



Universidad de Oviedo

Programa de Doctorado en Materiales

**Optimización de inyecciones de impermeabilización mediante
la correlación entre parámetros geotécnicos, volúmenes de
admisión y tipos de lechadas en suelos**

Optimization of waterproofing injections through the correlation between geotechnical
parameters, admission volumes and types of slurries in soils.

TESIS DOCTORAL

Johnatan González García

Diciembre 2022



Universidad de Oviedo

Programa de Doctorado en Materiales

Optimización de inyecciones de impermeabilización mediante la correlación entre parámetros geotécnicos, volúmenes de admisión y tipos de lechadas en suelos

Optimization of waterproofing injections through the correlation between geotechnical parameters, admission volumes and types of slurries in soils.

TESIS DOCTORAL

Directores de tesis

Dr. D. Celestino González Nicieza

Dra. Dña. Martina Inmaculada Alvarez Fernández



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español: Optimización de inyecciones de impermeabilización mediante la correlación entre parámetros geotécnicos, volúmenes de admisión y tipos de lechadas en suelos.	Inglés: Optimization of waterproofing injections through the correlation between geotechnical parameters, admission volumes and types of slurries in soils.
2.- Autor	
Nombre: Johnatan González García	
Programa de Doctorado: Materiales	
Órgano responsable: Comisión Académica Programa de Doctorado en Materiales	

RESUMEN (en español)

Esta tesis propone un procedimiento para el control de las infiltraciones de agua en los túneles y obras subterráneas, alternativo al tradicional sistema tubo-manguito, por medio de inyecciones de mezclas constituidas por cementos y microcementos, con la misión del relleno de la porosidad efectiva, consolidando el terreno alrededor de la excavación de la obra subterránea y mejorando sus propiedades de impermeabilidad, resistentes y deformacionales en terrenos tipos suelos.

La inyección de mezclas de cementos, microcementos y acelerantes de fraguado es capaz de controlar las infiltraciones en las estructuras subterráneas de manera rápida y eficiente, por sus cortos tiempos de ejecución y reducida mano de obra, por lo que se considera una de las mejores opciones para solucionar el problema de las infiltraciones de agua en los túneles y obras subterráneas.

El efecto de los procesos internos de las lechadas ayudó a comprender las justificaciones en la selección de las diferentes mezclas en cada uno de los casos prácticos. Pero el conocimiento de sus propiedades mecánicas, que reflejan la influencia combinada de todas las interacciones físico-químicas, son las que permiten definir las mezclas que se utilizan en cada caso, pudiéndose, en consecuencia, seleccionar la lechada con las características apropiadas para obtener los beneficios de la consolidación o de la impermeabilización de un terreno tipo suelo con un determinado problema geotécnico.

En las pruebas efectuadas, la selección de la lechada se ha realizado en función de las características granulométricas del material no consolidado. El análisis de esas características permite apreciar el coeficiente de permeabilidad y en menor medida la porosidad del suelo, lo que contribuye a la selección de los aditivos para mejorar las mezclas básicas. El resultado de la investigación ha demostrado que la inyección del contorno de excavación de una obra subterránea reduce la permeabilidad del macizo a excavar, disminuyendo a su vez los efectos negativos del flujo de agua en la obra: erosión del relleno de discontinuidades, generación de subpresión reduciendo la estabilidad de la superestructura, pérdida de agua en acuíferos, etc.

Durante los ensayos realizados, todos los procesos de inyección fueron automatizados: la lechada se fabricó en plantas programadas para cumplir con las



mezclas diseñadas, la inyección se controló mediante el empleo de autómatas programables tipo PLC ubicados en cada equipo de inyección, para regular los parámetros de la inyección y registrar los datos más importantes.

Terminado cada proceso de inyección, los datos de fabricación y de inyección se transfirieron a PC, facilitando el seguimiento del tratamiento de inyección y el estudio estadístico de cada resultado.

Los resultados permiten concluir que la difusión preferente de la lechada se realiza a lo largo de la dirección del flujo de inyección, bajo condición hidrodinámica y restringiendo el campo dinámico del agua en el rango de difusión de la lechada.

En los trabajos ejecutados directamente en obra, el flujo de agua subterránea y la presión de inyección son los principales factores de control que afectan el rango de difusión de la lechada, el cual adquiere a su vez una correlación positiva con la presión de inyección y una correlación negativa con la velocidad del agua que fluye.

En este trabajo se proponen sugerencias para mejorar los métodos de diseño y las tecnologías actuales en el campo de las inyecciones de impermeabilización en obras subterráneas.

RESUMEN (en Inglés)

This thesis proposes a procedure for the control of water infiltrations in tunnels and underground works, as an alternative to the traditional hose system, by means of injections of mixtures consisting of cements and microcements, with the mission of filling the effective porosity, consolidating the ground around the excavation of the underground works and improving its impermeability, resistance and deformation properties in soil type terrains.

The injection of mixtures of cements, microcements and setting accelerators is able to control infiltrations in underground structures in a fast and efficient way, due to its short execution times and reduced manpower, so it is considered one of the best options to solve the problem of water infiltrations in tunnels and underground works.

The effect of the internal processes of the grouts helped to understand the justifications in the selection of the different mixes in each of the practical cases. But the knowledge of their mechanical properties, which reflect the combined influence of all the physical-chemical interactions, are the ones that allow defining the mixes to be used in each case, being able, consequently, to select the grout with the appropriate characteristics to obtain the benefits of consolidation or waterproofing of a soil type terrain with a given geotechnical problem.

In the tests carried out, the selection of the grout was based on the granulometric characteristics of the unconsolidated material. The analysis of these characteristics allows to appreciate the permeability coefficient and to a lesser extent the porosity of the soil, which contributes to the selection of additives to improve the basic mixes. The result of the research has shown that the injection of the excavation contour of a underground work reduces the permeability of the massif to be excavated, reducing in turn the negative effects of water flow in the work: erosion of the filling of discontinuities, generation of underpressure reducing the stability of the superstructure, loss of water in aquifers, etc.

During the tests carried out, all the injection processes were automated: the grout was



Universidad de Oviedo

manufactured in plants programmed to comply with the designed mixtures, the injection was controlled by means of PLC type programmable automats located in each injection equipment, to regulate the injection parameters and record the most important data.

At the end of each injection process, the manufacturing and injection data were transferred to a PC, facilitating the follow-up of the injection treatment and the statistical study of each result.

The results allow concluding that the preferential grout diffusion is along the injection flow direction, under hydrodynamic condition and restricting the dynamic field of water in the grout diffusion range.

In on-site works, groundwater flow and injection pressure are the main controlling factors affecting the grout diffusion rate, which in turn acquires a positive correlation with injection pressure and a negative correlation with flowing water velocity.

In this paper, suggestions are proposed to improve the design methods and current technologies in the field of waterproofing injections in underground works.

**SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO
EN MATERIALES**

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización de la presente investigación, en especial a los directores de tesis Dr. D. Celestino González Nicieza y Dr. Dña. Martina Inmaculada Alvarez Fernández, por su sabiduría y su enorme paciencia, porque siempre han tenido un momento para resolver mis dudas, por animarme cuando lo he necesitado, por su continuo apoyo y motivación y, sobre todo, por el afecto mostrado durante éstos últimos años.

Agradezco profundamente la ayuda recibida de mi tutor de tesis D. Antonio Argüelles Amado, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de la misma.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud al Prof. D. Rafael Ispizua de la Universidad del País Vasco, con el que me encuentro en deuda por sus valiosas aportaciones, comentarios y enseñanzas recibidas.

El autor agradece a los Servicios Científicos-Técnicos de la Universidad de Oviedo y en particular a los departamentos de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, por su continua colaboración y asesoramiento. El autor también quiere agradecer al Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) por apoyar este trabajo en el marco del proyecto de investigación "Impermeabilización Primaria de Túneles mediante Inyecciones" (IDI-20181025).

Un reconocimiento muy especial merece la comprensión, paciencia, el ánimo y el cariño de mi esposa, Begoña y de mi hija Valeria, porque son parte fundamental de mi vida, y sin ellas no hubiese sido posible este trabajo y especialmente, al Dr D. Daniel Vazquez Silva, mentor profesional.

Y, por último, aunque no menos importante, agradezco a mi compañero Sergio González, un ejemplo a seguir, por sus consejos y el haber inculcado en mí las ganas de finalizar esta tesis doctoral.

A todos, MUCHAS GRACIAS.

El autor

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	8
1.1. ¿QUE ES LA INYECCION DE SUELOS? PRINCIPALES APLICACIONES	10
1.2. METODOLOGIA. LAS TRES FASES DE DEL PROCESO DE INYECCION	14
1.2.1. Fase 1: Caracterización.	14
1.2.2. Fase 2: Definición de parámetros técnicos	18
1.2.3. Fase 3: Control del proceso	21
1.2.3.1. Presión de Bombeo	21
1.2.3.2. Consideraciones básicas	22
1.2.3.3. Inyección de baja presión	22
1.2.3.4. Inyección de alta presión	23
1.2.3.5. Teoría detrás de la inyección a alta presión	24
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	26
CAPÍTULO II – ESTADO DEL ARTE	28
2.1. CARACTERIZACION DE LECHADAS	29
2.2. PRUEBAS DE INYECTABILIDAD	33
2.3. INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD DE LA LECHADA EN LA INYECTABILIDAD	37
2.4. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA VISCOSIDAD	38
2.4.1. Viscosímetros Capilares	38
2.4.2. Viscosímetros de orificio o viscosímetros de copa.	39
2.4.3. Viscosímetros de pistón o de extrusión.	40
2.4.4. Viscosímetros de cuerpo móvil	40
2.4.5. Viscosímetros rotacionales	40
CAPÍTULO III – DESARROLLO EXPERIMENTAL	41
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS LECHADAS	41
3.1.1. Nuevo procedimiento de caracterización del comportamiento viscoso de lechadas.	42
3.1.2. Diseño conceptual	43
3.2. DISEÑO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACION DE LECHADAS	46
3.2.1. Ensayos de puesta a punto del sistema	46
a) Fluidos con distinta viscosidad en canal de 2,5 mm de abertura	47
b) Efecto de la abertura de los canales	49
c) Modificación de la aceleración del movimiento	50
3.2.2. Ensayos en lechadas de cementos y microcementos	50
3.3. PRUEBAS DE INYECTABILIDAD DE LECHADAS EN SUELOS	52
3.3.1. Diseño conceptual	52
3.3.2. Descripción de equipos y materiales	54

3.3.3. Descripción de la campaña experimental	58
3.3.4. Caracterización inicial de los suelos a ensayar	62
CAPITULO IV – ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	67
4.1. INYECCIONES DE CEMENTO EN GRANULOMETRÍA > 2 mm	67
4.1.1. Influencia de la dosificación agua/cemento	67
4.1.2. Influencia de la dirección de inyección	70
4.1.3. Efecto de las inyecciones progresivas	73
4.2. INYECCIONES EN GRANULOMETRÍA 0,5 A 2 mm	74
4.2.1. Influencia de la dosificación de microcemento	78
4.2.2. Permanencia de la mezcla en el suelo (lavado)	79
4.3. INYECCIONES EN GRANULOMETRÍA 0,25-0,50 mm	80
4.4. ENSAYOS DE ARRASTRE Y LAVADO	81
CAPITULO V – NUEVA PROPUESTA METODOLOGICA Y APLICACIÓN A UN CASO REAL: TUNEL DE URDINBIDE	84
5.1. PROPUESTA DE UNA NUEVA METODOLOGIA	84
5.2. EL CASO DEL TUNEL DE URDINBIDE	88
5.2.1. Descripción del túnel	89
5.2.2 Descripción del problema. Efecto de los caudales de infiltración	99
5.3 APLICACIÓN DEL NUEVO METODO AL TUNEL DE URDINBIDE	102
5.3.1. Definición de las secciones trococónicas de inyección.	103
5.3.2. Selección de las lechadas en los trabajos del Túnel de Urdinbide	108
5.3.3. Eficacia de la reinyección y el tratamiento por etapas	110
5.3.4. Solución propuesta para el Túnel de Urdinbide	111
5.3.5. Finalización del tratamiento	118
CAPITULO VI – CONCLUSIONES	120
CAPITULO VII – FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	123
CAPITULO VIII – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En la actualidad existen múltiples infraestructuras subterráneas (túneles ferroviarios y de carretera, excavaciones mineras, etc.) con altos niveles de degradación y corrosión de los elementos de sostenimiento (bulones, cuadros metálicos) y de los hormigones de revestimiento, causados por las infiltraciones de agua lo cual pone en jaque su integridad. Las compañías constructoras gastan millones de euros al año en el mantenimiento de estas infraestructuras a lo largo de su vida útil, para tratar este tipo de problemas. A esto hay que sumar la afección medioambiental, puesto que los aportes de agua suelen estar vinculados a daños en los sistemas acuíferos del entorno. Por tanto, el desarrollo de técnicas que reduzcan las infiltraciones de agua y, en consecuencia, tanto las afecciones a arroyos, acuíferos y embalses circundantes al trabajo subterráneo, como al deterioro los elementos de la propia infraestructura, es un objetivo prioritario para la obra civil y la minería.

Dentro de estas técnicas, las inyecciones en el terreno se postulan como una de las herramientas más potentes, puesto que permiten adaptarse a un amplio rango de escenarios (tipos de obras, de terrenos, caudales de agua) al mismo tiempo que pueden aportar otro tipo de mejoras, más allá de reducir la permeabilidad (mejoras en la resistencia, reducción de la deformabilidad, minimización de la erosión interna, mayor seguridad durante la excavación, etc.).

Es por ello que se ha abordado en la presente investigación la tarea de ahondar en el conocimiento del comportamiento de los materiales inyectados en el interior de los suelos, estableciendo un vínculo directo entre el análisis experimental en laboratorio y la ejecución real de los proyectos de inyección. Esto ha supuesto el reto de diseñar una serie de procedimientos de ensayo a media escala cuyos resultados puedan ser utilizables de forma directa en proyectos reales.

La presente tesis doctoral está estructurada en un total de *Ocho Capítulos* donde se desarrolla el contenido, siendo el último capítulo un anexo final donde se citan las publicaciones y proyectos relacionados con este trabajo.

En el primer capítulo de la tesis, capítulo de introducción, se expondrán en primer lugar los antecedentes y el planteamiento del problema base de la investigación, a continuación, y de forma breve se describirá el mecanismo de trabajo de las inyecciones de impermeabilización y consolidación, definiendo las técnicas

actuales de aplicación de las lechadas, sus parámetros básicos y el control del proceso. Finalmente se definen los objetivos de la investigación, centrados en la caracterización de lechadas en suelos.

En el segundo capítulo se describe el estado actual del arte para la caracterización de las lechadas de cemento a emplear en técnicas de inyección en suelos.

En el tercer capítulo se describe todo el desarrollo experimental de la tesis, definiendo un nuevo procedimiento de caracterización de las lechadas y de la interacción con los suelos, a través de su diseño conceptual y una batería de ensayos de viscosidad y de pruebas de inyectabilidad. Se definen en este capítulo los equipos empleados y se describe la campaña experimental realizada.

En el cuarto capítulo, se desarrolla y analizan los resultados de los ensayos referentes a la inyectabilidad de las lechadas de cemento para tres tipos de granulometría de suelos, analizando los fenómenos de arrastre y lavado.

El quinto capítulo versa sobre un caso práctico real de aplicación de los ensayos, concretamente en la obra del túnel de Urdinbide, ubicado en Amorebieta (Vizcaya), España.

En el sexto capítulo, se expondrán las conclusiones de la investigación realizada en la presente tesis, las aportaciones científicas obtenidas y las innovaciones del proyecto.

Por último, en el séptimo capítulo se expondrán las futuras líneas de investigación abiertas con el desarrollo y redacción de la presente tesis.

Durante el desarrollo de la investigación de la tesis, se han realizados las publicaciones y proyectos siguientes, que se incluyen como anexo final:

- **Publicación en revista ENERGIES de la editorial MDPI:**

Injection Treatment for Tunneling Excavation in Sandy Soils with High Fines Content

Citation: González-García, J.; González-Nicieza, C.; Álvarez- Fernández, M.-I.; Prendes-Gero, M.-B. Energies 2021, 14, 6930. Esta revista tiene un índice JCR de 3.252, lo que la sitúa en el primer cuartil (Q1) en la categoría Engineering (miscellaneous).

- **Proyecto relacionado:**

Proyecto de investigación y desarrollo denominado “impermeabilización primaria de túneles mediante inyecciones” (IMPETU), financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), mediante la concesión de una ayuda económica a la investigación sobre el presupuesto total aceptado por este centro que asciende a 461.370 €. El proyecto de investigación se desarrolló desde el 1 de julio de 2018 al 30 de junio de 2021, lo que supuso un total de 36 meses de investigación.

1.1. ¿QUE ES LA INYECCION DE SUELOS? PRINCIPALES APLICACIONES

Las técnicas de tratamiento del terreno que se utilizan con mayor frecuencia, y su campo de aplicación más adecuado a priori, se recogen de manera resumida en la Tabla 1, extraída de la Guía de Cimentaciones en obras de Carretera del Ministerio de Fomento.

Para analizar la necesidad de aplicar un procedimiento para mejorar el terreno en un caso concreto, es preciso identificar claramente el problema a resolver. Si se trata del apoyo de un terraplén sobre suelos blandos, deben calcularse la estabilidad y los asentos que corresponderían a la situación de construcción sin tratamiento. En ocasiones, las técnicas de mejora del terreno se utilizan para resolver situaciones patológicas.

En tales casos la identificación de la necesidad del tratamiento requerirá la realización de estudios que permitan plantear claramente el problema a resolver, y determinar su evolución teórica en el caso de que no se ejecutara tratamiento alguno.

Todo proceso de inyección presenta dos facetas características (Sanz, 1981):

- Introducción y fluencia en el suelo de la mezcla de inyección. Para que ello sea posible debe adecuarse, de acuerdo con la morfología de los vacíos intergranulares del suelo, de una red de perforación auxiliar y de unas presiones de inyección adecuadas.
- Transformación de la mezcla, que madura según un proceso químico que puede ser desde el fraguado en el caso del cemento, a la transformación solido-gel, en el caso de inyecciones químicas.

TÉCNICA O TRATAMIENTO	TERRENO		MEJORA DE			PROFUNDIDAD EFICAZ DEL TRATAMIENTO
	GRANULAR	COHESIVO	RESIS- TENCIA	DEFORMA- BILIDAD	PERMEA- BILIDAD	
Sustitución del terreno	Cualquier suelo problemático (suelos blandos, arcillas expan- sivas, suelos colapsables)		SI	SI	SI	Moderada (normalmente menos de 3 m)
Compactación con rodillo	Cualquier terreno no saturado		SI	SI	No	Pequeña (normalmente menos de 1 m).
Precargas	SI	SI	SI	SI	No	Hasta varias decenas de metros
Mechas drenantes	No	SI	No	No	SI	Hasta varias decenas de metros
Vibración profunda	SI Vibroflotación	SI Vibrosustitución	SI	SI	No	Normalmente hasta 15 m de profundidad
Compactación dinámica	Cualquier tipo		SI	SI	No	Véase epígrafe 7.2.4
Inyecciones	Impregnación (véase nota al pie)	No aplicable	Algo	Algo	SI	Hasta más de 100 m
	Hidrofracturación: cualquier terreno		Algo	SI	SI	
	Desplazamiento: cualquier terreno		SI	SI	SI	
Jet-grouting	Cualquier tipo		SI	SI	Sólo con columnas secantes	Normalmente menos de 20 m
Columnas de grava	Cualquier tipo de suelo blando		SI	SI	SI	Normalmente menos de 20 m
Columnas de suelo cemento	Cualquier tipo de suelo blando		SI	SI	No	Normalmente menos de 20 m
Claveteado o cosido del terreno	Suelos de consistencia media o superior		SI	SI	No	Normalmente menos de 10 m

NOTA: La permeabilidad inicial del terreno que se requiere para poder impregnarlo, depende del producto inyectado:

Lechadas de cemento: $k_{\text{terreno}} > 10^{-2}$ cm/s
 Lechadas de microcemento: $k_{\text{terreno}} > 10^{-3}$ cm/s
 Geles y otros productos químicos: $k_{\text{terreno}} > 10^{-4}$ cm/s

Tabla 1.- Campo de aplicación de las principales técnicas de mejora del terreno (GCOC Ministerio de Fomento)

Con las inyecciones se pretende introducir en el terreno un material que, bien rellenando vacíos intergranulares, bien desplazando el terreno existente, o bien creando (por mezcla con el original) un nuevo material, consiga una mejora de las características geotécnicas resistentes de la zona tratada. Habitualmente, esta mejora conlleva además una reducción de la deformabilidad y una disminución de la permeabilidad. De hecho, cada vez son más las obras en las que el objetivo primero del tratamiento de inyección es, precisamente, la impermeabilización.

En el proceso de inyección se controla la difusión de materiales bombeables mediante el ajuste de sus propiedades reológicas^(a), fundamentalmente: viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte), coeficientes de esfuerzos normales, viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio), módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (comportamiento viscoelástico lineal), funciones complejas de viscoelasticidad no lineal y de sus parámetros de trabajo (presión, volumen y caudal).

La composición de la mezcla a inyectar determina dichas propiedades reológicas. Estas propiedades, unidas a la presión de inyección, definen su capacidad de penetración del suelo y de desplazamiento del aire y del agua presentes en los vacíos intergranulares, sin diluirse ni deteriorarse.

El análisis de las propiedades reológicas es necesario para poder identificar el tipo correcto de mezcla o lechada a utilizar, ya que es posible emplear aditivos o estabilizantes para lograr que una mezcla tenga las propiedades necesarias para la realización de un tratamiento específico

El perfeccionamiento progresivo de las técnicas de inyección ha provocado también la mejora de las mezclas de lechada. Mezclas a base de bentonita, de silicato de sodio, y soluciones de resina orgánica están hoy disponibles en adición a las tradicionales mezclas cementicias. Se están realizando investigaciones orientadas al perfeccionamiento de la utilización de emulsiones de gases expandibles que, aumentando el propio volumen inicial, pueden rellenar cavidades grandes del suelo incluso en presencia de agua circulante.

En general la selección de la lechada se hace en función de las características granulométricas del material no consolidado o de la distribución de las fisuras o juntas de contacto de la masa de suelo a inyectar. El análisis de esas características permite tener una apreciación del coeficiente de permeabilidad y de la porosidad del terreno lo que contribuye a la selección de los aditivos para mejorar las mezclas básicas.

Las técnicas actuales de impermeabilización reducen las infiltraciones de agua basándose en el empleo del sistema de tubo-manguito que focaliza las inyecciones en puntos muy localizados, sin embargo, los resultados conseguidos no son los óptimos.

(a) Las propiedades reológicas más comunes son la tensión de fluencia, los tiempos de relajación, la viscosidad y la conformidad. Las propiedades reológicas estudian el comportamiento de los fluidos sometidos a carga mecánica. La estructura sólida, al tener una forma definida, cuando es sometida a una carga se deforma y se tensiona. Por el contrario, la estructura líquida, al no tener forma definida, cuando se somete a una carga no se deforma ni se tensiona, sino que cambia la posición de los átomos. A este cambio se le conoce por el nombre de fluencia.

En esta técnica tradicional, la mezcla de lechada de cementos o microcementos se inyecta en el suelo a través de tubos rígidos fabricados en PVC con perforaciones a distancias regulares recubiertas con válvulas de goma (Figura 1, Informes de la Construcción, Vol. 59). Las últimas actúan como válvulas antiretorno ya que impiden que la mezcla regrese dentro del tubo después de atravesarlas para inyectar el terreno. Los tubos-manguito generalmente utilizados en aplicaciones de inyección estándar tienen diámetros entre 1" y 2".

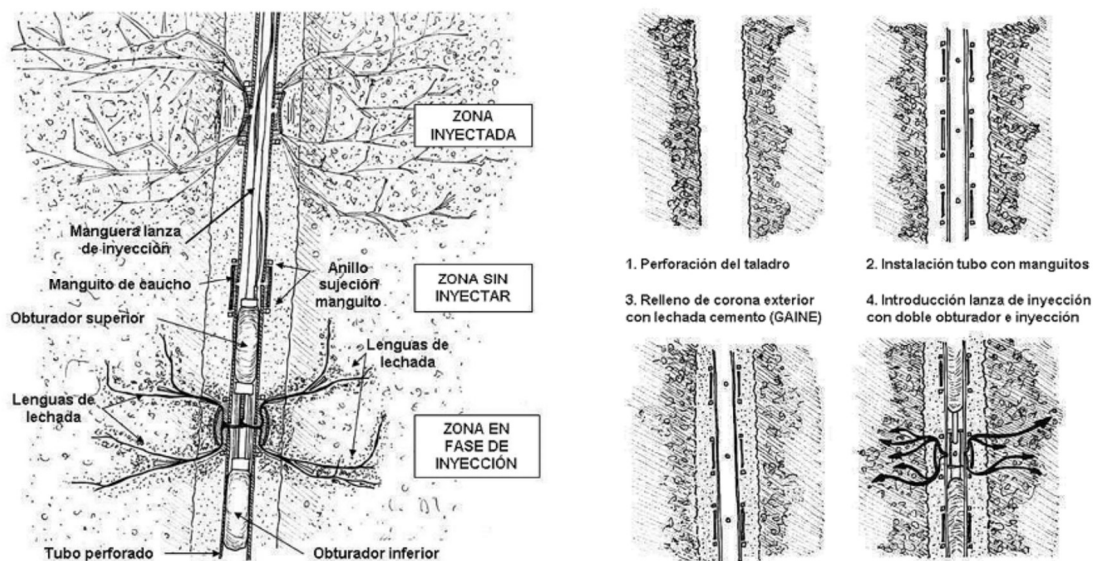


Figura 1. Sistema de ejecución de la inyección en cada manguito

Una vez que el tubo ha sido instalado en el interior de una perforación en el terreno (2), es necesario sellar el espacio entre este y la pared del barreno perforado (3). Esto es necesario para evitar que la mezcla inyectada suba a lo largo del agujero mismo, en lugar de penetrar el terreno y por lo tanto si este sellado no es correcto o tiene fugas el procedimiento mediante tubo-manguito fracasará. Posteriormente mediante el uso de un obturador doble (hidráulico o mecánico) se concentra la salida de lechada en cada una de las válvulas (4), rompiendo en esa zona el sellado anterior y procediendo a la inyección del terreno en el área cercana al obturado.

La nueva técnica de inyección a desarrollar para suelos tendrá aplicaciones muy importantes en las siguientes áreas de trabajo:

Rellenos de huecos y fisuras: Se inyecta la lechada en las fracturas, diaclasas o discontinuidades del terreno; o se rellenan los vacíos intergranulares. En este caso, el producto se introduce básicamente por gravedad hasta colmatar los huecos. Con grandes huecos, conviene introducir en las lechadas áridos o

productos de alto rendimiento volumétrico mientras que con vacíos intergranulares se empearan microcementos con gran difusión y mayor tiempo de fraguado mediante retardantes químicos.

Inyecciones de impregnación: No existe rotura del terreno. Se emplean mezclas muy penetrantes, cuyo objetivo principal es disminuir la permeabilidad del terreno rellenando poros y fisuras. Se sustituye el agua o el gas intersticial con una lechada inyectada a baja presión para no producir desplazamientos de terreno.

Inyecciones de compactación o de desplazamiento: Se introducen morteros de alta fricción interna que comprimen el terreno flojo y lo desplaza lateralmente de forma controlada, sin que el material inyectado se mezcle con él.

Inyecciones de fracturación hidráulica o por tubos-manguito: Se fractura el terreno mediante la inyección de la lechada a una presión que supere su resistencia a tracción y su presión de confinamiento. La lechada no penetra en los poros, sino que se introduce en las fisuras creadas por la presión utilizada, formándose lentejones que recomprimen el terreno. Esta técnica también se llama hidrofracturación, hidrofisuración, “hidrojacking” o “claquage”. Son útiles en inyecciones de consolidación, de compensación de asientos e inyecciones armadas.

Inyección de alta presión: Se excava y mezcla el terreno con un chorro de lechada a alta velocidad (jet-grouting).

1.2. METODOLOGIA. LAS TRES FASES DE DEL PROCESO DE INYECCION

Todo proyecto de inyección, ha de comprender fundamentalmente **tres fases: Caracterización, Definición de Parámetros Técnicos y Control del Proceso.**

1.2.1. Fase 1: Caracterización.

Durante la fase de excavación de las obras subterráneas se encuentran terrenos con diferentes problemas geotécnicos que pueden amenazar el proceso constructivo afectando a los sostenimientos empleados en la ejecución de los trabajos de excavación y a las infraestructuras cercanas (colapsos, infiltraciones de agua, expansión de terrenos, deformaciones, gradientes geotérmicos, presencia de gases nocivos, aparición de tensiones geotécnicas o presencia de fallas activas).

En ciertas obras subterráneas para resolver estos problemas geotécnicos, se aplican cambios en el sistema de excavación, en tanto que en otras se complementa y a veces se modifica el método de sostenimiento. Pero en ocasiones, y en especial cuando el problema está asociado a la presencia de agua, ya sea por el

caudal, por la presión, o por el daño que causa, la alternativa que se escoge tiene como base un trabajo exhaustivo de aplicación de inyecciones.

En muchos casos reales de ejecución, el proyecto no contempla un estudio independiente de las inyecciones, por lo que se debe hacer un diagnóstico de la problemática de la obra o del proyecto en su fase inicial, durante la ejecución de la excavación para definir, entre las varias alternativas, la más práctica y económica que se pueda aplicar rápidamente para seguir con la construcción.

En la Tabla 2 pueden apreciarse la amplitud y la buena capacidad de acción de las lechadas en terrenos granulares y cohesivos en función de los agentes de inyección.

■ ¿Qué agentes de inyección son adecuados para qué tipo de subsuelo?
Which injection agents are suitable for which type of subsoil?

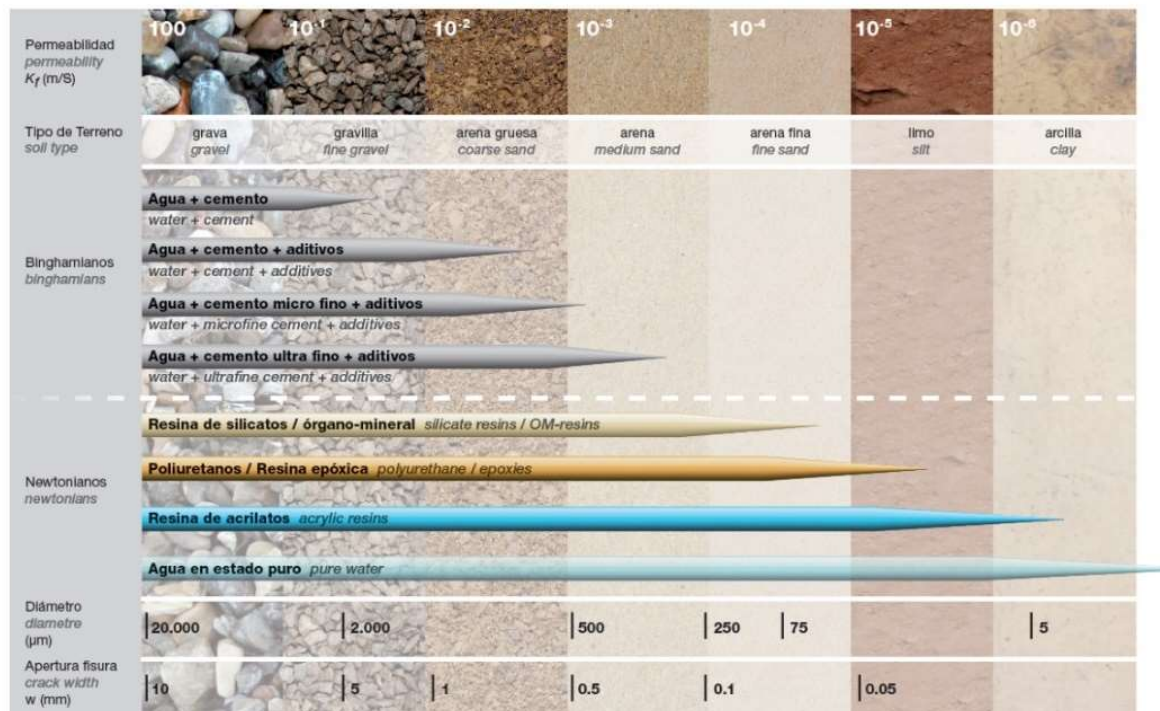


Tabla 2.- Agentes de inyección según tipo de subsuelo (Geo-inyección Estabilizadora con Polímeros TPH)

Las incógnitas que presenta el medio geotécnico, ampliadas con las diferentes variables de los sistemas de inyección, hacen necesario planear detalladamente los trabajos estableciendo fases de trabajo o etapas, para lo cual se debe tener claro el objetivo del procedimiento que se va a aplicar. En casos específicos y una vez identificado el problema, se puede establecer si las inyecciones que se van a hacer serán para mejorar las condiciones de resistencia de los terrenos o para modificar su conductividad hidráulica. Se define un sistema de inyecciones de consolidación para el primero de los casos y un sistema de inyecciones de impermeabilización para el segundo.

En trabajos con presencia de problemas geotécnicos, en ocasiones, es necesario aplicar métodos combinados, y se hacen trabajos simultáneos de consolidación y de impermeabilización para superar un mismo problema.

Para el diseño de los tratamientos con inyecciones de consolidación o de impermeabilización se estudian y definen los parámetros del sistema suelo-lechada, para lo cual se debe tener conocimiento directo o indirecto de:

- a) Las características del terreno o suelo a tratar.
- b) Los materiales empleados en la inyección (cementos, microcementos, aditivos, estabilizantes).
- c) Las dosificaciones y relaciones A/C que se van a emplear para inyectar en la ejecución de los trabajos realizando un análisis de las mismas, mediante técnicas de ensayo de inyección a pequeña escala en laboratorio.

a) El terreno

Las inyecciones pueden utilizarse para el tratamiento de diversos tipos de terreno. La composición química, granulométrica y mineralógica del terreno, determina su permeabilidad y cohesión (granulometría, presencia de huecos vacíos y fracturas, etc.). Por lo tanto, terrenos arenosos y altamente permeables requerirán de una mezcla de lechada de cemento diferente respecto a la que deberá ser utilizada en el caso de terrenos formados de arena fina y limosa, con baja permeabilidad.

El coeficiente de permeabilidad del terreno, del que depende la facilidad de difusión de la mezcla, está determinado por la existencia, la dimensión y la geometría de los vacíos intergranulares. Por esta razón, la selección de la mezcla a inyectar y el diseño del esquema de inyección deben ser precedidos necesariamente de un análisis de la permeabilidad del terreno.

La permeabilidad del terreno se define como la capacidad de un cuerpo (en términos particulares, un suelo) para permitir en su seno el paso de un fluido (en términos particulares, la lechada) sin que dicho tránsito altere la estructura interna del suelo. Dicha propiedad se determina objetivamente mediante la imposición de un gradiente hidráulico en una sección del suelo, y a lo largo de una trayectoria determinada. El término permeabilidad puede recibir también las acepciones de *conductividad o transmisividad hidráulica*.

La permeabilidad se cuantifica en base al coeficiente de permeabilidad, definido como la velocidad de traslación del agua en el seno del terreno y para un gradiente unitario. El coeficiente de permeabilidad puede ser expresado según la siguiente ecuación:

$$k = Q / I A$$

Donde;

- k: coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica [m/s]
- Q: caudal [m³/s]
- I: gradiente [m/m]
- A: sección [m²]

b) Los materiales empleados

La capacidad de la mezcla o lechada de penetrar el terreno y de llenar los vacíos existentes en la zona a tratar, dependen de las características del terreno mencionadas en el apartado anterior y de la composición de la misma mezcla inyectada. La elección del tipo de mezcla a usar debe tener en consideración el objetivo del tratamiento.

Además, si fuese necesario, pueden ser inyectados en el suelo componentes químicos diversos (como silicatos) de forma simultánea a través de varios canales de inyección combinando el uso de dos o más equipos de bombeo.

c) Las dosificaciones

De forma general, las mezclas que se usan en los trabajos de inyección se pueden clasificar en dos categorías:

-Líquidos verdaderos. Fluidos del tipo newtoniano; son aquellos que se deslizan bajo la influencia de un esfuerzo cortante muy bajo, y cuya tasa de deformación es proporcional a ese esfuerzo cortante. Son conocidos como fluidos normales y en la aplicación de las inyecciones su penetrabilidad depende de la viscosidad.

-Suspensiones. Fluidos de Bingham o plásticos, del tipo no-newtoniano; son aquellos que se deforman permanentemente bajo un esfuerzo mínimo llamado de fluencia. Son conocidos como fluidos atípicos; en la aplicación de las inyecciones tienen tixotropía y comportamiento reológico,

y trabajan bajo leyes de flujo complejas. Las suspensiones más comunes son las lechadas simples a base de cemento, microcemento y las que tienen bentonita con algunas adiciones inertes como la arena fina. Su penetrabilidad depende de la finura de las partículas que la constituyen y su comportamiento está controlado por la exudación de las mezclas.

En definitiva, en esta investigación y en los proyectos de trabajo en campo, se deben caracterizar tanto cementos como microcementos (la aplicación de resinas quedaría fuera del objeto de la presente tesis, dado su elevado coste sobre los 1.200 €/tonelada frente a los 80 €/tonelada de los cementos o de los más de 600 €/tonelada de los microcementos) en función tanto de la composición y geometría del suelo, así como de la propia composición de la lechada. Se pretende lograr, por tanto, un número determinado de composiciones de lechada que nos permita una aplicación combinada de cemento y microcementos que resulte competitiva técnica y económicamente, dado que la aplicación de todo el tratamiento del suelo con microcementos en cada proyecto es excesivamente costosa y toda la aplicación únicamente con cementos no es suficientemente efectiva.

1.2.2. Fase 2: Definición de parámetros técnicos

Existe un amplio debate sobre los parámetros de diseño en el proceso de inyección de lechadas de cementos y microcementos. Esto se debe fundamentalmente a la tendencia de cada empresa a desarrollar experimentalmente sus procedimientos, centrándose en su ámbito geográfico de actuación, y a la escasa documentación completa sobre ellos. Así se pueden encontrar técnicas de inyección en las que se definen poco o nada las características de los suelos sobre los que se emplean. Hay autores que señalan estas técnicas como una solución a cualquier situación, mientras que otros delimitan excesivamente su campo de actuación.

Como referencias de inicio en este capítulo se señala a *Covil y Skinner (1996)*, que empezaron a poner algo de orden intentando extraer unas recomendaciones del estado del arte de aquel momento, que ellos mismos redactaron. Avanzaron un poco más *Croce y Flora (2000)*, marcando tres puntos de aproximación para el análisis del sistema de fluido simple: el fenómeno físico, las variables que influyen en el resultado final y los suelos adecuados para practicar estas técnicas basándose en varios casos de estudio prácticos en obras.

El proceso de inyección

Entre los parámetros que caracterizan la inyección de lechada se pueden distinguir, por una parte, los referentes a las máquinas empleadas, el equipo de perforación y el equipo de inyección (con sus características mecánicas: longitud de varillaje, características de las toberas; propiedades operativas: presión de impulsión, velocidad de salida de chorro, velocidad de retirada y de giro del varillaje), y por otra, las características de la lechada en sí (propiedades del cemento, relaciones agua/cemento, y la uniformidad de la mezcla).

Poco se puede decir de la primera mezcla de lechada preparada en cada trabajo de inyección, más que la importancia de que esta mezcla sea uniforme y tenga unas características físicas relacionadas con su densidad y con la granulometría del cemento, adecuadas para que no aparezcan problemas al inyectar a altas velocidades por los finos orificios de las toberas de inyección. Es importante conocer la relación entre la presión de impulsión y la velocidad de inyección, ya que las pérdidas de carga pueden ser importantes y varían de un equipo de inyección a otro.

