencia lógica y coherente de trabajo, donde de forma inicial se han estudiado los requisitos a imponer al nuevo material desde una perspectiva física, química, y mecánica, estudiando para ello a modo de antecedentes la literatura científica existente en cuanto a compatibilización de convergencias en terrenos inestables cuando se excava con TBM de Escudo, y el Estado del Arte relativo a las soluciones que existen en la actualidad ante dicho problema. Posteriormente, se han analizado las

herramientas científicas necesarias para validar el nivel de cumplimiento establecido para el nuevo material compresible, actuando a través de ensayos de laboratorio – convencionales recopilados en la normativa en vigor y algunos de desarrollo propio, necesarios para la validación de algunas de las propiedades específicas del nuevo mortero con caucho NFU –, y a través del software ANSYS para llevar a cabo las tareas de modelización numérica y matemática. A continuación, se han realizado diferentes dosificaciones del material (hasta 9), seleccionando aquellas de mejores prestaciones en base a los criterios de bombeabilidad y compresibilidad establecidos. Y, finalmente, empleando la herramienta de modelización matemática comentada se han definido los escenarios donde es susceptible de empleo la tecnología TBM de Escudo, se han modelizado dichos escenarios teniendo en cuenta el conjunto terreno – espacio anular – dovela, y, comprobando las diferentes mezclas como relleno del espacio anular, se han identificado los casos en los que la aplicación de la tecnología TBM empleando el mencionado material implica beneficios considerables respecto a otras opciones.

## 6.1 DISCUSIONES

Realizada esta breve introducción, a continuación, se procede a comentar de forma particularizada el grado de cumplimiento de cada uno de los objetivos científicos establecidos, reflejando así su cumplimiento:

- Identificación de los requisitos físicos, químicos y mecánicos a imponer al nuevo material. El proceso de puesta en obra y las exigencias estructurales a lo largo de su vida útil son las dos características de las que emanan los requisitos a imponer.

El primer paso para conocer los diferentes requisitos que debe reunir el nuevo mortero compresible, fue realizar un amplio repaso acerca del Estado del Arte de soluciones para asegurar la compatibilidad de convergencias en terrenos inestables excavados mediante TBM de Escudo. En este sentido, y entre las diferentes soluciones analizadas (doveles simples de mayor grosor, dovelas de hormigón UHPC, sistemas de deformación tangencial o radial, ...) se estudiaron con especial énfasis aquellas soluciones que abordaron materiales compresibles a inyectar en el espacio anular.

Dichos materiales compresibles, son fundamentalmente morteros de hormigón que incorporan en su dosificación ciertos materiales adicionales que les confieren las propiedades de compresibilidad deseadas. Básicamente, existen 3 mecanismos de compresión actualmente para estos tipos de morteros: 1) Mecanismo de compresión por deformación plástica, 2) Mecanismo de compresión por trituración quebradiza, y 3) Mecanismo de compresión por pandeo elástico. Atendiendo a los dos primeros, son los que se están empleando en los morteros compresibles actuales, y tiendan a usar poliestireno expandido y arcilla expandida respectivamente como elemento para sustituir parcialmente el árido convencional.

Si bien estas dos tipologías de mortero ofrecen un comportamiento en términos de compresibilidad aceptable, es en la funcionalidad donde muestran sus principales carencias. Generalmente supone un riesgo a la hora de trabajar el mortero las densidades tan bajas de estos dos materiales (alcanzan hasta densidades de 28 kg/m<sup>3</sup>), en comparación con el resto de componentes del mortero como el cemento (3.100 kg/m<sup>3</sup>) o áridos (2.600 kg/m<sup>3</sup>). Dicha diferencia de densidades acarrea diversos problemas de estabilidad de la mezcla en estado fresco durante las fases de mezclado y colocación, especialmente en términos de segregación. Además, en fase de bombeo también puede generar situaciones de 'segregación periférica', fenómeno que provoca que las partículas finas del mortero se adhieran a las paredes de la tubería, mientras los materiales con granulometrías más gruesas discurran por la parte central.

Otro tema a comentar es relativo a su comportamiento endurecido, pues ni el poliestireno expandido ni la arcilla expandida son materiales con propiedades elásticas que puedan contribuir a incrementar la elasticidad del material. Esto supone, que la compresión en muchas ocasiones se genere a partir de pequeñas fisuras internas del mortero provocadas por el peso del terreno. Por último, y también aspecto importante a considerar, es que tanto el poliestireno como la arcilla expandida suponen importantes discontinuidades en la matriz interna del mortero, con clara influencia en la capacidad portante del mismo. Dado que es muy complejo controlar que su distribución sea totalmente homogénea dentro de la mezcla endurecida, más aun considerando que la diferencia de densidades puede generar constantes problemas de flotación de dichos elementos cuando el material aún no ha fraguado, se pueden generar de forma involuntaria zonas potenciales de

falla en el material que, ante la generación de las fisuras provocadas por la convergencia del terreno, terminen por provocar un colapso severo del mortero.

Quedaba por tanto reconocida la necesidad de dotar al nuevo mortero compresible de unas determinadas características clave, que permitieran superar las carencias de los morteros compresibles para relleno de espacio anular actuales, y que supusieran la obtención de una solución definitiva para abordar la compatibilización de convergencias en terrenos inestables. Para ello, resultaba imprescindible avanzar hacia diferentes mecanismos de compresión, inéditos hasta la fecha en aplicación práctica, y en procedimientos alternativos para lograr el volumen de aire interior deseado. Es por esto que al mortero que ocupa la presente investigación se le han fijado una serie de requisitos químicos, físicos y mecánicos, que deben cumplirse para que el material pueda adquirir toda su potencialidad de aplicación. A continuación, se comentan los requisitos alcanzados para cada una de estas facetas.

#### Requisitos mecánicos

Es importante comenzar el repaso a partir de los requisitos mecánicos establecidos, pues del nuevo mecanismo de compresión empleado se desprenderán posteriormente los requisitos físicos y químicos que complementarán las premisas básicas de dosificación. En este punto, se debe indicar que se ha decidido emplear un **mecanismo de compresión por pandeo elástico**, en detrimento de los mecanismos de deformación plástica y trituración quebradiza utilizados hasta la fecha.

Un mortero que emplea dicho mecanismo de compresión, se caracteriza por adquirir un comportamiento más tenaz, exhibiendo una gran capacidad de absorber energía plástica introducida por cargas exteriores previa rotura. Para su consecución, se antoja imprescindible sustituir parte de sus áridos convencionales por materiales elastómeros, capaces de asumir grandes deformaciones a causa de su capacidad de absorción de energía. De este modo, dichas partículas son capaces de comportarse como muelles, que provocan un retardo en el agrandamiento de las fisuras y evitan un tipo de rotura catastrófica.

Para la dosificación del mortero compresible desarrollado, se debió seleccionar el elastómero idóneo para adquirir el mecanismo de compresión por pandeo elástico. En este sentido, si bien existían opciones convencionales como los

ya conocido EPM y EPDM, se apostó por caucho proveniente de neumático fuera de uso (NFU), por considerarse la opción más económica y medioambientalmente sostenible.

#### Requisitos físicos

Una vez seleccionado el mecanismo de compresión por pandeo elástico, se estudiaron los requisitos físicos a imponer al material para asegurar el buen comportamiento del caucho NFU dentro de la mezcla, tanto en estado fresco como ya fraguado. Poder acotar y parametrizar el comportamiento dentro de la matriz de cemento siendo el NFU un material con una densidad tan diferente al resto de materiales empleados, resultó fundamental de cara a asegurar tanto que el material se iba a comportar de forma estable evitando problemas de segregación, como que la capacidad portante fuera la idónea gracias a una correcta interacción en la interfaz cemento – caucho.

Dichos requisitos físicos, se establecieron a partir de 4 propiedades básicas del mortero.

- **Compresibilidad**

Definida como la capacidad del mortero endurecido para deformarse bajo escenarios a compresión. Para un mortero compresible, debe poder alcanzar una compresibilidad cercana al **50% sin rotura** o fisura en situación de confinamiento lateral. Se definió que el comportamiento tenso – deformacional idóneo del mortero, bajo una situación de restricción total de la deformación lateral, debe permitir que inicialmente exista una relación importante entre tensión y deformación, con un crecimiento de las tensiones y bajas deformaciones de forma simultánea. En el punto que el límite de compresión sea alcanzado, el material pasará a comportarse de manera plástica, pues, aunque las tensiones sigan constantes el mortero se deformará hasta prácticamente un 50%.