Un paso más es establecer correlaciones entre los registros de perforación (velocidad de avance, presiones de barrido, presión de percusión), el tipo de inyección, la relación agua/cemento, la densidad de la lechada, la presión de inyección, el caudal y el volumen inyectado. Igualmente, resulta crucial correlacionar los parámetros del procedimiento de inyección con las características geotécnicas del suelo analizado. Entre otros muchos parámetros que influyen en el resultado final se deben incluir aspectos como la velocidad de retirada y rotación del varillaje de perforación de los taladros perforados para la inyección y el arrastre de finos durante la perforación (generación negativa de huecos y cavidades).

Dado que los ciclos de trabajo en una obra están afectados por paralizaciones para descansar los trabajadores, cambios de turnos, existencia días festivos y averías en los equipos, es habitual en todos los proyectos realizar los trabajos de inyección por **etapas de tratamientos**. El tratamiento completo de inyección de un proyecto se realizará mediante varias etapas con un número de taladros determinados a inyectar de forma consecutiva. Los taladros de las siguientes etapas serán perforados y tratados con inyección en etapas sucesivas una vez finalizado el fraguado de cada etapa anterior.

Respecto a la técnica de inyección, los principales parámetros a considerar son;

Volumen de la inyección por etapa. Este depende de la relación volumétrica. Se refiere al volumen de la mezcla por etapa de tratamiento (cada uno de los intervalos temporales de inyección en los que se puede dividir los trabajos de varios taladros de perforación) o a la relación entre el volumen de mezcla a inyectar y el volumen del terreno a tratar, definidos por la porosidad y la relación de vacíos del terreno. Varía también con la geometría del tratamiento en función del espaciamiento entre las perforaciones y la longitud de cada etapa de inyección.

Presión de inyección. La presión de inyección se determina para una presión de máxima (que estará relacionada con la ruptura hidráulica del terreno) o hasta alcanzar una cantidad de mezcla tal que permita el objetivo de consolidación por compactación hidráulica progresiva del terreno, o el de la impermeabilización máxima y más económica posible del mismo. No se debe dejar de lado la complicada relación que hay entre la presión y el flujo semiviscoso de una mezcla de inyección.

Caudal de inyección. El caudal de inyección es un parámetro fundamental, y muchos fabricantes de equipos de inyección recomiendan que esté entre 0,2 m³/h y 0,4 m³/h. Los caudales pueden estar en valores intermedios que dependen del tiempo de fraguado de las mezclas inyectadas y del terreno a tratar.

Tiempo de inyección. Es un parámetro ignorado a menudo en la literatura técnica, y se define por la relación entre el volumen de inyección y el caudal promedio. Permite verificar la duración de inyección de una etapa y por tanto debe ser compatible con el tiempo de fraguado de la mezcla.

Interacción suelo-lechada

Tras analizar varios casos reales bien documentados, y de ensayos en diversos tipos de suelo, se pueden adelantar las siguientes consideraciones:

- La técnica de inyección de lechada es muy efectiva en suelos granulares gruesos, mientras que en suelos de grano fino puede resultar menos eficiente.
- El establecimiento de las correlaciones entre los diferentes parámetros resulta completamente necesario para generalizar y definir la técnica de inyección.

No obstante, como en toda técnica de suelos, por encima de la teoría, está la ejecución en el suelo real. En este caso, se debe tener en cuenta, para el éxito final, ya sea por resistencia, o sea por permeabilidad, lo siguiente:

- La existencia de zonas de granulometrías discontinuas, que almacenen menor contenido de inyección por alta permeabilidad del terreno.

- El efecto sombra generado por algún obstáculo, en el circuito interior de la inyección.

El análisis de la interacción suelo-lechada permitirá diseñar un sistema de refuerzo, basado en los parámetros de perforación óptimos, como son el diámetro, el espaciamiento y la longitud, así, como la resistencia de la lechada.

Y por supuesto, en la medida de lo posible, hay que realizar un control de geometría de perforación final, lo cual, es un problema complejo que tiene grandes implicaciones en el resultado final de la inyección.

1.2.3. Fase 3: Control del proceso

Todo el proceso de inyección de cada taladro, deberá ser monitorizado para conocer en tiempo real presiones, caudales y volúmenes inyectados en cada taladro. Los equipos de monitorización se situarán lo más cerca de la boca del taladro que sea posible, normalmente a la salida de las mangueras de inyección, para registrar valores lo más precisos y aproximados a la realidad de la inyección en el interior del barreno.

1.2.3.1. Presión de Bombeo

La máxima presión de inyección permitida para un determinado conjunto de condiciones, con frecuencia causa discusiones que surgen a partir de dos diferentes formas de analizar el tema:

1. El enfoque de baja presión, donde la atención se centra en no crear daños en la estructura del terreno circundante en un túnel o en cualquier parte del entorno del proyecto. En este enfoque el rango de presiones de inyección se establece entre los 10 y los 30 bar.

2. El enfoque de alta presión, donde la atención se centra en conseguir una inyección de manera eficiente tanto en el tiempo como en la economía y en la calidad del resultado. En este segundo enfoque los rangos de presiones de inyección están desde los 30 a más de 60 bar.

Puede ser visto como un poco injusto presentar los dos puntos de vista de este modo, como si los partidarios de primera aproximación no tuvieran ningún interés en la eficiencia y el resultado, pero, por otro lado, el segundo enfoque también se puede utilizar sin causar “daño”.

La primera vez que se emplearon inyecciones con base química en obra fue en el año 1967, en Milán para la estabilización del suelo aluvional incoherente de la ciudad italiana, antes de iniciarse la construcción subterránea de la Línea II del Metropolitano. En ese momento, el enfoque de baja presión era totalmente dominante. Durante los años transcurridos desde entonces, a través de muchos proyectos, ha habido un cambio gradual al enfoque de alta presión ya que este desarrollo gradualmente mejorado ha producido mejoras de forma sustancial en los resultados de inyección, sin causar ningún daño a los proyectos ejecutados.

1.2.3.2. Consideraciones básicas

Si no hay problemas de estabilidad y no hay problemas de entrada de agua nadie pensaría en ejecutar un tratamiento previo de inyección a la excavación de la obra subterránea. Sabemos, que si es posible bombear el agua a alta presión, de forma que se inducen fracturas hidráulicas (creación de grietas o fisuras) pueden realizarse inyecciones de consolidación. Esto podría ser clasificado como un daño ya que la calidad del terreno se reduciría durante el tratamiento.

La inyección de la lechada se ejecuta para controlar el flujo de agua subterránea y / o para mejorar la estabilidad del suelo, antes de excavar en él. Ambos problemas potenciales existen a causa de grietas, juntas, vías preferentes, materiales de baja fricción de la junta, arcillas, zonas de material cizallado, etc. y a veces terreno con altas columnas hidrostáticas (> 20 bar).

Debería ser muy fácil llegar a un acuerdo de que el propósito de una inyección, en tales casos, sólo puede cumplirse si la lechada se puede inyectar en las aberturas y discontinuidades por el uso de presión de bombeo. Como referencia de trabajo y de diseño de proyectos hay que tener en cuenta que la presión máxima especificada para el bombeo de la lechada debe ser un valor neto sin decimales, fundamentalmente porque la precisión de los equipos de inyección no es alta en los valores decimales de los presostatos.

1.2.3.3. Inyección de baja presión

En el enfoque de baja presión se trabaja habitualmente con el empleo de un cemento o microcemento en una relación agua /cemento (A/C) alta (> 3). Esto requiere de una lechada estable, que tenga elevados tiempos de fraguado, para contrarrestar los efectos negativos de una lechada inestable que endurece antes

de alcanzar las zonas de tratamiento del suelo al realizarse dicha inyección a baja presión (menores caudales y por tanto menor velocidad de fluencia). Para resumir los efectos de esta lechada cabe señalar lo siguiente:

- La propia perforación ejecutada para inyectar las lechadas de cemento tiene una admisión muy baja o prácticamente nula de lechada, a pesar de que, durante la fase de perforación puedan apreciarse fugas y cierta admisión de agua por parte del suelo. Dependiendo de las condiciones geológicas, inicialmente no suele darse admisión de lechada hasta alcanzar valores más altos de presión de inyección, mientras que durante el intervalo de tiempo que se está alcanzando la presión máxima, la admisión crece. El resultado de trabajar con presión de inyección de lechada máxima muy baja sería que muchos barrenos serían desaprovechados, en el sentido de que no podrían contribuir a los resultados específicos del tratamiento al no permitir que la lechada inyectará a través de ellos el suelo circundante.
- Los barrenos que admiten lechada, terminan con valores de admisión altos ya que el sistema continúa bombeando hasta que se alcanza la presión máxima (valores en el entorno de los 10 bar). Esta máxima presión baja no sería muy eficiente para extraer el exceso de agua de la propia lechada.
- La fuerza de elevación en el suelo que ejerce la lechada de cemento es el resultado del área bajo la presión y de los tiempos promedio durante los que se ejerce la presión. Con una baja viscosidad de una lechada con relación A/C alta, la pérdida de presión de la bomba al frente de inyección es relativamente baja, especialmente en el final del procedimiento, en el que la máxima presión se debe mantener habitualmente de 5 a 10 minutos a muy baja o nula velocidad de flujo de inyección. Sin límite de volumen de lechada de cemento, la zona a la que afectaría la acumulación de lechada podría ser muy grande llegando incluso a provocar surgencias en superficie o en zonas cercanas como arroyos, ríos o embalses.

1.2.3.4. Inyección de alta presión

Por lo general, el método de alta presión es ejecutado con lechadas menos estables y sin fugas, además las inyecciones ejecutadas se detienen, ya sea por presión máxima especificada o un volumen máximo (lo que se alcance primero), al igual que sucede con las inyecciones a baja presión, pero alcanzando mucho antes en el tiempo dichos valores al trabajar en unos rangos de presión más altos. Los siguientes efectos de esta metodología, deben tenerse en cuenta:

- Los barrenos empezarán admitiendo lechada con valores de presión de inyección en el entorno de 30 - 60 bar. En función de las condiciones del suelo, la porosidad y/o zonas aglutinadas del suelo, existentes alrededor del barreno, afectarán a la presión de inyección provocando variaciones, dejando que la lechada pueda empezar a fluir. Por lo general, la presión rápidamente subirá a más de 50 bar y de repente caerá a un nivel menor (se producen zonas de admisión de lechada de forma inmediata que provocan flujo rápido y provocan bajada de presión).
- Si se utiliza una lechada de cemento estable, la resistencia a la compresión de la lechada de cemento fraguada tendrá entre 5 y 10 MPa, la lechada no tendrá fugas y la porosidad rellenada en el suelo mostrará parámetros de resistencia mejorados y menor permeabilidad en comparación con la situación del suelo inicial tratado.
- Si la lechada admitida en un barreno alcanza alta presión (por ejemplo: 40 bar) y sigue en aumento durante el bombeo (sin repentina caída de presión), entonces todo el material de bombeo en este barreno puede pasar a alta presión y al final alcanzar el valor máximo de presión especificado por protocolo para evitar ruptura hidráulica del suelo. Por lo general, la presión máxima llegará mucho antes que el volumen máximo de admisión de lechada definido por barreno.
- Si se da la circunstancia de que tanto, el volumen máximo especificado en la cantidad de lechada por barreno como la presión máxima permitida se alcanzan más o menos al mismo tiempo, esto representa la carga máxima teórica de fuerza de empuje hidráulico. En principio, la presión máxima permitida debe ser la presión necesaria para colocar el volumen de lechada exigible por diseño de protocolo de trabajo.

1.2.3.5. Teoría detrás de la inyección a alta presión

Nick Barton presentó un estudio titulado *The theory behind high pressure grouting*, publicado en la revista T&T International, en septiembre y octubre de 2004, el cual, aunque está centrado en macizos rocosos, recoge importantes puntos de base para el análisis en suelos. El documento aclara sobre una base teórica, las razones por las que las altas presiones en las inyecciones (de 50 a 100 bar) no causan ruptura hidráulica del terreno y por eso también mejora sustancialmente los resultados de la inyección.

Es habitual el uso de la prueba de admisión de lechada mediante inyección de agua a presión (WPT) para calcular la cantidad de agua que admite el suelo antes de la inyección (capacidad de permeabilidad) en el entorno de 10 bar. Esta prueba tendrá un efecto insignificante en el conjunto de las aberturas existentes.

Esta es una razón por la cual estas pruebas de inyección de agua normalmente no muestran una correlación con la inyección de lechada realmente admitida por el suelo.

- La apertura física E de las juntas es mayor que la apertura hidráulica teórica. Esto es fácil de entender cuando se considera que las juntas naturales (E) tienen rugosidad y los contactos entre capas de suelo a través del plano transportan el mismo flujo de agua que en zonas completamente separadas a una distancia.
- Las aberturas físicas del suelo pueden abrirse entre 10 y 50 μm en las zonas límites de la perforación del barreno, cuando se emplea valores de 50 a 100 bar de presión de inyección. Esto podría representar un aumento de E en un 20 a 100 %.
- Un efecto secundario muy positivo de inyección a alta presión es que la estabilidad o calidad promedio del suelo, es considerablemente mejorado, y esto influirá en el coste y tiempo de construcción de la obra subterránea de un modo muy positivo.

Si hay limitantes de proyecto que condicionan como tener especial cuidado con la presión de inyección debido a las estructuras cercanas y la baja cobertera del túnel (menos de 20 metros) o cualquier circunstancia especial, se establecerán condiciones de trabajo que limitarán la presión de trabajo y el volumen máximo de inyección por taladro.

Un caudal máximo habitual de inyección suele ser de 15 l/min (este valor estará delimitado por el fabricante del equipo de inyección empleado, que tendrá unas características limitantes de diseño de fábrica condicionadas por las dimensiones del equipo y los volúmenes de inyección del proyecto) y la inyección se realizará a través de los obturadores (útiles que evitan el retorno de la lechada por el taladro perforado) ya instalados, haciendo uso de las llaves de válvula de esfera de $\frac{3}{4}$ " que permitan el cierre de la entrada de inyección de lechada una vez finalizada la inyección.

Este tipo de tratamientos a realizar con inyecciones, desde el interior de un túnel u obra subterránea y antes de cada tramo de excavación, tiene el doble objetivo de mejorar, en una corona alrededor de la sección de excavación del túnel y a lo largo de la parte restante por excavar, consiguiendo:

- La impermeabilidad del terreno atravesado para permitir la construcción del túnel y sobre todo, para que durante esta última y toda su vida en servicio, sea funcional el drenaje que actúa sobre los aportes de agua procedentes de acuíferos, arroyos, ríos o embalses cercanos que es necesario

preservar ya que estas entradas de agua dejan en el drenaje grandes cantidades de sedimentos en forma de silicatos que terminan por obturar el drenaje e inutilizándolo.

- Mejorar las propiedades geomecánicas (resistencia a corte y deformabilidad) del suelo o de la alternancia de suelos, de modo que se obtenga para un espesor de capa tratado mínimo, una alta cuantía de mejora.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

Por cuanto antecede y ante el problema científico planteado se formula para el presente trabajo de investigación el siguiente objetivo general:

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es establecer un sistema de inyección de lechadas para aplicaciones de impermeabilización subterránea en suelos como alternativa al tradicional sistema de tubo-manguito.

Este sistema debe resolver los problemas relacionados con la aplicación puntual del tratamiento debido al procedimiento tubo-manguito, disminuyendo el consumo de materiales desechables y reduciendo la huella de carbono en su aplicación.

Este objetivo principal, pasa por obtener los siguientes objetivos parciales:

- **Objetivo 1:** Mejorar la caracterización de las lechadas en función de los parámetros que influyen en la inyectabilidad (aptitud de una lechada de inyección para penetrar en un conducto o en la porosidad accesible del suelo, cuya clase viene dada por la apertura mínima en mm, en la que el producto es inyectable).
- **Objetivo 2:** Desarrollar un procedimiento experimental que permita evaluar la interacción entre la lechada y el suelo para reducir el número de mezclas ensayadas in situ al inicio de los proyectos de ejecución en las obras.
- **Objetivo 3:** Aprovechar el desarrollo del anterior objetivo para determinar los parámetros clave de la inyección (presión, penetrabilidad, caudal, número de reinyecciones) para obtener un determinado **RATIO de REDUCCION (RDP) de la permeabilidad del suelo post tratamiento.**

- **Objetivo 4:** Definir una técnica de inyección que sustituya el sistema de tubo-manguito más eficaz y económica en la impermeabilización de las obras subterráneas en terrenos tipo suelos, apoyándonos en los objetivos anteriores.

CAPÍTULO II – ESTADO DEL ARTE

Para conseguir la estanqueidad necesaria en las infraestructuras del subsuelo, es esencial obtener una extensión suficiente en las operaciones de inyección. Las lechadas a base de cemento son los materiales más utilizados en la industria de la impermeabilización debido a varias ventajas, especialmente desde el punto de vista económico y medioambiental. Sin embargo, las propiedades de penetrabilidad de la lechada influyen significativamente en la extensión correspondiente. Por ello, en esta tesis se ha partido de analizar:

- Las metodologías existentes desarrolladas para medir la penetrabilidad de la lechada.
- Mejorar la inyección de la lechada de forma efectiva utilizando impulsos de presión dinámicos.

A lo largo de los años se han desarrollado varios equipos de prueba y métodos de evaluación para determinar la penetrabilidad y la tendencia a la filtración de las lechadas de cemento, tanto en el laboratorio como en las propias obras. Sin embargo, la diversidad y el desacuerdo sobre los resultados obtenidos indican que esos métodos podrían no reproducir satisfactoriamente la filtración en una excavación real subterránea como ocurre en las operaciones de inyección en roca dura fracturada (Draganović y Stille 2014). Esto probablemente se deba a la deficiencia inherente a su diseño, que se basa en suposiciones, limitaciones y condiciones de pruebas diversas y a veces poco realistas (Nejad Ghafar, Ali, 2018).

Además, para determinar la penetrabilidad de la lechada en suelos, aún no se ha establecido ningún estándar realista. Cada uno de los métodos existentes está asociado a ciertas ventajas e inconvenientes, que hacen que los resultados obtenidos sean difíciles de relacionar con la inyección en suelos. Esto sugiere la necesidad de una mejor metodología de ensayo para evaluar la penetrabilidad de la lechada en suelos que reproduzca la filtración en una constricción de fractura de forma más realista.

La comparación de los resultados de las metodologías existentes, desarrolladas para medir la penetrabilidad de la lechada, revela que uno de los factores que gobiernan la filtración y, en consecuencia, la propagación de la lechada a la presión aplicada. Un aumento suficiente de la presión aplicada disminuye la tendencia a la filtración y mejora la propagación de la lechada al aumentar el potencial de erosión de las zonas de filtración inestables, Eriksson et al. (1999); Hjertström (2001); Draganović y Stille (2011, 2014); Stille et Al. (2012). Nobuto et Al. (2008) demostraron que un incremento de presión escalonado disminuye el potencial de obstrucción de las partículas de cemento a la entrada de una junta. Pusch et al. (1985) fueron

probablemente los primeros en demostrar la influencia de la presión oscilante de alta frecuencia en la mejora de la propagación de la lechada. Borgesson y Jansson (1990) examinaron además una presión oscilante de alta frecuencia y gran amplitud superpuesta a una presión subyacente de 20 bar e ilustraron que incluso una lechada de cemento con bajo contenido de agua puede penetrar bien a través de fracturas artificiales de 100 μm . Estos últimos describieron el correspondiente mecanismo de acción, como una reducción de la viscosidad de la lechada debido a la oscilación de alta frecuencia aplicada, por lo que la estructura interna de la lechada se alteraba y reorganizaba para proporcionar una suspensión de menor viscosidad. Wakita et al. (2003) también investigaron el mismo método utilizando amplitudes de oscilación de hasta 5 bar superpuestas a una presión subyacente de 10 bar y, de forma similar a las investigaciones anteriores, obtuvieron un aumento del caudal y del volumen total de la lechada tomada. Mohammed et al. (2015) profundizaron en el método y volvieron a reconocerlo como una solución potencial para mejorar la extensión de la lechada. Sin embargo, a pesar de estos prometedores resultados, el método aún no se ha generalizado debido a la limitada eficiencia y a la rápida disipación de la oscilación de alta frecuencia a lo largo de una fractura.

Por otra parte, la difusión y progresión innecesaria de la lechada más allá de la longitud de penetración requerida en las áreas de influencia de la obra subterránea, es antieconómica y, en algunos casos, también ha ido acompañada de graves problemas medioambientales. La teoría predice la extensión de la lechada a lo largo del tiempo utilizando las propiedades reológicas de la lechada y la presión aplicada (Gustafson y Stille 1996, 2005; Kobayashi et al. 2008; Axelsson et al. 2009; Tsuji et al. 2012; Stille et al. 2012; Gustafson et al. 2013; Stille 2015). Esta teoría se ha desarrollado sobre la base de varios supuestos fundamentales, de los cuales la apertura uniforme de la fractura es probablemente el más significativo. En consecuencia, todos los ensayos de laboratorio, se han realizado en tubos (Håkansson 1993) o en placas paralelas con aperturas constantes (Gustafson et al. 2013). Esto significa que la teoría aún no ha sido suficientemente investigada en el laboratorio con la presencia de alteraciones o canales preferentes similares a los existentes en un suelo.

2.1. CARACTERIZACION DE LECHADAS

Los conceptos más importantes a analizar en las lechadas de cementos para su caracterización son, su inyectabilidad y los materiales que se utilizan para conformarlas:

1. *Lechadas de cemento.* Se puede usar cualquier tipo de cemento para fines de inyección. El Cemento Portland ordinario es el más empleado (habitualmente el CEM 52,5), pero este tipo de cemento tiene un tamaño de partícula relativamente grande (unas 40 μm) y por tanto solo puede emplearse para rellenar juntas de apertura apreciable o suelos muy porosos. Su tiempo de fraguado (tiempo de apertura) es de unas 6 horas. Para la inyección de juntas más finas o suelos de grano más fino, se utilizan las lechadas de microcemento, que poseen un tamaño de partícula más pequeño (incluso en torno a 9 μm) y, por tanto, proporcionan una penetración más profunda, así como una estanqueidad, estabilidad y durabilidad más eficaz. En este caso, el tiempo de fraguado se reduce aproximadamente a 2 horas. En la Figura 2, se compara el tamaño de las partículas de estas lechadas con el de una junta fina, con una apertura eficaz de 20 μm .
2. *Lechada mineral.* Se emplea una solución de partículas nanométricas de sílice coloidal, lo que permite la penetración en grietas de menor entidad. Se utilizan en los contactos entre roca y suelos más finos, y en zonas donde sea necesario un aislamiento duradero.
3. *Poliuretano y Poliurea.* Los sistemas de poliuretano de un solo componente utilizan la humedad como agente de curado. Los sistemas de poliuretano de dos componentes utilizan sistemas de curado controlados. Los sistemas combinados de poliurea-silicatos son sistemas de dos componentes, que tienen un curado muy rápido y se emplean para la estabilización de rocas y suelos muy fracturados, para la reparación de estructuras submarinas y para el relleno de cavidades.
4. *Resinas acrílicas.* Son sistemas de hidrogel que se usan para reparaciones de hormigón, sellado de vías de infiltración de agua en el revestimiento y estabilización de suelos débiles.

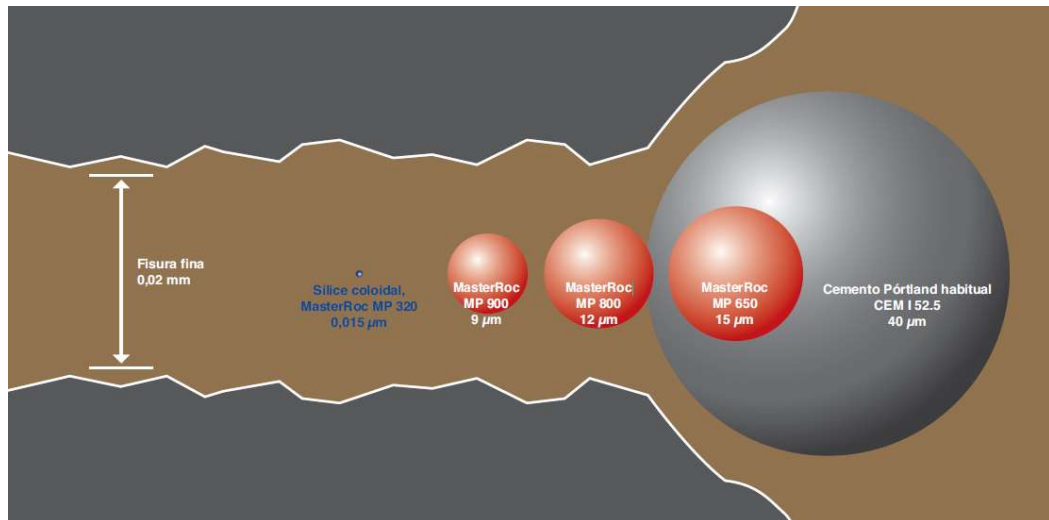


Figura 2.- Diferencias en valores D95 de los microcementos comparados con el cemento Portland convencional. (<https://www.master-builders-solutions.basf.es>)

Se define la inyectabilidad, como la capacidad de la mezcla para penetrar en el terreno y depende de tres grupos de condicionantes:

- Terreno: En concreto, su permeabilidad. Está ligada, por tanto, con el tamaño medio de las partículas del suelo y con su porosidad o, en el caso de un macizo rocoso, con la apertura de las fracturas, su rugosidad y la presencia de relleno.
- Fluido: Las principales características de la mezcla serán el tamaño de las partículas (véase la Figura 3), su estabilidad (que la segregación sea mínima) y su viscosidad.
- Procedimiento: Durante la inyección se controlan diversos parámetros como la presión (valor máximo y método de aplicación), el caudal y el tiempo de aplicación del tratamiento que influyen en la mayor o menor penetrabilidad de los productos a inyectar.

En el caso de suelos, se define el índice de inyectabilidad N como:

$$N = \frac{D_{15}(\text{suelo})}{D_{95}(\text{lechada})}$$

Donde D_{95} representa el tamaño de malla por el que pasa el 95 % del material de la lechada de inyección y D_{15} representa el tamaño de malla por el que pasa el 15% de las partículas del suelo. Para que la penetración de la lechada sea satisfactoria esta relación debe ser superior a 25; entre 25 y 11 podrá ser posible, y cuando es menor de 5 es inviable.

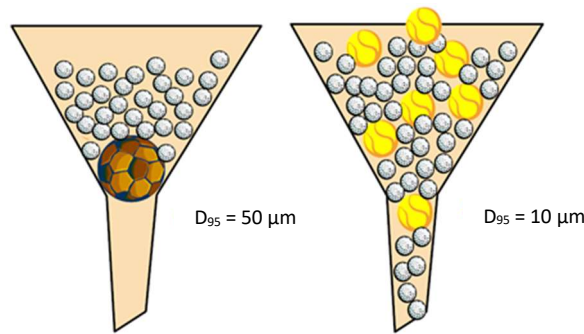


Figura 3.- Efecto de la penetración de la lechada

En la Figura 4 se observa el rango de aplicación de los materiales de inyección según el tipo de terreno y el tipo de materiales a inyectar:

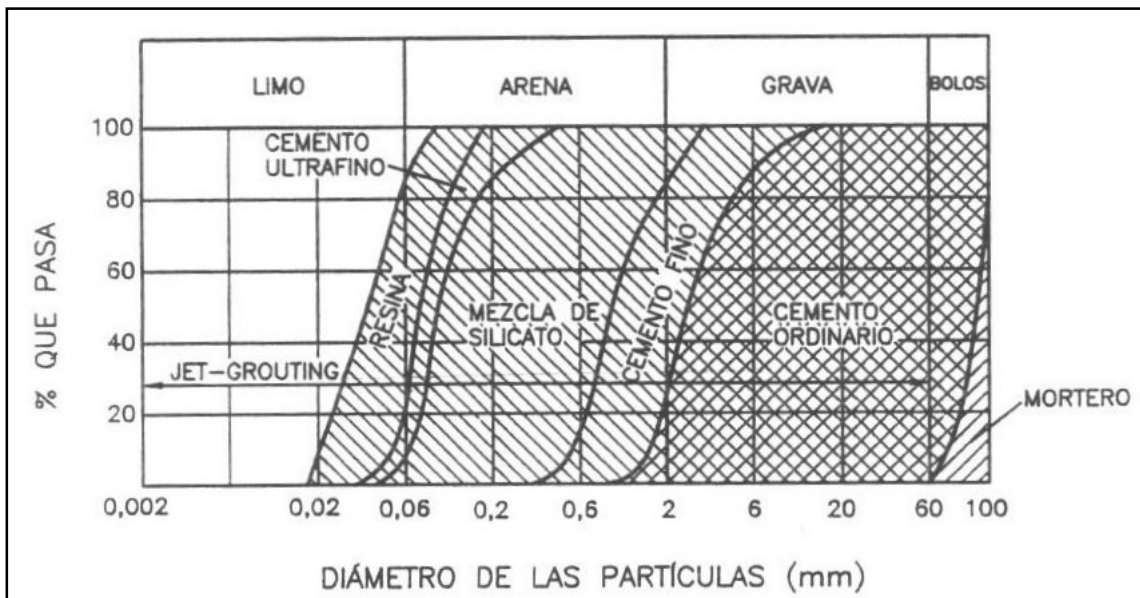


Figura 4.-Rango de aplicación de materiales de inyección (modificado de Kutzner, C., 1.996)

En el caso de macizos rocosos, Weaver (1991) definió el índice de inyectabilidad como:

$$\text{Índice de Inyectabilidad} = \frac{E_{media}}{D_{95}}$$

Siendo E_{media} la apertura media de las juntas. Para índices de inyectabilidad por debajo de 2 se considera que la inyección no es posible. En el otro extremo, para índices por encima de 5, la inyección sería perfectamente viable.

La Tabla 3, se puede utilizar como criterio para seleccionar la tipología de la lechada en función del tamaño de las fisuras que presente el macizo rocoso.

Como puede verse, estos criterios de inyectabilidad no tienen en cuenta nada más que el tamaño de partícula de la suspensión a utilizar en relación al tamaño de los huecos a rellenar. Ni los parámetros de inyección ni la viscosidad del fluido han sido considerados.

Tipo de Fractura	Tamaño fisuras	Tipo de lechada
Discontinuidades en el macizo rocoso	> 100 mm	Morteros de cemento Portland
	0,1-100 mm	Suspensiones de cemento y/o microcemento
	0,05 mm- 0,1 mm	Suspensiones de microcemento, geles de sílice y/o inyecciones químicas
Cavidades	Grandes cavidades	Morteros de cemento Portland y/o poliuretanos expansivos

Tabla 3.- Tipología de la lechada en función del tamaño de las fisuras del macizo rocoso

2.2. PRUEBAS DE INYECTABILIDAD

En la actualidad son muy numerosas las investigaciones, a nivel mundial, cuyo objetivo es desarrollar pruebas a escala de laboratorio para intentar predecir la inyectabilidad de una lechada en suelos o fracturas.

A este respecto destacan trabajos muy recientes como el de Mohammed Hatem (2015), cuyo ensayo consiste en dos discos de plexiglás, de 50 cm de diámetro, unidos mediante pernos para fijar una apertura de junta (canales de circulación del fluido) o una tensión de apriete, a través de la cual se inyecta la lechada (Figura 5). Con este dispositivo se pueden hacer pruebas de inyección en régimen estático y dinámico, modificando las frecuencias de inyección de la bomba. Como puede comprobarse, la condición de las juntas, principalmente su rugosidad, no se tiene en cuenta en absoluto, pese a que es clave para definir la penetrabilidad.



Figura 5.- Dispositivo de ensayo (Hattem, 2015)

A mayor escala es la prueba desarrollada por Shucaí Li. (2016), que simula fracturas de 4 m de longitud, 2 m de ancho y 5 mm de apertura (véase Figura 6), aunque de nuevo, sin tener en cuenta la rugosidad y anisotropía de la junta, ni el estado tensional.

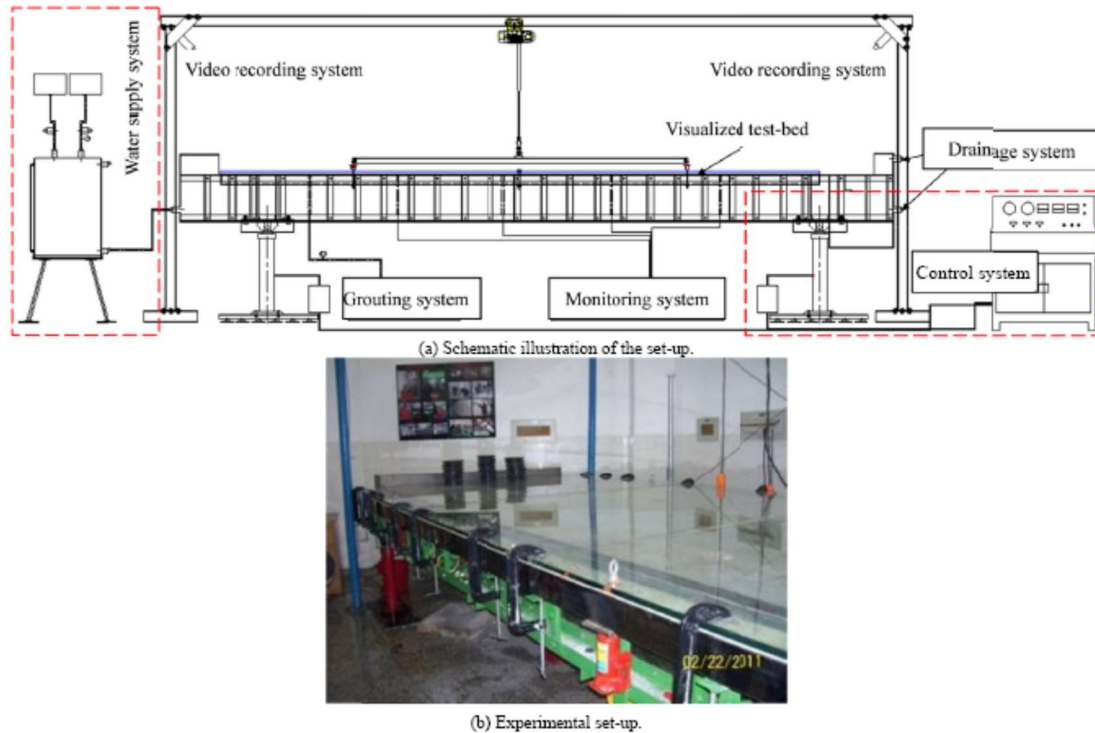


Figura 6.- Dispositivo de ensayo (Li, 2016)

En su trabajo Johan Funehag & Johan Thörn (2018), publican un comparativo entre modelos analíticos de penetrabilidad y ensayos a pequeña escala sobre juntas fabricadas con vidrio. Los resultados indican que la penetración de la lechada en aberturas de 125 μm y 200 μm se verifica hasta en un 40% de la máxima longitud de penetración teórica.

Respecto a la inyectabilidad en suelos, en 2015 Fernando Jorne, publica dos trabajos interesantes. En uno de ellos evalúa la consolidación de suelos utilizando para ello el dispositivo de la Figura 7, utilizando tomografía de ultrasonidos. Como puede verse, el tamaño de muestra en una de las configuraciones posibles es de 14 cm de diámetro y 30 cm de longitud, alcanzando una longitud de 1,20 m en la segunda configuración posible, aunque en este caso se reduce el diámetro a tan solo 6,3 cm. Por tanto, estos dispositivos tienen dos limitaciones: la escala de trabajo y el no considerar el estado tensional in situ del terreno, claves para garantizar la fiabilidad de las pruebas.

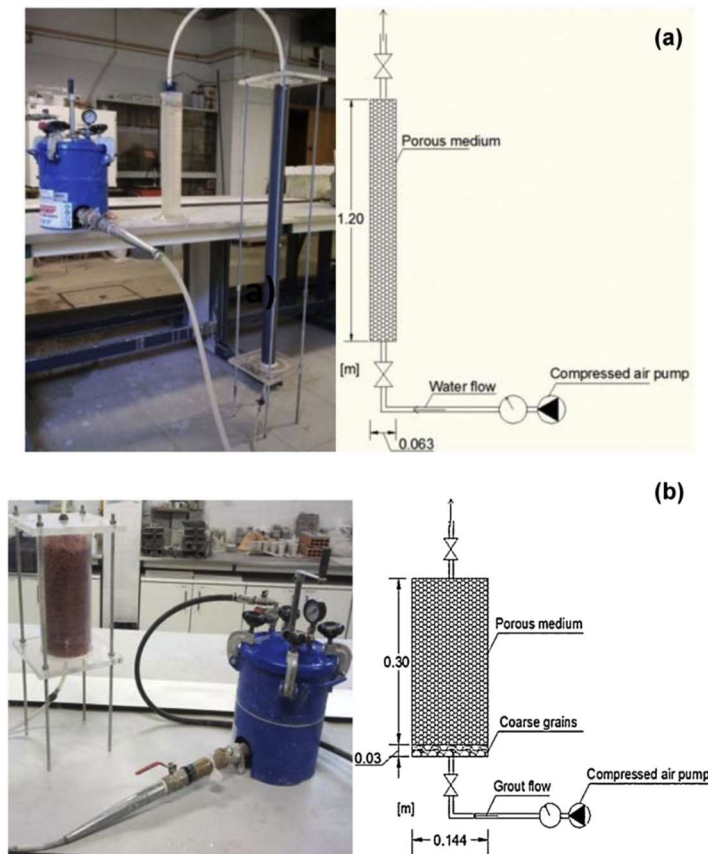


Figura 7.- Dispositivo utilizado por Jorne (2015)

Ese mismo año, Jisuk Yoon, Chadi S. El Mohtar (2015), publican los resultados obtenidos con un dispositivo de ensayo similar, para muestras de 3,8 cm de diámetro y alturas de hasta 45 cm. Utiliza los resultados de las pruebas para calibrar los parámetros de un modelo empírico de inyectabilidad.

En 2016, Fernando Jorne y Fernando M. A. Henriques, publican un nuevo trabajo en el que ensaya muestras con diferentes granulometrías longitudinalmente. Pese a su interés, el diámetro de las muestras no permite evaluar heterogeneidades transversales y la configuración del ensayo no tiene en cuenta el estado tensional mecánico. Estas mismas limitaciones se comprueban en los ensayos de Qiong Wang, Shanyong Wang (2016), sobre muestras de 20 mm de diámetro y una altura de 300 mm.

En cuanto a los diferentes modelos teóricos de inyectabilidad (ya sean para fracturas o para suelos), son numerosos los esfuerzos recientes, destacando los modelos analíticos de Fei Xiao (2017), Liangchao Zou (2018), Xiaolong Li, (2019, para lechadas poliméricas) o Anna Trybala (2019, también para lechadas poliméricas); los modelos numéricos de Quansheng Liu (2019), Katia Boschi (2019) o el modelo físico de Zhipeng Xu (2019). En 2018 Mozunder et al. utilizan modelos de inteligencia artificial (ANN) entrenados con pruebas de laboratorio de inyección con microcementos como herramienta predictiva. De nuevo, la

extrapolación de resultados a escala real (tamaño de muestra y estado tensional) es el punto débil de este trabajo.

Por su parte, el equipo de Salimian et al., 2017 se centra en investigar la mejora en la resistencia de las fracturas inyectadas, no en la inyectabilidad. Para ello, investiga el comportamiento de fracturas artificiales idénticas, fabricadas con una mezcla de sílice y yeso dental. Estas fracturas se moldearon con tres rugosidades superficiales diferentes y se evaluó la resistencia al corte de las mismas tras la inyección. Un estudio similar, pero para suelos fue llevado a cabo por Aziz et al., en 2017.

Por otra parte, diversos investigadores centran sus trabajos en la caracterización de los fluidos a inyectar y su interacción con el medio poroso. Es el caso de Zilong Zhou y Jie Liu, que en 2019 ensayan diferentes composiciones desde el punto de vista de su reología y de su resistencia o de Fernando Jorne que, en un segundo trabajo publicado en 2015, utilizan el mismo dispositivo para evaluar el comportamiento de diferentes tipos de lechadas.

También hay que destacar en este campo, el trabajo de la tesis doctoral de Íñigo Escobal Marcos (2022). En esta investigación se ha analizado el comportamiento de un fluido a través de una junta en roca desarrollando un sistema que permite regular la presión de entrada del fluido, la tensión normal que está soportando la junta y que, a su vez, permite registrar los caudales de entrada y salida en cada una de las direcciones de avance. Entre otras conclusiones, los estudios realizados por dicho autor muestran una distribución anisotrópica de la lechada, que se puede justificar analizando la influencia que sobre su movimiento tienen las familias de discontinuidades que se encuentran en el entorno del sondeo. Se presenta un nuevo modelo, en el que la inyección de lechada sufre una redistribución direccional tanto horizontal como vertical desde la zona de inyección, provocando niveles de afección diferentes. Se proponen, en base al caso de estudio, unos parámetros de corrección del radio de influencia y que tengan en cuenta estos fenómenos de redistribución y permitan estimar, con mayor precisión, la distancia entre sondeos de inyección.

2.3. INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD DE LA LECHADA EN LA INYECTABILIDAD

La viscosidad representa la resistencia al flujo de los fluidos y solo se manifiesta en fluidos en movimiento. Dado que la inyección implica el movimiento de un fluido a través de los poros y/o juntas del terreno, la viscosidad es una propiedad clave para caracterizar el procedimiento más adecuado.

La viscosidad dinámica relaciona el esfuerzo tangencial aplicado sobre un fluido con la velocidad del desplazamiento que genera, en régimen estacionario (velocidad constante). Este valor debe normalizarse con el área en que se aplica el esfuerzo (pasando entonces a una tensión cortante) y con el espesor del fluido.

Por su parte, la viscosidad cinemática relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del líquido y se obtiene dividiendo ambas. Para entender este concepto, se pueden considerar dos fluidos distintos con igual viscosidad absoluta, los cuales se harán fluir verticalmente a través de un orificio. Aquél de los fluidos que tenga mayor densidad fluirá más rápido, es decir, aquél que tenga menor viscosidad cinemática.

En el caso de los denominados fluidos newtonianos, se trata de una constante, pero en los denominados no newtonianos (casi todos los productos inyectables) la viscosidad depende del modo de aplicación de la fuerza tangencial que produce el movimiento. Además, tanto la *viscosidad dinámica* como la *cinemática*, dependen de la temperatura, disminuyendo con ésta, ya que la cohesión entre las moléculas se vuelve más débil.

En el caso de las inyecciones se debe llegar a un compromiso entre la penetrabilidad de la mezcla (mayor cuanto menor sea la viscosidad) y su capacidad para sustituir (movilizar y reemplazar) los fluidos presentes en el propio terreno (que será mayor cuanto mayor sea la viscosidad).

Se trata, además, de una propiedad que evoluciona con el tiempo, pues el material inyectado debe ir endureciendo progresivamente (véase la Figura 8).

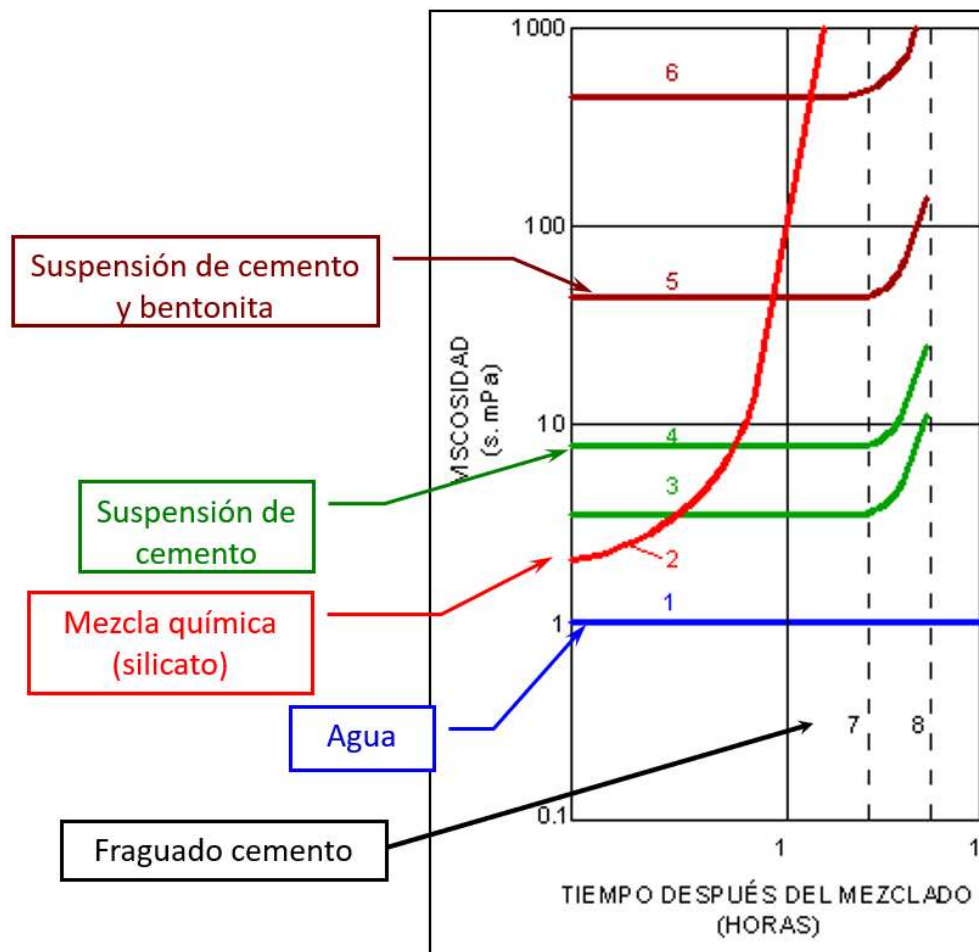


Figura 8.- Evolución de la viscosidad con el tiempo para distintos productos de inyección

2.4. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA VISCOSIDAD

Los instrumentos más ampliamente usados en la medida de viscosidades se pueden dividir en tres tipos: capilares, rotacionales y de cuerpo móvil.

2.4.1. Viscosímetros Capilares

Un fluido es obligado a pasar a través de un tubo observándose la distribución de velocidades en el tubo de tipo parabólico, de forma que la porción del fluido que está en contacto con las paredes del capilar tiene una velocidad nula y la porción del fluido que se encuentra en el centro del tubo tiene una velocidad máxima.

La fuerza impulsora del flujo es normalmente la presión hidrostática del propio líquido, aunque en algunos casos (fluidos newtonianos muy viscosos o fluidos no newtonianos) se suele aplicar una presión externa. Algunos ejemplos de estos viscosímetros se recogen en la Figura 9.

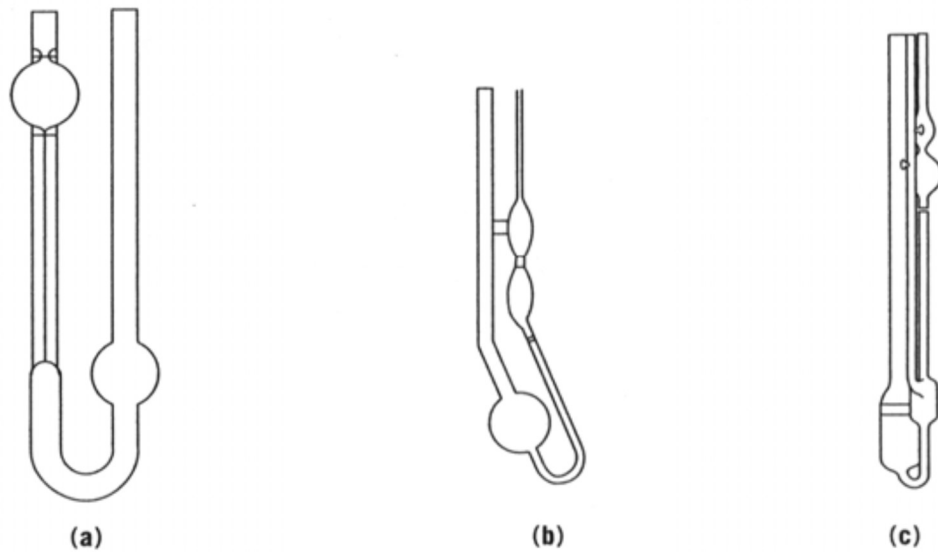


Figura 9.- Distintos tipos de viscosímetros de vidrio: a) Ostwald b) Cannon-Fenske c) Ubbelohde. (<https://rua.ua.es>)

2.4.2. Viscosímetros de orificio o viscosímetros de copa.

Se emplean normalmente para medir y controlar las propiedades de flujo en la fabricación, procesado y aplicaciones de tintas, pinturas y adhesivos. En general son sencillos y fáciles de manejar, aunque presentan el inconveniente de que las medidas de viscosidad no son muy precisas. Destacan el viscosímetro tipo Ford (Figura 10), el Engler, el Saybolt o el Redwood (estos tres últimos muy utilizados para aceites y lubricantes). La copa, que tiene un orificio en el fondo, se llena con el fluido y se mide el tiempo necesario para que se vacíe.



Figura 10.- Copa Ford

2.4.3. Viscosímetros de pistón o de extrusión.

Los viscosímetros de este tipo se usan principalmente para medir la viscosidad de polímeros fundidos y otros materiales muy viscosos. En estos viscosímetros un depósito se conecta a un capilar y el fluido se extruye por medio de un pistón que aplica un esfuerzo constante.

2.4.4. Viscosímetros de cuerpo móvil

En los viscosímetros de cuerpo móvil la viscosidad del fluido se determina a partir de la movilidad de una esfera, burbuja, disco, etc. en dicho fluido. Si cuerpo cae en el interior de un fluido libremente se desplaza hasta que la fuerza de la gravedad se iguala a la fuerza de rozamiento que ejerce el fluido sobre el cuerpo. Los más empleados son los de caída de esferas.

2.4.5. Viscosímetros rotacionales

Estos viscosímetros basan su medida en la fuerza necesaria para hacer girar un accesorio en el interior del fluido a una velocidad de giro dada. Constan de dos partes separadas por el fluido a estudiar (dos cilindros, dos superficies paralelas, una superficie y un cono de pequeño ángulo, un rotor en el interior de un cilindro, etc.). El movimiento de una de estas partes provoca la aparición de un gradiente de velocidades a lo largo del fluido. Para determinar la viscosidad se mide el esfuerzo necesario para producir una determinada velocidad angular.

Este tipo de viscosímetros son mucho más versátiles que los anteriores y pueden ser utilizados para fluidos no Newtonianos. Destacan el viscosímetro de Stormer, el de cilindros concéntricos, los de cono-placa, el Brookfield y el Stabinger.

En definitiva, no existe una dosificación ni una fluidez única para todos los casos de inyección. Se debe pensar que, para cada elemento particular a inyectar, se necesitaran condiciones reológicas diferentes en las lechadas cementicias. En casos especiales o particularmente críticos, se debe realizar un diseño de mezcla específico, considerando criterios de control de calidad y trazabilidad, tanto para todos los materiales necesarios (cemento, aditivos, espesantes) como para los procesos de mezclado e inyección involucrados.

De igual forma hay una gran variedad de ensayos y equipos para medir la viscosidad, pero que, por carencias ya expuestas, ha llevado a generar nuevos ensayos en el desarrollo experimental que se desarrolla en el capítulo 3 de esta tesis.

CAPÍTULO III – DESARROLLO EXPERIMENTAL

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es diseñar un nuevo sistema de inyección a presión de lechadas de cemento en el interior de un suelo con el fin de reducir la permeabilidad del mismo. Para ello se han diseñado y desarrollado nuevos ensayos que permiten evaluar el comportamiento de diferentes lechadas y diferentes suelos, dentro del rango de las inyecciones a baja presión. Los trabajos de investigación de la tesis han estado basados en el análisis de la caracterización de las lechadas y de la caracterización de la interacción suelo-lechada.

Durante la fase de investigación y análisis de la presente tesis se ha trabajado fundamentalmente en base al análisis en dos niveles:

- Por un lado, la *caracterización de lechadas de cemento y microcemento* que se iban a emplear durante los ensayos (basadas en cementos y microcementos comerciales existentes en el mercado y disponibles para la ejecución de gran parte de los proyectos de infraestructuras subterráneos), con objeto de definir y clasificar las mismas para establecer las bases de un análisis cualitativo de las mismas.
- En segundo lugar, la *caracterización de la interacción* provocada por acción de la inyección entre suelo-lechada, buscando interpretar la efectividad del tratamiento y los resultados obtenidos con el mismo sobre el suelo.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS LECHADAS

Un punto importante de partida durante la investigación ha sido que actuales métodos de caracterización de las lechadas no son efectivos.

Las propiedades de las lechadas de cemento, están definidas en dos grandes grupos, las propiedades reológicas (viscosidad, cohesión y fricción interna) y las Propiedades físicas (exudación, finura: superficie específica Blaine y resistencia). La reología de una lechada es un estudio muy complejo, pero que se puede caracterizar por tres parámetros: viscosidad, cohesión y fricción interna.

Las partículas de cemento actúan mediante reacciones químicas exotérmicas para producir estas propiedades. A presiones de lechada equivalentes, diámetro de poro y tamaños de partículas de lechada, la

viscosidad controla la velocidad de penetración (y, por lo tanto, el tiempo de fraguado de lechada), y la cohesión controla la presión interna requerida para iniciar o reiniciar el flujo de lechada. La cohesión también controla la distancia máxima de penetración. La fricción interna entre los componentes sólidos, cuando sea suficientemente alta, causará bloqueos de los canales de circulación de la lechada por los que se inyecta debido al aumento exponencial de la presión requerida para el movimiento. Estos comentarios se aplican a una mezcla estable e implican, que controlar la reología de una lechada al reducir la cohesión inicial y retrasar su aumento con el tiempo, mejorará significativamente la penetrabilidad.

Si bien actualmente se usan también otros parámetros como densidad, sangrado y tiempo de endurecimiento, la presente investigación se centra en el estudio de la viscosidad y en definir un método simple que permita ensayar tanto in situ como en laboratorio.

3.1.1. Nuevo procedimiento de caracterización del comportamiento viscoso de lechadas.

La inyectabilidad de la lechada en un canal de circulación de fluido a través del terreno, para unas determinadas condiciones del proceso de inyección, viene condicionada por la interacción entre fluido y canal que depende, principalmente de la apertura y rugosidad del canal y de la viscosidad del fluido en dichas condiciones de inyección.

A la vista de los ensayos que se han descrito en el apartado 2.4, no hay en la actualidad un sistema que permita evaluar la viscosidad de un fluido en movimiento en las condiciones de una inyección con bomba.

En esta situación, la viscosidad no puede ser descrita con el concepto tradicional de viscosidad absoluta (a velocidad constante) ni viscosidad cinemática (con una aceleración constante), puesto que el procedimiento de bombeo induce al fluido un movimiento con una aceleración variable en el tiempo al principio y final de las carreras de impulsión.

Tampoco ningún ensayo reproduce la circulación de la mezcla a través de dos superficies que puedan simular los labios de una discontinuidad.

Estas carencias han motivado el desarrollo de un nuevo método de ensayo, del que se ha construido un prototipo y con el que se han caracterizado diferentes fluidos viscosos.

3.1.2. Diseño conceptual

El sistema se ha diseñado para estudiar el comportamiento de los fluidos a inyectar en el interior de una junta de forma que simulen condiciones que permitan replicar una discontinuidad del terreno.

Para una mayor simplicidad, en vez de desplazar el fluido a través de una junta, se ha diseñado un procedimiento inverso, en el que es un objeto el que simula la junta y el que se desplaza en el interior del fluido de forma que, sometido a la acción de una fuerza (en este caso aplicada mediante un peso), adquiere diferentes velocidades y aceleraciones que van a depender de la viscosidad del fluido y las condiciones de la junta (abertura y rugosidad). Estas condiciones se podrán modificar para adaptar el ensayo a las reales.

Desde el punto de vista conceptual, el ensayo consiste en rellenar con un fluido diferentes tubos verticales de metacrilato y desplazar en su interior un émbolo de diámetro fijo. Los diferentes tubos de metacrilato simularán diferentes aberturas de junta en función de la relación entre el diámetro del émbolo y el diámetro del tubo exterior, tal y como puede verse en la Figura 11.

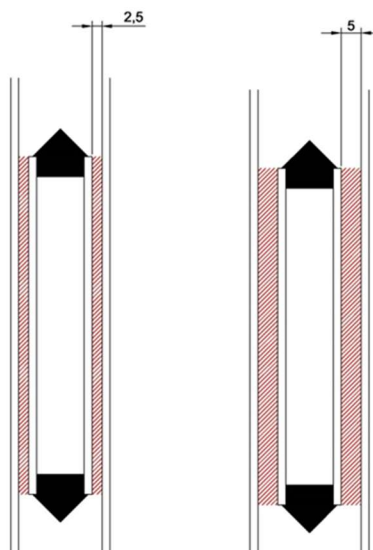


Figura 11.- Detalle de las juntas (aperturas de 2,5 mm y 5 mm)

El émbolo, que se ha fabricado como un cilindro de 16 mm de diámetro exterior y 99 mm de longitud (véase la Figura 12), se cierra con dos tapones de forma cónica para facilitar su movimiento y evitar así rozamientos (es más aerodinámico). La diferente rugosidad de las juntas se puede simular imprimiendo dicha rugosidad al perímetro del émbolo.

El movimiento ascendente del émbolo a través del fluido se impulsa aplicando diferentes pesos, lo que origina un movimiento acelerado que simula el efecto de bombeo tal y como sucede en la realidad (pulsos).

Este movimiento se graba mediante una cámara fijada sobre un trípode lo que permite analizar los fotogramas para medir la velocidad y aceleración en cada tramo.

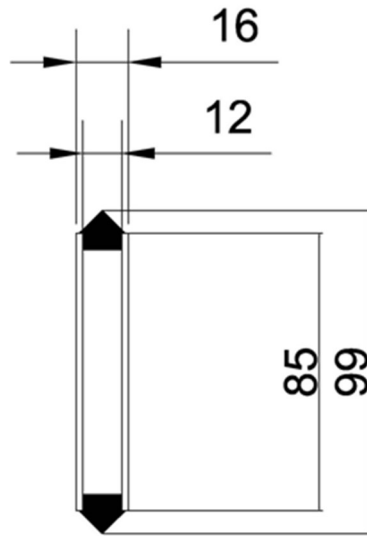


Figura 12.- Detalle del émbolo (dimensiones en mm)

El prototipo construido denominado **Viscosímetro Dinámico**, cuyo esquema puede verse en la Figura 13, está compuesto por:

- Estructura rígida (1), que conforman un marco con un ancho de 130 cm y 170 cm de altura. Esta estructura sirve de apoyo a los tubos de ensayo y garantiza su verticalidad. Esta estructura se rigidiza con una placa (10) de sección rectangular de 15 cm x 2 cm, y una longitud de 130 cm, con orificios para los tubos, que además permite garantizar la verticalidad de los tubos.
- Dos tubos de metacrilato (2) y (3) de diferente diámetro que se rellenarán con el fluido a analizar. En este prototipo los dos tubos tienen una altura de 109,9 cm. Uno de ellos tiene un diámetro exterior 25 mm y un diámetro interior 21 mm. El segundo tubo tiene un diámetro exterior de 30 mm y un diámetro interior de 26 mm. De esta forma se configuran una junta de 2,5 mm y otra de 5 mm de abertura. Estos diámetros pueden ser modificados para simular otras aberturas de junta
- Émbolo (4), construido a partir de un tubo de metacrilato con tapones cónicos en los extremos, de diámetro exterior 16 mm, diámetro interior 12 mm y con una longitud de 9,9 cm, cuyo detalle se ha presentado en la Figura 13.

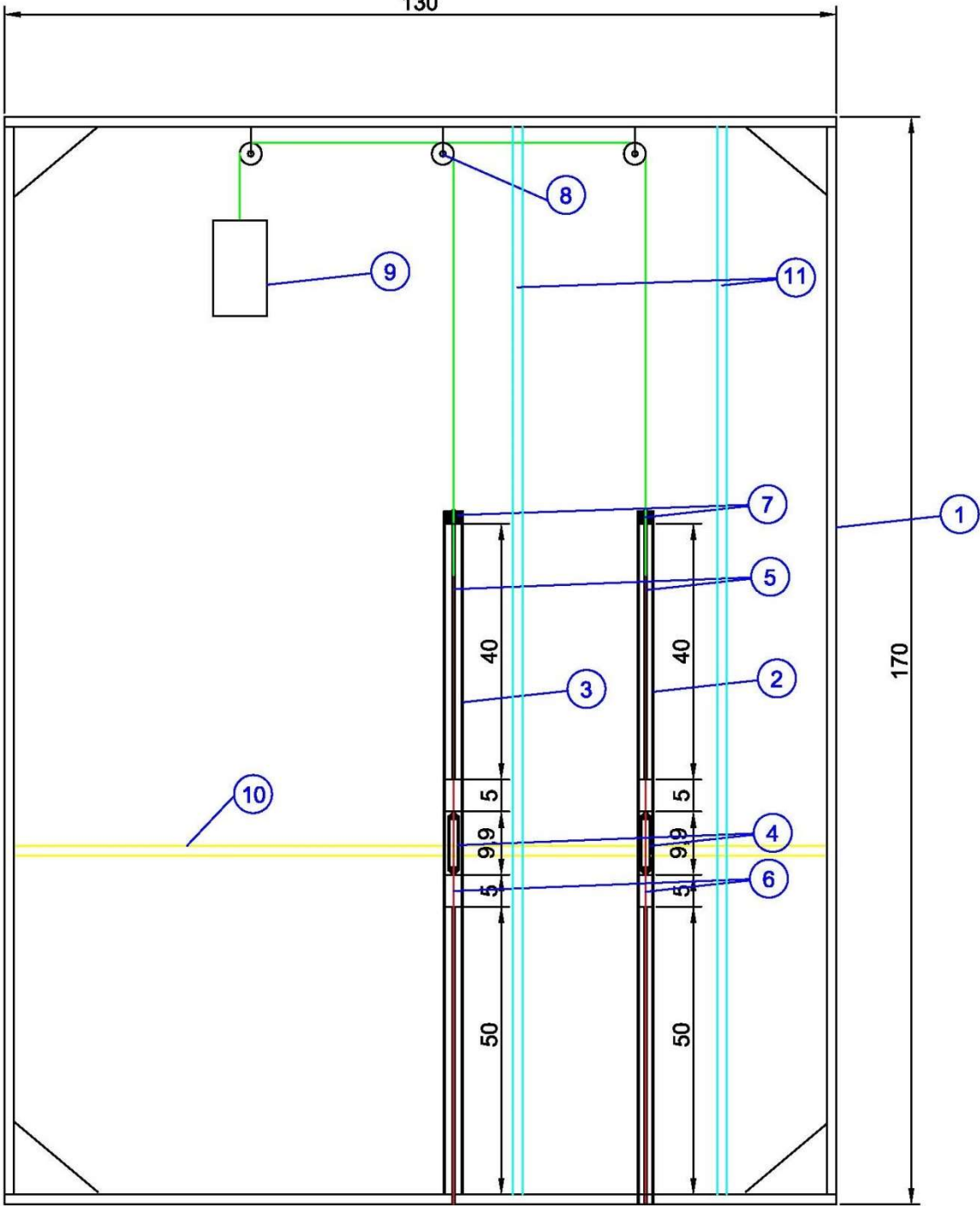


Figura 13.- Diseño del Viscosímetro Dinámico (dimensiones en cm)

- Tubo hueco (5), de diámetro exterior de 6 mm (diámetro interior de 4 mm). Presenta dos tramos: el inferior de 50 cm de longitud, anclado a la base y el superior de 40 cm de longitud, que se desliza a través del tapón superior. Por su interior desliza una varilla de acero rígida (6), solidaria al émbolo, que sirve para guiarlo de forma que su trayectoria sea lo más vertical posible. Las

dimensiones de estos elementos se han diseñado para fijar el recorrido del émbolo en 20 cm. En la Figura 14 se presenta un esquema detallado de estos elementos.

- Tapones (7) en la parte superior e inferior de los tubos (2) y (3) para retener los fluidos (en el caso de los inferiores) y guiar la varilla (en el caso de los superiores).
- Peso variable (9) dependiendo del fluido a estudiar para aplicar la fuerza que induce el movimiento del émbolo y poleas (8) para facilitar el movimiento. Para ello, el peso se une a la varilla (6) mediante un cable de acero.
- Escalas para referencia del movimiento (11) durante el análisis de los fotogramas de la grabación del ensayo.

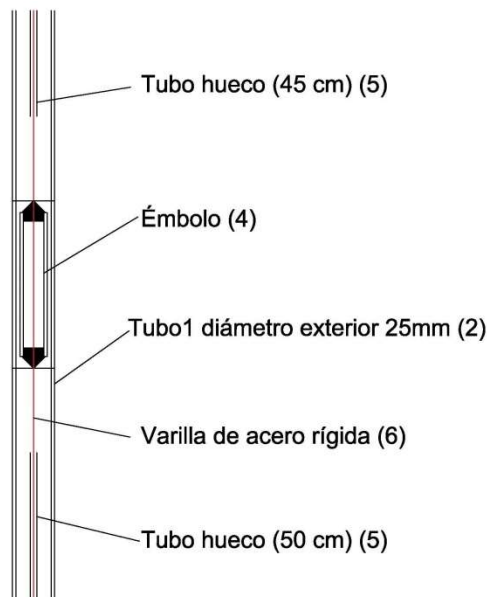


Figura 14.- Detalle zona central

3.2. DISEÑO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACION DE LECHADAS

3.2.1. Ensayos de puesta a punto del sistema

Para comprobar el funcionamiento del sistema se han llevado a cabo una serie de pruebas con fluidos de diferente viscosidad antes de abordar el análisis de las lechadas de cemento y microcemento, con un comportamiento mucho más complejo (con cambios en el tiempo y en algunos casos segregación). Estas pruebas se pueden agrupar en función de las distintas variables sobre las que se ha actuado:

1. Comparativa de fluidos con distintas viscosidades en el dispositivo configurado para un canal de 2,5 mm de abertura.
2. Comparativa del efecto de la abertura del canal.
3. Comprobación de la viabilidad de modificar la dinamicidad del sistema.

a) Fluidos con distinta viscosidad en canal de 2,5 mm de abertura

Se han seleccionado cuatro líquidos para esta prueba, cuyas propiedades se han resumido en la Tabla 4.

Fluido	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad dinámica (Pa·s)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)
Agua	0,997	1,00	100,30
MEZCLA 1	1,014	1,72	169,29
MEZCLA 2	1,015	1,80	176,87
MEZCLA 3	1,019	2,00	196,27

Tabla 4.- Propiedades de los fluidos ensayados

En la Figura 15 se presenta un ejemplo de los fotogramas analizados para evaluar la velocidad y aceleración en el movimiento del émbolo durante una de las pruebas.

En la Figura 16 se ha representado la evolución de la velocidad del émbolo en su recorrido ascendente de 20 cm en cada uno de los fluidos ensayados. Como puede verse, aunque se producen ligeras oscilaciones, se alcanza un régimen uniforme con una velocidad de equilibrio, que depende de la fuerza aplicada y de la viscosidad del fluido. En el caso del agua, esta velocidad ha sido de 10 cm/s, mientras que en la mezcla más viscosa se ve reducida a menos de 1 mm/s.

A su vez, en la Figura 17 se presenta una gráfica tipo de la aceleración que experimenta el émbolo durante el ensayo, tendiendo a cero a medida que el movimiento se va haciendo uniforme.

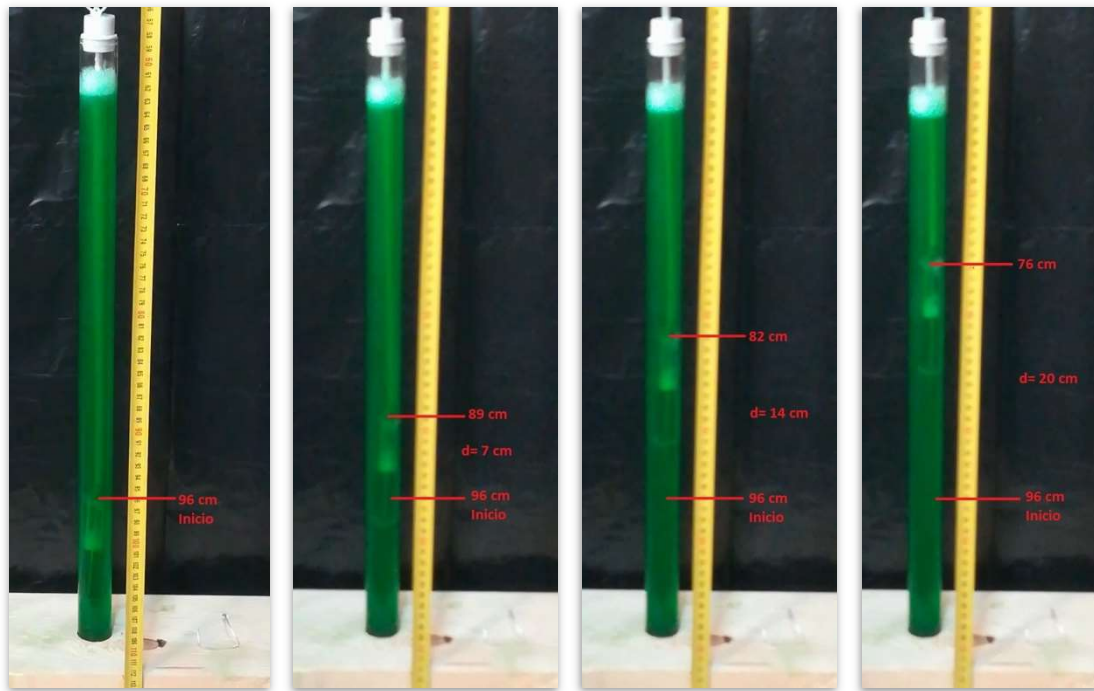


Figura 15.- Movimiento del émbolo en el interior del fluido

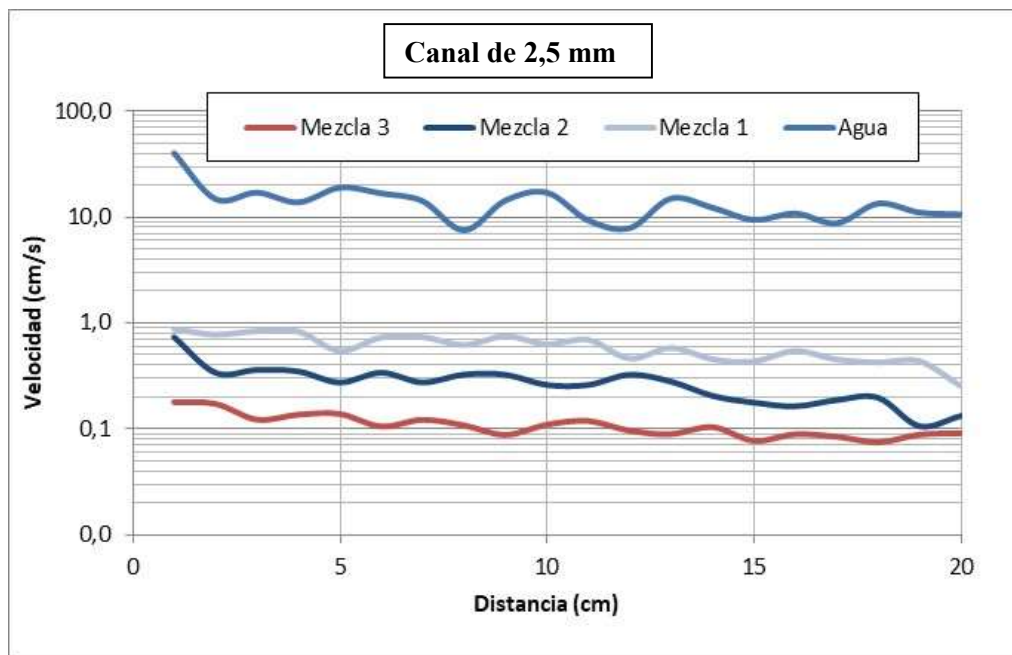


Figura 16.- Evolución de la velocidad del émbolo en los ensayos de distintos fluidos

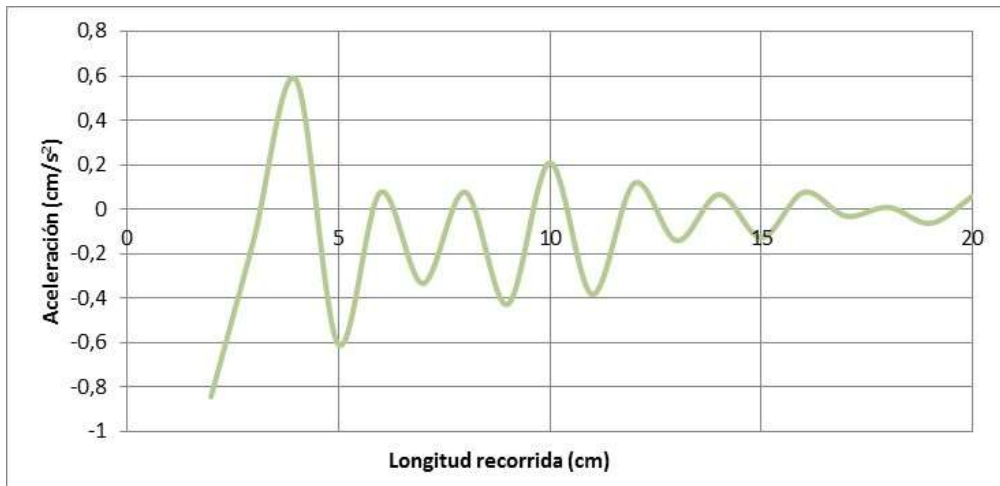


Figura 17.- Gráfica tipo de la evolución de la aceleración del émbolo

b) Efecto de la abertura de los canales

En ese caso se compara el comportamiento de los dos fluidos extremos (el agua como el menos viscoso y la Mezcla 3 como el más viscoso) cuando se modifica el espacio entre émbolo y tubo exterior simulando aberturas de canal de circulación de 2,5 y 5 mm.

En la Figura 18 se comprueba cómo, en el caso del agua apenas hay diferencia de comportamiento, mientras que en el caso de la Mezcla 3, la diferencia es de un orden de magnitud (8 mm/s para el canal más abierto y 0,9 mm/s para el más cerrado).

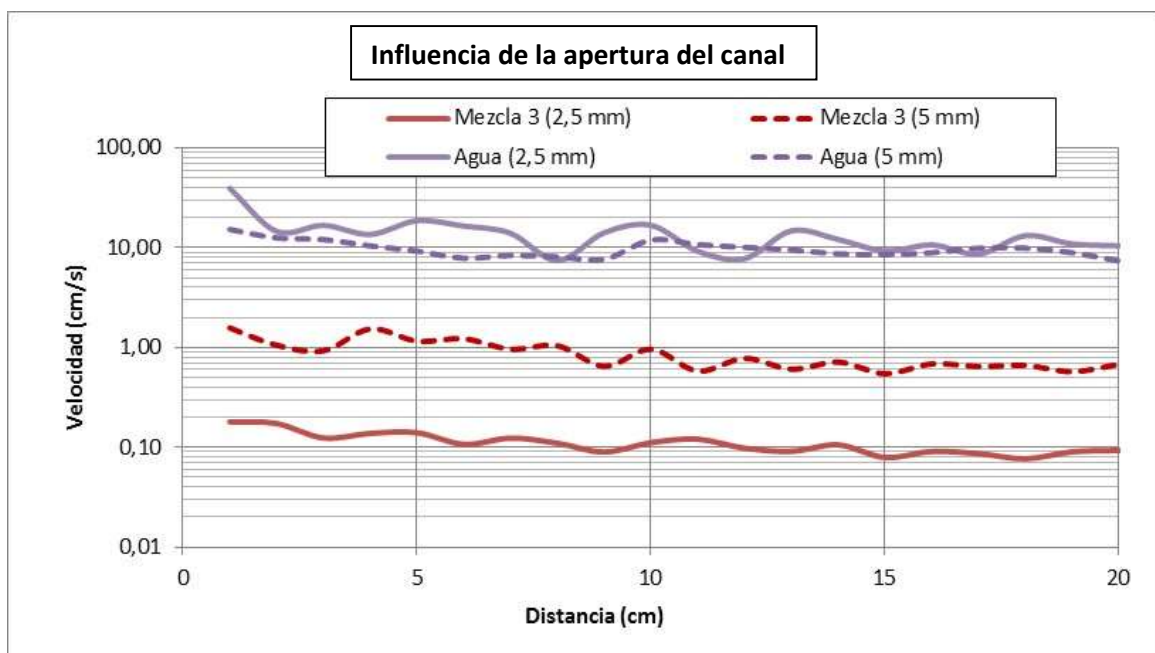


Figura 18.- Evolución de la velocidad del émbolo con diferentes aberturas de canales

El hecho de que no se detecten diferencias de comportamiento en el agua puede ser debido a su baja viscosidad, de tal forma que espesores de esta magnitud sean muy superiores a los que limitarían el movimiento del flujo. Esta idea, de confirmarse implicaría la existencia de una apertura de junta límite para cada fluido, a la que iría asociada una velocidad de flujo máxima, de forma que, aunque se aumentase la apertura, la velocidad de flujo no crecería.

c) Modificación de la aceleración del movimiento

El dispositivo diseñado permite modificar el régimen de aceleración del émbolo mediante la adición de más peso durante el ensayo o, simplemente generando un impulso inicial de mayor amplitud al inicio de la prueba con el sencillo sistema de dejar caer el peso desde diferentes alturas. Este último sistema se aproxima conceptualmente a los impulsos originados por una bomba de pistón. En la Figura 19 se pueden ver algunos de los acelerogramas obtenidos durante este tipo de pruebas.

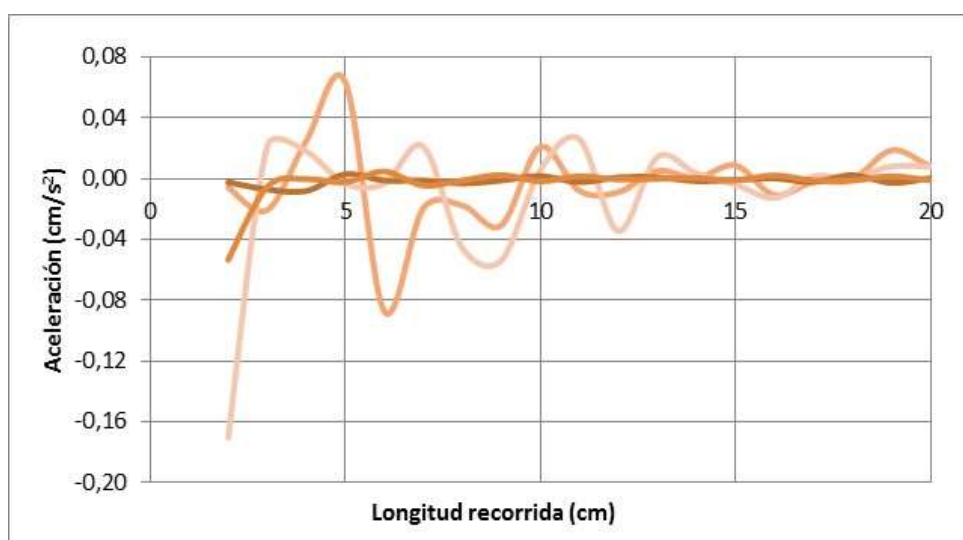


Figura 19.- Diferentes esquemas de aceleración

3.2.2. Ensayos en lechadas de cementos y microcementos

El análisis de este tipo de materiales es más complejo porque se introduce una variable adicional en la viscosidad, que ahora va variando con el tiempo. Esta variación se debe, en primer lugar, al proceso de fraguado del material cementítico y, en segundo lugar, a los procesos de segregación que pueden tener lugar en la lechada, puesto que se trata de una suspensión (con diferentes grados de estabilidad).

En la Figura 20 se muestran las pruebas efectuadas con microcemento. La relación agua cemento de estas lechadas ha sido 20:7, lo que supone un peso específico de 18 kN/m³. No se han utilizado otros aditivos.

Como puede verse, las velocidades en régimen estacionario para el canal de 2,5 mm son menores que para el canal de 5 mm (unas 4 ó 5 veces). Además, se observa como dichas velocidades van descendiendo a medida que transcurre el tiempo (indicando, de nuevo, una mayor viscosidad del fluido).