La razón por la que un mortero a base de cemento disminuye su rigidez superada la rama elástica inicial es por la compresión y posterior trituración de sus áridos. Así mismo, conforme se incrementa dicha compresión el volumen de huecos internos se agota, incurriendo en este momento en un drástico incremento de la rigidez del material. Es por esto, que la capacidad de compresibilidad de un mortero depende básicamente de la capacidad de compresión de los áridos y del volumen de huecos que se haya dosificado. De este modo, al haber sustituido un

porcentaje amplio de los áridos (50, 75 y 100% de la arena 0/4) por NFU, se consigue que el mortero se comporte de una forma dúctil gracias al mecanismo de pandeo elástico introducido.

- Trabajabilidad

Se considera la propiedad del mortero que mide su capacidad para ser colocado y consolidado de forma correcta, sin riesgo de que aparezcan fenómenos de segregación. La trabajabilidad depende de diferentes factores de la mezcla, como la composición, forma de las partículas y proporción de arena, cantidad de cemento, presencia de aire ocluido, los aditivos o la consistencia del material. Todos estos factores, juegan un papel decisivo para permitir que el nuevo mortero compresible pueda ser colocado en el espacio anular formado por dovelas y terreno excavado, empleando para tal fin equipos convencional de bombeo.

En cuanto a los requisitos establecidos para cumplir con la docilidad deseada, se ha estudiado la cantidad de agua de amasado añadida, pues la docilidad del mortero aumentará conforme más se añada. No obstante, un volumen excesivo podría acarrear también problemas de segregación o pérdida de estabilidad. Respecto de la granulometría y tipología de árido, para conseguir una buena trabajabilidad es necesario el empleo de árido fino, especialmente aquel redondeado proveniente de machaqueo. Así mismo, el contenido en cemento o el uso de aditivos superplastificantes tiende también a incrementar la docilidad del material y por ende la trabajabilidad.

Por norma general, para secciones pequeñas y de acceso complejo, como es el caso de la presente investigación, será **requerida una elevada trabajabilidad** para la puesta en obra del material, de modo que por esta razón se ha considerado tan relevante estudiar la trabajabilidad del mortero.

- Bombeabilidad

Se entiende por bombeabilidad de un mortero la capacidad de este para ser colocado en obra mediante bomba y bajo unas determinadas condiciones, esto es, se define como la capacidad de la mezcla para fluir a través de un conducto a causa de la presión ejercida por una bomba. Respecto a esta propiedad, es importante destacar que no es una característica intrínseca de la mezcla, sino que se consigue bajo unas determinadas circunstancias.

Por esta razón, para que el mortero compresible desarrollado cumpliera con los criterios establecidos de bombeabilidad, es importante conseguir que el material permanezca **homogéneo**, sin generar segregación, **durante todas las fases que se esté bombeando**. También es fundamental que el material **mantenga todavía una trabajabilidad mínima una vez finalizado el bombeo**, pues hay ocasiones donde si bien el mortero admite bien toda la fase de bombeo hasta su punto de colocación en obra, una vez allí pierde algunas de las propiedades clave para cumplir con su cometido.

En este caso concreto, la presencia de NFU complicaría necesariamente el bombeo y colocación del mortero a causa de la amplia diferencia de densidades entre este material y el resto. La diferencia de pesos puede generar tendencia del NFU a flotar en la mezcla cuando esta se encuentra en estado fresco, de modo que será necesaria una alta viscosidad para evitar que esto suceda. Así mismo, dicha viscosidad deberá ser mantenida una vez el material haya sido bombeado y esté esperando a fraguar en su ubicación definitiva en el espacio anular para evitar su flotación, aspecto que puede generar complicaciones en el bombeo por el siguiente motivo: habitualmente cuando un hormigón o mortero es bombeado, el efecto de la presión que introduce la bomba tiende a reducir la viscosidad inicial.

De este modo, para que el mortero colocado en espacio anular mantenga todavía una viscosidad aceptable, el mortero inicial debe poseer todavía un valor más alto de viscosidad para que, pese a ver mermado este parámetro durante el proceso de bombeo, mantenga todavía un valor alto. Además, la dificultad es añadida, pues tampoco es recomendable el empleo de mezcla de excesiva viscosidad para ser bombeada. He aquí la gran dificultad a la hora de conseguir la bombeabilidad del material, pues se deberá conseguir la suficiente viscosidad como para que el material no segregue durante el bombeo y para que se mantenga estable una vez colocado en el espacio anular, pero no una excesiva que condicione o ponga en riesgo el proceso de bombeo a través de la bomba.

Parámetros como la cantidad definitiva de NFU, la relación de agua/cemento, y los finos totales añadidos, son fundamentales para lograr la bombeabilidad óptima del nuevo mortero compresible.

- Estabilidad

Entendida como el desplazamiento o flujo producido en el mortero sin que sea necesaria la intervención de fuerzas externas, se mide mediante la exudación o segregación que genera el material. No solo dependerá del agua de amasado añadida, sino también de su contenido de finos, y de las propiedades adherentes de la pasta de cemento, las cuáles se pueden ver notablemente condicionadas a causa de la presencia de NFU. De nuevo, la viscosidad del material será un parámetro clave para garantizar esta propiedad. A mayores índices de viscosidad se conseguirá mayor estabilidad en el mortero, minimizando así la capacidad de exudar o segregar sin necesidad de que aparezcan fuerzas externas.

- Requisitos químicos

Finalmente, se han establecido una serie de requisitos químicos, fundamentalmente enfocados a conseguir el volumen interior de huecos deseado en el material. Como se ha comentado en capítulos precedentes, en la dosificación de un mortero compresible se acostumbra a emplear materiales no convencionales como poliestireno expandido, arcillas expandidas, o, en este caso, NFU. Dichos materiales, con una contribución decisiva para mejorar los mecanismos compresibles del material, introducen a su vez un volumen elevado de aire a causa de la mala adherencia que tienen con la pasta de cemento. Dicha mala adherencia contribuye a que se formen en la interfaz cemento – material compresible pequeñas burbujas de aire. Anteriormente, cuando se ha hablado de los requisitos para la compresibilidad, se ha indicado que son el volumen interior de huecos y la capacidad elástica del material sustituto de árido convencional, los dos factores clave para conseguir que el material sea compresible. Es por esto, que ese volumen interior de huecos deseado, se ha conseguido en otros morteros compresibles a partir de la propia inclusión indeseada de aire que generaba el material compresible añadido.

Si bien que el material compresible incluya una cantidad importante de aire se puede ver como una ventaja a la hora de dosificar un mortero de estas características, es a la vez un riesgo importante que se debe analizar con detenimiento. Elevar el volumen interior de huecos dentro de un mortero es una situación compleja, que en caso de que no se realice de la forma adecuada puede provocar un reparto no homogéneo de dicho aire, generando zonas de

acumulación de aire donde se reduzca de forma muy importante la capacidad portante del material, y supongan en consecuencia claros puntos de falla del mismo. Es por esto, que en la presente Tesis Doctoral se decidió ejercer un grado de control mucho mayor sobre el volumen de huecos interior del mortero, evitando que este proviniera prácticamente en exclusiva del generado en la adherencia del material compresible y la matriz de cemento, sino también de una oclusión química controlada a partir de la acción de aditivos inclusores de aire.

Dicha tipología de aditivo, permite introducir un volumen de micro burbujas de aire ordenado, que permite un reparto homogéneo dentro de la mezcla de mortero. Dicho aditivo, tiene también el poder de contribuir a la estabilización de la mezcla de mortero, permitiendo una distribución más homogénea de todos los otros materiales que la componen, y contribuyendo a mitigar los efectos de la flotación del caucho NFU. De este modo, además de conseguir la inclusión de dicho volumen de aire de forma ordenada, se consigue que el volumen que introduce el NFU también se distribuya de forma homogénea, pues este material habrá conseguido un mejor reparto dentro del nuevo mortero compresible.