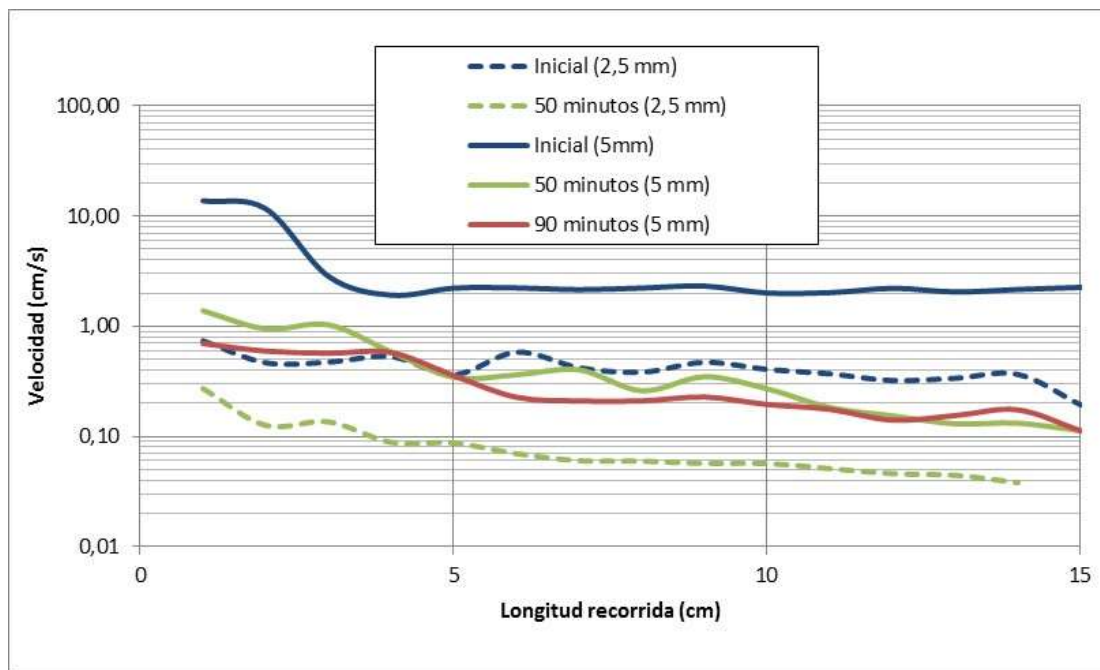


Figura 20.- Pruebas con microcemento

En el caso de la lechada de cemento, se ha probado con una relación agua-cemento de 1:1. En este caso, el primer fenómeno que se observa es la inestabilidad de la mezcla que, en los tubos de ensayo, se va segregando y va apareciendo una lámina de agua en superficie que va creciendo con el tiempo (véase la Figura 21).



Figura 21.- Lámina superior de agua por segregación de la lechada

En la Figura 22 se ha representado la evolución de este fenómeno con el tiempo. Como puede verse, es más intenso cuanto mayor es la apertura de la junta. En un futuro, este tipo de pruebas puede servir para

comprobar los fenómenos de filtrado que se producen a la entrada de las juntas por segregación de los granos más gruesos.

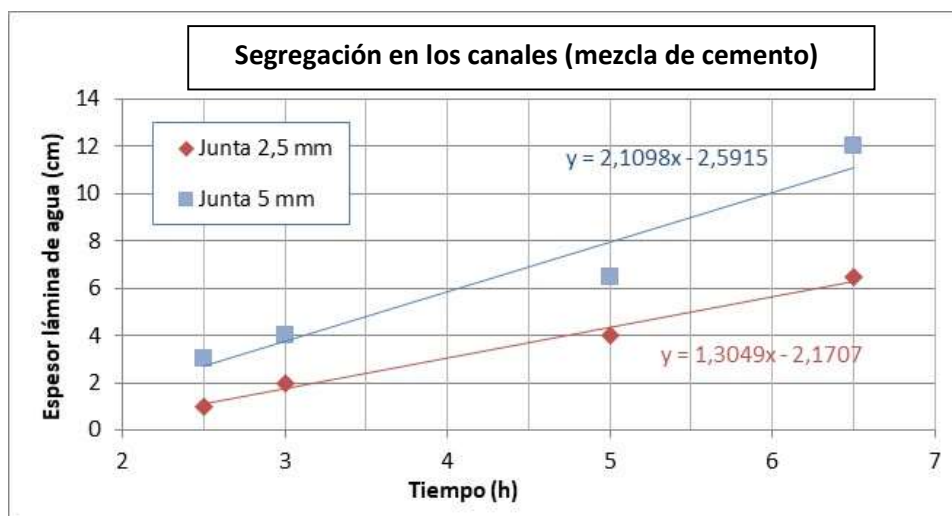


Figura 22.- Segregación de la mezcla de cemento en los canales

3.3. PRUEBAS DE INYECTABILIDAD DE LECHADAS EN SUELOS

Se ha diseñado y construido un sistema que permite un primer acercamiento al problema de la inyección de suelos, evaluando la interacción suelo-lechada. Se trata de un equipo que permite ensayar suelos saturados, inyectando lechadas de cemento o microcemento a presiones de hasta 15 Bar, y evaluar las propiedades hidráulicas antes y después de una inyección (lo que requiere un control en continuo de la presión y los caudales inyectados).

3.3.1. Diseño conceptual

El diseño conceptual del ensayo se ha realizado de forma que permita inyectar diferentes fluidos en un suelo registrando las presiones máximas y caudales necesarios para disminuir la permeabilidad, al mismo tiempo que permita observar la progresión de las lechadas inyectadas.

Para ello, se requiere un recipiente transparente, que nos permita una visualización de los ensayos y que contenga el suelo a ensayar, así como de equipos de instrumentación, principalmente caudalímetro y sensores de presión. Otros elementos claves son la boca de inyección del tubo, las conexiones hasta la máquina de inyección y el geotextil de retención del material. Para comprender mejor la disposición de todos los equipos, se adjunta la Figura 23.

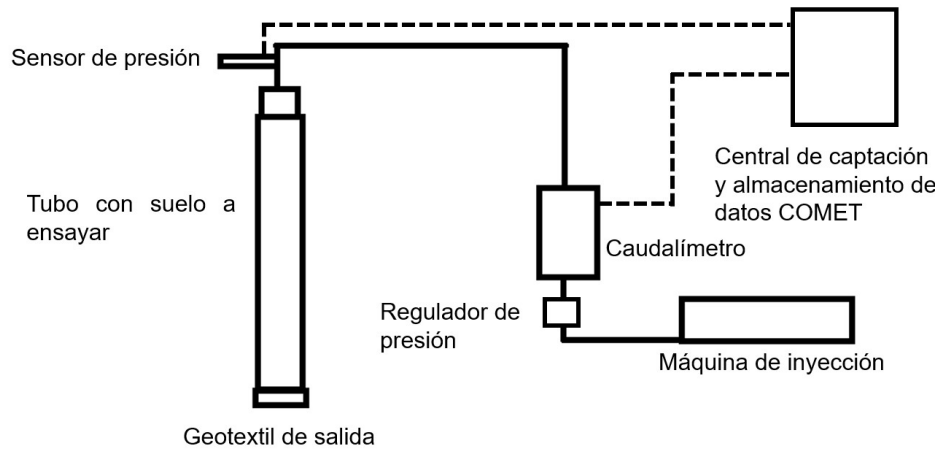


Figura 23.- Diseño conceptual del ensayo

El equipo principal diseñado para este ensayo consiste en un tubo de PVC GLASS transparente, de 90 mm de diámetro y una longitud de 1 m. En la parte superior, se dispone un cabezal y una llave que permite conectar el tubo con el del circuito de inyección mediante una rosca de 3/8" tal y como se muestra en la Figura 24. En la parte inferior se dispone un acople que permite introducir un geotextil, de gramaje 150 kg/m² que actúa de filtro para impedir la salida del material.



Figura 24.- Tubo de ensayos con el cabezal de inyección en la parte superior y detalle del filtro inferior

Este geotextil va dispuesto entre dos piezas perforadas que fueron diseñadas a medida y fabricadas mediante una impresora 3D, que permiten una perfecta fijación del geotextil a la boca del tubo.

3.3.2. Descripción de equipos y materiales

El principal equipamiento empleado para la realización de los ensayos es el siguiente:

- **Caudalímetro magneto-inductivo:** Se sitúa en serie con la tubería por la que discurre el fluido cuyo caudal se desea medir tal y como se muestra en la Figura 25. En este caso se ha empleado el modelo IFM SM7000, que permite registrar caudales desde 0,2 hasta 30 l/min. Este caudalímetro permite realizar mediciones precisas tanto para fluidos newtonianos como para lechadas con partículas en suspensión, como pueden ser las lechadas a base de cemento. El caudalímetro registra una señal analógica que es enviada a una tarjeta de adquisición de datos, donde se transforma en un valor de caudal circulante.



Figura 25.- Caudalímetro empleado durante un ensayo que registra 3,7 l/min

- **Sensor de presión:** El sensor de presión, Figura 26, consta de una pequeña membrana que se deforma como consecuencia de la presión y transmite una señal analógica a la tarjeta de adquisición de datos, donde es interpretada en una escala de presión. Los sensores empleados tienen un fondo de escala de 20 bar. En el caso de que se trabaje con lechadas de cemento, estos sensores deben ir acompañados de una membrana de protección, de forma que, la lechada no entre en contacto directo con el sensor para no dañarlo, sino que, a través de la membrana se transmita la presión a un fluido inocuo (aceite) y sea este el que esté en contacto con el sensor.



Figura 26.- Sensor de presión y sistema de protección

- **Regulador de presión:** Son equipos que permiten tarar el circuito a una presión fija a lo largo del tiempo. En este caso este equipo permite el ajuste de la presión mediante un tornillo a la presión requerida para cada ensayo. En la Figura 27 se puede observar el regulador de presión ensamblado en el circuito. Tal y como se observa el agua discurre de izquierda a derecha por los conductos laterales, mientras que en la parte superior se dispone el orificio con el tornillo para el ajuste deseado de la presión.

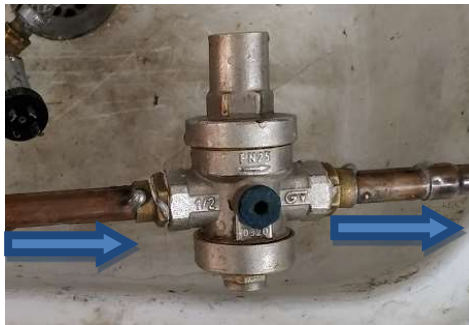


Figura 27.- Regulador de presión

- **Tarjeta de adquisición de datos:** La tarjeta de adquisición de datos empleada es de la marca Comet Systems, en concreto el modelo MS6D Data Logger. Su función es registrar e interpretar las señales analógicas de los distintos sensores empleados a lo largo de los ensayos. Este equipo se puede observar en la Figura 28. Ha sido configurada de forma que registre los datos de cada sensor cada segundo. Esos datos se almacenan en la memoria de la tarjeta Ram. Conectando la central a un ordenador se pueden descargar los datos exportándolos a un fichero tipo XLS para su posterior tratamiento y análisis.



Figura 28.- Comet MS Data Logger

- **Circuito auxiliar:** Se ha denominado así al conjunto de tuberías y acoples que permite el correcto ensamblado de todos los elementos mencionados anteriormente y la circulación de los fluidos a inyectar desde el punto de alimentación.
- **Bomba de inyección:** Es el equipo encargado de suministrar al fluido la energía, en forma de presión, para circular a través de la muestra de suelo. En este caso, se emplea el modelo de bomba PowerInject SP20, del fabricante Desol (véase la Figura 29). Se trata de una bomba de tornillo helicoidal que, permite alcanzar una presión máxima de 15 bares, así como un caudal variable de entre 1,5 y 13,5 l/min.



Figura 29.- Bomba de inyección Desol PowerInject SP20. Fuente: Desol

Una de las primeras labores llevadas a cabo ha sido obtener la curva característica de la bomba, que se puede observar en la Figura 30, y que relaciona cada valor de caudal con la presión entregada por la bomba. En algunos casos, para la alimentación de fluido se ha utilizado

directamente la acometida de agua (cuando el fluido es agua a presión de hasta 5 bares). También se adjunta la curva presión-caudal en este caso.

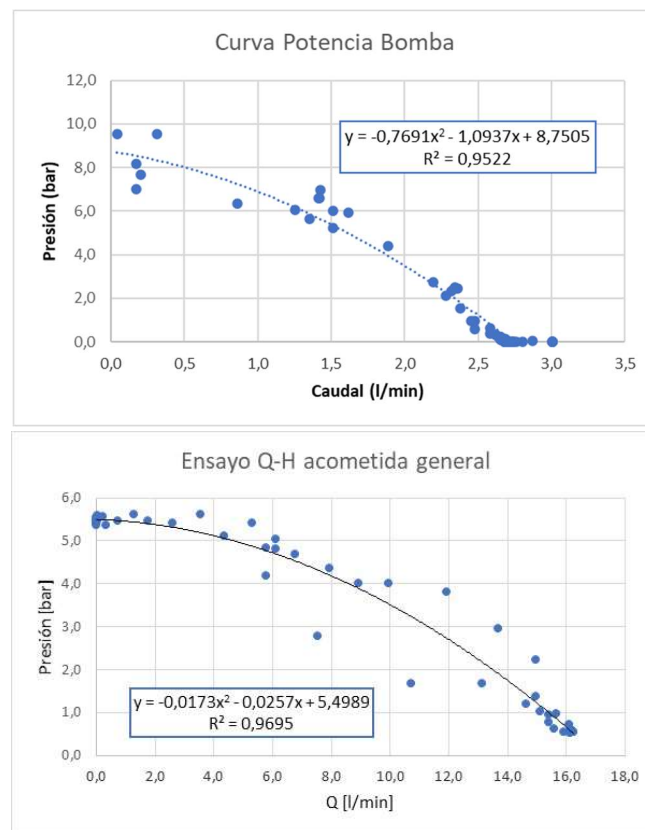


Figura 30.- Curva característica de la bomba empleada y de la acometida

- **Cemento y microcemento:** Para los ensayos de inyección con cemento, se ha utilizado cemento Portland, concretamente CEM II/B-M (V-L) 32,5R. Cuando se ha inyectado microcemento, el microcemento empleado ha sido el Spinor A20, de la marca SIKA, cuya característica principal es el tamaño máximo de partícula, que es inferior a 20 μm frente a los cementos comunes, con tamaño medio de partícula de 100 μm .
- **Suelos inyectados:** Para poder evaluar la influencia de la granulometría en la inyectabilidad de los suelos, se ha optado por trabajar con fracciones granulométricas bien diferenciadas. Además, a partir de cada fracción se puede componer una nueva granulometría mixta con el contenido deseado de cada una. Así, partiendo de un big-bag de arena caliza, se han separado tres fracciones granulométricas, cuyo aspecto se puede ver en la Figura 31:
 - Fracción >2 mm.
 - Fracción comprendida entre 0,5-2 mm.
 - Fracción comprendida entre 0,25-0,5 mm.



Figura 31.- Aspecto de las tres fracciones granulométricas diferenciadas

3.3.3. Descripción de la campaña experimental

Partiendo de los materiales y los equipos descritos, se han llevado a cabo diferentes tipologías de ensayos:

- **Ensayo de porosidad:** En este ensayo se comienza relleno el tubo con la granulometría cuya porosidad se desea determinar. Se conecta el tubo al circuito y el circuito a la acometida de agua, de forma que su posición sea vertical y con la entrada de agua en la parte inferior del tubo. A continuación, y con la ayuda de un cronómetro y un caudalímetro, se registran el tiempo y el caudal de agua inyectados desde que el agua accede al tubo hasta que sale por el otro extremo. Para que los resultados obtenidos sean precisos, el ensayo se realiza a caudal constante, y se fracciona el tubo en tres o cuatro secciones, de forma que se pueden obtener las porosidades en cada uno de esos tramos. La Figura 32 muestra la disposición del ensayo y los tres tramos definidos en ese caso marcados en el propio tubo.

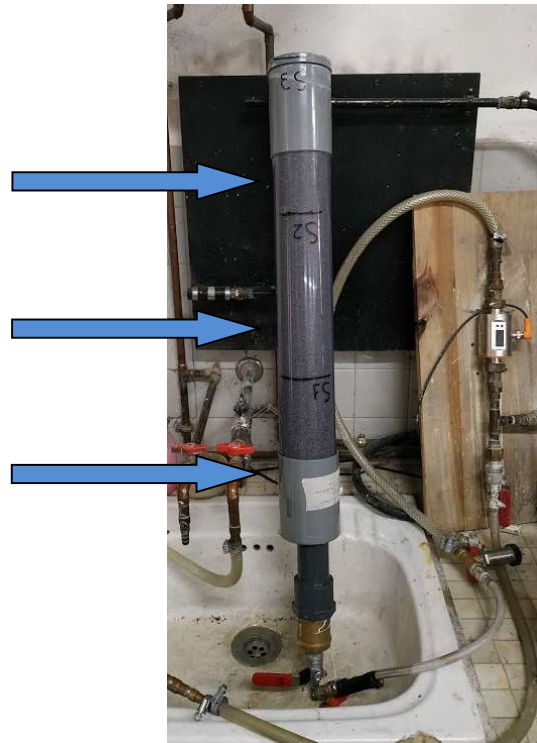


Figura 32. Secciones del tubo para ensayo de porosidad

De esta forma, y conociendo el volumen total del tubo (o de cada tramo), se puede establecer la relación entre el volumen inyectado y la porosidad, ya que el cociente entre el volumen total de agua introducida (que ha ocupado los huecos) y el volumen del tubo será la porosidad, definida como:

$$Porosidad [\%] = \frac{T \cdot Q}{\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L}$$

donde:

T : Tiempo de duración del ensayo [s].

Q : Caudal de ensayo [m³/s].

D : Diámetro del tubo [m].

L : Longitud del tubo [m].

Se realizan previamente a las pruebas de inyección para establecer el punto de partida y posteriormente como indicador de la mejora conseguida.

- **Ensayo de permeabilidad al agua:** Su objetivo es definir la permeabilidad del suelo introducido en el tubo, con el fin de caracterizarlo hidráulicamente de forma previa a la inyección. Los ensayos de permeabilidad pueden realizarse también tras una inyección, con el fin de valorar la mejora que

se produce. Una vez que el tubo se ha rellenado, se dispone en posición vertical y se conecta al circuito auxiliar, saturando el material de agua. El regulador de presión se tara a cuatro o cinco presiones distintas durante el ensayo. Estas presiones se seleccionan uniformemente distribuidas entre el gradiente de presiones máximo, generado a máximo caudal, y presión cero (atmosférica). Los escalones de presión mencionados se pueden observar en la Figura 33, donde se representa la presión en función del tiempo a lo largo de un ensayo. Se pueden distinguir en la gráfica tres zonas diferenciadas por colores. Las zonas de color azul y verde se corresponden con la apertura y cierre del circuito de paso de agua. La zona de color rojo se corresponde con los tramos de presión preestablecidos. Serán estos valores los que se empleen para determinar la permeabilidad del suelo ensayado.

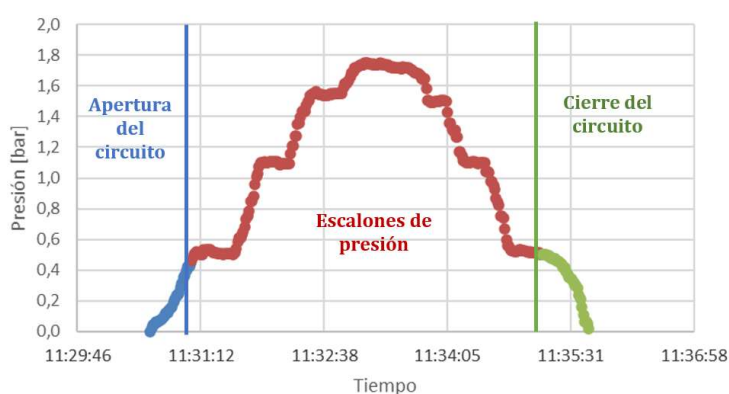


Figura 33.- Ejemplo de escalones de presión durante un ensayo de permeabilidad

Los datos de presión y caudal registrados se representan gráficamente (véase la Figura 34). Realizando un ajuste lineal y conociendo la sección del tubo, se puede determinar el valor promedio de la permeabilidad la zona de escalones intermedios de presión.

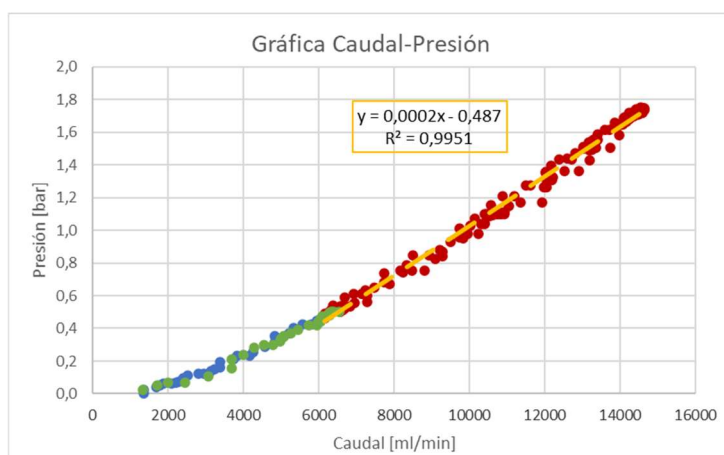


Figura 34.- Gráfica de evolución de la presión frente al caudal durante un ensayo de permeabilidad

- **Ensayo de inyección de lechada:** En este caso se utiliza la bomba de inyección. La preparación de la lechada requiere de la determinación de las dosificaciones de cada materia prima necesaria (agua y cemento), las cuales se amasan mediante un amasador de paletas durante seis minutos. El recipiente de amasado se cambia hasta en tres ocasiones (2 minutos por recipiente), para asegurar que la mezcla entre el agua y cemento es homogénea. A continuación, se conecta el tubo de PVC GLASS a la máquina de inyección a través del circuito y se procede a la inyección de la lechada. En una primera fase se aumenta gradualmente la potencia de la máquina (mediante el potenciómetro que lleva incorporado en el circuito eléctrico) durante 12 segundos hasta alcanzar su valor máximo. Durante la inyección se controla el caudal y presión en todo momento y se graba la evolución del frente de inyección. Una vez finalizado el ensayo se apaga la bomba y se inicia la limpieza. Para ello se hace circular agua por el circuito, del que se ha retirado el tubo con la muestra, durante un periodo de tiempo de unos 5 minutos. Los suelos así inyectados se dejan fraguar durante al menos 48 horas y después se evalúa de nuevo su porosidad y permeabilidad, y se someten a nuevas pruebas:
 - Se analiza el resultado de la inyección, para lo cual se extrae el material y se realizan diferentes pruebas de resistencia, así como un análisis cualitativo con lupa binocular.
 - Se reinyectan con nuevas lechadas más densas y viscosas.
- **Ensayos de arrastre y lavado:** Con estos ensayos se pretende estudiar el proceso de arrastre de partículas que tiene lugar cuando en un suelo se produce un flujo de agua. Esta situación se da, por ejemplo, cuando se realiza una excavación en un suelo saturado y se crea un gradiente de presión que moviliza el agua a una cierta velocidad. El arrastre de partículas puede generar un aumento de la porosidad y consecuentemente de la permeabilidad, magnificando los problemas de aporte de agua. El ensayo comienza disponiendo un tubo horizontal cargando con el suelo a ensayar (Figura 35). En el tubo, en esta ocasión, se disponen dos llaves de paso, una en la zona de entrada de fluido y otra en la zona de salida. Con ambas llaves cerradas, se abre la llave de entrada y se permite la entrada de agua hasta una presión predeterminada, saturando el material y manteniendo unos minutos esta situación, como punto de partida. Después se abre la llave de salida el agua permitiendo la salida del agua, que arrastra una parte del material (las granulometrías más finas), recogiendo todos los efluentes, de los que se separa la fracción sólida para ser pesada. El proceso se repite varias veces si se considera oportuno.



Figura 35.- Disposición del ensayo de lavado

En la Tabla 5 se resumen las pruebas llevadas a cabo:

Tipo de suelo	Inyección	Ensayos y objetivo
Granulometría >2 mm	Sin inyección	Ensayos de porosidad y permeabilidad
	Cemento 2:1	Análisis de la inyección Inyección vertical/horizontal
	Cemento 1,5:1	Análisis de la inyección
	Cemento 1,25:1	Análisis de la inyección
	Progresiva 2:1 1,5:1 1,25:1	Ensayos de porosidad y permeabilidad tras cada reinyección
Granulometría 0,5-2 mm	Sin inyección	Ensayos de porosidad y permeabilidad
	Inyección cemento 2:1	Análisis de la inyección
	Microcemento 2:1	Análisis de la inyección, Ensayos de porosidad y permeabilidad Inyección y lavado
	Microcemento 1,5:1	Análisis de la inyección
	Microcemento 1,25:1	Análisis de la inyección
Granulometría 0,25-0,5 mm	Sin inyección	Ensayos de porosidad y permeabilidad
	Microcemento 2:1	Análisis de la inyección
75% > 2 mm, 25% entre 0,250-0,063 mm	Sin inyección	Ensayos de arrastre y lavado
25% entre 0,5-2 mm 25% entre 0,250-0,063 mm	Sin inyección	Ensayos de arrastre y lavado
25% >2 mm 50% entre 0,5-2 mm 25% entre 0,063-0,25 mm	Sin inyección	Ensayos de arrastre y lavado
50% > 2 mm 25% entre 0,5-2 mm 25% entre 0,063-0,25 mm	Sin inyección	Ensayos de arrastre y lavado

Tabla 5. Resumen de los ensayos efectuados

3.3.4. Caracterización inicial de los suelos a ensayar

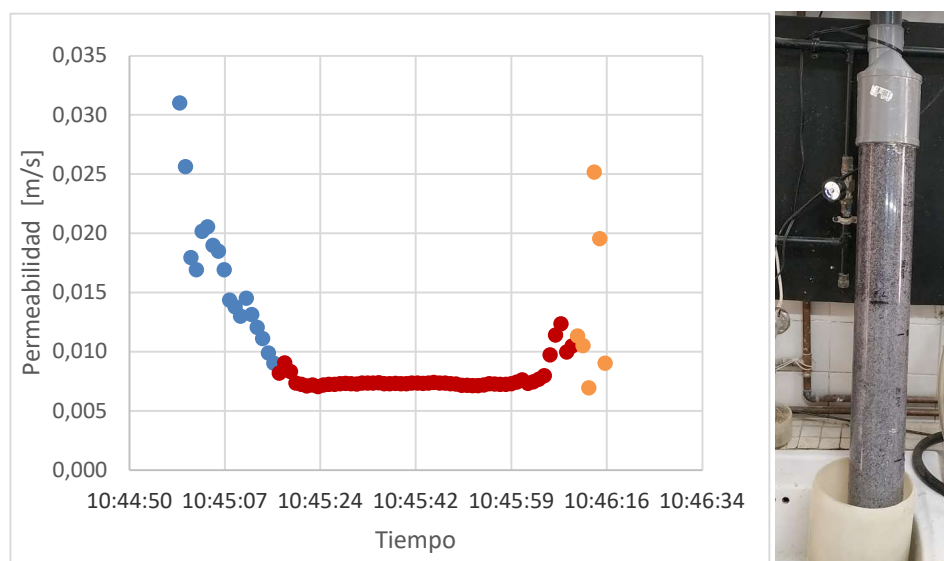
Como ya se ha comentado, en primer lugar, se han separado diferentes fracciones granulométricas de una arena caliza para poder analizar cómo afecta a la inyectabilidad. Estas fracciones fueron caracterizadas mediante ensayos de porosidad y permeabilidad (siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.3) para establecer el punto de partida de cada tratamiento posterior.

Respecto a la porosidad de la granulometría $> 2\text{mm}$, se estima ésta a lo largo de cuatro tramos del tubo (H1 a H4, siendo H1 la zona más cercana al punto de inyección de agua y H4 la más alejada). Los resultados obtenidos para estos cuatro tramos se recogen en la Tabla 6. El valor medio es de $35,25\%$.

Porosidad (%) por tramos ($> 2\text{ mm}$)	
H1	33,46
H2	38,24
H3	33,46
H4	35,85
Media	$35,25 \pm 2,29$

Tabla 6. Valores de porosidad por tramos en granulometría $> 2\text{ mm}$

En la Figura 36 se ve presenta la gráfica utilizada para determinar la permeabilidad de la granulometría $> 2\text{ mm}$. El valor promedio de la zona en rojo de la gráfica, que corresponde a los escalones de presión es de $7,7 \cdot 10^{-3}\text{ m/s}$.



Suelo	Porosidad (%)	Permeabilidad (m/s)
> 2mm	35,25±2,29	7,7·10 ⁻³ m/s
0,5-2 mm	28,90±1,47	2,3·10 ⁻³ m/s
0,25-0,5 mm	24,65±1,95	1,1·10 ⁻⁴ m/s

Tabla 7.- Valores de porosidad y permeabilidad de los suelos ensayados

A nivel práctico, en la ejecución de los trabajos en la obra del Túnel de Urdinbide (Capítulo V) se plantea la hipótesis de que una presión de inyección elevada puede ocasionar un aumento de la presión en determinadas zonas del acuífero, por lo que el gradiente hidráulico disponible para generar estos arrastres puede verse incrementado con el propio proceso de inyección

Para corroborar esta hipótesis se hicieron en el laboratorio, con los equipos y metodología descritos anteriormente, una serie de pruebas que se describen a continuación.

Para llevar a cabo los ensayos se ha tenido en cuenta la proporción de finos que se encuentran en los bancos de arenas (40-70%) y que es donde se produce el aporte de agua. Se realizaron cuatro ensayos con un material creado en laboratorio a partir de las fracciones granulométricas del material original procedente de la obra del túnel de Urdinbide. Las pruebas se han llevado a cabo con las combinaciones de las fracciones granulométricas recogidas en la Tabla 8.

Ensayo	Peso total (kg)	Granulometría (mm)	Porcentaje (%)	Peso fracciones (kg)
1	5,2	0,063 – 0,250 > 2	25 75	1,3 3,9
2	6,0	0,063 – 0,250 0,5-2	25 75	1,5 4,5
3	6,0	0,063-0,250 0,5-2 >2	25 50 25	1,5 3,0 1,5
4	6,0	0,063-0,250 0,5-2 >2	25 25 50	1,5 1,5 3,0

Tabla 8.- Fracciones granulométricas y porcentajes de las muestras ensayadas (tolerancia ±5 g)

1. El primer ensayo se realizó con aproximadamente 5 kg de suelo compuesto por dos fracciones diferentes (>2 mm; 0.063 - 0.250 mm). Tras un primer lavado, se recogen 0,537 kg de material arrastrado, es decir un 10.3% del material total y un 41% de las arenas más finas. A continuación, se realizó un segundo lavado con el material que aún permanece en el tubo, en el que se recogen otros 0,031 kg de material de granulometría fina. Es decir, de la fracción más fina introducida en

el tubo, el 50% es arrastrado en tan solo dos minutos con un gradiente hidráulico de 0,5 MPa (Tabla 9).

	1 ^{er} lavado		2 ^o lavado	
	kg	%	kg	%
Material que sale	0,537	41,32	0,031	2,38
Material que permanece	4,671	58,68	4,640	56,30

Tabla 9.- Resumen de los resultados del primer ensayo (tolerancia de ± 5 g)

- En el segundo ensayo se sustituye la fracción más gruesa (>2 mm) por una fracción de menor granulometría (0,5 - 2 mm). Sin embargo, no se aprecia arrastre para gradientes hidráulicos de 0,5 MPa ni de 0,9 MPa, es decir, la permeabilidad inicial de estos materiales es demasiado baja para que el agua circule con suficiente velocidad como para que los finos puedan ser arrastrados.
- En el tercer ensayo se analiza el arrastre de un suelo intermedio entre los dos ensayos anteriores y se estudia el efecto que el arrastre provoca en la permeabilidad. Se realizan cuatro lavados de un minuto cada uno sometiendo el tubo a una presión de 0,5 MPa entre cada lavado. La Tabla 10 muestra que, de la fracción fina, el 82,29 % permanece dentro del tubo, mientras que el resto es extraído en el efluente de salida.

	1 ^{er} lavado		2 ^o lavado		3 ^{er} lavado		4 ^o lavado	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
Material que sale	0,006	0,43	0,005	3,94	0,127	8,49	0,073	4,84
Material que permanece	5,994	99,57	5,987	95,63	5,860	87,14	5,787	82,29

Tabla 10.- Resumen de los resultados del tercer ensayo (tolerancia de ± 5 g)

- Se lleva a cabo un cuarto ensayo con las mismas fracciones granulométricas que en el ensayo anterior, pero variando los porcentajes de dichas fracciones. Se realizan cuatro lavados de 1 minuto con gradientes hidráulicos de 0,5 MPa entre cada lavado. La Tabla 11 muestra que, de la fracción fina, el 72,83% permanece dentro del tubo, mientras que el resto es extraído en el efluente de salida.

	1 ^{er} lavado		2 ^o lavado		3 ^{er} lavado		4 ^o lavado	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
Material que sale	0,02	1,26	0,01	7,69	0,25	16,80	0,02	1,41
Material que permanece	5,98	99,98	5,96	91,05	5,72	74,25	5,69	72,83

Tabla 11.- Resumen de los resultados del cuarto ensayo (tolerancia de ± 5 g)

La evolución de la permeabilidad llevada a cabo en los suelos 3 y 4 (Tabla 12) muestra el mismo comportamiento en ambos casos. Un aumento brusco de la permeabilidad entre los minutos 2 y 3 relacionado con un incremento en la masa de finos saliente. Estos resultados muestran que cuando se realizan más de dos lavados, la permeabilidad de las arenas tratadas aumenta y, por tanto, las permeabilidades de las zonas a inyectar pueden sufrir grandes variaciones provocadas por la inyección a

alta presión de otras zonas del túnel. Por tanto, es necesario un control exhaustivo de la presión de inyección para evitar el arrastre de material fino y el aumento de la permeabilidad.

	Ensayo 3			Ensayo 4		
	Permeabilidad (m/s)	Volumen (l)	Finos (kg)	Permeabilidad (m/s)	Volumen (l)	Finos (kg)
1º Minuto	1,13 x 10 ⁻⁵	0,21	0,006	2,29 x 10 ⁻⁵	0,20	0,019
2º Minuto	1,04 x 10 ⁻⁵	0,20	0,005	1,42 x 10 ⁻⁵	0,25	0,011
3º Minuto	6,65 x 10 ⁻⁴	11,91	0,127	1,05 x 10 ⁻³	14,71	0,252
4º Minuto	6,49 x 10 ⁻⁴	11,86	0,073	1,06 x 10 ⁻³	14,41	0,021

Tabla 12. Evolución de la permeabilidad en el tercer y cuarto ensayo

CAPITULO IV – ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Durante los trabajos de experimentación de esta investigación en el proyecto de subvención innovadora del CDTI denominado IMPETU, se han realizado ensayos de dosificación agua/cemento y su aplicación en suelos de diferente granulometría, analizándose a continuación todos los resultados obtenidos.

4.1. INYECCIONES DE CEMENTO EN GRANULOMETRÍA > 2 mm

Se analizan en primer lugar los ensayos de influencia de la dosificación agua/cemento en la inyectabilidad de este tipo de suelos. Se sabe que, a mayor contenido en cemento, mayor viscosidad, mayor densidad y por tanto menor inyectabilidad.

4.1.1. Influencia de la dosificación agua/cemento

Para cuantificar el comportamiento de las lechadas se rellenan tres tubos distintos con la misma fracción granulométrica > 2 mm y se realizan tres ensayos de inyección distintos con dosificaciones agua/cemento de 2:1, 1,5:1 y 1,25:1 respectivamente. No se han podido ensayar lechadas más densas por producirse atascos en el circuito de inyección en la zona del caudalímetro de la bomba de inyección empleada en laboratorio. Las propiedades de estas lechadas se recogen en la Tabla 13, junto con los resultados más representativos de las pruebas.

Relación agua/cemento	2:1	1,5:1	1,25:1
Densidad (t/m ³)	1,12	1,27	1,49
Presión Máxima ensayo (Bar)	3,52	5,35	6,37
Caudal Máximo (l/min)	12,64	9,96	5,43
Caudal másico (kg/min)	14,18	12,65	8,14
Porcentaje de huecos inyectado	75,8	64,4	64,3

Tabla 13.- Comparativa de resultados en función de la relación agua/cemento (>2 mm)

En la Figura 37 se ha representado la evolución de la presión, el caudal y el volumen inyectado durante el ensayo de lechada 2:1 en este tipo de suelo. Los puntos en azul representan las medidas anteriores a alcanzar la máxima potencia en la bomba de inyección. Analizando con más detalle las gráficas, se observan dos zonas bien diferenciadas. En la primera de ellas se aprecia una subida progresiva en el caudal inyectado, que se refleja en una progresión lineal del volumen de lechada, pero no supone cambios en la presión de

inyección. Sin embargo, una vez alcanzados caudales de 210 ml/s (unos 12 l/minuto), se produce un cambio importante, puesto que el caudal admitido cae rápidamente hasta unos 50 ml/s, al mismo tiempo que comienza a subir la presión. Esta situación perdura durante unos 30 segundos, cuando la subida de presión se hace muy rápida. Durante ese tiempo, el volumen inyectado crece con una pendiente constante, pero inferior a la del primer tramo.

Este cambio puede interpretarse como la inyección de poros a dos niveles. En el primer tramo se accede a los poros más fáciles de acceder o a los de mayores dimensiones, mientras que, en el segundo, una vez llenos los poros de acceso más fácil se consigue acceder a otro nivel, pero a costa de incrementar la presión.

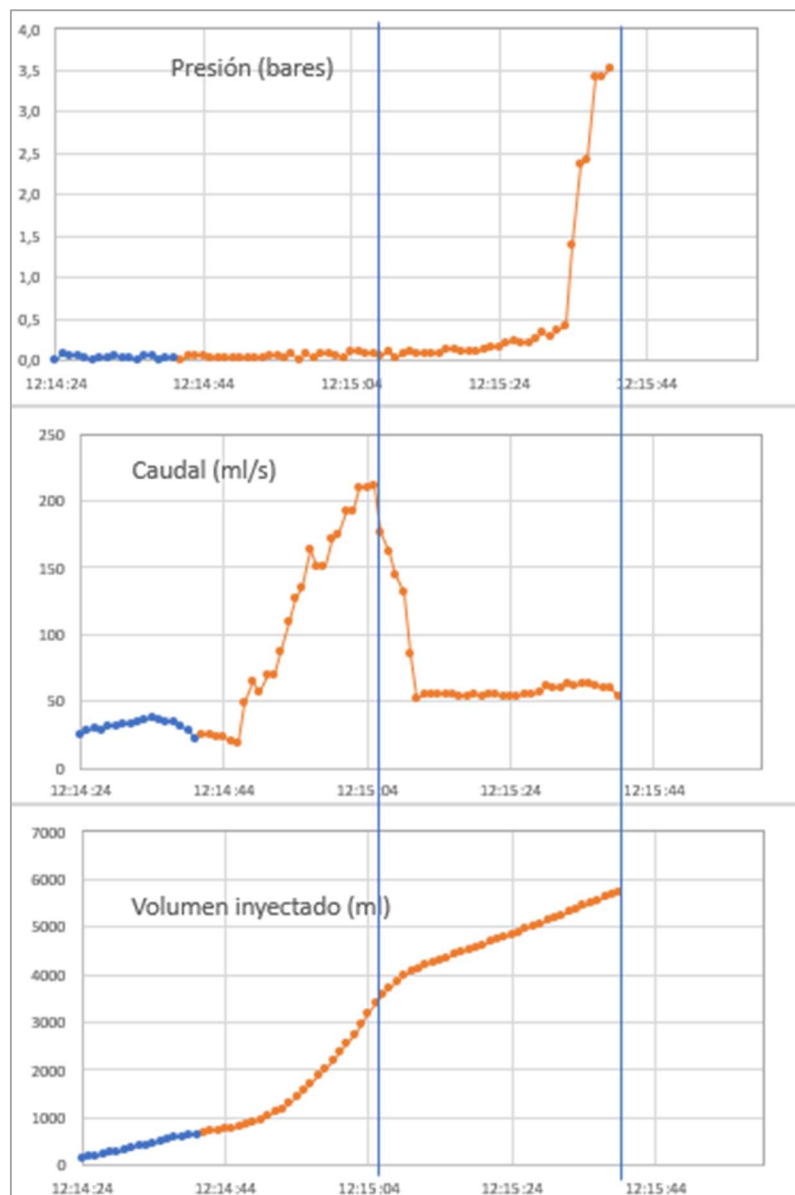


Figura 37.- Ensayo de inyección de lechada 2:1 (>2 mm)

Desde que la lechada entra en el tubo hasta que empieza a salir por el otro extremo, se introducen 1,54 litros de material, de forma que considerando una porosidad media del 35,3% se puede estimar que en el primer tramo de inyección se rellena el 75,8 % de los poros.