Tal y como se ha visto en las líneas anteriores, los requisitos mecánicos, físicos y químicos a imponer al nuevo mortero compresible han quedado claramente definidos, de modo que el primer objetivo científico de la investigación ha sido alcanzado.

Validación de las herramientas que permitan verificar el nivel de cumplimiento de los requisitos establecidos por parte del nuevo material.

Las herramientas, tradicionalmente aceptadas por la comunidad científica son dos: ensayos de laboratorio y modelización matemática del fenómeno. En el caso de los ensayos, además de recurrir a ensayos normalizados, será necesario diseñar un nuevo ensayo útil para medir la resistencia a compresión confinada, simulando las condiciones en las que se encontrará el mortero una vez sea inyectado en el espacio anular formado por el terreno excavado y las dovelas de hormigón. En el caso de la modelización matemática, se optará por modelos numéricos del conjunto terreno-hueco anular relleno del nuevo material-dovelas; compatibilizando el método de los elementos finitos con el método de los elementos de contorno.

Para la obtención del nuevo mortero compresible resultó necesario validar diferentes herramientas con las que trabajar en su desarrollo. Fundamentalmente los trabajos de investigación se dividieron en dos fases, una primera vinculada a la campaña de ensayos de laboratorio, bien fueran estos convencionales o bien fueran diseñados expresamente en el marco de la presente tesis. Y una segunda fase dedicada a la modelización matemática de los diferentes escenarios, donde se pudiera comprobar el rendimiento en terreno de las diferentes dosificaciones potenciales desarrolladas.

#### A) Validación herramientas fase laboratorio

Un primer paso para diseñar una campaña de ensayos de laboratorio exitosa que verdaderamente mida los parámetros de interés en el mortero, es definir aquellas propiedades que es relevante caracterizar. En base a dichas propiedades es posible seleccionar aquellos ensayos normalizados que permiten medir cada una de ellas, así como identificar potenciales necesidades de ensayos propios necesarios para que la investigación se desarrolle de manera exitosa. Dichas propiedades fueron las siguientes:

- Distribución granulométrica de los áridos empleados
- Propiedades mecánicas como resistencia a compresión simple, resistencia a flexo tracción o resistencia a compresión confinada
- Propiedades elásticas
- Propiedades reológicas, como la consistencia, viscosidad y capacidad de relleno, y períodos de trabajabilidad y fraguado
- Densidad
- Contenido en aire
- Exudación, tanto en situación simple como bajo presión
- Permeabilidad
- Cambio de longitud, bien relajación o bien contracción
- Lavado de los finos del mortero
- Fricción interna del material

En base a esta relación de parámetros a medir en el mortero, se planificó una campaña de ensayos de laboratorio que contenía las siguientes pruebas, algunas de ellas normadas y otras de desarrollo propio:

## 6.- DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 261

- 1) Granulometría de los áridos empleados. Ensayo realizado mediante UNE EN 1015-1.
- 2) Compresión simple y flexo tracción del mortero. Ensayo realizado mediante UNE EN 1015-11.
- 3) Compresión confinada del mortero. Ensayo realizado según desarrollo propio.
- 4) Módulo elástico. Ensayo realizado mediante UNE EN 83316.
- 5) Consistencia del mortero. Ensayo realizado mediante UNE EN 1015-3.
- 6) Fluidez, viscosidad y capacidad de relleno. Ensayo realizado mediante UNE EN 12350-9.
- 7) Período de trabajabilidad. Ensayo realizado mediante UNE EN 1015-9.
- 8) Tiempo de fraguado. Ensayo realizado mediante UNE EN 480-2.
- 9) Densidad en estado fresco. Ensayo realizado mediante UNE EN 1015-6.
- 10) Contenido en aire del mortero. Ensayo realizado mediante UNE EN 1015-7.
- 11) Exudación del mortero. Ensayo realizado mediante UNE EN 480-4.
- 12) Exudación del mortero bajo presión. Ensayo realizado según desarrollo propio.
- 13) Permeabilidad. Ensayo realizado mediante UNE EN 83310.
- 14) Cambio de longitud/relajación/contracción. Ensayo realizado mediante UNE EN 13872.
- 15) Lavado del mortero. Ensayo realizado mediante Norma BS 8443 (Reino Unido).
- 16) Fricción interna. Ensayo realizado según desarrollo propio.

Respecto de todas las pruebas que contaban con normativa en vigor para su desempeño y una vez se asoció de forma correcta la propiedad a medir con dicho ensayo, se consideró como validada la herramienta. Por lo que respecta a aquellos ensayos que no contaban con normativa, se hizo una revisión de la literatura científica al respecto para proponer pruebas con el mayor sustento técnico posible. Finalmente, estos ensayos quedaron diseñados mediante el siguiente procedimiento:

Compresión confinada del mortero:

Como premisa para el desarrollo de este ensayo se asumió que el comportamiento tenso-deformacional del mortero debe replicar y representar de la manera más fidedigna posible el escenario sostenimiento – mortero inyectado en

espacio anular – roca y/o terreno excavado. Es por esto que para conseguirlo y para obtener datos que ofrezcan información de interés para la investigación, se debe tener en cuenta que el hueco entre el terreno excavado y el sostenimiento puede ser considerado como un sector circular ideal sometido a: 1) confinamiento en la dirección tangencial debido a la simetría del escenario, 2) confinamiento en la dirección longitudinal del túnel a causa de la extensión del mismo (tensión normal), y 3) carga en la dirección radial debido a la convergencia de la roca y al contrasta de las dovelas de hormigón que actúan a modo de sostenimiento.

En definitiva, el propósito resultaba someter el núcleo del mortero a un estado triaxial de tensiones, gracias a un elemento de acero que, envolviendo a las probetas y sometido a tensiones biaxiales, introduzca la situación de confinamiento. De este modo, la carga total generada puede ser considerablemente mayor que la suma separada de las cargas del material que forma el elemento de acero y el hormigón. Dicha carga, además, se verificó que depende en gran medida de tres factores fundamentales, como son el espesor del elemento de acero de recubrimiento, la relación de esbeltez y la forma de la sección transversal.

Como conclusión, se consideró que los medios y equipos necesarios para la materialización de este ensayo son una prensa para prueba a compresión axial simple con sistema de control que permita la adquisición de la respuesta completa tensión – deformación, una camisa metálica de fuerza para someter a la probeta a situación de confinamiento, y, por último, un anillo de guarda circunscrito en la parte central de la probeta para medir cada una de las deformaciones conforme se incrementa la carga. Por último, se consideró que las probetas cilíndricas eran las idóneas para esta tipología de ensayo, a causa de su mayor esbeltez respecto de las probetas cúbicas.

#### Exudación del mortero bajo presión:

Si bien generalmente la exudación se mide en condiciones de no presión, para este caso tan particularizado donde la mezcla va a recibir presiones del terreno aún cuando todavía está en estado fresco se decidió que era importante desarrollar un ensayo que permitiera parametrizar dicha condición.

Para ello, se realizó un ajuste respecto del método convencional de exudación simple sí normalizado, rellenando un recipiente con una muestra representativa del mortero, compactada y enrasada, para posteriormente introducirlo en un filtro

– prensa de Barold durante 4 minutos a la presión de 1 bar. Así mismo, y durante todo el proceso, se determinó como fundamental controlar las condiciones ambientales del laboratorio, determinando que el ensayo debía proceder a una temperatura de  $20 \pm 2$  °C, y a una humedad relativa del 65%.

Para el desarrollo del ensayo, se extrajo el agua acumulada en la superficie del hormigón por medio de una pipeta a intervalos de 10 minutos durante los primeros 40 minutos, y posteriormente cada 30 minutos hasta que finalmente cese el proceso de exudación. Finalmente, en base a un tanto por ciento respecto del agua total contenida en el hormigón, se anotó el volumen de agua final acumulado.

Fricción interna:

Por lo que respecta al ensayo de fricción interna del mortero, de nuevo ante la ausencia de normativa al respecto se desarrolló una metodología propia a partir del empleo de una celda para ensayo triaxial de suelos.

Dicha prueba, consistió en la preparación y curado de una muestra en fresco del mortero a 23°, la cual no debía estar consolidada ni forzarse su saturación de forma previa al ensayo. En el momento en que el material ya está preparado, la muestra se colocó en la celda triaxial y se realizó la prueba pertinente para determinar tanto su cohesión aparente como el ángulo de fricción interno.

B) Validación herramientas fase modelización

Como herramienta asociada a la modelización matemática se ha diseñado un modelo para la simulación de los diferentes escenarios de excavación dovelas – mortero compresible – roca/terreno excavado, donde simular el comportamiento de las diferentes dosificaciones del mortero planteadas en la campaña de ensayos de laboratorio.

En el desarrollo de dicho modelo numérico, se han seguido una serie de premisas e hipótesis que han permitido validar su funcionamiento como herramienta para la selección de la mejor dosificación, siendo las siguientes aquellas de mayor relevancia:

- Reducción a un número finito de escenarios

Hipótesis adoptada de mayor peso, permite representar un amplio espectro de casos mediante un número acotado de situaciones, de modo que convierte el

problema a resolver en abordable desde un punto de vista computacional. Así pues, se asumen una serie de simplificaciones, resumidas en los siguientes ítems:

- Se asume que es posible caracterizar un problema de excavación de túneles en condiciones de 'squeezing' mediante la simulación de la litología de la roca, la resisten y fracturación del macizo, orientación de las imperfecciones del mismo, existencia de sobrecargas o presiones hidrostráticas, y procedimiento constructivo y sistema de sostenimiento empleado.
- Se considera posible reproducir la interacción de los factores anteriores mediante un único modelo integrado, estableciendo unas condiciones de contorno impuestas y modelos de comportamiento teóricos de la resistencia de materiales.
- Se consideran como variables fundamentales del modelo el diámetro de la excavación, las características mecánicas de cada tipo de terreno, los índices del macizo rocoso, la velocidad de avance de la tuneladora, y a presión actuante en el contorno del modelo o carga.

Es por esto, que el grueso de casos potenciales se reduce a un número determinado de escenarios donde si se modifican dichas variables es posible conseguir patrones de respuestas para la caracterización de cada una de las dosificaciones.

- Condiciones de contorno

Tras establecer las variables que controlan el problema, se definieron las características físicas a implementar en la modelización, esto es, qué forma y dimensiones va a tener, y como se va a vincular con el exterior. En este punto, se definió:

- Geometría. Con el objetivo de reducir al máximo un coste computacional ya de por sí elevado, se apostó por una geometría cilíndrica recta, donde, recurriendo a una simetría radial de forma y carga, fue posible emplear tan sólo una cuarta parte del cilindro de túnel para reproducir el comportamiento total. Si bien la simetría radial en geometría cilíndrica asociada al túnel no requiere de mayor explicación, se debe indicar que para que esta simplificación sea factible también debe ser la carga simétrica radialmente, lo que implica, también necesariamente, que ésta tenga que ser uniforme.

Es por esto que la carga, o presión que ejercerá el terreno sobre el túnel, se ha considerado que es uniforme y de igual valor vertical que horizontal, para poder

representar una única carga radial dirigida hacia el eje longitudinal del eje de la excavación. Todo ello permite simplificar la geometría por simetría de forma y carga.

- Dimensiones. Según la literatura científica, se han adoptado unas condiciones geométricas que permitan que los puntos de control donde se va a analizar el estado tenso – deformacional estén lo suficientemente alejados de los contornos como para permitir una correcta redistribución de tensiones tras el paso de la tuneladora TBM. Es por esto que se seleccionó una longitud mínima igual a 20 diámetros de la excavación, y un radio mínimo aproximadamente igual a 15 diámetros de la excavación. En cualquier caso, se pudo comprobar como dicha consideración cumplió de forma holgada, pues, para el modelo realizado en la presente tesis doctoral, hubiera sido suficiente con una longitud de 10 diámetros de excavación, y un radio exterior igual aproximado a 12 veces al diámetro de la excavación.

- Condiciones de contorno. Respecto a este parámetro se han coartado los siguientes desplazamientos atendiendo a las hipótesis de simetría de forma y carga: 1) Desplazamiento longitudinal en las caras frontales y dorsales del modelo, correspondientes a las embocaduras de entrada y salida de la excavación mediante TBM. Y 2), Desplazamiento circunferencial de los planos de simetría horizontal y vertical del modelo, correspondientes a los planos ubicados entre 0 y 90°. Esto es, se ha permitido la convergencia radial del modelo, correspondiendo con un planteamiento de deformación plana de cada una de las secciones transversales del mismo, lo que introduce tensiones longitudinales que permiten reproducir la tendencia del terreno al auto equilibrio tras el paso de la tuneladora.

- Modelización de materiales

Los materiales considerados en el modelo han sido el terreno de excavación, el hormigón correspondiente a las dovelas, y el mortero compresible inyectado en el interior del espacio anular. Cada uno de estos materiales se han modelizado de la siguiente manera:

- Terreno excavado, modelado como material viscoelástico lineal según el modelo de Maxwell. Es el responsable de aportar la respuesta diferida en el tiempo de la descompresión tras el paso de la tuneladora TBM. Se representa mediante el módulo de Young (E), módulo de corte inicial (G), coeficiente de Poisson ( $\gamma$ ) y coeficiente de viscosidad dinámica ( $\mu$ ).

- Hormigón de las dovelas, modelado como material elástico lineal. Se caracterizó mediante el módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson ( $\gamma$ ).
- Mortero compresible, modelado de nuevo como un material elástico lineal. Se caracterizó mediante el módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson ( $\gamma$ ). Para la modelización del endurecimiento del mortero con el paso del tiempo no se modificó el módulo de elasticidad, por razones de limitación del software empleado. Sino que se recurrió a una técnica consistente en sustituir el mortero en fase de endurecimiento por una presión equivalente que se ejerce contra las paredes de la excavación una vez pasa el cabezal de corte.

- Implementación de escenarios

Se trató de minimizar el número de variables para la confección de los escenarios, pero asegurando que no se perdiera representatividad en el modelo. Puesto que algunas de ellas estaban relacionadas entre ellas, se trató de enfocar los casos de estudio en aquellas variables independientes que necesariamente deben modelizarse para obtener resultados representativos de toda la casuística posible.

- Se asumió que la litología de la roca se componía principalmente de dos variables: propiedades mecánicas de la roca y estado del macizo rocoso.
- Se asoció a cada tipología litológica una profundidad con un riesgo de fluencia entre moderado y elevado, lo que conllevaba a una presión exterior propia. Así mismo, la velocidad de la tuneladora TBM se relaciona también con la litología, de modo que no supone una alternativa de estudio por no poder correlacionarse con lo anterior.
- Dado que la geometría debe ser cilíndrica, se seleccionó un diámetro común y constante para todos los escenarios, del entorno de los 9 metros, valor común en este tipo de construcciones.

De este modo, los escenarios se basaron tan sólo en alternativas de tipo de roca – representado por las características mecánicas - y estado de disgregación del macizo –a través del índice GSI-. Se consideraron tres posibles alternativas de cada una, resultando un total de 9 combinaciones de escenarios posibles y reduciendo, por tanto, el análisis final a  $9 \cdot 10$  (dosificaciones a ensayar más una de control) = 90 casos distintos de estudio.

Tal y como se ha descrito en las anteriores líneas, las herramientas que han permitido verificar el nivel de cumplimiento de los requisitos establecidos

quedaron ampliamente validadas, de modo que se da por cumplido el segundo objetivo científico de la presente Tesis Doctoral.

- Dosificación del nuevo material. En base a la literatura científica consultada, se plantea un nuevo material de características funcionales muy similares a un mortero elástico, que se pretende alcanzar incorporando caucho procedente de NFU a la mezcla, siendo objeto de estudio la granulometría y el porcentaje de adición.