Tras la inyección, se deja fraguar el material para estimar la mejora inducida, procediéndose a realizar nuevas pruebas de porosidad y permeabilidad, cuyos resultados se pueden ver en la Tabla 14. La porosidad se reduce entorno a un 9% y la permeabilidad descende un orden de magnitud

Estado	Porosidad (%)	Permeabilidad (m/s)
Inicial	35,25±2,29	$7,7 \cdot 10^{-3}$
Tras inyección	26,49±2,90	$9,5 \cdot 10^{-4}$

Tabla 14.- Mejora en la permeabilidad y porosidad tras inyectar la lechada 2:1 en granulometría >2 mm

Tras estos ensayos se corta el tubo de PVC para poder acceder al material mejorado. En la Figura 38 se puede observar el aspecto del mismo.



Figura 38.- Aspecto de la granulometría > 2 mm tras la inyección 2:1

Se aprecian cambios significativos con la distancia al extremo por el que tuvo lugar la inyección:

1. El material se fragmenta al extraerlo, disminuyendo el tamaño de los fragmentos con la distancia a la inyección, o lo que es lo mismo, aumenta la densidad de fracturas. Estableciendo una equivalencia con el RQD (Rock Quality Design) de un macizo rocoso, este se reduce progresivamente y pasa del 100 % en la primera mitad a menos del 50 % en la segunda.
2. El contenido en matriz cementante es menor en la parte final del tubo. Esto se comprueba cualitativamente por la facilidad con la que se disgregan los granos en esa zona respecto al extremo opuesto.
3. Se tomaron muestras en ambos extremos y en la zona central con el fin de analizarlas al microscopio y evaluar su resistencia cuando esto fuera posible mediante ensayos de carga puntual tipo Franklin. En la Tabla 15 se resumen los resultados obtenidos.

Zona	Índice de carga puntual (MPa)	Densidad (t/m ³)
Próxima inyección	2,03	1,26
Central	1,49	1,28
Alejada de la inyección	-	1,26

Tabla 15.- Resultados del análisis por tramos (lechada 2:1 en granulometría > 2 mm)

Además, también se aprecia heterogeneidad en la distribución de la lechada en una misma sección, siendo mayor la proporción de la misma en la zona central y disminuyendo hacia los bordes (véase la Figura 39).



Figura 39.- Distribución de la inyección en una sección para lechada 2:1 (>2 mm)

El ensayo descrito se llevó a cabo con el tubo en vertical, razón por la cual es posible que la influencia de la gravedad haya podido afectar a los resultados, puesto que una parte de la lechada puede haber fluido al exterior tras el cese de la inyección. Por ese motivo se decidió efectuar una segunda prueba de inyección con el tubo en posición horizontal.

4.1.2. Influencia de la dirección de inyección

En la Figura 40 se pueden ver las gráficas correspondientes al proceso de inyección en esta posición horizontal. Puede comprobarse como, una vez alcanzada la máxima potencia de la bomba (puntos en naranja) el proceso es bastante regular, tanto en lo referente a presiones como a caudales, existiendo un único tramo en la curva de evolución de volumen inyectado frente al tiempo. Respecto a la presión, si bien se aprecia un pico de más de 6 bares al inicio de ensayo y otro de 4,3 bares una vez alcanzada la potencia máxima, tiende a regularizarse en torno a 2,5 bares.

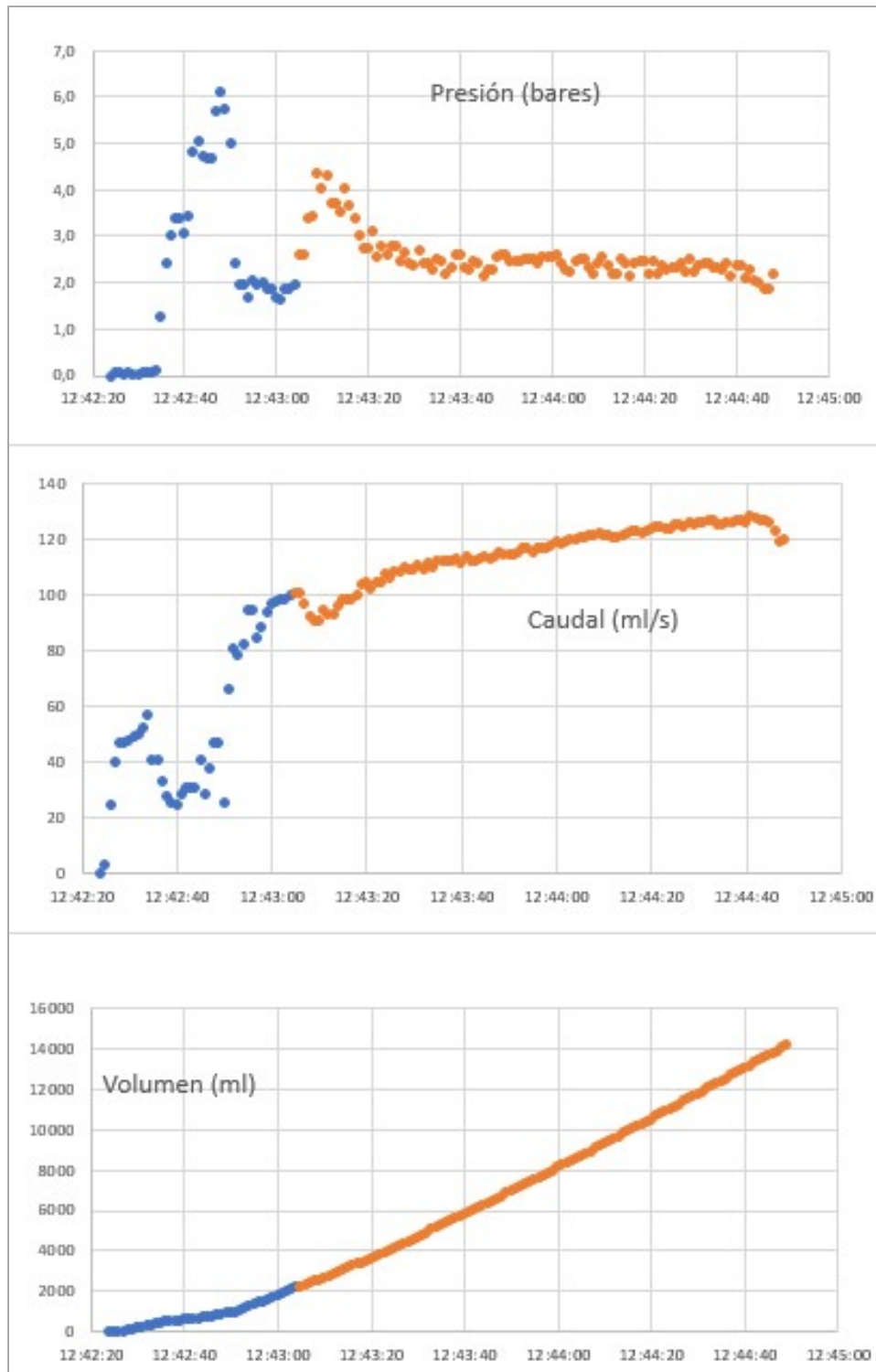


Figura 40.- Ensayo de inyección de lechada 2:1 (>2 mm) con tubo horizontal

En la Figura 41 se han comparado los volúmenes inyectados en el tiempo en posición vertical (gráfica con dos tramos) y posición horizontal (un único tramo). El resultado final resulta muy similar, si bien con el tubo horizontal la evolución es más regular. Los dos tramos del ensayo vertical sugieren que primero se produce el llenado de los huecos en la zona central a lo largo de todo el tubo (dirección que se ve favorecida por la gravedad) y que luego progresa lateralmente, es decir, que el frente de inyección no es uniforme.

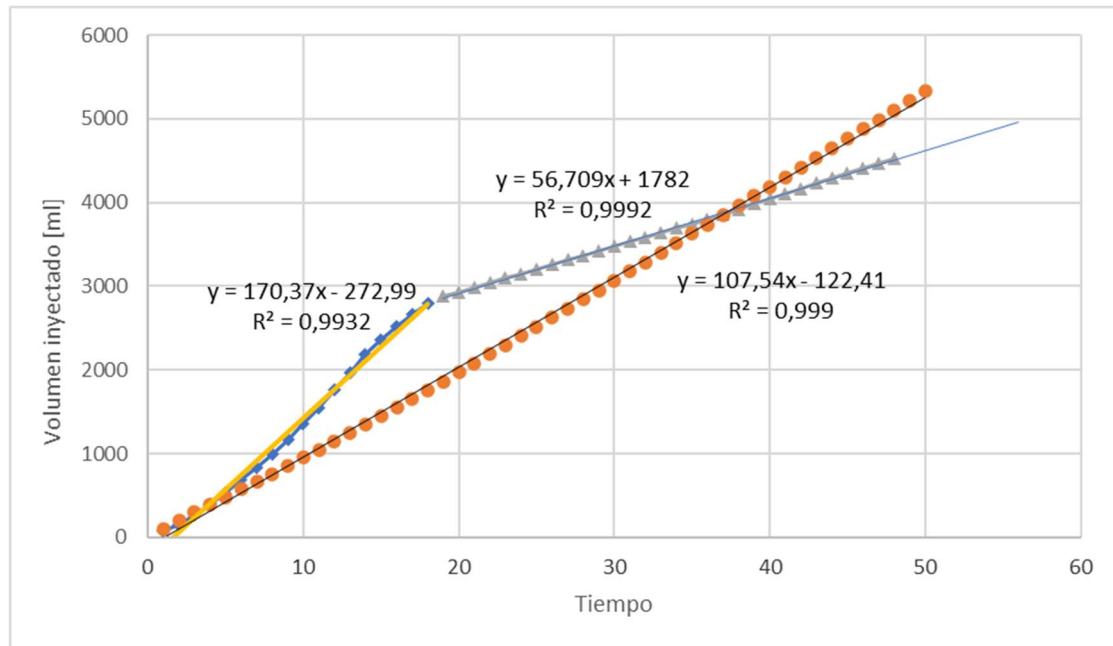


Figura 41.- Comparativa de la inyección de lechada 2:1 (>2 mm) con tubo vertical y horizontal

En cuanto a la evolución de la permeabilidad, en este caso no se produce una reducción tan importante con la inyección, ya que se tienen $4,8 \cdot 10^{-3}$ m/s, frente a los $9,5 \cdot 10^{-4}$ m/s que se obtuvieron con el tubo en vertical, si bien esta cifra supone una reducción de más del 37 % respecto a la permeabilidad inicial.

Cuando se cambia la densidad de las lechadas, aumentando la proporción de cemento se observa como aumenta la presión necesaria para la inyección al mismo tiempo que disminuye el caudal máximo de inyección (véase la Tabla 13) y el volumen de poros accesible. Esta evolución se ha representado en la Figura 42, apreciándose el buen nivel de ajuste obtenido.

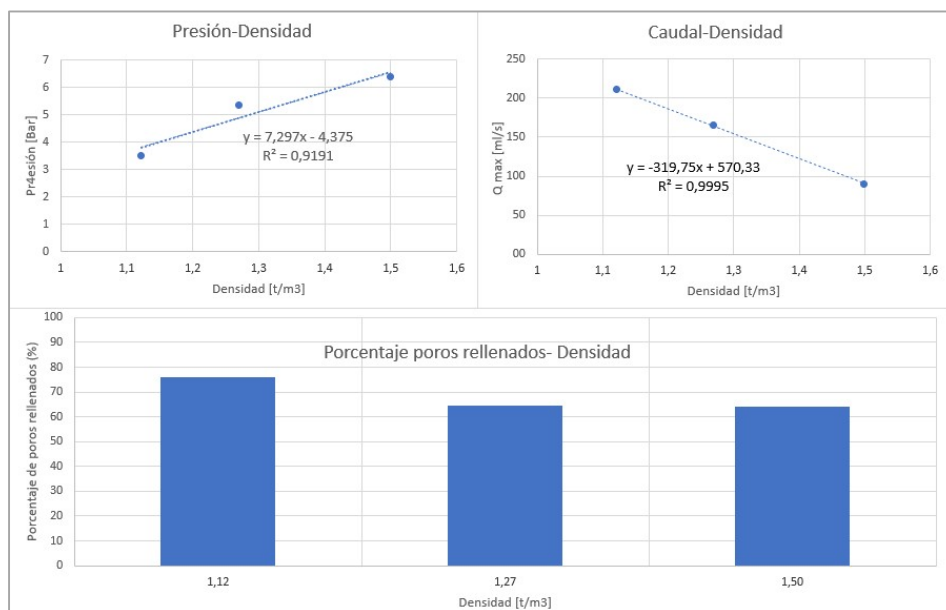


Figura 42.- Presión, caudal y volumen de poros accesible en función de la densidad de la lechada (> 2 mm)

Si se compara la evolución del volumen de material inyectado en las tres lechadas frente al tiempo, se tiene la gráfica de la Figura 43. Para una mejor comprensión, se representan solo los tramos correspondientes a la bomba funcionando a pleno rendimiento y se ha considerado el mismo origen de tiempos. La pendiente de cada uno de estos tramos representaría un caudal medio o característico del material para cada lechada, que va disminuyendo al aumentar su densidad. En negro, se ha representado la gráfica correspondiente al agua.

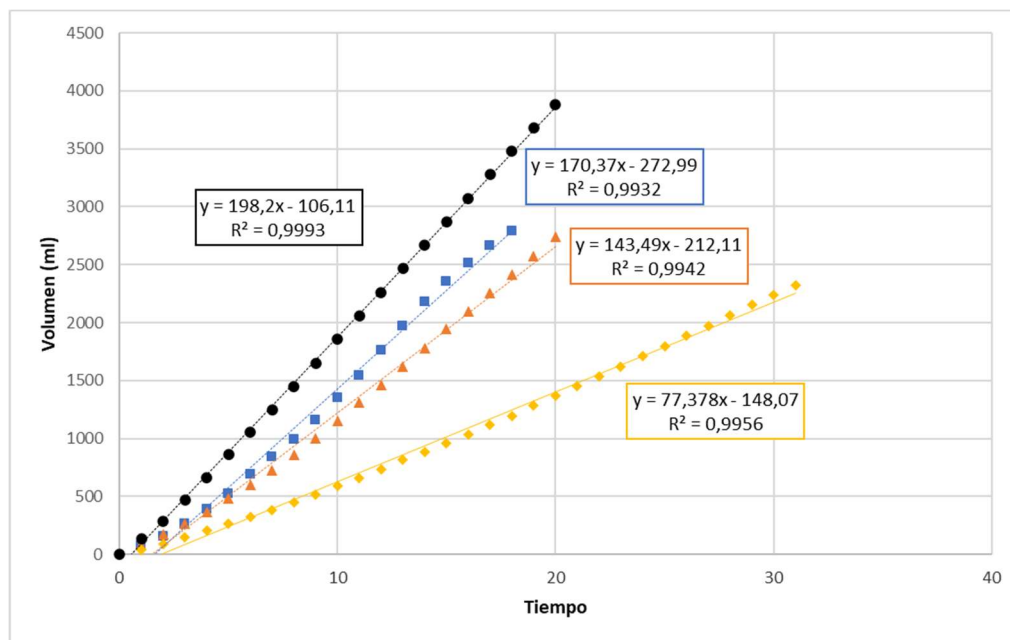


Figura 43.- Velocidad de inyección en función del tipo de lechada

4.1.3. Efecto de las inyecciones progresivas

En los trabajos de impermeabilización de suelos es habitual llevar a cabo inyecciones en las que progresivamente se va aumentando la densidad de la lechada, aumentando el contenido en cemento y reduciendo por tanto la relación agua/cemento. Se ha llevado a cabo una prueba en el laboratorio con el fin de comprobar cómo se desarrolla este tipo de tratamiento y cuál es la evolución en la porosidad y permeabilidad.

Para ello, se parte de un tubo de ensayo de 1 m de longitud relleno de material con granulometría > 2 mm y se inyecta con una lechada tipo 2:1, se deja fraguar y se comprueba su porosidad y permeabilidad. Seguidamente se reinyecta con una lechada más densa, con relación agua/cemento 1,5:1 y se vuelve a dejar fraguar. En este caso se comprueba como no ha habido una penetración total, si no que este material más

denso alcanza aproximadamente la mitad de la longitud del tubo. Se vuelve a determinar su porosidad y permeabilidad antes de reinyectarla nuevamente, esta vez con lechada 1,25:1, comprobándose como penetra aún una menor longitud. Tras comprobar el efecto de esta tercera inyección en el suelo, se intenta llevar a cabo una nueva prueba con el mismo tipo de lechada 1,25:1, pero no hay penetración apreciable en este caso.

Estado	Permeabilidad (m/s)	Longitud de penetración (cm)	Presión máxima (bar)	Caudal representativo (ml/s)
Inicial	$7,7 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
Inyección 2:1	$9,5 \cdot 10^{-4}$	1,05	4,7	165
Inyección 1,5:1	$7,5 \cdot 10^{-5}$	60	11,6	75
Inyección 1,25:1	$3,2 \cdot 10^{-5}$	25	15,2	30

Tabla 16.- Mejora en la permeabilidad inyectando sucesivas lechadas

También se puede ver en la Tabla 16, la reducción porcentual en el caudal medio de entrada de cada una de las lechadas como consecuencia de su mayor densidad y de la inyección previa.

4.2. INYECCIONES EN GRANULOMETRÍA 0,5 A 2 mm

Para esta fracción granulométrica, el análisis comenzó con la inyección de una lechada de cemento 2:1. Sin embargo, se pudo comprobar, como no se consigue que el material recorra toda la longitud del tubo de ensayo, quedando una zona sin impregnar (véase la Figura 44).



Figura 44.- Aspecto del material tras el ensayo, con solo la parte inicial impregnada

Como puede verse, no hay una progresión regular del frente de avance, que alcanza una longitud máxima de unos 47 cm y mínima de unos 30 cm. Se tomaron muestras a lo largo de cuatro tramos para evaluar sus diferencias, que se analizan en la Tabla 17.

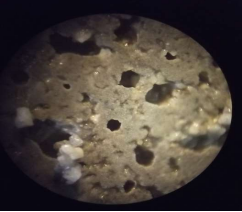
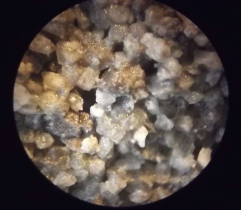
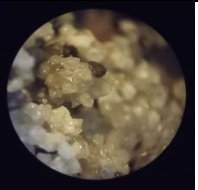
Tramo	Observaciones	Fotografías
0-20 cm	Fragmentos consistentes (bloques) con resistencia a compresión simple estimada con penetrómetro de mano de unos 0,3 MPa. Aspecto homogéneo de visu y en lupa binocular	 
20-40 cm	Fragmentos consistentes (bloques) con resistencia a compresión simple estimada con penetrómetro de mano de unos 0,1 MPa. Aspecto no homogéneo en lupa binocular, con mayor contenido en cemento en zona central.	 
40-60 cm	Arenas compactadas por la presión de inyección, con resistencia a compresión simple estimada con penetrómetro de mano de unos 0,04 MPa. No se aprecia cementación ni de visu ni en lupa.	 
>60 cm	Arenas sueltas, con resistencia a compresión simple estimada con penetrómetro de mano de menos de 0,02 MPa. No se aprecia cementación ni de visu ni en lupa.	 

Tabla 17.- Resumen de resultados del análisis de la inyección de cemento en la fracción 0,5-2 mm

Analizando el proceso de inyección se observa cómo, si bien la inyección parece comenzar de forma normal, se llega a un punto en el cual disminuye significativamente el caudal al tiempo que la presión crece de forma muy rápida (véase la Figura 45).

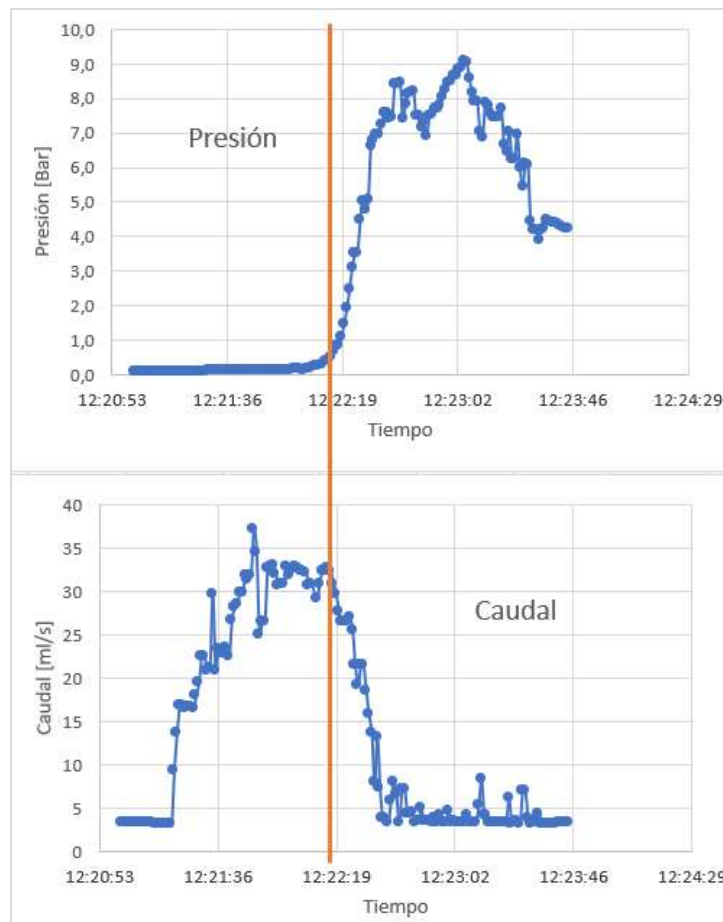


Figura 45.- Proceso de inyección de cemento en granulometría 0,5-2 mm

Puede verse como se alcanza una presión de 7 bares al tiempo que el caudal es prácticamente cero. Aunque la presión sube hasta 9 bares al aumentar la potencia del equipo de bombeo, no se consigue reactivar la inyección. Este ensayo se repitió una segunda vez con resultado prácticamente idéntico.

A la vista de estos resultados de baja penetrabilidad, se decidió iniciar las pruebas de inyección con microcementos, que se llevaron a cabo con dosificaciones agua/cemento 2:1, 1,5:1 y 1,25:1. El microcemento utilizado fue un SPINOR A20. La primera prueba se realizó con la dosificación 2:1, que consiguió penetrar completa y uniformemente toda la longitud de suelo (1 m). En la Figura 46 se puede observar el aspecto del material tras la inyección y fraguado. Se tomaron muestras de las dos zonas extremas y la central para su análisis y ensayo. En la Tabla 18 se resumen las características más importantes observadas en estas muestras.



Figura 46.- Inyección de microcemento 2:1 en granulometría 0,5-2 mm

Si se compara cualitativamente el resultado de esta inyección con la realizada en las arenas de tamaño > 2 mm con cemento en dosificación 2:1, puede comprobarse como con el microcemento se consigue un resultado más homogéneo (véase la Figura 47), con una distribución más uniforme, que permite dotar a todo el conjunto de una mayor cohesión, sin que se disgreguen granos.



Figura 47.- Comparación de una inyección de microcemento y cemento

Se tomaron muestras de las dos zonas extremas y la central para su análisis y ensayo.

Tramo	Observaciones	Fotografías
Inicial	Fragmentos consistentes (bloques): • Densidad: 1,38 t/m³ • Resistencia a compresión: 1,1 MPa • Carga puntual: 2,7 MPa • Resistencia a tracción: 0,8 MPa Aspecto no homogéneo con mayor contenido de microcemento en la zona central.	
Central	Fragmentos consistentes (bloques): • Densidad: 1,41 t/m³ • Carga puntual: 3,3 MPa • Resistencia a tracción: 1,9 MPa Aspecto homogéneo.	
Final	Fragmentos consistentes (bloques): • Densidad: 1,34 t/m³ • Carga puntual: 3,6 MPa • Resistencia a tracción: 1,0 MPa Aspecto no homogéneo con mayor contenido de microcemento en la zona central.	

Tabla 18.- Características más relevantes de las arenas 0,5 - 2 mm inyectadas con microcemento 2:1

Respecto a las modificaciones en las propiedades hidráulicas, se consigue una reducción de casi un 8% en la porosidad y de un orden de magnitud en la permeabilidad (Tabla 19).

Estado	Porosidad (%)	Permeabilidad (m/s)
Inicial	28,90±1,47	2,3·10 ⁻³ m/s
Inyección microcemento	21,19±3,86	5,8·10 ⁻⁴ m/s

Tabla 19.- Valores de porosidad y permeabilidad tras la inyección de microcemento

4.2.1. Influencia de la dosificación de microcemento

Cuando se cambia la densidad de las lechadas, aumentando la proporción de microcemento se observa como aumenta la presión necesaria para la inyección al mismo tiempo que disminuye el caudal máximo de inyección y el volumen de poros accesible. Esta evolución se ha representado en la Figura 48, apreciándose el buen nivel de ajuste obtenido.

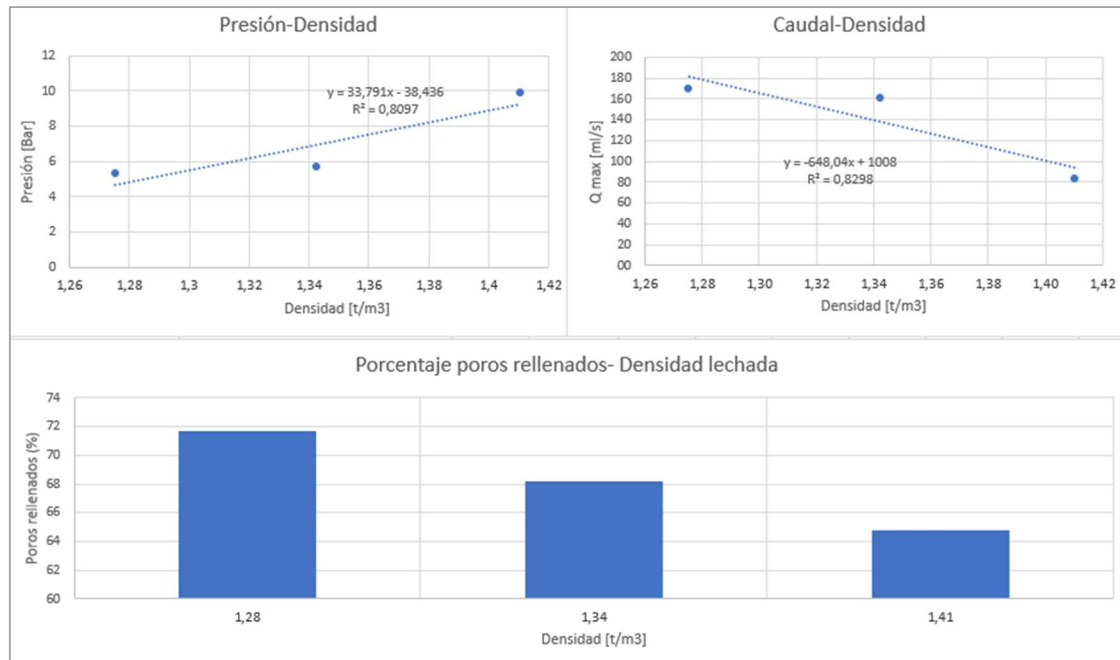


Figura 48.- Presión, caudal y volumen de poros accesible en función de la densidad de lechada de microcemento (0,5 - 2 mm)

4.2.2. Permanencia de la mezcla en el suelo (lavado)

También se ha llevado a cabo una prueba de estabilidad de la mezcla de microcemento en el interior del suelo y la resistencia a su lavado. Para ello, tras la inyección de microcemento con dosificación 2:1 en la fracción granulométrica 0,5-2 mm, se ha lavado el material inyectando agua a una presión de 2,5 bares durante un minuto (simulando el cese de la inyección y el retorno del agua a la zona tras este cese). Por último, se deja el material fraguando durante cinco días y se determina su permeabilidad (véase la Tabla 20). Como puede verse, el proceso de lavado posterior afecta a la impregnación, ya que la permeabilidad del terreno lavado es mayor que la del terreno sin lavar,

Estado	Permeabilidad (m/s)
Inicial	$2,3 \cdot 10^{-3}$ m/s
Inyección microcemento SIN lavado	$5,8 \cdot 10^{-4}$ m/s
Inyección microcemento CON lavado	$1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s

Tabla 20.- Valores de permeabilidad antes y después de la inyección de microcemento y el lavado

Si bien el ensayo de lavado ha sido muy intenso (un minuto a 2,5 bares de presión, lo que equivale a caudales de 9 litros/minuto), una parte importante del microcemento permanece impregnando el material.

Esto se comprueba también observando el proceso, ya que, desde prácticamente el primer momento, el fluido que se extrae del tubo es agua (véase la figura 49).



Figura 49.- Imágenes del ensayo: izquierda a los 2 s de iniciarlo, derecha a los 4 s del inicio

4.3. INYECCIONES EN GRANULOMETRÍA 0,25-0,50 mm

En este material se optó por iniciar las pruebas ya directamente con microcemento en relación agua/cemento 2:1, puesto que en la fracción granulométrica superior ya no se consiguió una impregnación completa con el cemento. Con este tratamiento se consigue reducir la permeabilidad aproximadamente a la mitad (Tabla 21).

Estado	Permeabilidad (m/s)
Inicial	$1,1 \cdot 10^{-4}$ m/s
Inyección microcemento 2:1	$6,7 \cdot 10^{-5}$ m/s

Tabla 21.- Valores de permeabilidad antes y después de la inyección de microcemento (0,25-0,50 mm)

La presión y caudal durante el proceso de inyección pueden verse en la Figura 50 (la zona representativa está limitada por las rectas naranjas). Se observa el modo en que va aumentando la presión de 9 a 14 bares a medida que la lechada penetra en el material, para un caudal representativo de unos 10 ml/s.

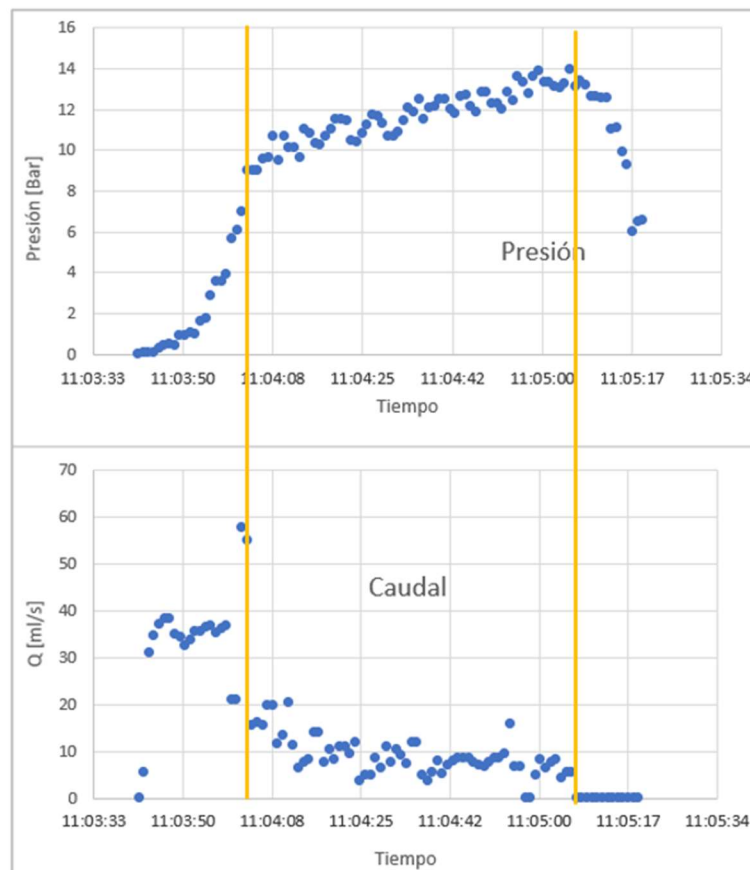


Figura 50.- Ensayo de inyección en granulometría 0,25-0,50 mm

4.4. ENSAYOS DE ARRASTRE Y LAVADO

Como ya se ha comentado, con estos ensayos se pretende estudiar el proceso de arrastre de las partículas más finas que tiene lugar cuando en un suelo se produce un flujo de agua. El lavado de finos puede generar un aumento de la porosidad y consecuentemente de la permeabilidad, magnificando los problemas de aporte de agua.

En primer lugar, se preparan unos 5 kg de un suelo compuesto por un 75 % de arenas > 2 mm y un 25 % de arenas finas (entre 0,063 y 0,250 mm), tal y como se ve en la Tabla 22.

Fracción granulométrica	Peso total (g)	Porcentaje
>2 mm	5208	75%
0,063-0,250 mm		25%

Tabla 22.- Granulometría inicial ensayada

Posteriormente se rellena el tubo con agua a presión hasta 5 bares, se deja unos minutos y se abre entonces la salida del tubo, permitiendo la expulsión de agua y de los sólidos que ésta arrastre. Los efluentes se recogen, se secan y se pesan, comprobándose que han sido extraídos 537,95 g. es decir un 10,3 % del material total y un 41 % de las arenas más finas. A continuación, sobre el material que aún permanece en el tubo, se efectúa un segundo proceso de lavado, idéntico al anterior, extrayéndose otros 31 g de la granulometría más fina. Los aspectos inicial y final de la muestra pueden verse en la Figura 51, así como el material extraído, una vez secado.



Figura 51.- Aspecto inicial de la muestra y tras el ensayo (dos lavados) y material extraído

A la vista de estos resultados, se hace una segunda prueba sustituyendo la fracción granulométrica más gruesa (>2 mm) por la inmediatamente inferior (0,5-2 mm). En este caso se comprueba que no se produce flujo apreciable de agua ni a 5 bares ni a 9 bares, por lo que se concluye que la permeabilidad inicial de estos materiales es demasiado baja para que el agua circule con suficiente velocidad como para que los finos puedan ser arrastrados.

Intentando determinar las condiciones de partida que si favorecen este tipo de fenómenos se generan dos nuevos suelos, intermedios entre los dos anteriores y, además de comprobar el material extraído se evalúa el cambio de permeabilidad experimentado tras el lavado. Los resultados de estas pruebas se recogen en la Tabla 23.

Composición granulométrica	Peso material lavado (g)	% lavado	Permeabilidad inicial (m/s)	Permeabilidad final (m/s)
– 25% >2 mm	212,45	3,5 % del total 14,2 % de los finos	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
– 50% 0,5-2 mm				
– 25% 0,063-0,25 mm				
– 50% >2 mm	303,73	5,1 % del total 20,2 % de los finos	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
– 25% 0,5-2 mm				
– 25% 0,063-0,25 mm				

Tabla 23.- Ensayos de lavado y arrastre

Queda así demostrado que este tipo de fenómenos pueden afectar enormemente a la permeabilidad, modificando las condiciones de inyectabilidad, si bien es crítico para que se produzcan un cierto contenido en fracciones granulométricas más gruesas (no necesariamente mayoritarias) que permitan una cierta velocidad en el flujo del agua.

CAPITULO V – NUEVA PROPUESTA METODOLOGICA Y APLICACIÓN A UN CASO REAL: TUNEL DE URDINBIDE

Las actuales técnicas de preinyección para impermeabilización utilizan el sistema de tubo-manguito, ya descrito en el apartado 1.1. En este capítulo se propone una nueva metodología de trabajo, la cual se ha llegado a implementar con éxito en una situación real, en la construcción del Túnel de Urdinbide (Vizcaya). Los trabajos de ejecución de la obra de referencia se paralizaron en primera instancia ante la imposibilidad de realizar el avance de los túneles con una detracción de agua por infiltración en los túneles razonable, empleando el sistema de tubo-manguito como método de inyección. (FASE 1) y tras la parada y un proyecto modificado de la obra, se retomaron los trabajos con el nuevo sistema de inyecciones previas a la excavación que se propone en esta investigación (FASE 2).

La aprobación ambiental del proyecto original vino condicionada a que la ejecución del túnel no afectase de forma sensible al acuífero que se iba a atravesar, así como a mantener el sistema de captaciones y aprovechamientos de agua existentes y el propio caudal ecológico del arroyo Ategorri, proveniente de los manantiales que abastece dicho acuífero. Esta premisa se mantuvo durante la ejecución de las obras realizadas hasta la paralización de los trabajos (FASE 1) y, evidentemente, se mantuvo como criterio básico de diseño del proyecto.

A partir de los datos recopilados durante el seguimiento hidrológico que se llevó a cabo durante el período de obras, el cual incluyó el control de niveles piezométricos y control de aforos (aguas de infiltración del túnel y de los manantiales y arroyos), se realizó una actualización del modelo hidrogeológico inicial de la obra en FASE 1, sobre el que se simuló el túnel terminado.

5.1. PROPUESTA DE UNA NUEVA METODOLOGIA

Con este nuevo sistema de inyección aplicable en excavaciones de túnel en arenas, se obtiene una opción nueva y real al sistema tubo-manguito. El sistema de inyección tradicional tubo-manguito, plantea problemas de seguimiento de la inyección, al realizar la aplicación de la lechada solo a través de las válvulas colocadas de forma intercalada en la propia tubería de PVC y no en toda la longitud aplicada de tubería. La lechada, en el sistema tubo-manguito, se inyecta en el suelo a través de tubos rígidos fabricados en PVC

con perforaciones a distancias regulares recubiertas con válvulas de goma. Las últimas actúan como válvulas antirretorno ya que impiden que la mezcla regrese dentro del tubo después de haber sido realizada la inyección. Los tubos manguito generalmente utilizados en aplicaciones de inyección estándar tienen diámetros entre 1" y 2". Una vez que el tubo ha sido instalado en el interior de una perforación en el terreno, es necesario sellar el espacio entre este y la pared del agujero justo en la boca de perforación. Esto es necesario para evitar que la mezcla inyectada circule a lo largo de la perforación por el contorno del tubo saliendo por la boca de perforación, en lugar de penetrar el terreno. En suelos granulares, el sellado se realiza mediante la inyección de una vaina cementicia (cemento/bentonita); mientras que en terrenos rocosos se usan normalmente obturadores.

La mezcla de lechada inyectada abre las válvulas y se expande en el terreno circunstante. Una vez terminada la inyección, las válvulas se cierran para prevenir que la mezcla regrese dentro del tubo. Después de ser lavados internamente con agua corriente, los tubos pueden ser reutilizados para realizar nuevas inyecciones, aunque parte de las válvulas, sobre todo las más profundas, suelen quedar inutilizadas tras dos o tres usos.

En los tramos de tubería aplicada en la perforación donde no hay válvula, no se produce inyección efectiva, no pudiendo garantizar el tratamiento en esos tramos, generándose zonas de "sombra" carentes de tratamiento de inyección.

Hay que recordar que toda la logística de tubería de PVC queda instalada en la zona a tratar, con lo cual, en el caso de los túneles, durante la excavación, este material es extraído y debe ser gestionado como un residuo que no puede ir a los vertederos de estériles ni a las escombreras, con el coste adicional que esto supone.

Dado que la colocación de la tubería de PVC requiere ser colocada tras la perforación, este sistema tradicional es muy complicado de ejecutar en túnel en taladros horizontales, donde tras la perforación, el taladro perforado suele derrumbarse y por tanto dificultar o hacer imposible la colocación de la tubería de PVC.