Con el objetivo de encontrar la dosificación del nuevo material compresible para el relleno del espacio anular formado por las dovelas rígidas de hormigón y el terreno excavado, se hizo uso de las dos herramientas, ya validadas, que se han comentado en el objetivo científico anterior. La mezcla definitiva seleccionada como idónea, ha sido por tanto aquella que ha obtenido mejores resultados de esta doble perspectiva, alcanzando los resultados esperados en cuanto a los parámetros ensayados en la campaña de pruebas de laboratorio, y ofreciendo el mejor comportamiento una vez inyectada en el espacio anular en las diferentes simulaciones realizadas a partir del modelo matemático del escenario: dovelas – espacio anular – terreno excavado.

#### A) Dosificación según herramienta fase laboratorio

Una vez se ejecutaron los diferentes ensayos que componían la campaña de laboratorio se obtuvieron resultados correspondientes a cada una de las 9 dosificaciones, debiendo ser estos analizados y evaluados de forma razonada. En este sentido, se apostó por una valoración multicriterio, donde fuera posible además otorgar pesos a cada uno de los ensayos, ya que no todos cuentan con la misma trascendencia de cara a obtener la dosificación idónea de mortero compresible.

Las pruebas realizadas se dividieron en 3 grupos y ponderaron por un coeficiente de 5, 3 y 1 en función de la importancia de los ensayos comprendidos dentro de cada grupo en la obtención de las propiedades deseadas del mortero, entendiendo estas como aquellas que permitirían conseguir una mezcla bombeable y compresible, fundamentalmente. Así pues, aquellos ensayos que se ponderaron por un coeficiente de 5 son aquellos que medían directamente la bombeabilidad y compresibilidad de la mezcla. Esto es, consistencia y embudo en V de cara a la bombeabilidad del mortero. Y módulo elástico, resistencia a compresión confinada y volumen de huecos en relación a la compresibilidad del nuevo material.

Respecto a los ensayos ponderados por un coeficiente de 3, se consideraron aquellos que evalúan propiedades básicas demandadas en el nuevo mortero, aunque de forma indirecta. En síntesis, fueron los ensayos de trabajabilidad y tiempo de fraguado del material, exudación bajo presión, flexo tracción, anillo de guarda y cambio de longitud. El hecho de dotar de una importancia relevante a esta relación de ensayos fue por diferentes motivos, también vinculados a la puesta en obra y colocación del material. Este fue el caso, por ejemplo, de los tiempos de trabajabilidad y fraguado, pues son fundamentales para poder planificar una metodología de bombeo óptima que permita disponer del suficiente margen temporal para ubicar el mortero en el espacio anular, y que una vez este haya quedado ubicado comience a fraguar de forma muy rápida para ser a la mayor brevedad posible competente frente a la compatibilización de convergencias.

En cuanto al ensayo de exudación bajo presión, conocer el agua que exuda cada mezcla se consideró relevante ya que la mezcla va a encontrarse en estado fresco en el momento que el terreno comience a transmitir las primeras tensiones de convergencia, de modo que exudaciones excesivas de una determinada dosificación por este motivo pueden dar pie a la formación de una densa red de capilares que, en síntesis, incremente de forma indeseada el volumen de huecos interior de la matriz de cemento del mortero. Por lo que atiende al ensayo de flexo tracción, dado que el mortero en su ubicación final puede estar sometido a cargas de diferentes direcciones, algunas secciones del material pueden estar trabajando bajo estas dos sollicitaciones. Es esta la razón principal por la que se incluye el ensayo dentro de este grupo de pruebas.

En relación a los ensayos de anillo de guarda y cambio de longitud, estas dos pruebas aportarán información sobre los desplazamientos que permitirá el mortero o que va a experimentar mientras dure el proceso de fraguado. Ambos, parámetros importantes para controlar que el mortero no genere daños o fisuras sobre las dovelas de hormigón.

En base a todas estas consideraciones previas, se obtuvo que la dosificación 7 fue la que mejores resultados obtuvo en la valoración multicriterio. Dicha mezcla, presenta diferentes rasgos diferenciadores, entre los que se encuentra la parte cementante de la misma, la cantidad de NFU o la tipología de aditivo empleada. La parte cementante de la dosificación 7 está compuesta por Cenizas Volantes como

adición. Dicho material contribuye notablemente a mitigar el calor de hidratación durante el proceso de fraguado, factor que ha contribuido, entre otras cosas, a controlar en gran medida las deformaciones por retracción o contracción durante esta fase de la puesta en obra. Así mismo, de entre las tres opciones de adición de NFU sometidas a ensayo (sustitución de un 50, 75 o 100% de la arena 0/4 por este material) cuenta con la menor de todas ellas, un 50%. Esto le ha permitido lograr las mejores resistencias mecánicas de entre todas las dosificaciones ensayadas. Además, contando la acción conjunta del aire que le introduce de forma indirecta dicha cantidad de NFU, y el aire que ocluye de forma directa el aditivo inclusor de aire, ha alcanzado un porcentaje de huecos idóneo, de un 25,54%, muy cercano al 25% fijado como objetivo.

Atendiendo a las características reológicas de la dosificación 7, consiguió muy buenos resultados en todos aquellos ensayos que midieron parámetros del mortero en estado fresco. En cuanto a consistencia, logró un resultado de consistencia fluida, algo clave para garantizar el material pudiera ser bombeado y colocado correctamente en el espacio anular. Así mismo, también consiguió un muy buen resultado (segunda mejor dosificación), en cuanto al ensayo de embudo en V, que mide de forma directa la viscosidad de la mezcla. Se debe recordar, que solo asegurando una buena viscosidad en el mortero se podrá evitar la flotación de las partículas de NFU en su interior cuando esta todavía no haya endurecido, o incluso eludir problemas de segregación del mortero especialmente durante la fase de bombeo del material.

Analizando los resultados en cuanto a trabajabilidad y tiempos de fraguado satisfactoriamente se comprobó como la mezcla se comportaba de forma idónea de cara a la futura puesta en obra del material, pues lograba un buen margen temporal previo a iniciar el proceso de fraguado, al mismo tiempo que conseguía, una vez iniciado el proceso de endurecimiento, completar el proceso de forma rápida. La justificación de dicho comportamiento se puede establecer de manera directa con la combinación de los aditivos incorporados: inclusor de aire y acelerante del fraguado. El efecto dispersante e inductor de aire del aditivo inclusor evita un efecto inmediato del aditivo acelerante, de modo que se consigue el mencionado margen temporal para poder bombear el mortero de forma oportuna, aunque en el momento en que este efecto pasa el acelerante actúa de lleno, permitiendo que el mortero ya colocado fragüe veloz.

Otras propiedades a destacar por la presente dosificación fueron los resultados obtenidos en cuanto a la deformación de anillo de guarda, pues se verificó que, pese a alcanzar las mejores resistencias a compresión, la mezcla de mortero permitía también una buena deformación previa rotura (este parámetro resulta relevante pues permite que el mortero pueda asumir las deformaciones que le introduzca el terreno, sin llegar a facturar). O bien el resultado conseguido en el ensayo de fricción interna, el cual determinó que obtuvo la mejor cohesión interior de entre todas las mezclas ensayadas, lo cual supone que fue la dosificación que integró con mayor grado de acierto el NFU en su matriz interior de cemento.

Finalmente, se puede considerar que la dosificación de ensayo número 7 logró cumplir con todas las premisas básicas fijadas para el nuevo mortero compresible y que, por lo que respecta a la herramienta de ensayos de laboratorio, es una mezcla plenamente viable para servir como mortero compresible de relleno en la excavación de un túnel mediante TBM.

#### B) Dosificación según herramienta fase modelización

Previo a comentar los resultados obtenidos en cuanto a qué dosificación presenta un mejor comportamiento como relleno del espacio anular según el modelo numérico, se indican a continuación de forma resumida las premisas adoptadas acerca del registro de resultados.

- Ubicación del punto de control

Se comprobó como tensiones y deformaciones se regularizaban a diferentes distancias de los contornos frontal y dorsal del modelo una vez introducido el desequilibrio generado por la TBM, empezando a ser adecuadas a  $1/8$  de la longitud total del túnel. Es por esto, que se estableció que los resultados se registrasen a  $L/8$  del plano dorsal. Así mismo, para evitar cualquier influencia con los contornos horizontal y vertical se consideró el punto de control a  $45^\circ$  de cualquier de ambos planos.

- Salida de resultados

Se decidió obtener las componentes cilíndricas de tensión en el revestimiento y las tensiones de Von Mises en el plano medio del revestimiento como elemento comparador y su evolución en el tiempo. Así mismo, también en relación al tiempo, se registró la evolución de la convergencia radial en este mismo punto.

## 6.- DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 271

Una vez comentadas dichas premisas, se pasa a valorar los resultados obtenidos tras el proceso de simulación del modelo numérico:

- Ordenando los resultados de tensión de Von Mises en el revestimiento en relación con la convergencia y normalizándolos tomando como valor de referencia unidad la tensión menor acaecida en cada caso, se pudo comprobar como la respuesta óptima se daba, en todos los escenarios, para las mezclas 7 y 8.
- De entre las dos mezclas – 7 y 8 – indicadas en el párrafo anterior, se pone de manifiesto que la 7 es la única que para todos los escenarios obtiene valores más favorables respecto a un mortero convencional.
- Se muestra una clara tendencia de la dosificación 7 a mejorar su respuesta a medida que el terreno pierde rigidez. Esto es, la mezcla 7 mejora de forma más rápida la respuesta del revestimiento cuanto más propicio es el terreno a condiciones de ‘squeezing’.
- Si se atiende a los resultados anteriores, y se analiza la tendencia a mejorar/empeorar la respuesta en el revestimiento con el descenso de la rigidez del terreno, se pueden realizar las siguientes lecturas:
  - Se pueden distinguir con claridad dos familias de mezclas, en función de si presenta un comportamiento más apto en terrenos con menor rigidez – como es el caso de las mezclas 1, 4, 3, 7 y 9, o bien producen un mayor alivio de tensiones en rocas más rígidas – en este caso 2, 5, 6 y 8 –.
  - La dosificación número 7 mejora el comportamiento de un mortero convencional en todos los escenarios, y hasta en un 6% de la tensión transmitida al revestimiento.
  - Además de que ninguna mezcla mejore los resultados de las dosificaciones 7 y 8, se ha determinado una rigidez del terreno que ejerza como límite entre la idoneidad de una u otra. Este valor es de 12,24 GPa.
- Aplicando el criterio de Hoek & Marinos para evaluar el riesgo de fluencia en función de la convergencia esperada durante la construcción de un túnel, se observa que para valores inferiores al 1% no se considera que exista riesgo de ‘squeezing’. Dicho esto, es muy relevante que para todos aquellos escenarios donde la mezcla idónea resulta la 8 se ha obtenido que no existe riesgo de fluencia. Mientras, en todos aquellos escenarios donde las convergencias han sido superiores al 1% y que por tanto existiría riesgo de fluencia, la mezcla resultante como idónea ha sido la 7.

- Incluso, la dosificación 7 se confirma desde una perspectiva de modelización numérica como la idónea para trabajar en condiciones de fluencia “Severa”, según Hoek & Marinos aquellas convergencias que oscilan entre el 5 y 10% del diámetro del túnel.

Tras todas las valoraciones anteriores, se obtiene la conclusión más importante de la presente Tesis Doctoral, comprobando como la dosificación número 7 es la solución óptima como relleno del espacio anular – tanto según resultados de campaña de laboratorio como modelo numérico –, en todo el rango de valores de rigidez del terreno donde es posible que existan fenómenos de fluencia. A partir de este hallazgo, se puede concluir que el objetivo científico número 3 ha sido superado, así como el Objetivo General de la Investigación: habiendo desarrollado una nueva solución constructiva para asegurar la compatibilidad de convergencias entre terreno excavado y dovelas rígidas de hormigón, cuando se trabaja con tuneladoras TBM de escudo en terrenos inestables con riesgo de Squeezing Ground.

## 6.2 CONCLUSIONES

En base a las discusiones planteadas en el apartado anterior, se puede concluir que la presente Tesis Doctoral ha logrado cumplir con todos los objetivos científicos fijados en el Plan de Investigación inicial.

- Se han identificado los requisitos mecánicos – mecanismo de compresión del mortero por pandeo elástico logrado a partir de la inclusión de NFU en el material –, requisitos físicos – el mortero debía reunir propiedades de bombeabilidad, compresibilidad, trabajabilidad y estabilidad – y químicos – combinación de sinergia química de aditivos a partir de aditivo inductor de aire, aditivo superplastificante y aditivo acelerante del fraguado –.

- Se han validado las herramientas necesarias para verificar que el mortero ha adquirido el nivel de cumplimiento necesario para con los requisitos establecidos previamente. De este modo, se ha definido una campaña de ensayos ajustada con precisión a las propiedades a medir en el mortero, y se ha desarrollado satisfactoriamente un ensayo personalizado para medir la resistencia a compresión confinada del mortero. Dicho ensayo, ha sido posible a partir del uso de una camisa de fuerza y un anillo de guarda sobre cada probeta de mortero ensayada en la prensa. Así mismo, se ha desarrollado satisfactoriamente un modelo numérico que ha simulado el escenario en cuestión, y que ha permitido obtener la dosificación exacta que mejor rendimiento proporciona como relleno anular. Además, a consecuencia de la aplicación del modelo, ha sido posible determinar que un terreno, generalmente, presentará riesgo de fluencia para todos aquellos valores de módulo elástico no superiores a 10,27 GPa, siendo dicho valor el parámetro límite a partir del cual el terreno dejará de mostrar riesgo de fluencia.

- Finalmente se ha encontrado una dosificación de mortero compresible, compuesta a partir de caucho NFU, capaz de llevar a cabo la compatibilización de convergencias entre el terreno recién excavado con riesgo de fluencia y la dovela rígida de hormigón. Dicha dosificación se puede considerar el resultado definitivo de la presente tesis doctoral, habiendo demostrado que es posible encontrar una solución al problema de excavación mediante TBM de Escudo a través de terrenos y/o rocas inestables de una forma más económica y medio ambientalmente sostenible que las soluciones actuales.

### 6.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El nuevo mortero compresible desarrollado en la presente tesis se ha concebido como una solución a un problema latente y actual que afecta a la

DT_07		
Material		Cantidad
CEM II/B-V 42,5 R (kg)		366
Arena lavada (0/4) (kg)		937,5
Arena triturada (0/2) (kg)		530
Caucho NFU (kg)		39
Agua (l)		113
Aditivos	Inclisor (%)	1,5
	Acelerante (%)	1

Tabla 1.85 Dosificación final. Fuente: Elaboración propia.

excavación de túneles mediante TBM de escudo. Esta técnica puede resultar un tanto cara en algunos casos, no obstante, sale económicamente rentable si se compara con otras alternativas, ya que los plazos de ejecución se recortan significativamente. La problemática se ha tratado de resolver a partir del empleo de un mortero específico como relleno del espacio anular que queda formado por las dovelas de hormigón y el terreno excavado. Este mortero debía reunir unas ciertas propiedades que le confiriesen un mayor potencial respecto de una mezcla convencional, habiendo conseguido dichas cualidades gracias a la sustitución de parte del árido fino por NFU (neumático reciclado). Este material, de módulo elástico mucho más bajo que el árido fino, ha sido clave a la hora de aumentar significativamente la elasticidad del mortero endurecido.

Así pues, y fruto de la presente Tesis Doctoral, surgen diferentes líneas futuras de investigación que el doctorando entiende de interés. Se presentan a continuación, tanto aquellas inherentes al NFU como material, como aquellas aplicadas a materiales conglomerados en base a cemento que empleen dicho elemento en su composición.

NFU como material:

El NFU como material puede tener diferentes aplicaciones en el ámbito de la ingeniería civil o ciertas ramas industriales. Todos estos usos, se encuentran no obstante en fase claramente incipiente, pendientes todavía de una profunda investigación que sustente su uso desde un enfoque comercial y plenamente industrializable. Estos potenciales usos, serían los siguientes:

- Carreteras

Se identifica un uso potencial de NFU en el ámbito de las carreteras es en forma de granulado, para la fabricación de betunes – caucho, pudiendo aplicarse directamente como áridos o filler para mezclas bituminosas como una modalidad más de betún modificado. También puede ser empleado como elemento de seguridad vial y pantallas anti ruido.