El nuevo sistema plantea una nueva geometría de perforación, basado en un plan de tiro para cada una de las 4 etapas de inyección que se plantean (2 de cemento y 2 de microcemento) a ejecutar desde el interior del túnel previas a la excavación de 6 m de túnel tratado y que conseguirán una mejora de 3 metros alrededor de cada tubo del túnel con un solape mínimo entre coronas de inyección de 6 metros, asegurando que los

cruces entre etapas solo se producirán en la zona que posteriormente vaya a ser excavada. La secuencia de perforación e inyección se hace en fases sucesivas: se perforarán e inyectarán los taladros en tramos de 6 metros de longitud, en concordancia con la secuencia de excavación de la obra en tramos de avance de 6 m.

De esta forma en primer lugar se perforarán hasta una longitud de 6 metros. A continuación, se inyectarán este tramo. Tras el fraguado de la mezcla, se reperfora el tramo inyectado y se prolonga la perforación hasta 12 metros y se inyectarán nuevamente como en el paso anterior. Así sucesivamente hasta completar la longitud total de cada uno de los taladros. La ejecución se realiza en tramos evolutivos de 6 m, longitud máxima a excavar en cada avance posterior a cada tratamiento desde el frente de excavación. Una vez ejecutada la excavación de 6 m, colocado su sostenimiento y finalizado el sostenimiento, se ejecuta un nuevo tratamiento de inyecciones.

En el caso de aparecer fuertes caudales y/o arrastres de finos relevantes durante la perforación, a una longitud distinta a la preestablecida para cada barreno, este sistema permite interrumpir la perforación para inyectar a una longitud distinta a la prevista al no estar condicionado por longitudes de fabricación del PVC a instalar, como sucede en el sistema tubo-manguito. Esto permite reducir el arrastre de materiales y evitar que el tratamiento sea una restitución de materiales del terreno por cemento.

La perforación de estos taladros se realizará con un registro continuo de presión y velocidad de inyección, por sistemas de monitorización automático (tipo Jean-Lutz o similar) mediante el PLC equipado en las bombas de inyección.

Con esta nueva metodología, la longitud completa del taladro perforado para tratamiento de inyección, recibe inyección de lechada, siendo repartida de una forma uniforme a lo largo de la misma desde la zona de aplicación con el obturador (boca de perforación) hasta el final de cada taladro. No existen válvulas en la longitud del taladro que limiten la inyección y la lechada está en contacto en todo momento con el terreno, realizando la aplicación de la lechada en todo el desarrollo y en la misma intensidad.

Otro problema del sistema tradicional en túneles es que, en las zonas del sistema de tubo-manguito donde no se garantiza la inyección de lechada (zonas de sombra), se producen, además, problemas durante la excavación posterior dado que son tramos débiles que no llevan asociado tratamiento y por tanto van a generar inestabilidades y riesgos durante la excavación.

Las principales ventajas que presenta esta nueva metodología son:

- Control más directo sobre el reparto de la lechada en toda la longitud de la perforación
- Se genera un tratamiento más intensivo y evolutivo que garantiza los resultados.
- Se evitan las zonas de sombra carentes de tratamiento, comunes en el sistema tubo-manguito.
- Reducción de la huella de carbono al eliminar los tubos de PVC del proceso y, por tanto, el impacto ambiental resultante es menor, como se demuestra a continuación.

Con la aplicación de la nueva técnica de inyección se consigue una reducción de la huella de carbono: Mediante la aplicación de la técnica de inyección se eliminan materiales fabricados con PVC (tubo-manguito y válvulas) empleadas en el sistema tradicional. Esta reducción de la huella de carbono (cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que son producidas y liberadas a la atmósfera directa o indirectamente por un producto) está calculada por metro lineal de túnel de sección media 70 m². Para la sección anteriormente definida, considerando que son necesarias 60 unidades de tubo-manguito para la sección de 70 m², el peso de PVC necesario (Tubo de presión PN16 de PVC duro DIN 8062, serie 5 de diámetro 100 mm) para ejecutar una longitud de 1 m de túnel es de 3,83 kg/ml x 60 ud de 1 m = 229,8 kg.

Si bien los gases de efecto invernadero (GEI) son el dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, los CFC y el ozono, nos centramos en este análisis en el CO₂ por ser el gas con mayor participación en los ciclos productivos. La huella de carbono se expresa en unidades de carbono equivalente (CO_{2eq}). Una unidad que además del CO₂ toma en cuenta los otros Gases de Efecto Invernadero que contribuyen al calentamiento global. El Factor de emisión en kg CO_{2eq} / MWh, corresponde a los valores informados en la CNE para la emisión neta de gases de efecto invernadero.

La huella de carbono de una tubería de PVC 100 mm, en las etapas analizadas de su ciclo de vida es de 38,46 tonelada CO₂/t producida. La etapa del ciclo de vida que más emite es la de obtención de materias primas para la fabricación de la tubería, con un total de 33,57 toneladas CO₂/t producida (87,29% del total de la huella). Datos obtenidos de la Información general sobre el Registro de huella, compensación y proyectos de absorción de CO₂ del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

También se evita el transporte marítimo de materia prima de PVC con un total de 23,36 t CO₂/t producida. Por tanto, la reducción de la huella de carbono por metro lineal de excavación en un túnel de sección media

70 m² al eliminar el tubo-manguito del proceso es un total de 8,37 t CO₂ en el ciclo de vida de fabricación y 7,68 t CO₂ en los transportes material.

De esta forma, evitando el empleo del sistema tubo-manguito en trabajos de inyección subterránea, se dejan de emitir un total de 16,05 toneladas de CO₂ por metro lineal del túnel ejecutado.

5.2. EL CASO DEL TUNEL DE URDINBIDE

Durante el desarrollo de los trabajos de investigación de la presente Tesis, se acometió la obra mencionada hasta el momento y que consistió en la mejora de la Carretera BI-635 desde Amorebieta hasta la bajada del alto de Autzagane, con una longitud total de la obra próxima a los 3,5 km que incluía la ejecución del Túnel de Urdinbide. Geográficamente (Figura 52), las obras del tramo Amorebieta - Muxika, se sitúan en la zona norte de la Península, concretamente en el País Vasco, discuriendo por los términos municipales de Amorebieta - Etxano y Muxika, en la provincia de Vizcaya.

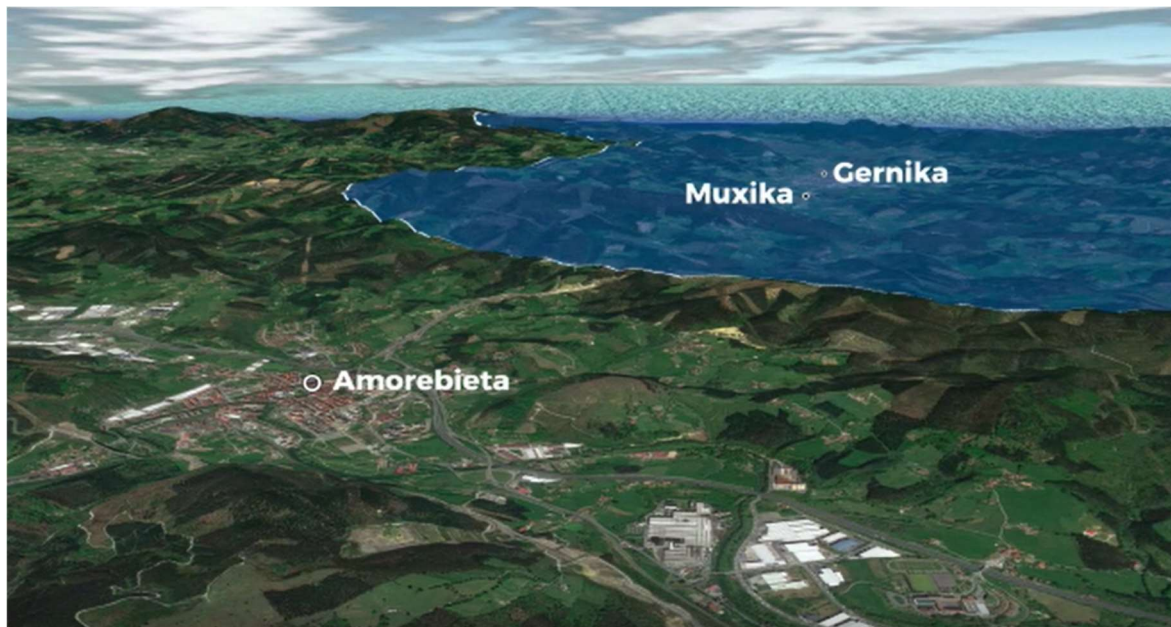


Figura 52.- Localización geográfica del Túnel de Urdinbide

El elemento más singular de la obra es el túnel bitubo de Urdinbide, formado por dos tubos de dos carriles de circulación cada uno y sentido del tráfico unidireccional con longitud final de 701m.

5.2.1. Descripción del túnel

La construcción de los dos túneles paralelos atraviesa suelos arenosos y un acuífero. Debido a éste, en los avances frontales durante la excavación del túnel, hay un mayor flujo de agua hacia el interior del túnel. Este flujo es tan elevado que en los tramos de túnel que atraviesan el acuífero, el nivel freático de éste se reduce afectando al suministro de agua de varios pueblos y aldeas. Además, la filtración de agua durante los trabajos de excavación provocaba grandes retrasos de ejecución de las obras por los riesgos relacionados con la seguridad de la estabilidad del tramo excavado, la posibilidad de subsidencias y provocando un importante impacto ambiental sobre el acuífero. Debido a estos problemas, técnicos y ambientales, la obra tuvo que paralizarse durante más de un año y volver a licitarse como *Proyecto de terminación de las obras del tramo Amorebieta – Muxika*, (FASE 2) para finalizar la excavación del túnel (con un sistema alternativo de inyecciones diferente al tubo-manguito). Es en esta parte donde se enmarca este trabajo.

El túnel de Urdinbide es un túnel bitubo (un tubo por calzada) con dos carriles por calzada. La separación entre ambos tubos es de aproximadamente 21,50 m. Esta separación permanece prácticamente constante a lo largo de toda la longitud del túnel en mina.

Se proyectó con sección circular de radio interior de 6,53 metros (en la zona fuera del acuífero) y de 6,48 metros en la zona de acuífero, con una altura del centro de 1,286 metros sobre el eje con el firme a lo largo de todo el túnel; consiguiéndose, con esta geometría, un gálibo de, al menos, 5 metros sobre bordes de plataforma. La sección libre varía entre 82 y 83 m² en función del tipo de sostenimiento requerido en cada tramo.

La boquilla norte del túnel proyectado queda dentro de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai. La longitud total de los túneles es de algo menos de 700 m por tubo (695 y 693 m, respectivamente en el eje 1 y 2) con recubrimientos máximos en torno a 90 m, siendo la parte correspondiente al túnel en mina de 538 y 537 metros respectivamente para cada eje (Figura 53).

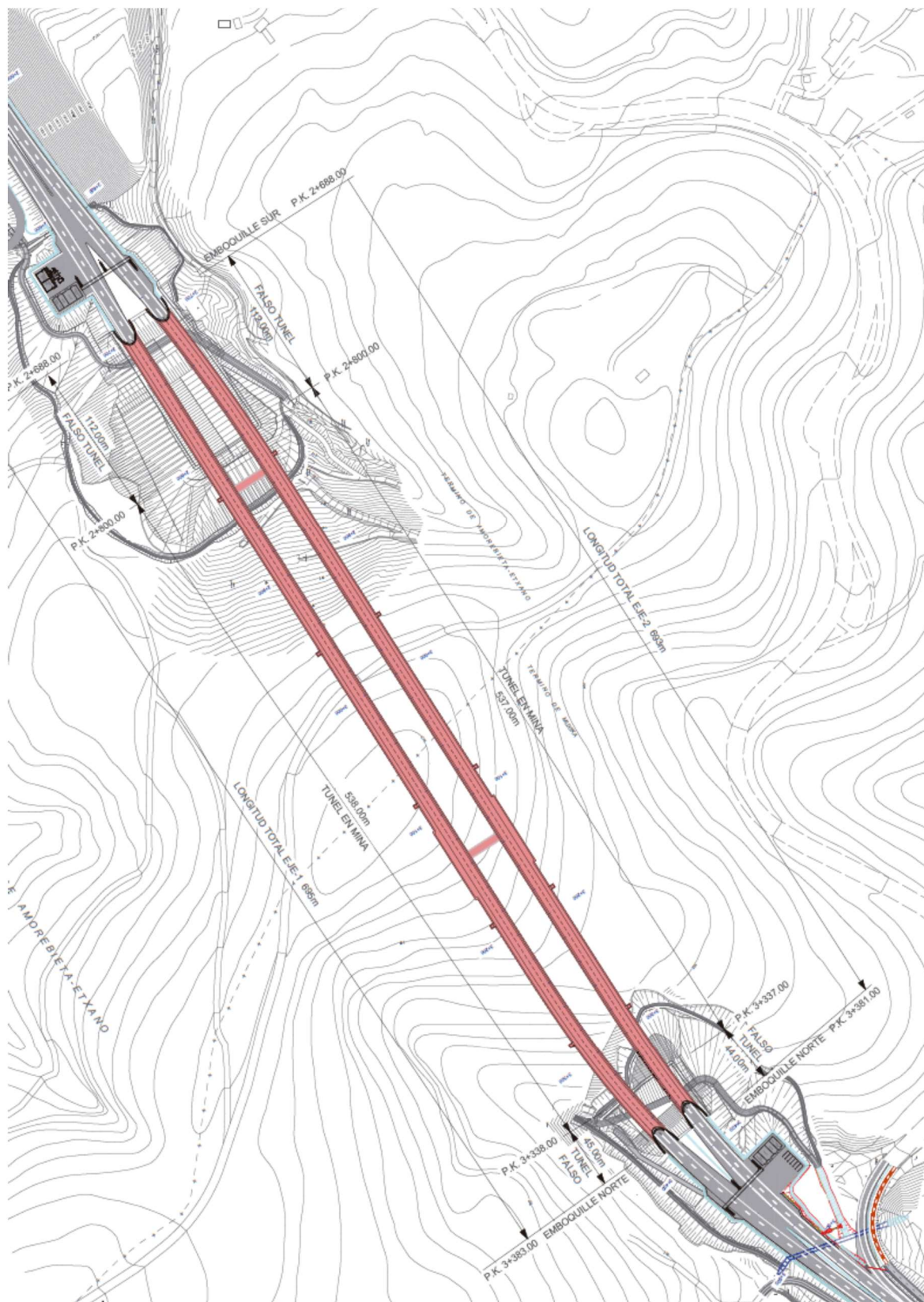


Figura 53.- Planta del Túnel de Urdinbide

Entre las características generales del Túnel Urdinbide se encuentran las siguientes:

- La sección transversal de ambos tubos estará compuesta por un arcén derecho de 2,5 m, 2 carriles de 3,5 m cada uno, un arcén izquierdo de 1 m y 2 aceras laterales de 0,75 m de anchura mínima.
- La pendiente longitudinal mínima es del 0,61% y la pendiente longitudinal máxima es del 3%, dentro del rango de valores exigidos.
- Se ubican dos galerías de emergencia, ambas peatonales. Se sitúa la primera de ellas a 141 m del inicio del túnel (boca sur). A 305 m se encuentra la segunda, que a su vez está del fin del túnel (boca norte) a 247 metros.
- La ejecución de los túneles se ha efectuado por medio de perforación y voladura excepto en las zonas de boquilla y en las secciones de sostenimiento tipo ST-V, que se excavaron de forma mecánica.
- La sección de sostenimiento ST-V (Figura 54), que fue, la aplicable a la zona problemática de acuífero que nos ocupa, consistió en:
 - Empleo de sostenimiento con distancia de posteo a un metro de cerchas metálicas HEB-180 y 30 cm de espesor de hormigón proyectado HM-30.
 - Empotramiento del sostenimiento en fase de destroza para evitar su descalce en la ejecución de la contrabóveda.
 - Los frentes de las secciones de inyección se sellaron, de forma sistemática, con 20 cm. de hormigón proyectado y doble mallazo con el objetivo de prevenir riesgos de desestabilización durante las labores de inyección. El sellado de los frentes se efectuó tanto en la fase de avance como de destroza.
 - La solera de los frentes de avance, se trató con una capa de hormigón proyectado de 10 cm en los 6 metros más cercanos a los frentes. Este tratamiento tenía un objetivo triple: recoger y encauzar las aguas de infiltración, conseguir una plataforma apropiada de trabajo, reforzar el diedro formado por el frente de inyección y la solera.
- Eliminación de actuaciones sistemáticas como paraguas de micropilotes, patas de elefante y contrabóveda provisional en fase de avance que se han demostrado innecesarias durante la ejecución de obras similares y en la FASE 1 del Túnel de Urdinbide.

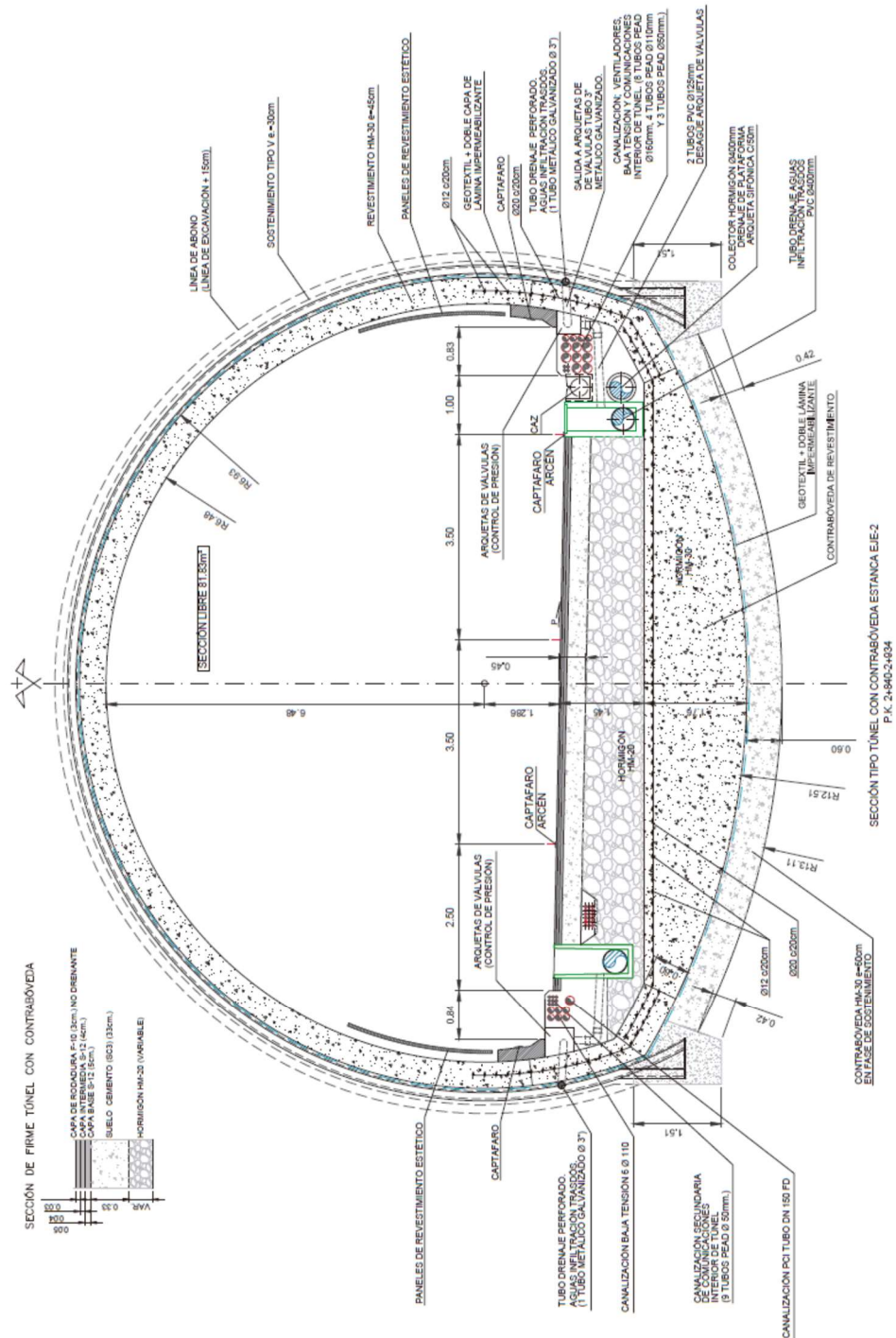


Figura 54.- Sección tipo en la zona de acuífero (ST-V).

La zona de afección al acuífero se determinó mediante la observación y análisis de la geología existente, así como de los resultados de los sondeos horizontales realizados durante la primera fase de la ejecución. Esta zona se ubica entre los PK 2+859 y 3+019 en el eje 1, y entre los PK 2+840 y 3+004 en el eje 2, como puede verse en la Figura 55.

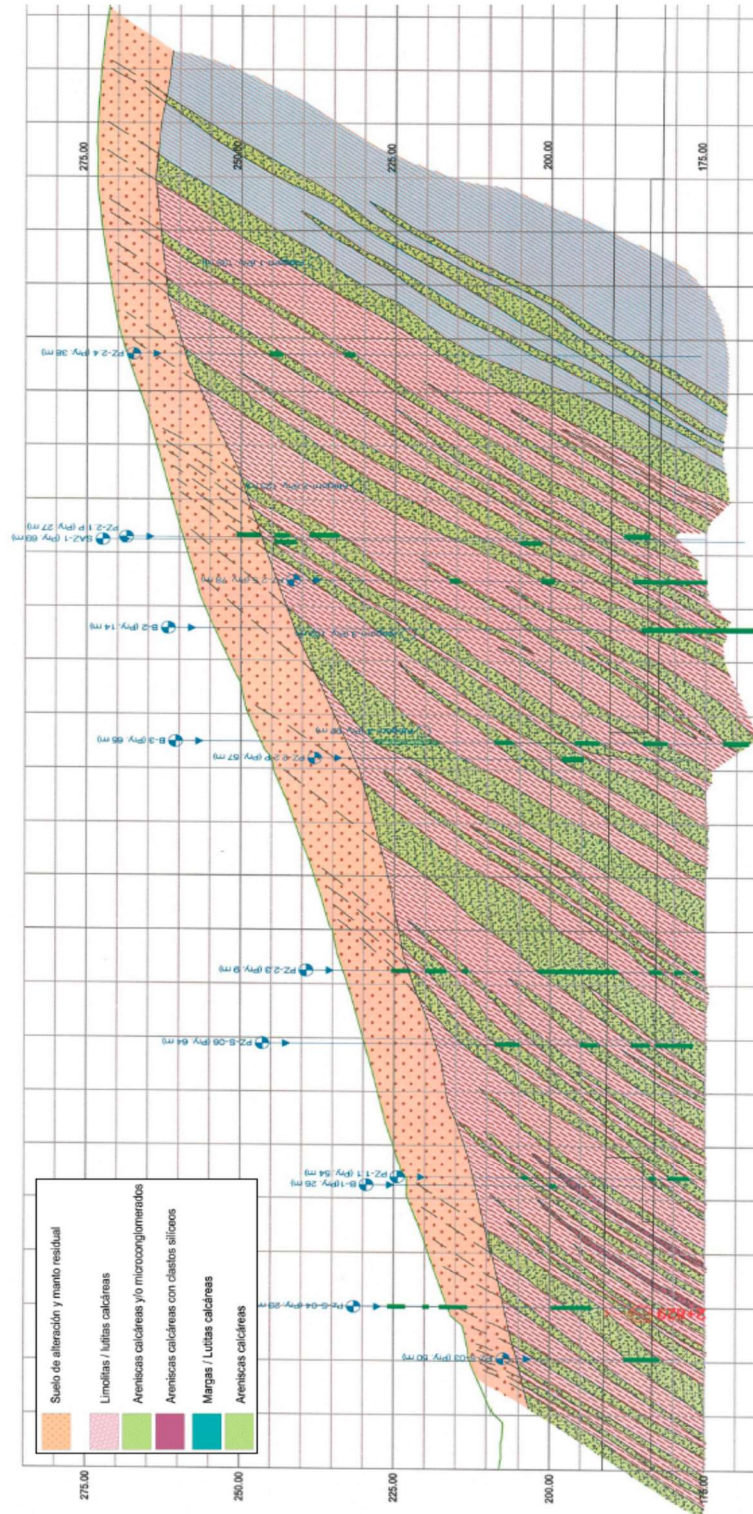


Figura 55.- Detalle de la zona de afección al acuífero

El túnel corta casi transversalmente una serie monoclinal inclinada al sur, constituida por paquetes litológicos que, de noreste a suroeste, son los siguientes:

- Unidad Margosa (Mg), donde estará emplazada también la boquilla norte del túnel.
- Unidad Areniscosa inferior (Ar). donde se ubica la zona problemática, constituida por alternancias de limolitas más o menos calcáreas e intercalaciones de areniscas/microconglomerados con un porcentaje variable de cemento carbonatado (a la que se asignó una nomenclatura de Ar+L) tanto en la parte del túnel ya excavada como en la zona que quedaba por completar.
- Tramo “Lutítico” intermedio (L) con sus dos intercalaciones (IIa, más baja, de alternancias decimétricas lutítico-areniscosas e Ia, más alta y mejor definida, de bancos areniscosos y lutitas subordinadas). La boquilla sur del túnel está emplazada en este Tramo.

La propia naturaleza de estas litologías condiciona, a priori, la permeabilidad de cada una de ellas debido a los siguientes motivos:

- La porosidad primaria de los materiales areniscosos, siempre importante en comparación con la que presentan las formaciones margosas o “lutíticas”.
- La respuesta mecánica frágil que presentan los materiales areniscosos ante la fracturación y las fallas (o ante cualquier modificación tectónica, en general, como pueda ser, por ejemplo, un plegamiento), en comparación a la de las formaciones margosas, más dúctiles. Para las fallas y fracturas, la respuesta mecánica frágil supone discontinuidades más netas y mejor definidas, y con rellenos más porosos (vías preferentes de circulación de agua subterránea), al contrario que la respuesta dúctil.
- La tendencia que presentan los materiales areniscosos a generar, por meteorización y alteración, depósitos más porosos (arenosos) respecto a los procedentes de los margosos. Estos depósitos pueden estar superpuestos a (u ocultar) las zonas de afloramiento de las areniscas, pero también pueden tender a acumularse en zonas de vaguada.

Así pues, el túnel atraviesa, un paquete más areniscoso (Ar: a priori, más permeable) entre dos conjuntos litológicos menos permeables (Mg y L). Este contraste de permeabilidades se acentúa por el hecho de que en las areniscas del paquete areniscoso los procesos de alteración/meteorización alcanzan mayor profundidad que para las demás litologías.

El acuífero de Autzagane, atravesado por el túnel, está constituido fundamentalmente por capas areniscosas, meteorizadas desde la superficie, entre las que se intercalan capas de lutitas y margas poco permeables. Esta secuencia de capas forma un acuífero multicapa buzante, que presenta un funcionamiento hidráulico fundamentalmente confinado.

En el entorno del túnel, este acuífero se recarga por la infiltración de las precipitaciones y se descarga fundamentalmente en la cabecera del arroyo Ategorri, bien mediante manantiales o a través de descargas directas al cauce.

Los recursos hídricos subterráneos en esta zona se cifran en unos 4 l/s, de los que 1,4 l/s se utilizan para el abastecimiento parcial del municipio de Amorebieta-Etxano mediante la captación de los manantiales de la cabecera del arroyo Ategorri. La aprobación ambiental del proyecto original vino condicionada a que la ejecución del túnel no afectase de forma sensible al acuífero que se iba a atravesar, así como a mantener el sistema de captaciones y aprovechamientos existentes y el propio caudal ecológico del arroyo Ategorri, proveniente de los manantiales que abastece este acuífero. Ante ello, el proyecto constructivo se había previsto la realización de inyecciones de impermeabilización previas a la excavación desde los frentes de avance y la construcción de un revestimiento estanco definitivo en parte del tramo que atraviesa el acuífero con el fin de garantizar su preservación. El caudal máximo de drenaje permisible se limitó a 0,2 l/s entre ambos tubos.

Una vez iniciadas las obras (FASE 1), se comprobó que la construcción del túnel estaba provocando un descenso significativo del nivel del agua en las zonas septentrional y central del acuífero, y una afección importante al conjunto de las captaciones municipales de los manantiales de la cabecera del Ategorri, llegándose a secar los manantiales Ategorri-1 y Ategorri-2, y al caudal del propio arroyo. También resultó afectada la descarga de agua subterránea en la cabecera del arroyo Etxanosolo, situada al Este del arroyo Ategorri. Por ello, previo al inicio de los trabajos se hizo una modelización numérica mediante el paquete informático Visual MODFLOW^(b) del comportamiento de las aguas subterráneas en el macizo que sería atravesado por el túnel de Urdinbide

El objetivo de este modelo fue reproducir el efecto a corto plazo de la perforación de sondeos de reconocimiento y/o inyección desde el interior del túnel en el sector del acuífero más cercano al túnel.

(b) MODFLOW es un programa gratuito desarrollado por el Servicio Geológico USA para simular el flujo del agua subterránea, o más exactamente, la evolución de los niveles en las condiciones especificadas: bombeos, ríos, drenes, infiltración de las precipitaciones, etc.

Asimismo, este modelo permitió predecir el efecto de los ciclos de perforación-inyección con los que se impermeabilizaría de forma previa el terreno a atravesar y se protegería el avance de la excavación del túnel en el interior del acuífero.

La modelización numérica de flujo subterráneo fue por tanto la herramienta utilizada para analizar la afección que diferentes escenarios de operación del túnel de Urdinbide provocarían en el funcionamiento natural de las aguas subterráneas y en sus aprovechamientos, permitiendo ser una base de apoyo en los primeros ensayos de inyección y un punto de partida en el diseño de los protocolos de trabajos.

Con el objeto de disponer de una referencia a la hora de valorar la afección del túnel sobre el funcionamiento natural del acuífero de Autzagane se efectuó una pasada previa del modelo sin considerar la existencia del túnel de Urdinbide para obtener las series de escurrimiento subterránea drenadas por las cabeceras de los arroyos Ategorri y Etxanosolo en régimen natural.

De forma general, las características de este modelo fueron las siguientes:

- El ámbito de modelización es el sector hidrogeológico del Ategorri, dentro del acuífero de Autzagane.
- El periodo de simulación máximo fue de un año, con el objetivo de que las afecciones no alcanzasen los límites laterales de la parte de acuífero simulada y no desvirtuasen, por este motivo, a los resultados del modelo.
- El acuífero de Autzagane se consideró una alternancia de varias capas más y menos permeables.
- La recarga del modelo se produce por infiltración de las precipitaciones, y la descarga natural mediante manantiales asociados a las capas más permeables (manantiales de la cabecera del valle del Ategorri).

En primera instancia se simuló un escenario de explotación del túnel en el que, por ambos tubos, se drenase del orden del doble de caudal máximo permisible según el proyecto inicial (0,4 l/s en vez de 0,2 l/s) con el objetivo de que las afecciones predichas quedasen del lado de la seguridad.

Los resultados del modelo para este escenario permitieron extraer las siguientes conclusiones:

- El drenaje a través del túnel de 0,4 l/s tendría como consecuencia una detracción de 0,2 l/s de las descargas naturales que se producen mediante manantiales y salidas directas al cauce en la cabecera del arroyo Ategorri, lo que supone una pérdida del 5,6% de sus recursos.
- Las otras afecciones significativas se producirían en las descargas a través del arroyo Etxanosolo, también en el sector del Ategorri, cuyo caudal perdería 0,1 l/s (un 5,7% de sus recursos naturales), y el manantial de Sastratxu, en el sector de Torreburu, cuyo caudal perdería un 18,4% de sus recursos.
- La afección al resto de salidas del acuífero apenas supone 0,03 l/s en conjunto.
- En estas circunstancias, las afecciones producidas a los sectores adyacentes serían prácticamente insignificantes.
- Por lo tanto, el funcionamiento hidrogeológico del sector del Ategorri y, en general, del acuífero de Urdinbide, no sufriría modificaciones significativas respecto a su funcionamiento en régimen natural ni siquiera considerando un drenaje por el túnel que fuera el doble del caudal máximo permitido por el Proyecto de Construcción.

El modelo fue utilizado para reproducir un segundo escenario de terminación del túnel, más realista, que contempló la ejecución de dos tipos de secciones a lo largo de los tubos del túnel a su paso por el acuífero de Urdinbide:

- Una sección de revestimiento estanco que impidió el aporte de agua del acuífero hacia el interior del túnel. Este tipo de sección se aplicó en el tramo meridional de ambos ejes, desde el inicio del acuífero (ST-V, PK 2+859 en el eje 1 y PK 2+840 en el eje 2) hasta los PK. en el que se encontraban situados los frentes de avance excavados desde las boquillas septentrionales, es decir, el PK 2+954 en el Eje 1 (oriental) y el PK 2+934 en el Eje 2 (occidental).
- Una sección de revestimiento drenado que, merced a las inyecciones perimetrales ejecutadas previamente a la excavación, disminuyó la aportación de agua subterránea hacia el túnel con referencia a una sección totalmente drenante. Este tipo de sección se aplicó desde los PK. mencionados en el párrafo anterior, es decir, desde la situación de parada de obra de los frentes de avance de los tubos septentrionales hasta el final de la zona de acuífero (ST-V, PK 3+019 en el eje 1 y PK 3+004 en el eje 2).

Esta explotación del modelo ha consistido en una simulación en régimen transitorio de un año hidrológico medio. Las características concretas de la simulación han sido las siguientes:

- Periodo de simulación: 1 año hidrológico
- Paso de tiempo: se realizaban medias completas de forma mensual
- Recarga: cantidad de agua correspondiente a un año de precipitación media (aprox. 1550 mm), considerando el 50% de la precipitación mensual y aplicando el reparto mensual correspondiente a los datos del año hidrológico 2013-14.
- Drenaje por el túnel de Urdinbide: consideración de celdas con condición de dren a las correspondientes a las fases de avance y destroza de los tramos de sección de revestimiento drenado desde el inicio de la zona de acuífero en el ataque por la boca norte (PK 3+019 en el eje 1 y PK3+004 en el eje 2) hasta los PK. en que se encontraban los frentes de avance septentrionales (PK 2+954 en el eje 1 y PK 2+934 en el eje 2).

No se consideró la existencia de aporte de agua procedente del acuífero en los tramos de sección con revestimiento estanco meridionales.

Los resultados de la simulación en cuanto a la evolución de caudales predichos por el modelo, tanto en régimen natural, no afectado, como considerando la existencia del túnel, se muestran en la Figura 56.

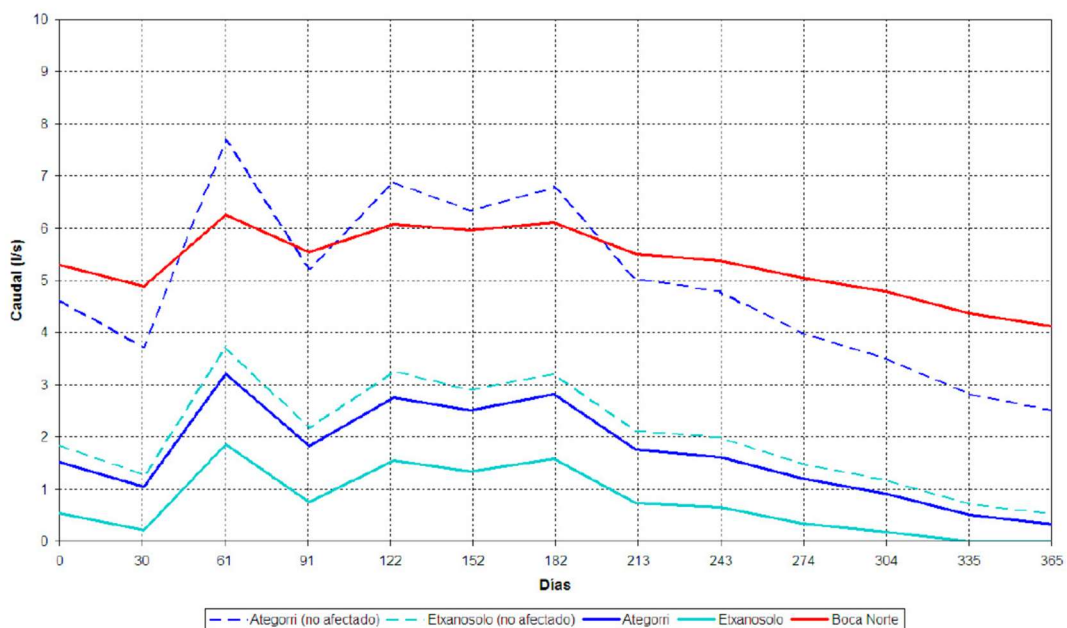


Figura 56.- Evolución de caudales predicho por el modelo para el escenario de terminación del túnel

A la vista de los resultados pueden hacerse las siguientes observaciones:

En las condiciones de terminación del túnel contempladas en la simulación se aprecia que el caudal drenado por el conjunto de los dos tubos del túnel de Urdinbide se situaría, a lo largo del año, entre 5 y 6 l/s, disminuyendo durante el estiaje hasta los 4 l/s.

- En la situación natural, sin túneles excavados, el drenaje subterráneo a través del arroyo Ategorri se mantendría la mayor parte del año entre los 4 y 8 l/s, aunque durante el estiaje descendería hasta los 2,5 l/s. La presencia del túnel de Urdinbide supondría una significativa afección a esta descarga, reduciendo la escorrentía subterránea hacia el Ategorri hasta los 1 a 3 l/s e incluso menos durante el estiaje, aunque el modelo no prevé su anulación.
- Por lo que respecta al arroyo Etxano solo, aunque la afección del túnel de Urdinbide no sería relativamente tan alta como en el caso del arroyo Ategorri, el modelo predice la anulación de la escorrentía subterránea durante el estiaje.

Para establecer el caudal máximo detraible por el túnel en fase de explotación (basándose en los resultados de una simulación numérica de flujo como la efectuada previamente), hubo que tener en cuenta la sensibilidad hidrogeológica y ambiental existente en torno a las afecciones que la operación del túnel podría provocar, por ello se consideró necesario establecer unas limitaciones más restrictivas que las correspondientes a esta última simulación (que llegaban a 6,0 l/s), pero no tanto como las de la primera (que demostraban una afección despreciable para 0,4 l/s). Por este motivo se consideró necesario fijar el máximo caudal punta detraible por el conjunto de los dos tubos del túnel en el tramo que atraviesa el acuífero de Autzagane durante la fase de explotación en 3,0 l/s, es decir un caudal máximo de 1,5 l/s para cada tubo.

5.2.2 Descripción del problema. Efecto de los caudales de infiltración

Durante la ejecución de los trabajos de la obra analizada, el volumen de caudal de agua de infiltración fue el dato clave para analizar no solo la mejora del tratamiento de inyecciones, si no, también el valor limitante para definir si el tratamiento de cada sección de túnel y de cada fase, era el apropiado. Este aforo de agua de infiltración se realizaba a través de las llaves de válvula colocadas en los obturadores. Se realizaba medición de aporte de agua en cada taladro y se establecían los valores máximos por taladro y medio aritmético de todas las mediciones. Este aforo se realizaba antes del tratamiento de cada fase y al finalizar

el tratamiento de forma que se podía valorar cuantitativamente la evolución de la reducción del caudal validando dicho tratamiento de inyecciones.

En las gráficas de las Figuras 57 y 58 se detallan los aforos de los caudales de agua infiltrada en el túnel, en la zona de acuífero. Esta información es de especial interés, ya que permite conocer el agua que inicialmente se infiltra en esta zona y deducir, a partir de los valores máximos definidos en el proyecto para la situación final, los caudales de infiltración adicionales admisibles en la parte de obra de esta fase de ejecución (FASE 2). Con estos datos se pudo determinar como la excavación del túnel afectó inicialmente a la descarga de los acuíferos de la zona debido a los caudales de infiltración que se producían en la zona ya excavada del túnel, dando como primer contraste que el proyecto inicial era deficitario. Con estos datos se realizó un modificado técnico y económico que permitió establecer unos nuevos condicionantes en la ejecución del túnel de Urdinbide con el nuevo proyecto constructivo para finalizar la excavación del túnel con garantías para mantener los caudales de los acuíferos superficiales.

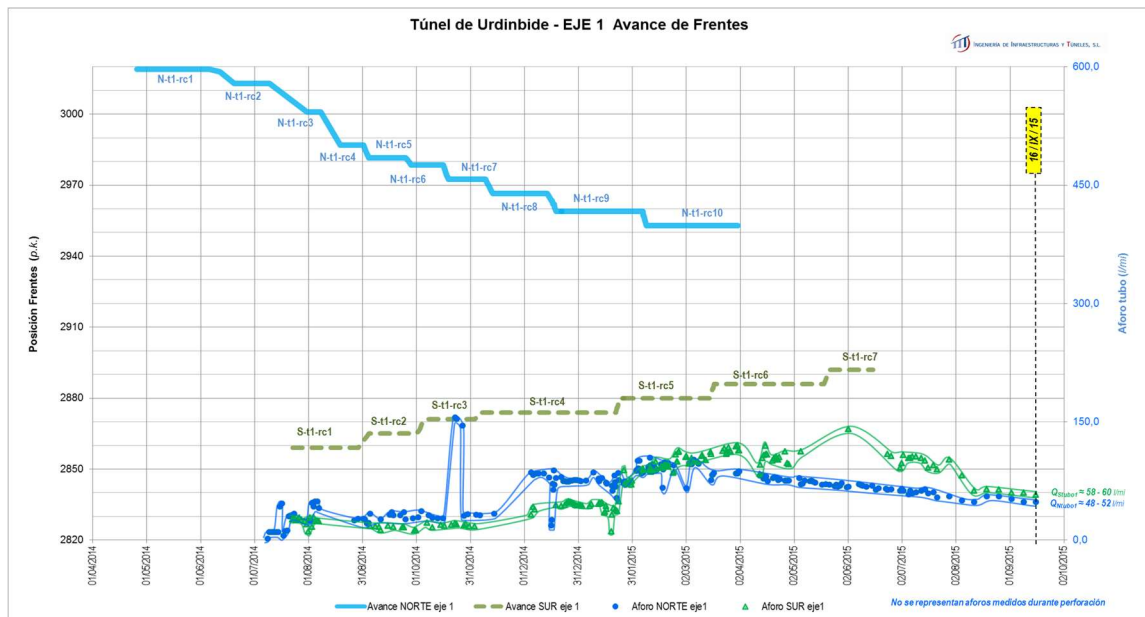


Figura 57.- Gráfico de infiltración de agua en EJE 1

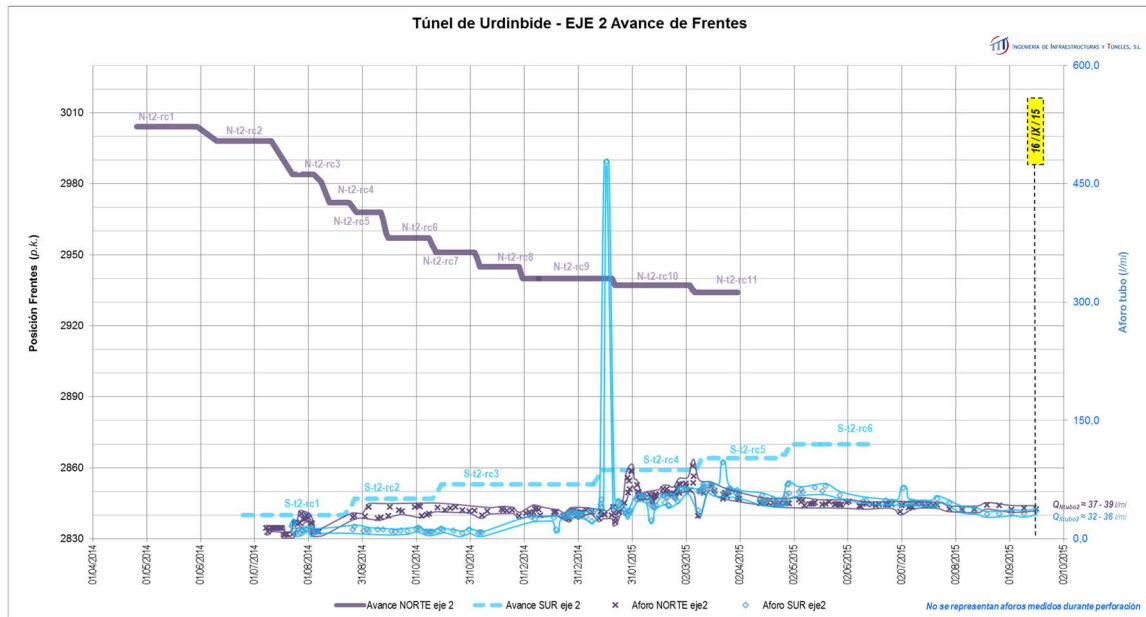


Figura 58.- Gráfico de infiltración de agua en EJE 2

En esta zona pendiente de excavar, la sección tipo de sostenimiento a ejecutar (ST-V) contempla la ejecución de inyecciones sistemáticas y repetitivas en secciones separadas entre sí por 6 metros, cuyo objeto es conseguir una corona de terreno mejorado de un espesor mínimo de 3 metros alrededor del perímetro de la excavación y una impermeabilización que evite la infiltración de las aguas hacia el interior del túnel. Esta sección tipo también contempla la ejecución de contrabóveda y doble capa de impermeabilización de lámina drenante previa al revestimiento de hormigón.

Las inyecciones definidas son repetitivas y selectivas y se realizan mediante el sistema de reperforaciones sobre los mismos taladros con longitudes incrementadas en cada fase de perforación. Se diseñan de esta forma con objeto de uniformizar el procedimiento de ejecución. Se trata de coronas de perforación e inyección troncocónicas ejecutadas en un mínimo de 4 etapas con inyecciones de cemento en las primeras etapas (“recintado”) y de microcemento en las últimas (“impermeabilización y mejora”). El objetivo del “recintado” es tratar de conseguir una zona de terreno pretratado que reduzca los caudales de infiltración y permita realizar el tratamiento de impermeabilización y mejora del terreno en el túnel.

La geometría de las inyecciones se realizó adaptándose a la orientación de las superficies de estratificación del macizo rocoso, de forma que la base de la superficie troncocónica sea siempre un plano virtual paralelo

a dicha estratificación. Esta geometría obliga, a su vez, a realizar tratamientos en fase de avance y en fase de destroza para conseguir el objetivo y evitar zonas sin tratamiento.

5.3 APLICACIÓN DEL NUEVO METODO AL TUNEL DE URDINBIDE

La excavación del túnel en el tramo de afección por las infiltraciones del acuífero, requirió de la ejecución de inyecciones previas, cuyos objetivos principales fueron:

- Conseguir una corona de terreno “mejorado” de un espesor mínimo de 3 metros en todo el perímetro de la excavación.
- Reducir la permeabilidad del terreno hasta unos valores con los que la infiltración de agua al túnel no supere el caudal máximo que se puede detraer sin afectar de forma sensible al acuífero.

El primero de los objetivos es un requisito que viene determinado por la estabilidad del túnel durante la ejecución. Los cálculos estructurales realizados han determinado la necesidad de disponer de una corona de espesor mínimo 3 metros en todo el perímetro, en la que el grado de mejora conseguido sea un aumento del valor del GSI en 20 puntos.

El segundo objetivo viene determinado por el estudio hidrológico realizado, que establece el caudal máximo a detraer para evitar afecciones sensibles al acuífero de Autzagane y a su sistema de captaciones y manantiales. A partir de este caudal máximo y de las permeabilidades conseguidas con los tratamientos de inyección realizados durante las obras, se ha establecido también la tramificación del túnel con revestimiento estanco y drenado, con la cual se cumple dicho requisito.

Las inyecciones se realizaron desde el interior del túnel y consistieron en recintos troncocónicos exteriores al perímetro de la excavación realizados mediante un sistema de inyecciones repetitivas. Adicionalmente se complementaron con tratamientos del frente, basados en la estabilidad del frente mediante hormigón proyectado tipo HP y refuerzo con mallazo electrosoldado 12x12x8 cm. La importancia de estos refuerzos radicó en el empuje realizado por el volumen de lechada inyectada, que provocaba fisuras y grietas durante los trabajos de inyección favoreciendo la salida de la lechada por el mismo frente de excavación en el que se aplicaban las inyecciones y no su admisión en el terreno adyacente (efecto nada deseado). También se aplicó una solera de hormigón en masa HM25 con mallazo armado de 12x12x6 cm en los últimos 6 m de frente de excavación con un doble objetivo:

- Permitir una zona firme de trabajo para alojar el jumbo durante las perforaciones y para los equipos de inyección.
- Evitar surgencias de lechada por la parte inferior de la solera durante los trabajos de inyección.

5.3.1. Definición de las secciones trococónicas de inyección.

La geometría de los tratamientos se determinó, de forma que el plano definido por los puntos finales de todas las perforaciones de cada sección de tratamiento, conformase un plano virtual paralelo a la superficie de estratificación y estableciendo como longitud máxima de perforación (taladro más largo), los 30 metros, por operativa de la maquinaria (jumbo, Figura 59) y control de direccionalidad de las inyecciones. El tratamiento planteado se realiza mediante la inyección de lechadas a través de las perforaciones previas cuya disposición conforma coronas troncocónicas de una geometría determinada.



Figura 59.- Perforación de una etapa de inyección en Avance

Con estas premisas y estableciendo un contorno exterior a la excavación de 4,5 metros, que asegure, teniendo en cuenta las posibles desviaciones, una corona mínima de 3 metros alrededor del túnel, se obtiene que la longitud máxima de excavación entre dos secciones de tratamiento es de 6 metros en avance y de 8 metros en destroza. De esta forma se asegura el solape de 6 metros que se ha considerado. Esta longitud fue determinada experimentalmente durante la ejecución de la obra ya que en avances de más longitud (8 o incluso 10 m) el tratamiento perdía su eficacia y los caudales aforados previos al tratamiento eran ya muy importantes y dificultaban el tratamiento de la siguiente sección en fase de avance.

Se ha determinado la necesidad de realizar las inyecciones en dos fases, avance y destroza, ya que, con los requisitos anteriormente citados, es geoméricamente imposible conseguir una corona de tres metros de

terreno mejorado bajo la línea de excavación de la contrabóveda con un solo tratamiento desde el avance (Figura 59 y Figura 60).



Figura 60.- Solape de etapas de Inyección en Avance

Las coronas de tratamientos se establecieron en 4 etapas (aunque el método permite más etapas consecutivas si fuera necesario) que tienen diferentes contornos exteriores y mezclas a utilizar. Cada etapa consta de 30 taladros en fase de avance y 19 taladros en fase de destroza, como puede apreciarse en las Figuras 61 y 62).

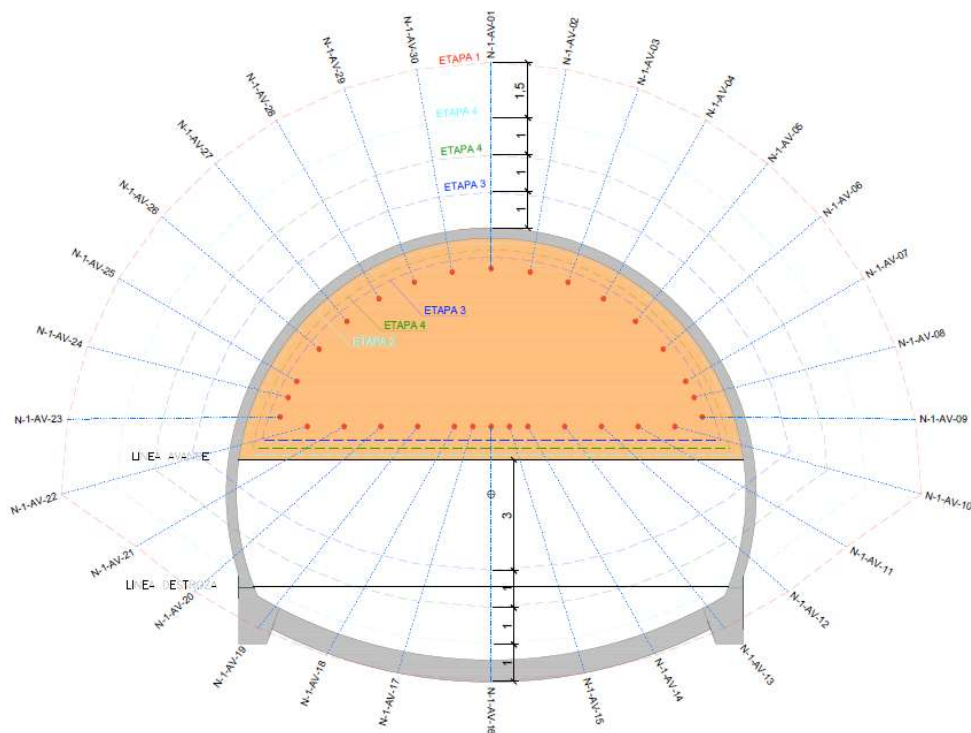


Figura 61.- Proyección de la corona de inyecciones en avance

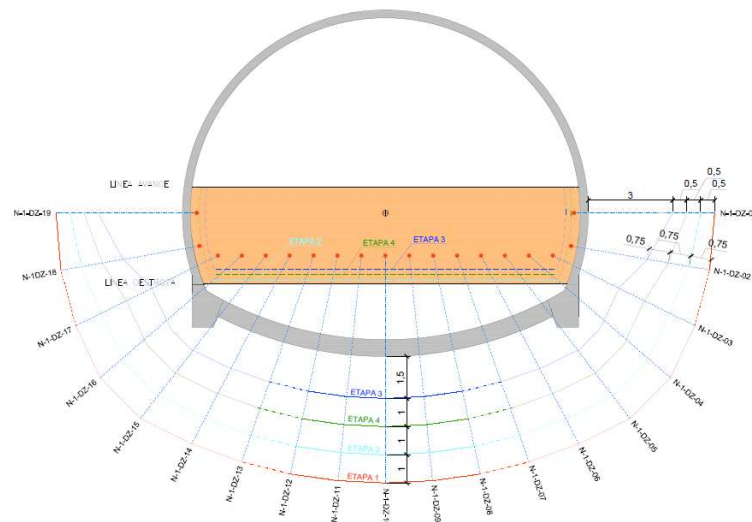


Figura 62.- Proyección de la corona de inyecciones en destroza

Las dos primeras etapas tienen la misión principal de conseguir el “recintado”.

Para ello, en las dos etapas iniciales se inyectan lechadas de cemento con acelerante; mezclas densas y de fraguado rápido que permitan realizar el “recintado”. Por el contrario, en las siguientes etapas se inyectan lechadas de microcemento; mezclas más fluidas y de mayor penetrabilidad e inyectadas a presiones más altas para que penetren de forma eficaz en las juntas o espacios intergranulares consiguiendo la reducción de permeabilidad y la mejora de las características del terreno buscadas.

La hipótesis de trabajo contempla la ejecución de un mínimo de 4 etapas por sección de tratamiento y un máximo de 5 etapas. Una conclusión de los trabajos ejecutados es que, llevar a cabo un número mayor de etapas no garantizara una mejora en el tratamiento de la zona a excavar de mayor grado de impermeabilización que el ya obtenido.

Para conseguir el tratamiento, los taladros de cada etapa se perforan, a su vez, por fases de longitudes múltiplos de 6 m (6, 12, 18, 24 y 30 m), con objeto de ir con tratamientos en tramos vinculados a los 6 m de paso máximo de excavación en cada tramo. Una vez la mezcla ha fraguado de los primeros 6 metros, se reperforan hasta 12 metros y se inyectan, y así sucesivamente hasta la longitud final definida para cada taladro. Este sistema de ejecución permite inyectar de forma selectiva por tramos y ha sido utilizado con resultados satisfactorios en los tramos de túnel ya inyectados. Cabe indicar, que el sistema diseñado sustituye el uso del tubo-manguito por un procedimiento con perforaciones y reperforaciones consecutivas

de longitud creciente, que permiten ir tratando diferentes tramos de terreno por fases. Se ha concluido además que este procedimiento ha resultado efectivo durante las obras ejecutadas.

En la primera etapa (y con menos probabilidad en la segunda) es cuando se analizó que los taladros podían interceptar capas sin tratamiento previo y generarse vías de agua hacia el interior del túnel con arrastres de arenas. En esta primera etapa (y en la segunda si fuese necesario) fue necesaria la instalación previa de boquillas tipo preventer^(c), que permiten detener las entradas de agua con grandes caudales e inyectar con seguridad.

Estas actuaciones preventivas son especialmente importantes, ya que, si durante la ejecución se producen salidas de importantes caudales de aguas con arrastres sólidos, generan un empeoramiento del terreno que hace más difícil conseguir las mejoras del tratamiento. En situaciones con caudales reducidos y sin arrastres se han previsto obturadores simples con accionamiento mecánico o neumático.

Cabe indicar que, adicionalmente a las coronas anteriormente descritas, se realizó un tratamiento del frente para cerrar frontalmente el recinto. Consta de 17 taladros de 12 metros de longitud repartidos uniformemente por la sección. (Figura 63).

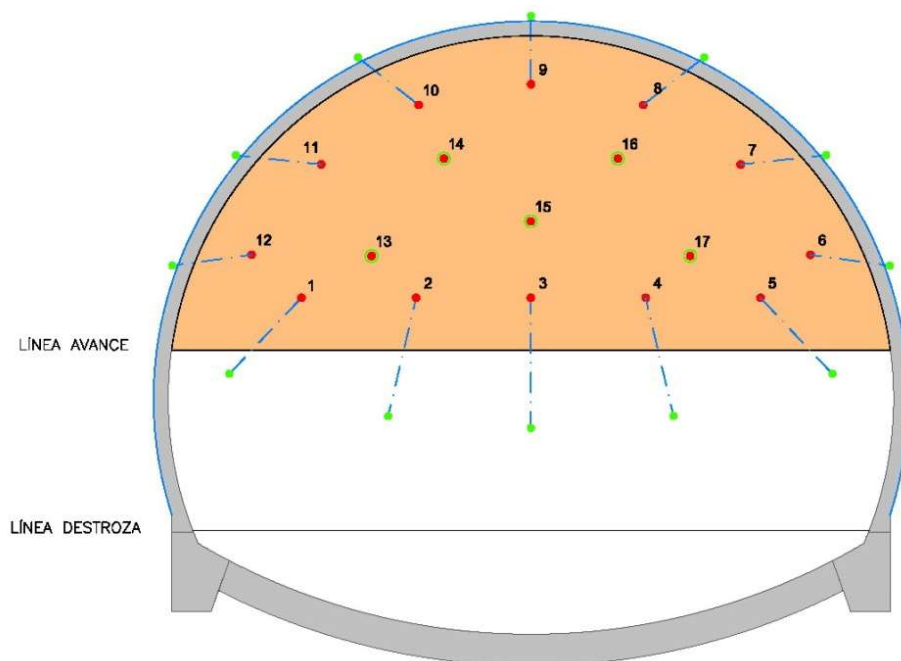


Figura 63.- Proyección de inyecciones en Tratamiento de Frente

- (c) También denominado Tubo de apoyo (standpipe). A través de la perforación con un tamaño de la broca 76 mm de diámetro a una profundidad de 3 a 4 m, se inserta un tubo de acero (ϕ int. > 55 mm, ϕ ext. < 66 mm) en los barrenos y rellenado previamente su anillo exterior contra el terreno con lechada densa de cemento. De esta forma la colocación del obturador no es directamente sobre el frente de excavación, consiguiéndose una zona de aplicación de la inyección segura, libre de fracturas y con agarre garantizado del obturador sobre la tubería.

A medida que se ejecutó el avance del frente se observó un mayor aporte de agua hacia al túnel, hasta el punto de que en las secciones que atravesaban el acuífero aparecían grandes caudales de agua con la consiguiente disminución del nivel freático del acuífero, que abastece a varias poblaciones.

Además, esta afluencia de agua obligaba a paralizar las obras por los riesgos relacionados con la seguridad y la afección a los acuíferos. En la Figura 63 se muestra entre círculos rojos, el replanteo de los barrenos de perforación en el frente de excavación.

Sin embargo, conseguir una mayor impermeabilidad exige el rellenado de aperturas y poros con el menor tamaño posible, lo que implica el empleo de mezclas muy finas con microcemento, junto con presiones de inyección lo más elevadas posibles, para obtener la máxima penetrabilidad y un radio de alcance más amplio. Para explicar este mayor aporte de agua se propuso la hipótesis de que las propias filtraciones de agua hacia el interior del túnel provocan un arrastre de las fracciones más finas del material, aumentando la permeabilidad del terreno en un proceso progresivo de erosión. Al excavar el túnel se genera un gradiente de presiones hidráulicas muy marcado entre los niveles acuíferos no afectados aún por la excavación y las paredes del túnel, donde la presión del fluido es cero. Este gradiente genera un flujo de agua intenso, con velocidad suficiente para arrastrar partículas, de forma que la propia excavación del túnel va aumentando la permeabilidad del terreno por lavado.

En la Figura 63 se observa la evolución del gradiente de presiones.

- En el estado inicial, a la cota del túnel, la presión hidrostática en un punto está definida por la siguiente ecuación.

$$P = \rho \times g \times h$$

Donde P es la presión hidrostática, ρ es la densidad del fluido, g es la aceleración de la gravedad y h es la altura del fluido.

- Al abrir una sección del túnel, la presión en el techo es cero, mientras que en su entorno la presión sigue la expresión de la Ec 1, generando un gradiente de presiones muy alto. Este gradiente provoca un mayor caudal que facilita el arrastre de las arenas más finas y, por tanto, el aumento de la permeabilidad de las mismas en las inmediaciones del túnel.

- Una vez se arrastran la mayoría de las arenas finas, el gradiente de presiones asciende sucesivamente, lo que provoca que, de forma general, las arenas situadas a cotas más altas aumenten a su vez su permeabilidad, haciendo que el fenómeno progrese (Figura 64).

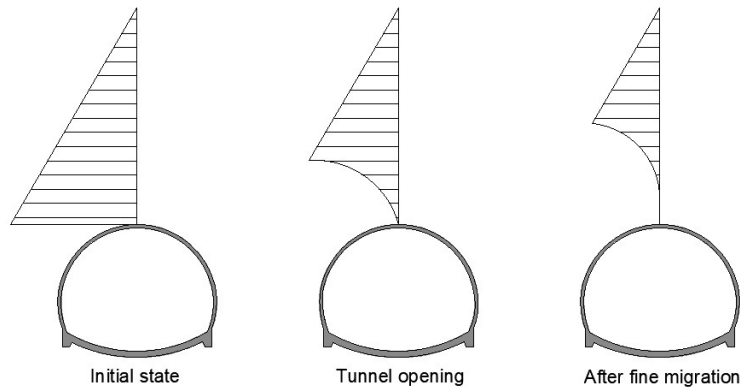


Figura 64.- Evolución del gradiente de presiones con el avance del túnel

Por tanto, a las necesidades de mejora del terreno e impermeabilización del mismo, se une el problema de arrastre de material, que aumenta la afluencia de agua y obliga a una inyección más intensa y agresiva. Como ya se analizó en el apartado 3.2, una presión de inyección elevada puede ocasionar un aumento de la presión en determinadas zonas del acuífero, por lo que el gradiente hidráulico disponible para generar estos arrastres puede verse incrementado con el propio proceso de inyección. Por ello, hubo que controlar el proceso de inyección para evitar aumentar la permeabilidad del acuífero en otras zonas al favorecer el arrastre de finos.

5.3.2. Selección de las lechadas en los trabajos del Túnel de Urdinbide

Para poder llevar a cabo un correcto diseño del tratamiento de inyección es necesario conocer tanto el material a inyectar como el material donde se va a inyectar. Con este fin, se realiza un reconocimiento del terreno y se selecciona el material a inyectar función de la exudación, fraguado o resistencia a compresión. A continuación, se analiza el arrastre de finos mediante ensayos de laboratorio empleando diferentes proporciones de granulometría de suelos y se estudia la influencia que dicho arrastre provoca en la permeabilidad del suelo ensayado. Por último, y dado que conseguir un grado de impermeabilidad alto en una sola etapa de inyección es prácticamente imposible, se realiza un estudio de reinyección mediante el empleo de lechadas de diferentes densidades.

Fuero dos los materiales seleccionados para los trabajos de inyección en el túnel de Urdinbide:

- Lechadas de cemento CEM II/B-M (V-L) 32.5R, con tamaño de partículas inferior a 65 micras, superficie Blaine de molienda entre 350 y 600 m²/kg y decantaciones inferiores al 4%. Además, se emplean aditivos superplastificantes para aumentar la fluidez y facilitar la inyección, así como acelerantes para reducir el tiempo de fraguado. Las dosificaciones agua/cemento consideradas están entre 0,5 y 0,7 y las propiedades de las mezclas se recogen en la Tabla 24, incluyendo la viscosidad con el Cono Marsh, el tiempo de fraguado y la resistencia a compresión simple a los 7 días.

A/C ratio	densidad (g/cm ³)	Exudación (%) 2h	Tiempo fraguado (h)	Viscosidad cono	Resistencia a compresión (MPa) 7d
0,5	1,62±0,1	2,5±0,5	3,0±0,20	1'05''±0,5''	30,7±2,0
0,6	1,61±0,1	2,7±0,5	3,5±0,20	0'41''±0,5''	24,6±1,8
0,7	1,59±0,1	4,0±0,5	4,5±0,35	0'40''±0,5''	17,9±1,6

Tabla 24.- Características de las lechadas de cemento función de su A/C ratio

- Lechadas de microcemento con una penetrabilidad superior a las inyecciones de cemento, un tamaño de partícula inferior a 32 micras, una superficie Blaine de molienda superior a 1.000 m²/kg y A/C ratio de 1,5. Para conseguir que las partículas finas del microcemento no se aglutinen y formen agrupaciones de mayor tamaño que disminuyan su capacidad de penetración, se adicionan dispersantes. Además, y con el fin de evitar la migración de la lechada, ésta debe presentar el menor tiempo de fraguado posible. Para la selección del microcemento se analizan propiedades de diferentes microcementos comerciales como la densidad aparente en húmedo, la exudación de agua, el tiempo de fraguado, la viscosidad con el Cono Marsh y la resistencia a compresión a los 7 días. La Tabla 25 muestra los resultados de dichos análisis para dos microcementos con dos tamaños máximos de partícula (12 y 32 micras). Destaca el microcemento con tamaño 32 micras, con menor viscosidad y mayor resistencia a compresión. Por tanto, será éste el microcemento seleccionado para llevar a cabo las inyecciones.

Microcemento	Densidad (g/cm ³)	Exudación (%) 2h	Tiempo fraguado (h)	Viscosidad cono (s)	Resistencia a compresión (MPa) 7d
12	1,36±0,1	8±0,5	18±1,0	0'34"±0,5"	23,7±2
32	1,35±0,1	8±0,5	5±0,5	0'29"±0,5"	25,0±2

Tabla 25.- Características de las lechadas de microcemento

Una vez seleccionados los diferentes materiales a inyectar (cemento CEM II/B-M (V-L) 32.5R y microcemento 32), se analizó la eficacia de la inyección.

5.3.3. Eficacia de la reinyección y el tratamiento por etapas

Para poder alcanzar el grado de impermeabilidad deseado mediante inyecciones, es habitual trabajar en etapas, o lo que es lo mismo, con reinyecciones, de tal forma que en las primeras etapas se cierran los grandes poros y fracturas para en etapas posteriores cerrar los pequeños huecos y/o fisuras. En cada reinyección se suele modificar o la densidad de la lechada o el tipo de lechada empleada.

Dada la importancia de alcanzar un grado de impermeabilidad alto, se realizan ensayos de reinyección. En los ensayos de laboratorio se rellena el tubo de PVC con el material a ensayar, procedente del túnel, y se comienza inyectando una lechada de cemento con A/C ratio de 0,5 que se deja fraguar 6 horas para, a continuación, analizar los cambios en porosidad y permeabilidad. Sobre este material previamente inyectado se inyecta una segunda lechada con A/C ratio de 0,6 que de nuevo se deja fraguar para analizar la nueva porosidad y permeabilidad. Por último, se vuelve a inyectar a la muestra una lechada de A/C ratio de 0,7 analizando la nueva porosidad y permeabilidad.

En la Tabla 8 se recogen los valores de permeabilidad, longitud de penetración de la lechada, presión máxima y caudal representativo obtenidos en los ensayos de reinyección llevados a cabo en el material representativo del terreno.

Estado	Permeabilidad (m/s)	Longitud de penetración (m)	Presión máxima (MPa)	Caudal representativo (l/min)
Inicial	$7,7 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
Inyección 0,5	$9,5 \cdot 10^{-4}$	1,05	0,470±0,05	10
Inyección 0,6	$7,5 \cdot 10^{-5}$	0,60	1,160±0,1	5
Inyección 0,7	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,25	1,520±0,1	2

Tabla 26.- Resultados del ensayo de reinyección

En la Tabla 26 se observa como en la segunda y tercera reinyección la penetración de la lechada es inferior a 1 m, y se reduce aún más en la siguiente reinyección. Además, también se observa una reducción tanto

de la permeabilidad como del caudal medio de entrada en cada una de las etapas, al tiempo que aumenta la presión de inyección.

5.3.4. Solución propuesta para el Túnel de Urdinbide

Una vez analizado el problema, se diseña un tratamiento de inyección compuesto a su vez por dos sub-tratamientos, uno previo a la excavación del túnel y denominado, preinyección, y uno posterior a la excavación y colocación del sostenimiento del túnel denominado post-inyección.

Con la preinyección se pretende:

- Conseguir una franja de terreno “mejorado” de espesor mínimo de 3 m en todo el perímetro de la excavación que asegure la estabilidad del túnel durante su ejecución.
- Reducir la permeabilidad hasta que la infiltración del agua del túnel no supere el caudal máximo que se puede detraer sin afectar de forma sensible al acuífero superior y que, según el estudio hidrológico previo, es de 3 l/s.

Con la post-inyección se pretende tratar zonas puntuales en donde la preinyección no haya conseguido el grado de impermeabilidad deseado.

a) Preinyección

De acuerdo a experiencias previas, y a los ensayos realizados se diseña una preinyección formada por cuatro etapas de inyección.

Recordar que la acción de la gravedad junto con las irregularidades del terreno, pueden provocar desviaciones en los taladros del 2 al 4 % de la longitud total perforada, por tanto, para asegurar el espesor mínimo de tratamiento de 3 m, el contorno de los sondeos más externo se sitúa entre 3 y 4,5 m de distancia del perímetro de la excavación, mientras que el contorno de los sondeos más interno se sitúa entre 1 y 1,5 m.

Todos los sondeos se monitorizan durante la inyección, con el fin de conocer en tiempo real la presión, el caudal de inyección y el volumen de lechada inyectada.

La Figura 65 muestra de forma esquemática los sondeos de cada etapa, así como su inclinación para secciones equidistantes 6 m a lo largo del eje del túnel.

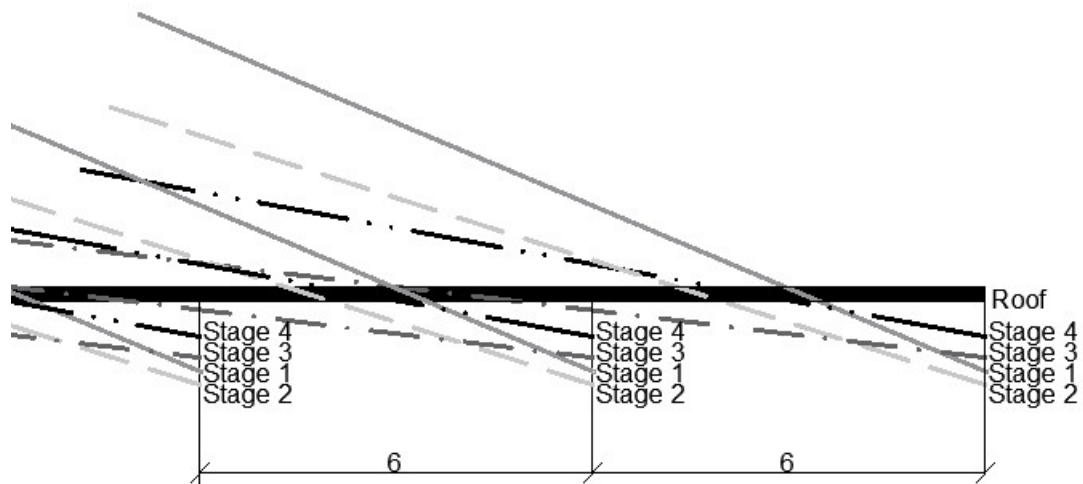


Figura 65.- Esquema longitudinal de las cuatro etapas de preinyección.

b) Etapa 1 (relación A/C de 0,5)

En un primer momento se perforan ocho sondeos, denominados sondeos piloto, distribuidos a lo largo de todo el perímetro del frente de la excavación. El objetivo de estos sondeos es conocer la posición y las características de los niveles más permeables que van a ser interceptados por el tratamiento, pero también evaluar el caudal surgente.

Los sondeos piloto se perforan e inyectan en fases sucesivas de 6 m de longitud, es decir, una vez perforados e inyectados esos 6 m de longitud se deja fraguar la lechada para volver a reperforar el tramo inyectado hasta alcanzar los 12 m de longitud que de nuevo se inyectan y se dejan fraguar para volver a perforar hasta alcanzar los 18 m y así sucesivamente hasta completar la longitud del sondeo.

Una vez completado el análisis de los sondeos piloto se perfora el resto de los sondeos de esta primera etapa de inyección. En total 30 sondeos en avance separados 2 m entre sí (de los cuales 8 son los sondeos piloto) que se inyectan con una lechada de cemento con una A/C ratio de 0,5. La inyección se realiza en abanico comenzando por el sondeo inferior, progresando hacia arriba y alternando derecha e izquierda.

La presión máxima de inyección en esta etapa se fija en 1,5 MPa. Este límite superior se ha fijado de forma que no se supere la suma de la presión mínima necesaria para inyectar la lechada (unos 0,5 MPa según se determinó en las pruebas de laboratorio) a la presión del acuífero 0,7 MPa y a los 0,5 MPa que generan un lavado significativo de finos (ensayos de arrastre), es decir se ha fijado por debajo de 1,7 MPa. En cuanto al caudal máximo de inyección, teniendo en cuenta las pruebas de laboratorio que dan un caudal de 10

l/min, se ha fijado un valor máximo de seguridad de 15 l/min, caudal máximo recomendable por los fabricantes de los equipos de inyección empleados.

La distribución de los 30 sondeos en avance incluyendo los 8 sondeos piloto (que se indican con una P entre paréntesis en el croquis) se muestran en la Figura 66, mientras que sus propiedades geométricas se recogen en la Tabla 27. Como se observa en la Figura 66, en esta etapa el contorno externo de los sondeos se sitúa a una distancia de 4,5 m del perímetro de la excavación. Los sondeos piloto son los seleccionados para recoger los parámetros del equipo de perforación durante la ejecución de dichas perforaciones mediante el sistema de media continua o Measurement While Drilling (MWD), tiempo, profundidad, ratio de penetración, presión en cabeza, empuje, presión de amortiguamiento, velocidad de rotación, presión de rotación, caudal de agua de barrido y presión del agua.

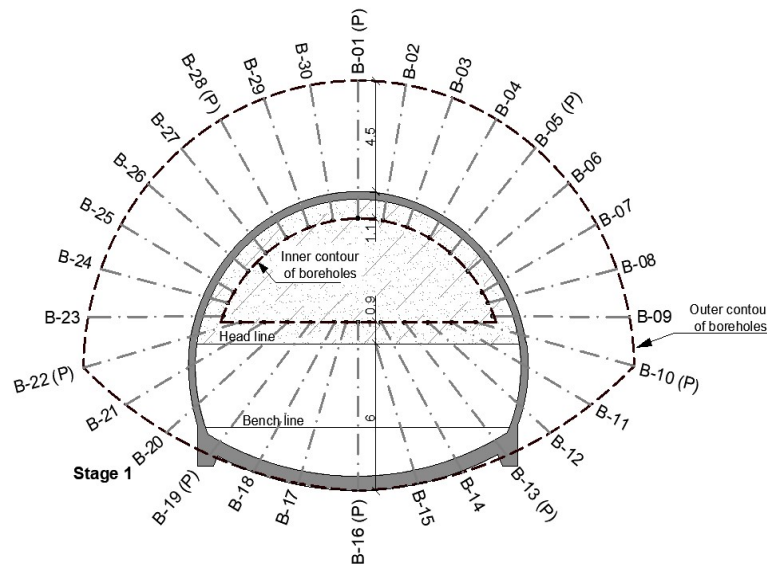


Figura 66.- Esquema de perforación de la etapa 1 y en avance

Numero	Longitud (m)	Azimet (°)	Inclinación (°)	Numero	Longitud (m)	Azimet (°)	Inclinación (°)
B-01	16,09	0	23	B-16	31,50	0	-13
B-02	15,23	3	22	B-17	28,14	-5	-14
B-03	16,65	6	19	B-18	26,76	-8	-13
B-04	18,33	9	15	B-19	27,13	-10	-13
B-05	22,21	10	12	B-20	23,31	-13	-11
B-06	22,25	11	9	B-21	21,35	-16	-9
B-07	24,37	11	7	B-22	21,23	-21	-5
B-08	26,52	12	3	B-23	17,11	-20	0
B-09	28,64	11	0	B-24	15,57	-21	5
B-10	31,50	12	-3	B-25	14,35	-20	11
B-11	31,04	10	-6	B-26	13,46	-19	15
B-12	31,42	9	-8	B-27	12,90	-17	19
B-13	31,50	7	-10	B-28	14,69	-14	22
B-14	31,27	6	-12	B-29	12,82	-10	24
B-15	30,70	3	-13	B-30	13,29	-5	24

Tabla 27. Propiedades geométricas de los sondeos de la etapa 1 en avance (tolerancia de ± 25 cm)

Finalizada la inyección de la etapa 1 y con el fin de generar una zona impermeable y estable en la parte del macizo rocoso que se encuentra situado por delante de los frentes de inyección se proyecta la perforación e inyección sistemática de 17 sondeos de 12 m de longitud para las secciones intermedias situadas a lo largo del eje del túnel y de 24 sondeos de 12 m de longitud para las zonas finales de unión (cale) del túnel en cada tubo (Figura 67, Tabla 28). Estos sondeos, denominados de consolidación del frente, son sondeos subhorizontales que crean un volumen de protección del frente con forma troncocónica. Se inyectan con una lechada de cemento con w/c ratio de 0.5, de forma alterna, de abajo arriba y alternado derecha e izquierda.

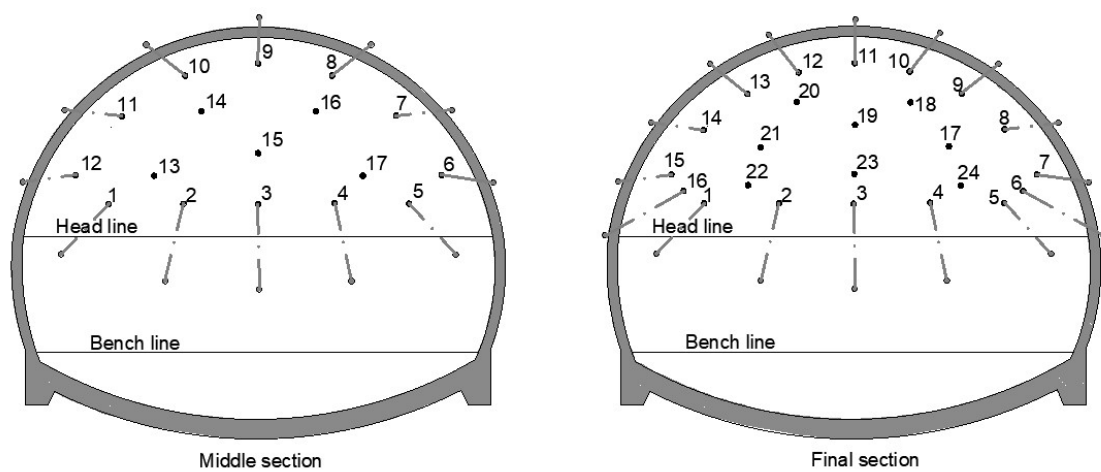


Figura 67.- Esquema de perforación de los sondeos de consolidación del frente

Secciones Medias			Secciones Finales		
Numero	Azimet (°)	Inclinación (°)	Numero	Azimet (°)	Inclinación (°)
1	-7	-7	1	-7	-7
2	-3	-11	2	-3	-12
3	0	-12	3	0	-12
4	3	-11	4	3	-11
5	7	-7	5	7	-7
6	7	-1	6	11	-6
7	8	1	7	7	-1
8	6	4	8	7	1
9	0	6	9	5	4
10	-6	4	10	4	5
11	-8	1	11	0	6
12	-7	-1	12	-4	5
13	0	0	13	-5	4
14	0	0	14	-7	1
15	0	0	15	-7	-1
16	0	0	16	-11	-6
16	0	0	17 - 24	0	0

Tabla 28. Propiedades geométricas de los sondeos de consolidación del frente (tolerancia de ± 25 cm)

c) Etapa 2

Como en el caso anterior, esta etapa tiene un total de 30 sondeos en el frente (Tabla 29), que se inyectan con una lechada de cemento con A/C ratio de 0,6 y en abanico, comenzando por el sondeo inferior, progresando hacia arriba y alternando derecha e izquierda. Sin embargo, en esta etapa la separación entre sondeos es menor que en la primera etapa, en torno a 1,2 m, lo mismo que el extremo de cada sondeo que se sitúa a una distancia de 3 m del perímetro final de la excavación (Figura 68).