- Obras de tierra y terraplenes

Se observa un potencial uso de este material, en su versión troceada y granulada, como material ligero o de relleno en la construcción de terraplenes. Mediante esta aplicación, se identifican diferentes ventajas como pueden ser la utilización de grandes cantidades de residuo, un peso reducido, una mejora de la

permeabilidad y resistencia a heladas y resistencia a esfuerzos. Sin embargo, pese a ser resistente a radiaciones ultravioletas y no ser biodegradable, su uso puede tener alguna influencia en el medio ambiente, siendo esta la razón principal por la que se recomienda avanzar hacia investigaciones más precisas del material.

- Combustible (valorización energética)

Existen por el momento investigaciones incipientes en Japón y EEUU, fundamentalmente, para emplear el NFU como combustible. Esto se fundamenta en el gran poder calorífico del neumático, aproximadamente 35 MJ/kg, muy similar al de otros materiales empleados actualmente como el carbón. En algunas industrias como plantas industriales y centrales de producción de vapor y energía, se detecta un amplio potencial de uso.

NFU en morteros y hormigones:

En este ámbito se quiere poner de manifiesto la principal línea de investigación futura que propone el doctorando, a partir de la capacidad demostrada de mitigación de vibraciones del NFU. Existen diferentes antecedentes en literatura científica, que comentan la relación directa que existe entre el volumen de NFU existente en una determinada dosificación. Por ejemplo, fueron los casos de Cing – YaoLin et al. [69], que analizaron el comportamiento de este parámetro en la fabricación de hormigones con NFU de distintos tamaños, encontrando unos resultados que indicaron que con una sustitución del árido por NFU de tamiz 40 en un 2,5 %, el coeficiente de amortiguación se veía incrementado en un 94 %. Otros casos fueron las investigaciones de Topcu [70] y Fauthi y Clarck [71] donde se recomendaba el uso de hormigones con NFU en aplicaciones donde se necesitaba una cantidad importante de atenuación, como es el caso de estaciones de ferrocarril o cimentaciones de maquinaria. O bien Topcu y Ali et al [72], recomendando el uso de este material a escenarios donde pudiera estar sometido a excitaciones dinámicas.

En este sentido, el doctorando plantea investigar si, ante un determinado túnel que se haya ejecutado mediante TBM de Escudo, y donde se haya inyectado el nuevo mortero compresible en el espacio anular formado por la excavación y las dovelas de hormigón, existe una potencial capacidad de mitigación de las vibraciones que el tráfico generado por dicho túnel transmite al exterior, dados los antecedentes que existen en literatura científica en cuanto a la capacidad que ofrece

el caucho NFU para la atenuación de vibraciones en el ámbito del ferrocarril [73], [74] y [75]. Se plantea especialmente dicha investigación en el caso de los túneles subterráneos de índole ferroviaria, Metro por ejemplo, los cuáles además circulan por entornos urbanos en una alta probabilidad. La generación de vibraciones en dichos casos, puede suponer un grave problema para viviendas y edificios cercanos, como ya se ha podido comprobar en varios emplazamientos en territorio nacional como es el caso de las líneas 1, 2 y 7 de Metro Valencia a su paso por Torrent [76], la línea 1 de Barcelona de forma generalizada [77], o la línea 3 (Metrosur) de Metro Madrid a su paso por Getafe [78].

De este modo, si se lograra demostrar una notable efectividad del anillo que formaría el nuevo mortero compresible con caucho en términos de aislación de vibraciones al exterior, el material aquí desarrollado no solo sería útil para llevar a cabo la compatibilización de convergencias entre terrenos que presenten riesgo de fluencia y las dovelas de hormigón, sino que también tendría una contribución directa a mitigar el ingente problema actual en diferentes Metros de ciudades de todo el mundo en cuanto a la propagación de vibraciones al exterior, con las molestias y externalidades que esto acarrea para los ciudadanos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ramoni, «The interaction between shield, ground and tunnel support in TBM tunnelling through squeezing ground,» *Rock mechanics and rock engineering* 44, pp. 37-61, 2011.
- [2] Ramoni, «Tunnel boring machines under squeezing conditions,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, pp. 139-157, 2010.
- [3] Ramoni, «Squeezing loading of segmental linings and the effect of backfilling,» *Tunneling and Underground Space Technology*, 26, pp. 692-717, 2011.
- [4] Barla, «TBM tunnelling in difficult ground conditions,» *Geoeng*, 2000.
- [5] L. Cantieni y G. Anagnostou, «The interaction between yielding supports and squeezing ground,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp. 309-322, 2009.
- [6] Ramoni, «Segmental linings under squeezing pressure,» 2012.
- [7] «[www.therobbinscompany.com](http://www.therobbinscompany.com),» [En línea].
- [8] Ramoni, «Squeezing loading of segmental linings and the effect of backfilling,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, pp. 692-717, 2011.
- [9] K. Kovári, «Tunneling in squeezing rock,» *Tunnel* 5, pp. 12-31, 1998.
- [10] mEZGER, «Some concepts for segmental linings in squeezing rock,» *ETH Zurich*, 2015.

- [11] R. Leucker, D. Kessler y H. Otremba, «Neue Tübbings aus hochfestem, faserbewehrtem Beton: Ergebnisse von Belastungsversuchen und Vergleich mit numerischen,» pp. 198-203, 2009.
- [12] M. Ramoni y A. G, «TBM tunnelling in squeezing ground - Basic considerations and decision aids,» *Rapid Excavation and Tunnelling Conference, san Francisco*, pp. 219-233, 2011.
- [13] K. Kovári, «Method and devide for stabilizing a cavity excavated in underground construction.». US Patente 20050191138, 2005.
- [14] W. Schubert, «Dealing with squeezing conditions in Alpine tunnels.,» *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29, pp. 145-153, 1996.
- [15] R. Podiadtko y G. Weidig, «Verstellbarer nachgiebiger Tübbingausbau,» *Tunnel 2010*, pp. 37-42, 2010.
- [16] G. Brunar y f. pOWONDRA, «Nachgiebiger Tübbingausbau mit MeypoStauchekenebten,» *Felsbau*, 3, pp. 225-229, 1985.
- [17] E. Schneider, K. Rotter, A. Saxer y R. Röck, «Compex Support System: Komprimierbarer Ringspaltmörtel zur Bewältigung druckhafter Gebirgsbereiche bei TBM-Vortrieben mit starrem Tübbingausbau,» *Felsbau* 23, pp. 95-101, 2005.
- [18] B. Billing, C. Gipperich, M. Wurlff y A. Schaab, «Ausbausysteme für den maschinellen Tunnelbau in druckhaftem Gebirge,» *Taschenbuch für den Tunnelbau*, pp. 223-260, 2007.
- [19] Billing, «DeCo Grout - Innovative Grout to cope with rock deformations in TBM tunneling. Underground Space - the 4th Dimension of Metropolises,» 2007.
- [20] Henn, «Aua Guidelines For Backfilling And Contact Groutinf of Tunnels and Shafts,» 2003.
- [21] Sukontasukkul, «Porperties of concrete pedestrian blocks mixed with crumb rubber,» *Construction and Building Materiales*, 20, pp. 450-457, 2006.

- [22] Mohammed, «Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests,» *Construction and Building Materials*, 25, pp. 1388-1397, 2011.
- [23] R. Siddique y T. R. Naik, «Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview,» *Waste management*, 24, pp. 563-569, 2004.
- [24] Fattuhi, «Cement based materials containing shredded scrap tyre rubber,» *Construction and Building Materials*, 10, pp. 229-236, 1996.
- [25] Topcu, «Collision behaviors of rubberized concrete,» *Cement and Concrete Research*, 27, pp. 1893-1898, 1997.
- [26] Kramar, «Impact Response of Lightweight Mortars Containing Expanded Perlite,» *Cement and Concrete Composites*, 37, pp. 205-214, 2012.
- [27] M. Panet y A. Guenot, «Analysis of Convergence Behind the Face of a Tunnel,» *Tunnelling'82. The Institution of Mining and Metallurgy, London*, pp. 197-204, 1982.
- [28] Kovári, «Tunnelling in squeezing rock,» vol. 1, 1996.
- [29] F. Mezger, M. Ramoni, A. G y A. Dimitrakopoulos, «Einsatzgrenzen von Tübbingausbauten in druckhaftem Gebirge,» *KT- Forschungsprojekt*, 2014.
- [30] R. D. Dwivedi, M. Singh, M. Viladkar y R. Goel, «Estimation of support pressure during tunnelling through squeezing grounds,» *Engineering geology*, 168, pp. 9-22, 2014.
- [31] E. Grimstad y N. Barton, «Updating the Q-System for NMT. In Proc. int. symp. on sprayed concrete-modern use of wet mix sprayed concrete for underground support,» pp. 46-66, 1993.
- [32] R. K. Goel, «Correlations for Predicting Support Pressures and Deformations in Tunnels,» 1994.

- [33] R. Bhasin y E. Grimstad, «The use of stress-strength relationships in the assessment of tunnel stability,» *Tunnelling and underground Space Technology*, 11, 93-98.
- [34] K. Zhao, G. Barla y M. Janutolo, «A completely 3D Model for the Simulation Of Mechanized Tunnel Excavation,» *Rock Mechanics Engineering*, pp. 475-494, 2012.
- [35] C. Yoo, «Performance of multi-face tunnelling - A 3D numerical investigation,» 2009.
- [36] G. Barla y S. Borgna, «Numerical modelling of squeezing behavior in tunnels,» 2000.
- [37] G. Barla, «Tunnelling mechanics. Tunnelling under squeezing rock conditions,» 2002.
- [38] V. Kontogianni, P. Psimoulis y S. Stiros, «What is the contribution of time-dependent deformation in tunnel convergence?,» 2005.
- [39] J. M. Alcaide Alonso, «Procedimiento de estimación de la presión de trabajo óptima en la cámara de mezclado de un escudo de presión de tierras. Implicación en los parámetros de diseño del escudo,» 2011.
- [40] W. Broere, «Tunnel face stability & new CPT applications,» *TU Delft, Delft University of Technology*, 2001.
- [41] G. Mollon, K. K. Phoon, D. Dias y A. H. Soubra, «Validation of a new 2D failure mechanism for the stability analysis of a pressurized tunnel face in a spatially varying sand,» *Journal of Engineering Mechanics*, 137, pp. 8-21, 2010.
- [42] E. Ministerio de Fomento, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, 2008.
- [43] Putzmeister América., «Tecnología del hormigón para bombas de hormigón,» Sturtevant, Milwaukee, 2018.

- [44] CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Residuos utilizables en construcción. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente..
- [45] CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). NFU. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente..
- [46] A. Turatsinze, S. Bonnet y J. L. Granju, «Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance,» *Construction and Building Materials*, pp. 176-181, 2007.
- [47] V. Royano García, S. Valls del Barrio, M. Barra Bizinotto y E. Vázquez Ramonich, «Estudio de hormigones con adición de polvo de neumáticos fuera de uso (NFU) Jornada de Recerca I Innovació a l'Escola de Camins. Universitat Politècnica de Catalunya,» 2011.
- [48] M. A. Aiello y F. Leuzzi, «Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state.,» *Waste management*, 30, pp. 1696-1704, 2010.
- [49] C. y. Lin, G. C. Yao y C. H. Lin, «A Study on the Damping Ratio of Rubber Concrete,» *Journal os Asian Architecture and Building Engineering*, 9, pp. 423-429, 2010.
- [50] A. A. Aliabdo, A. E. M. A. Elmoaty y M. M. AbdElbaset, «Utilization of waste rubber in non-structural applications,» *Construction and Building Materials*, 91, pp. 195-207, 2015.
- [51] C. (. d. E. y. E. d. O. Públicas), Humo de sílice. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- [52] CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Cenizas Volantes. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- [53] CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Escorias de horno alto. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

- [54] «[www.elconstructorcivil.com](http://www.elconstructorcivil.com),» [En línea].
- [55] UNE-EN 934-3:2010 + A1:2012 Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado..
- [56] «Universidad de Oviedo (2016) <http://www.uniovi.es/>,» [En línea].
- [57] «Specification and Guidelines for the use of specialist products for Soft Ground Tunneling, April 2005».
- [58] P. D. Medina, E. A. Cruz y J. H. Restrepo, «Aplicación del modelo de experimentación Taguchi en un ingenio azucarero del Valle del Cauca,» *Scientia Et Technica*, 1, 2007.
- [59] AENOR, EN 13108-1:2008, Bituminous mixtures. Material specifications. Part I: Asphalt Concrete, Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid. Spain., 2008.
- [60] E. Wilson Jr, J. Decius, P. Cross y R. Lagemann, «Molecular vibrations,» *American Journal of Physics*, vol. 23, nº 8, pp. 550-550, 1955.
- [61] Shing, Bhawani y J. L. Jethwa, «Correlation between observed support pressure and rock mass quality,» *Tunneling and Underground Space Technology*, 2, pp. 59-75, 1992.
- [62] «[www.sharcnet.ca](http://www.sharcnet.ca),» [En línea].
- [63] G. Barla, «Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions,» 2016.
- [64] T. R. Company, «[www.therobbinscompany.com](http://www.therobbinscompany.com),» 2017. [En línea].
- [65] ADIF, «Estudios informativos para el desarrollo de la Red de Alta Velocidad en Asturias. Tramo Pola de Lena - Oviedo. Anejo 10. Túneles,» 2015.

- [66] «<http://www.therobbinscompany.com>,» [En línea].
- [67] G. Perri, proyecto de túneles: criterios de diseño.
- [68] M. Sapigni, M. Berti, E. Bethaz, A. Busillo y G. Cardone, TBM performance estimation using rock mass classifications, 2002.
- [69] E. Hoek y P. Marinos, Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses, 2000.
- [70] E. Hoek y P. Marinos, Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses, 2000.
- [71] C. D. Calderón, Análisis, diseño y control geotécnico de la excavación del túnel y pozo vertical de la Descarga de Fondo del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, 2013.
- [72] C. Y. Lin, Y. G. C. y C. H. Lin, «A Study on the Damping Ration of Rubber Concrete,» *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, pp. 423-429, 2010.
- [73] I. B. Topcu, «The properties of rubberized concretes,» *Cement and Concrete Research*, 25, pp. 304-310, 1995.
- [74] N. I. Fattuhi y L. A. Clark, «Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber,» *Construction and Building Materials*, 10, pp. 229-236, 1996.
- [75] A. O. Atahan y A. Ö. Yücel, «Crumb rubber in concrete: static and dynamic evaluation,» *Construction and Building Materials*, 36, 617-622.
- [76] A. Dasí, «Vecinos de Torrent denuncian el ruido y vibraciones que provoca el paso del Metro.,» *Las Provincias*, pp. <https://www.lasprovincias.es/horta-morvedre/vecinos-torrent-denuncian-20180720001933-ntvo.html>, 20 julio 2018.

- [77] Ó. Hernández, «El cambio de vías de la L1 reducirá ruido, vibraciones y mantenimiento,» *el Periódico*, pp. <https://www.elperiodico.com/es/barcelona/20190709/cambio-vias-l1-reducira-ruido-vibraciones-mantenimiento-7546363>, 9 julio 2019.
- [78] D. Callejo, «Metro volverá a analizar las vibraciones que provoca en Getafe.,» *Cadena Ser*, p. [https://cadenaser.com/emisora/2020/01/16/ser\\_madrid\\_sur/1579171470\\_175734.html](https://cadenaser.com/emisora/2020/01/16/ser_madrid_sur/1579171470_175734.html), 16 enero 2020.
- [79] L. Ibarra y M. Alzorritz, «Journal of Applied Polymer Science,» pp. 805-813, 2002.
- [80] P. Cucino, G. Eccher, R. Castellanza, A. Parpaiola, C. Di Prisco y L. SpA, «Expanded clay in deep mechanised tunnel boring,» *In. Proc. ITA-AITES World Tunnel Congress Bangkok*, 2012.
- [81] G. Anagnostou y L. Cantieni, «Design and analysis of yielding support in squeezing ground,» *11th Congress of the International Society for Rock mechanics, Lisbon*, pp. 829-832, 2007.
- [82] L. Cantieni y G. Anagnostou, «The effect of the stress path on squeezing behaviour in tunnelling,» *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2008.