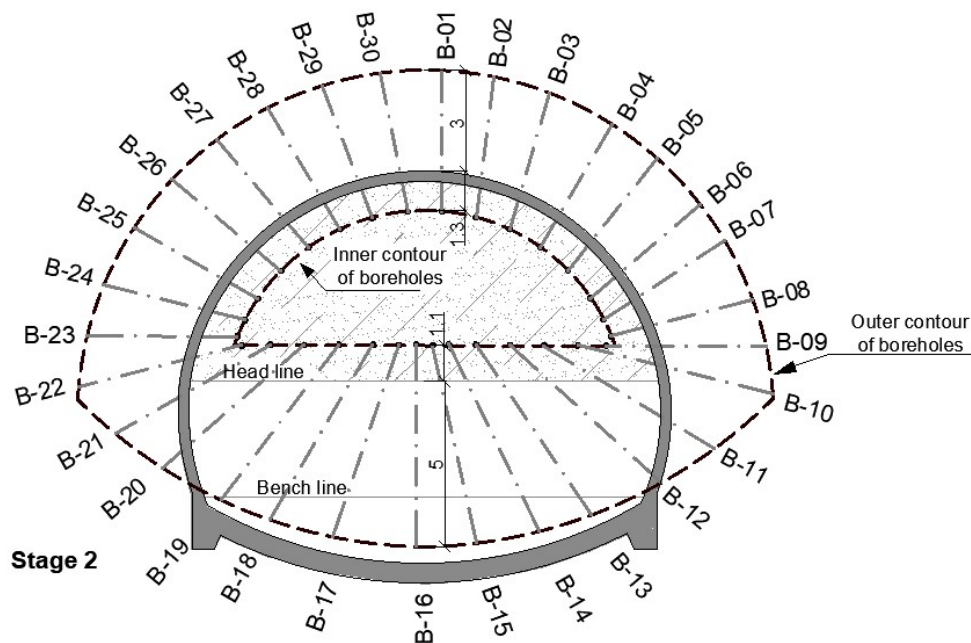


Figura 68.- Esquema de perforación de la etapa 2 y en avance

Número	Longitud (m)	Azimuth (°)	Inclinación (°)	Número	Longitud (m)	Azímüt (°)	Inclinación (°)
B-01	14,09	0	18	B-16	29,60	0	-11
B-02	15,23	2	16	B-17	28,14	-4	-11
B-03	16,65	4	14	B-18	26,76	-7	-11
B-04	18,33	7	12	B-19	25,13	-8	-11
B-05	20,21	8	10	B-20	23,31	-10	-9
B-06	22,25	9	7	B-21	21,35	-12	-7
B-07	24,37	9	6	B-22	19,23	-14	-4
B-08	26,52	9	2	B-23	17,11	-15	0
B-09	28,64	9	0	B-24	15,57	-16	4
B-10	30,85	10	-3	B-25	14,35	-15	9
B-11	31,04	9	-5	B-26	13,46	-14	12
B-12	31,42	8	-7	B-27	12,90	-13	15
B-13	31,50	6	-9	B-28	12,69	-10	17
B-14	31,27	5	-10	B-29	12,82	-7	18
B-15	30,70	2	-11	B-30	13,29	-4	18

Tabla 29.- Propiedades geométricas de los sondeos de la etapa 2 en avance (tolerancia de ± 25 cm)

En esta etapa la presión máxima de inyección en esta etapa se fija en 2,0 MPa, ya que la presión mínima necesaria para inyectar la lechada crece a 1,1 MPa según se determinó en las pruebas de laboratorio. En

cuanto al caudal máximo de inyección, teniendo en cuenta las pruebas de laboratorio que dan un caudal de 5 l/min, se ha fijado un valor máximo de seguridad de 7,5 l/min para evitar roturas hidráulicas del suelo.

d) Etapa 3

En esta etapa se perforan 30 sondeos a una distancia entre ellos de 1,4 m y se sitúa el contorno externo de los sondeos a una distancia de 1 m del perímetro del túnel (Figura 69, Tabla 30). La lechada que se inyecta en esta fase tiene una relación A/C de 0,7. La presión de inyección máxima se incrementa a 2,2 MPa, al aumentar la presión necesaria para la inyección a 1,5 MPa.

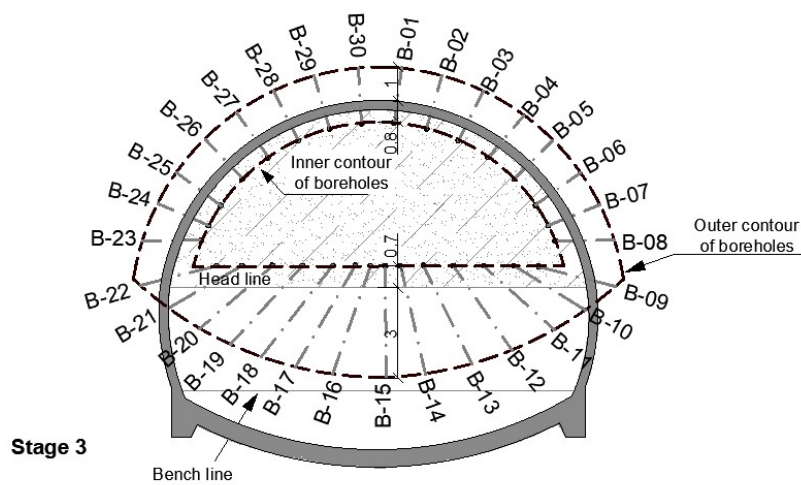


Figura 69.- Esquema de perforación de la etapa 3 y en avance

Número	Longitud (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)	Número	Longitud (m)	Azimut (°)	Inclinación (°)
B-01	14,09	1	7	B-16	29,60	-2	-7
B-02	15,23	2	6	B-17	28,14	-4	-7
B-03	16,65	3	5	B-18	26,76	-5	-6
B-04	18,33	3	4	B-19	25,13	-5	-6
B-05	20,21	3	3	B-20	23,31	-5	-5
B-06	22,25	4	2	B-21	21,35	-6	-3
B-07	24,37	4	1	B-22	19,23	-7	-2
B-08	26,52	4	0	B-23	17,11	-6	0
B-09	28,64	4	-1	B-24	15,57	-6	3
B-10	30,85	4	-2	B-25	14,35	-6	4
B-11	31,04	4	-4	B-26	13,46	-5	6
B-12	31,42	3	-5	B-27	12,90	-5	6
B-13	31,50	3	-6	B-28	12,69	-4	7
B-14	31,27	1	-6	B-29	12,82	-2	8
B-15	30,70	0	-7	B-30	13,29	-1	8

Tabla 30.- Propiedades geométricas de los sondeos de la etapa 3 en avance (tolerancia de ± 25 cm)

e) Etapa 4

En esta etapa se perforan 30 sondeos con una lechada de microcemento de A/C ratio de 1,5 a una distancia entre ellos de 1,2 m y se sitúa el contorno externo de los sondeos a una distancia de 2 m del perímetro del túnel (Figura 70, Tabla 31).

Como sucedía en la etapa 1, en esta última fase se realizan 8 sondeos de control de 12 m de longitud que coinciden con los sondeos número 1, 5, 10, 13, 16, 19, 22 y 28.

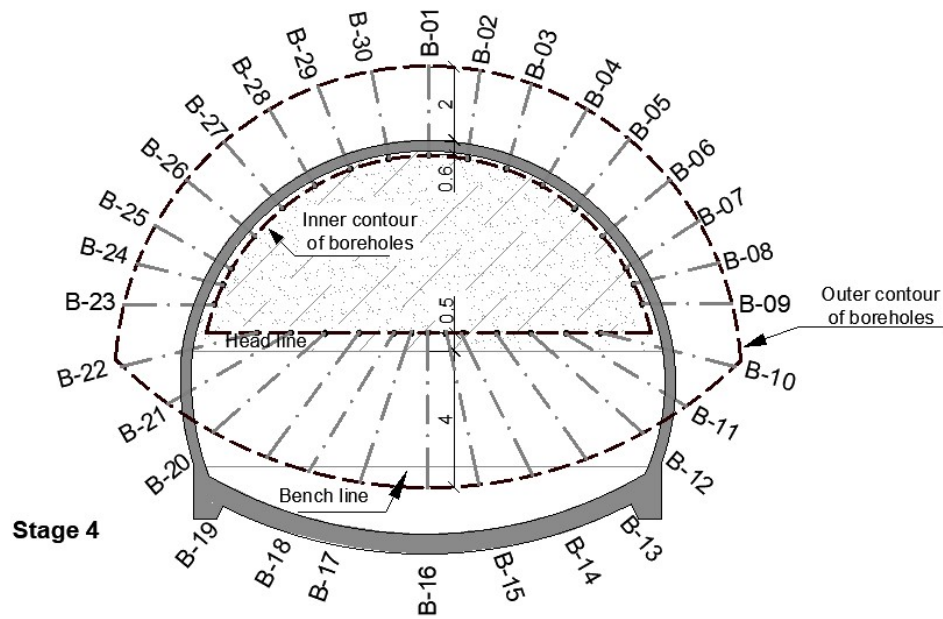


Figura 70.- Esquema de perforación de la etapa 4 y en avance

Number	Length (m)	Azimuth (°)	Inclination (°)	Number	Length (m)	Azimuth (°)	Inclination (°)
B-01	14,09	0	11	B-16	29,60	0	-8
B-02	15,23	1	10	B-17	28,14	-3	-8
B-03	16,65	3	9	B-18	26,76	-5	-8
B-04	18,33	4	7	B-19	25,13	-6	-8
B-05	20,21	5	6	B-20	23,31	-8	-7
B-06	22,25	5	4	B-21	21,35	-9	-5
B-07	24,37	5	3	B-22	19,23	-11	-3
B-08	26,52	5	1	B-23	17,11	-9	0
B-09	28,64	5	0	B-24	15,57	-9	2
B-10	30,85	7	-2	B-25	14,35	-9	5
B-11	31,04	6	-4	B-26	13,46	-8	7
B-12	31,42	6	-5	B-27	12,90	-7	9
B-13	31,50	4	-6	B-28	12,69	-6	10
B-14	31,27	4	-7	B-29	12,82	-4	11
B-15	30,70	2	-8	B-30	13,29	-2	11

Tabla 31.- Propiedades geométricas de los sondeos de la etapa 4 en avance (tolerancia de ± 25 cm)

De igual forma que se inyecta el frente, en destroza se inyectan 19 sondeos en cada etapa con las mismas características de lechada e inyección que las llevadas a cabo en el frente. En la etapa 1 este contorno se

sitúa a 4,5 m del perímetro de la excavación, mientras que en la etapa 3, la más cercana al perímetro, el contorno externo de los sondeos se sitúa a 1,5 m. En el resto de las etapas, el contorno exterior de los sondeos es equidistante con las anteriores.

f) Post-inyección

La post-inyección se realiza en zonas puntuales donde es necesario incrementar el grado de impermeabilidad del terreno y siempre en función de los resultados obtenidos en los sondeos de control. Se lleva a cabo mediante la inyección de microcemento con un A/C ratio de 1,5 en sondeos distribuidos uniformemente a lo largo del perímetro del túnel con una distancia de 108 m entre sí y con una longitud de 10 m (Figura 71). Este último tratamiento solo se empleó en determinados puntos donde, bien por afluencia de agua, bien por deformaciones puntuales, no se había conseguido la intensidad requerida de inyección del tratamiento.

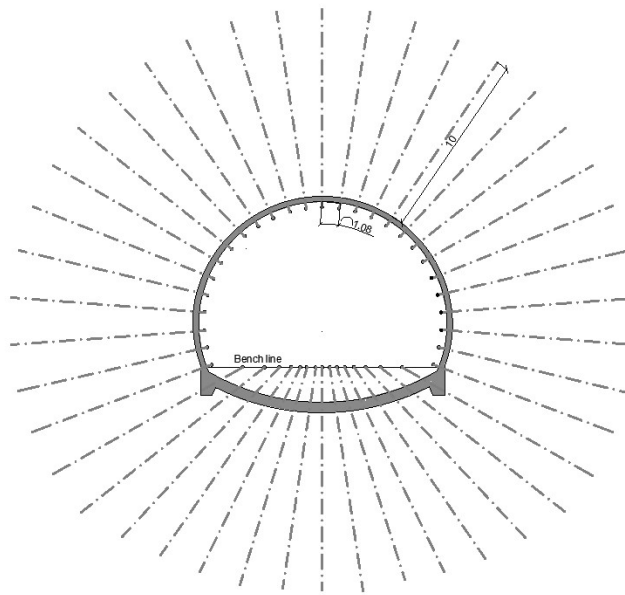


Figura 71.- Esquema de perforación en el tratamiento de post-inyección

5.3.5. Finalización del tratamiento

El proyecto contemplaba criterios de control objetivos que permitían evaluar el grado de mejora e impermeabilización conseguido.

Para el primer objetivo (mejora del terreno), el proyecto contempla un control basado en las presiones de inyección alcanzadas en la última etapa. Se considera que conseguir presiones de cierre elevadas supone disponer de un terreno de mejores características. Para considerar que la mejora exigida (incremento de 20

puntos de GSI) se ha conseguido, las presiones de cierre de las inyecciones de los taladros de la última etapa deberán cumplir las siguientes condiciones (Tabla 32). En ella el termino “tapada” se refiere a la montera de terreno por encima de la clave de la sección de excavación del túnel, diferenciando una cobertura de mas de 45 m y de menos de 45 m.

CONDICIONES DE CESE DE LA INYECCIÓN PARA CADA MEZCLA Y EN CADA TALADRO DE AVANCE O DESTROZA TANTO EN ZONA CON REVESTIMIENTO ESTANCO COMO DRENADO.

CESE NORMAL:

CESE POR PRESIÓN	ETAPAS 1 Y 2	ETAPAS 3 Y SUCESIVAS
AVANCE	20 BARES	20-30* BARES TAPADA <45m 30-40* BARES TAPADA >45m
DESTROZA	20 BARES	20-30* BARES PARA MICROCEMENTO 12 μ 30-40* BARES PARA CEMENTO

* LAS PRESIONES MAYORES SE ADOPTARÁN CUANDO NO SE HAN OBSERVADO SURGENCIAS NI EN SUPERFICIE NI EN EL INTERIOR DEL TÚNEL.

Tabla 32.- Condiciones de Cese de la inyección

Las presiones de inyección se mantuvieron siempre por debajo de los 40 bares para evitar surgencias en superficie.

En cuanto a la reducción de permeabilidad, el proyecto contempla la realización de 8 taladros de control repartidos por el perímetro y frente de la excavación de una longitud igual a la excavación a realizar más un mínimo de 6 metros de solape (mínimo de 12 metros). Una vez realizados, se aforan para medir los caudales que deben cumplir unos máximos en función de las características del tramo a considerar, con revestimiento estanco o drenado.

- Tramo con revestimiento estanco:
 - Caudal medio de los taladros de control ≤ 10 litros/minuto.
 - Ningún taladro con caudal mayor a 30 litros/minuto.
- Tramo con revestimiento drenado:
 - Suma de los caudales de los taladros de control $\leq 1,5$ litros/minuto.

CAPITULO VI – CONCLUSIONES

A continuación, se exponen las principales conclusiones extraídas de los trabajos de investigación llevados a cabo en relación a la inyectabilidad de terrenos tipo suelos.

1. Los trabajos de investigación han permitido diseñar un nuevo instrumento de medida de viscosidad denominado **viscosímetro dinámico**, para estudiar el comportamiento de los fluidos a inyectar en el interior de una junta de forma que simulen condiciones que permitan replicar una discontinuidad del terreno. Este tipo de pruebas servirá para comprobar los fenómenos de filtrado que se producen a la entrada de las juntas por segregación de los granos más gruesos.
2. Se ha diseñado un equipo y una metodología de ensayo que permite predecir el comportamiento de una lechada en un suelo determinado, de forma que sirva como base de diseño para el tratamiento, definiendo la longitud entre sondeos, la tipología de lechadas más adecuadas en cada fase y las reducciones en la permeabilidad previsibles.
3. La lechada avanza dentro del suelo buscando las zonas que le generan una menor resistencia. Es por lo que, cuando encuentra dificultades, el frente de avance tiende a desarrollar una forma de lengua en el interior del suelo, mientras que es uniforme cuando penetra con facilidad. La profundidad máxima alcanzada por la inyección y la forma de la lengua dependerá en gran medida del tamaño de partícula máximo en la lechada inyectada en relación a la granulometría del suelo y su heterogeneidad. Además, la forma del frente de avance irá variando a medida que se aleja del punto de inyección y las condiciones se vuelven más críticas.
4. Se ha demostrado que la aplicación del tratamiento del suelo con una combinación estudiada y analizada de uso de cemento y microcemento es adecuada tanto desde el punto de vista técnico como desde el económico, estableciendo un punto de equilibrio.
5. Cuanto mayor es la relación agua/cemento de la lechada, mayor es el volumen de poros inyectados. Es decir, cuanto menos densa es la lechada mayor capacidad tiene esta de fluir y rellenar los poros del suelo. Así, una dosificación 2:1 permite reducir la permeabilidad un orden de magnitud.
6. Cuando se realizan inyecciones progresivas de lechadas más densas se consiguen reducciones muy significativas en la permeabilidad. Sin embargo, la capacidad de penetración se reduce significativamente con la densidad, aun aumentando la presión de inyección, por lo que los tratamientos secundarios o terciarios requieren menor distancia entre sondeos para ser completamente efectivos.

7. Se ha comprobado que, aunque tras el cese de la inyección se realice un lavado del material por el retorno de agua, este lavado no es completo, ya que parte del material inyectado permanece en los huecos.
8. Se ha demostrado la hipótesis de que las propias filtraciones de agua hacia el interior del túnel provocan un arrastre de las fracciones más finas del material, aumentando la permeabilidad del terreno en un proceso progresivo de erosión. Al excavar el túnel se genera un gradiente de presiones hidráulicas muy marcado entre los niveles acuíferos no afectados aún por la excavación y las paredes del túnel, donde la presión del fluido es cero. Este gradiente genera un flujo de agua intenso, con velocidad suficiente para arrastrar partículas, de forma que la propia excavación del túnel va aumentando la permeabilidad del terreno por lavado. Este fenómeno debe tenerse en cuenta en las obras de excavación, puesto que los flujos de agua pueden incrementarse progresivamente y terrenos a priori poco permeables pueden requerir tratamientos de impermeabilización.
9. Como consecuencia de los fenómenos de lavado por circulación de agua, las permeabilidades de las zonas a inyectar pueden sufrir grandes variaciones provocadas por la inyección a alta presión de otras zonas del entorno del túnel.
10. Llevar a cabo un número mayor de etapas de tratamientos de inyección no garantizara una mejora en el tratamiento de la zona a excavar de mayor grado de impermeabilización que el ya obtenido con las primeras etapas, haciendo la inversión de medios y tiempo innecesaria.
11. Se aporta una solución técnica que combina la aplicación sistemática de inyecciones de consolidación con una geometría troncocónica que permite añadir al tratamiento del terreno la impermeabilización. Este tratamiento se aplica antes de movilizar el terreno por su excavación, lo cual evita el problema de las infiltraciones posteriores que aparecen en los siguientes avances de excavación del túnel.
12. El procedimiento de inyecciones planteado cambia la localización puntual de las inyecciones por una inyección uniformemente repartida. Con ello se consigue un resultado más homogéneo en las obras mineras y civiles, tanto superficiales como subterráneas. Sustituye el uso del tubo-manguito por un procedimiento con perforaciones y reperforaciones consecutivas de longitud creciente, que permiten ir tratando diferentes tramos de terreno por fases, concluyendo tras la ejecución de la

obra que este procedimiento ha resultado efectivo. Al eliminar el uso de tubos de PVC, además de la ventaja económica, se reduce la huella de carbono de la obra.

13. Las incógnitas que presenta el medio geotécnico ampliadas con las variables de los sistemas de inyección, hacen necesario planear detalladamente los trabajos en cada etapa de inyección, para lo cual se debe tener claro el objetivo del procedimiento que se va a aplicar. En casos específicos y una vez identificado el problema, se puede establecer si las inyecciones que se van a hacer serán para mejorar las condiciones de resistencia de la masa del terreno o para modificar su conductividad hidráulica.

CAPITULO VII – FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Los estudios presentados en esta tesis dejan abiertas distintas líneas de investigación que pueden permitir caracterizar de forma más completa la actuación de las lechadas de cemento en acciones de impermeabilización subterránea en suelos, así como acercarlos resultados aquí obtenidos a aplicaciones prácticas.

Algunas de las posibles líneas futuras de investigación se citan a continuación:

a) Correlacionar los datos obtenidos en laboratorio mediante ensayos, con los datos reales de inyección en obras ejecutadas.

Una línea de investigación que tiene por objetivo desarrollar un modelo de predicción del comportamiento de las lechadas en la inyección. La finalidad de dicho modelo sería la de su utilización como herramienta de decisión en fase de diseño de la impermeabilización de una infraestructura subterránea, en relación con la elección de materiales más acordes a las condiciones ambientales y de servicio previstas.

Para realizar este modelo de predicción es necesario comparar los resultados de los ensayos de laboratorio con los casos reales de las obras analizadas.

b) Estudiar el comportamiento de las lechadas de cemento ante los diferentes parámetros que se pueden alterar durante la inyección, principalmente temperatura, presión y el contenido en agua del suelo.

La variación de estos parámetros, fundamentalmente la temperatura, proporcionara a las lechadas propiedades variables que modificaran su comportamiento en función de las necesidades del suelo a inyectar y tratar.

c) Ampliar el estudio de las propiedades de las lechadas de cemento para otras adiciones o mezclas.

Centrando el estudio en el desarrollo de nuevas lechadas basadas en geopolimeros, que doten a las mismas de múltiples propiedades y beneficios y empleando para su fabricación materiales reciclables que contribuyan a una economía circular. Se plantea aquí el uso de desechos inertes de construcción, canteras y minería que tengan en las inyecciones un ciclo de vida útil.

d) Estudiar y comparar el comportamiento de las lechadas de cemento estableciendo un criterio de control con IA (Inteligencia Artificial) que regule la inyección (parámetros de bombeo) durante su aplicación y que actúe sobre las variaciones de la densidad de la lechada en tiempo real.

Mediante el empleo del Machine Learning que es una disciplina del campo de la Inteligencia Artificial que, a través de algoritmos, dota a los ordenadores de la capacidad de identificar patrones en datos masivos y elaborar predicciones (análisis predictivo).

e) Estimación predictiva de los volúmenes de inyección mediante el diseño de nuevos ensayos.

A la vista de las limitaciones observadas en los ensayos predictivos del comportamiento que se han desarrollado a nivel mundial, se está diseñando un nuevo tipo de ensayo (Figura 71) que subsane dichas limitaciones, en especial el tamaño de muestra (efecto escala) y el comportamiento de las inyecciones sobre un terreno sometido a un estado tensional más parecido al que realmente se encuentra en una obra. En las siguiente Figura 71 se esboza el diseño de dicho ensayo del equipo al que denominaremos, **Antipresímetro**.

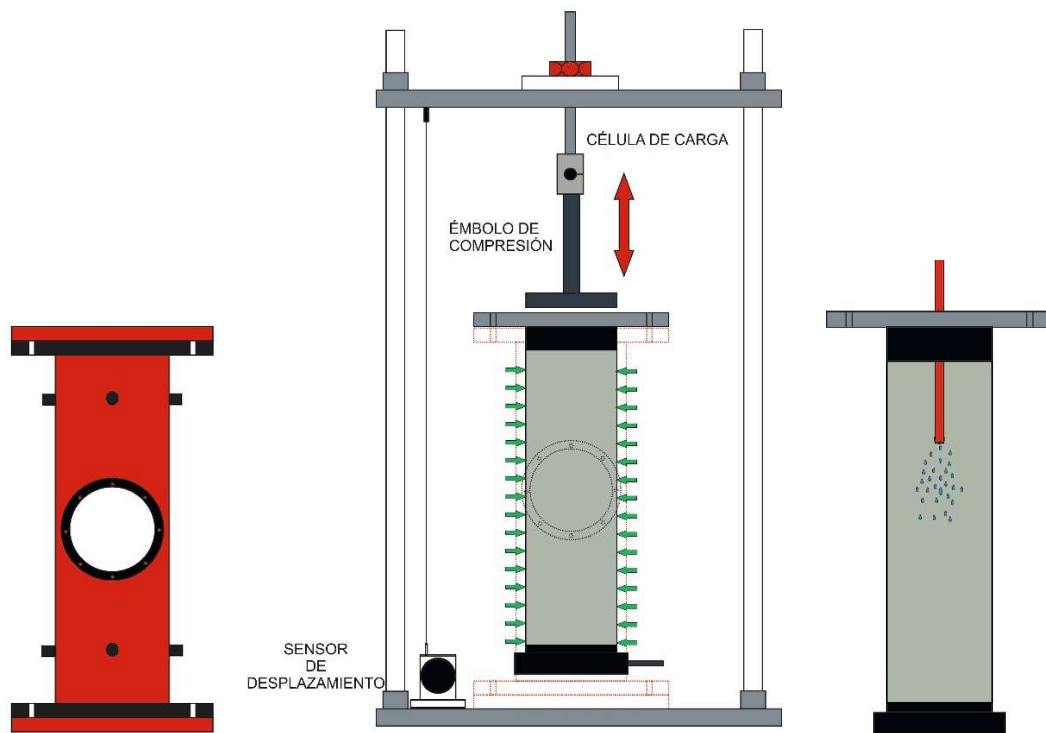


Figura 71.- Diseño del ensayo a media escala (Antipresímetro)

En el interior de una camisa de acero, de 1 m de longitud y 20 cm de diámetro, se introduce el suelo a ensayar, que puede ser compactado hasta una densidad similar a las condiciones in situ. En estas

condiciones, a través de una cánula se introduce la lechada de inyección y se puede evaluar su progresión, modificando variables como la presión de inyección o el caudal.

Este sistema permitiría obtener un punto de partida para optimizar las lechadas de inyección en un determinado material, a una escala de trabajo que ya permite considerar granulometrías más gruesas o heterogeneidades del terreno.

Durante todos estos ensayos, los resultados analíticos que se han ido obteniendo, se han ido acumulando, generando una base de datos bastante compleja y necesaria de almacenar y procesar con objeto de poder realizar informes posteriores y mejoras en el proceso. A consecuencia de ello, nos planteamos la necesidad de un sistema de almacenamiento de datos web que nos permitiera tener almacenados los mismos, con acceso desde cualquier punto, tanto para el volcado de nuevos datos de inyección como para consulta.

f) Estimación predictiva de los volúmenes de inyección mediante el diseño de nuevos ensayos.

Se desarrollará un manual de inyecciones en suelos como guía para nuevos proyectos y referencia en los estudios futuros, basado en las prácticas de campo y experiencias durante los trabajos de inyección acaecidos durante los casi dos años de ejecución en la obra del Túnel de Urdinbide y de la investigación en paralelo realizada con la Universidad de Oviedo.

CAPITULO VIII – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Por orden alfabético:

- (1) Axelsson, M., G. Gustafson, and Fransson A. 2009. **Stop Mechanism for Cementitious Grouts at Different Water-to-Cement Ratios**. Tunnelling and Underground Space Technology 24 pag. 390–397.
- (2) Aziz Naj, Majoor Dean, Mirzaghorbanali Ali (2017). **Strength Properties of Grout for Strata Reinforcement**. Procedia Engineering, Volume 191, pp. 1178-1184.
- (3) Barton, N. (2004). **The theory behind high pressure grouting**. Tunnels & Tunnelling International, Sept. pp.28-30, Oct. pp. 33-35.
- (4) Borgesson, L., and Jansson L. (1990). **Grouting of Fractures Using Oscillating Pressure**. In International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock: 875–82. Vienna, A. A. Balkeme, Rotterdam.
- (5) Boschi Katia, Giulio di Prisco Claudio, Oryem Ciantia Matteo (2019). **Micromechanical investigation of grouting in soils**. International Journal of Solids and Structures.
- (6) Covil, C.S., Skinner, A.E. (1996) Grouting in the ground. Paper 36. **Jet grouting– a review of some the operating parameters that form the basis of the jet grouting process**. Institution of Civil Engineers, Dr. A. L. Bell editor. Thomas Telford publishers.
- (7) Croce, P., Flora, A. (2001) **Analysis of single-fluid jet grouting**. Geotechnique 50, No. 6, y discussion en Geotechnique 51 No. 10.
- (8) Dou Jin-xi, Zhang, Zhang Gui-jin, Zhang Xi, Fan, Fan Wei-zhong, Song Wei. (2021). **Dynamic response analysis of slurry-soil coupling in sandy soil based on pulsating grouting**. ROCK AND SOIL MECHANICS, Volume 42, Issue12 Page3315-3327, Published DEC 13 2021, Indexed 2021-12-29
- (9) Draganović Almir, Stille Håkan. (2011). **Filtration and penetrability of cement-based grout: study performed with a short slot**. Tunn Undergr Sp Tech 26 pag:548–559.
- (10) Draganović Almir, Stille Håkan. (2014). **Filtration of cement-based grouts measured using a long slot**. Tunnelling and Underground Space Technology, volumen 43, pag 101 – 112.

- (11) El Mohtar, Chadi, Jaffal, Hamza, Miller Anna Kate, Ward Katie. (2022). **Implementing Digital Imaging for Improved Understanding of Microfine Cement Grout Permeation and Filtration.** Geotechnical and Geological Engineering, Indexed 2022-06-10.
- (12) Eriksson M, Dalmalm T, Brantberger M, Stille H. (1999). **Separations-och filtrerings stabilitet hos cementbaserade injekteringsmedel.** Raport 3065 (in Swedish), Royal Institute of Technology
- (13) Escobal Marcos I, Alvarez-Fernandez MI, Prendes-Gero MB, Gonzalez-Nicieza C. (2021). **Designing Cement-Based Grouting in a Rock Mass for Underground Impermeabilization.** Energies, Volume 14, Issue 13, Article Number 4062. Published JUL 2021.
- (14) Escobal Marcos I. Tesis doctoral. **Evaluación del comportamiento anisotrópico de las lechadas de inyección en macizos rocosos.** Universidad de Oviedo, octubre 2022.
- (15) Fei Xiao, Zhiye Zhao, Huimei Chen. (2017). **A simplified model for predicting grout flow in fracture channels.** Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 70, pp. 11-18.
- (16) Funchag Johan, Thörn Johan (2018). **Radial penetration of cementitious grout – Laboratory verification of grout spread in a fracture model.** Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 72, pp 228-232.
- (17) G. McDonald Michael and W. Harbaugh Arlen (1988). **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.** Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1. USGS Numbered Series.
- (18) **Geo-inyección Estabilizadora con Polímeros – PSGi® Polymer Stabilizing Geoinjection – PSGi®** TPH Bausysteme GmbH Nordportbogen 8 22848 Norderstedt GERMANY.
- (19) Gonzalez Garcia J, Gonzalez-Nicieza C, Alvarez-Fernandez MI, Prendes-Gero MB. (2021). **Injection Treatment for Tunneling Excavation in Sandy Soils with High Fines Content** Energies, Volume 14, Issue 21, Article Number 6930. Published NOV 2021.
- (20) Guía de Cimentaciones en obras de Carretera del Ministerio de Fomento 2020.
- (21) Gustafson G., and Stille H. (2005). **Stop Criteria for Cement Grouting.** Felsbau: Zeitschrift Für Geomechanik Und Ingenieurgeologie Im Bauwesen Und Bergbau 25, pag. 62–68.
- (22) Gustafson G., Claesson J., and Fransson A. (2013). **Steering Parameters for Rock Grouting.** Applied Mathematics 2013: 1–9.
- (23) Gustafson, G, and Stille H. (1996). **Prediction of Groutability from Grout Properties and Hydrogeological Data.** Tunnelling and Underground Space Technology 11, pag. 325–332.

- (24) H. Salimian M., Baghbanan A., Hashemolhosseini H., Dehghanipoodeh M., Norouzi S. (2017). **Effect of grouting on shear behavior of rock joint**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 98, pp. 159-166.
- (25) Håkansson U. (1993). **Rheology of Fresh Cement-Based Grouts**. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology-KTH, Stockholm, Sweden.
- (26) Hatem Mohammed, Pusch Roland, Knutsson Sven (2015). **Study of cement-grout penetration into fractures under static and oscillatory conditions**. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 45, pp 10-19.
- (27) Hjertström S. (2001). **Microcement-pentration versus particle size and timecontrol**. In: Proceedings of the 4th nordic rock grouting symposium, Stockholm, Sweden, 8 Nov 2001. SveBeFo Rapport, vol 55, pp 61–71.
- (28) Informes de la Construcción, Vol. 59, 505, 21-35, enero-marzo (2007). ISSN: 0020-0883
- (29) Jie Liu, Yi Li, Guijin Zhang, Yaning Liu (2019). **Effects of cementitious grout components on rheological properties**. Construction and Building Materials, Volume 227, Article 116654.
- (30) Jisuk Yoon, Chadi, El Mohtar S. (2015). **A filtration model for evaluating maximum penetration distance of bentonite grout through granular soils**. Computers and Geotechnics, Volume 65, pp. 291-301.
- (31) Jorne Fernando, M. A Fernando Henriques, G. Baltazar Luis (2015). **Influence of superplasticizer, temperature, resting time and injection pressure on hydraulic lime grout injectability. Correlation analysis between fresh grout parameters and grout injectability**. Journal of Building Engineering, Volume 4, pp. 140-151.
- (32) Jorne Fernando, M. A. Henriques Fernando (2016). **Evaluation of the grout injectability and types of resistance to grout flow**. Construction and Building Materials, Volume 122, pp. 171-183.
- (33) Jorne Fernando, M.A. Henriques, Fernando, G. Baltazar Luis (2015). **Evaluation of consolidation of different prous media with hydraulic lime grout injection**. Journal of Cultural Heritage, Volume 16, Issue 4, pp. 438-451.
- (34) Kobayashi S., Stille H., Gustafson G., and Stille B. (2008). **Real Time Grouting Control Method: Development and Application Using Äspö HRL Data**. Stockholm, Sweden.

- (35) Liu Quansheng, Sun Lei, Tang Xuhai (2019). **Investigate the influence of the in-situ stress conditions on the grout penetration process in fractured rocks using the combined finite-discrete element method**. Engineering Analysis with Boundary Elements, Volume 106, pp. 86-101.
- (36) Nejad Ghafar Ali, Akbar, S., Al-Naddaf, M., Draganović, Almir, Larsson S. (2018). **Uncertainties in Grout Penetrability Measurements; Evaluation and Comparison of Filter pump, Penetrability Meter and Short Slot**. Geotechnical and Geological Engineering, volumen 36.
- (37) Nobuto J., Nishigaki M, Mikake S., Kobayashi S., Sato T. (2008). **Prevention of clogging phenomenon with high-grouting pressure**. Doboku Gakkai Ronbunshuu C 64 pag:813–832.
- (38) Orden AAA/1702/2014, de 11 de septiembre, por la que se modifica la Orden ARM/1683/2011, de 2 de junio, por la que se regulan los ficheros con datos de carácter personal gestionados por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- (39) Orden AAA/2833/2015, de 17 de diciembre, por la que se modifica la Orden ARM/1683/2011, de 2 de junio, por la que se regulan los ficheros con datos de carácter personal gestionados por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- (40) Pollock, D.W. (1989). **Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S.G.S. modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model**. U.S. Geological Survey Open File Report 89-381.
- (41) Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono.
- (42) Ruhul Amin Mozumder, Aminul Islam Laskar, Monowar Hussain (2018). **Penetrability prediction of microfine cement grout in granular soil using Artificial Intelligence techniques**. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 72, pp. 131-144.
- (43) Sanz J.M. (1981). **Procedimientos generales de construcción. Sondeos y perforaciones, inyecciones, pilotes, pantallas continuas**. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Madrid.
- (44) Shucai Li, Rentai Liu, Qingsong Zhang, Xiao Zhang. (2016). **Protection against water or mud inrush in tunnels by grouting: A review**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 8, Issue 5, pp.753-766.
- (45) Sonebi Mohammed, Perrot Arnaud. (2019). **Effect of mix proportions on rheology and permeability of cement grouts containing viscosity modifying admixture**. Construction and Building Materials, Volume 212, pp. 687-697.

- (46) Stille H., Gustafson G., Hassler L. (2012). **Application of new theories and technology for grouting of dams and foundations on rock**. Geotech Geol Eng 30 pag:603–624.
- (47) Stille, H. 2015. **Rock Grouting-Theories and Applications**. Rock Engineering Research Foundation-BeFo, Stockholm, Sweden.
- (48) Trybala Anna, Koursari Nektaria, Johnson Phillip, Arjmandi-Tash Omid, Starov Victor. (2019). **Interaction of liquid foams with porous substrates**. Current Opinion in Colloid & Interface Science, Volume 39, pp 212-219.
- (49) Tsuji M., Holmberg M., Stille B., Rafi J.Y., and Stille H. (2012). **Optimization of the Grouting Procedure with RTGC Method. Data from a Trail Grouting at City Line Project in Stockholm**. Stockholm, Sweden.
- (50) Wakita S., Aoki K., Mito Y., Kurokawa Y., Yamamoto T., and Date K. (2003). **Development of Dynamic Grouting Technique for the Improvement of Low-Permeable Rock Masses**. In 1st Kyoto International Symposium on Underground Environment, 341–48.
- (51) Wang Qiong, Wang Shanyong, William Scott Sloan, Sheng Daichao, Pakzad Ramin. (2016). **Experimental investigation of pressure grouting in sand**. Soils and Foundations, Volume 56, Issue 2, pp. 161-173.
- (52) Weaver, K. (1991). **Dam Foundation Grouting**. ASCE. New York. 178 p.
- (53) Xiaolong Li, Lianbang Wang, Meimei Hao, Yanhui Zhong, Bei Zhang (2019). **An analytical solution for the radial flow of variable density grout in rock fractures**. Construction and Building Materials, Volume 206, pp. 630-640.
- (54) Zheng, Chunmiao. (1992). **A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reaction of Contaminants in Groundwater Systems**.
- (55) Zhipeng Xu, Changwu Liu, Xingwang Zhou, Gangrong Gao, Xuhai Feng. (2019). **Full-scale physical modelling of fissure grouting in deep underground rocks**. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 89, pp. 249-261.
- (56) Zilong Zhou, Xin Cai, Xueming Du, Shanyong Wang, Haizhi Zang. (2019). **Strength and filtration stability of cement grouts in porous media**. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 89, pp. 1-9.
- (57) Zou L., Håkansson U., Cvetkovic, V. (2018). **Two-phase cement grout propagation in homogeneous water-saturated rock fractures**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 106, 243–249.

- (58) Zou Liangchao, Håkansson U., Cvetkovic Vladimir. (2018). **Two-phase cement grout propagation in homogeneous water-saturated rock fractures**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 106, pp. 243-249.