



Universidad de Oviedo

Programa de Doctorado en Materiales

TITULO DE LA TESIS

**Evaluación del comportamiento anisotrópico de las lechadas de
inyección en macizos rocosos.**

Evaluation of the anisotropic behaviour of injection grouts in rock masses.

TESIS DOCTORAL

Iñigo Escobal Marcos

Junio 2022



Universidad de Oviedo

Programa de Doctorado en Materiales

TITULO DE LA TESIS

**Evaluación del comportamiento anisotrópico de las lechadas de
inyección en macizos rocosos.**

Evaluation of the anisotropic behaviour of injection grouts in rock masses.

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: Evaluación del comportamiento anisotrópico de las lechadas de inyección en macizos rocosos	Inglés: Evaluation of the anisotropic behaviour of injection grouts in rock masses
2.- Autor	
Nombre: Iñigo Escobal Marcos	DNI:
Programa de Doctorado: Materiales	
Órgano responsable: Comisión Académica Programa de Doctorado en Materiales	

RESUMEN (en español)

Predecir el comportamiento de un fluido a través de una junta en roca es de especial interés en aplicaciones de ingeniería civil y obra subterráneas, puesto que permite optimizar los parámetros de inyección de fluidos en el macizo rocoso para provocar el sellado de infiltraciones.

En la actualidad, no existe normativa para analizar y caracterizar el flujo a través de una junta de roca. Existen abundantes referencias bibliográficas que abordan esta temática, pero todos los ensayos propuestos limitan la posibilidad de que el avance del fluido de inyección sea bidireccional, forzándolo a través de la dirección de la rugosidad considerada.

Sin embargo, debido a la anisotropía propia de las juntas de roca, imponer una única dirección de avance puede provocar desviaciones significativas del comportamiento del fluido analizado respecto al que efectivamente se desarrolla en el medio natural. Por tanto, predecir adecuadamente el comportamiento en condiciones reales implicaría comprender cómo interactúan rugosidades diferentes en presencia de varios fluidos que disponen de libertad suficiente para avanzar por cualquiera de ellas.

Para analizar este avance a través de una superficie rocosa a escala de laboratorio ha sido necesario desarrollar 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. Debido a esta falta de normativa se han definido conceptualmente y desarrollado un nuevo tipo de ensayos que permiten dar respuesta a los objetivos planteados en la presente investigación.

En primer lugar, en láminas de metacrilato de 1 cm de espesor se han reproducido todos los patrones de JRC y se han utilizado técnicas de fotoelasticidad para analizar su comportamiento cualitativo cuando se somete la junta a una compresión que tiende a cerrar su apertura. Estas pruebas han permitido demostrar la enorme influencia de la rugosidad y la tensión en la junta en la distribución anisotrópica de los caudales.

Posteriormente se ha llevado a cabo un análisis cuantitativo del flujo direccional con diferentes fluidos (agua, cemento y microcemento) Para ello se han seleccionado cuatro perfiles de rugosidad representativos: JRC 0-2, JRC 10-12 y JRC 18-20 cruzados con una dirección lisa sin rugosidad y una superficie muy rugosa,



correspondiente al JRC 18-20 en todas las direcciones.

Los ensayos se han realizado con el fluido de inyección a diferentes presiones (entre 1 y 6 bares) (dos ensayos por presión de inyección) y para para tensiones normales aplicadas sobre la junta entre 0,5 MPa y 2,0 MPa.

Como comprobar el modelo anisotrópico, se ha realizado un estudio de campo. En el mismo se analiza el uso de lechadas a base de cemento y microcemento para resolver un problema a escala real: el aporte de agua desde un canal cercano a las plantas de sótano de un edificio de reciente construcción en la ciudad del Bilbao (Bizkaia, España).

Entre otras conclusiones, hay que destacar que los resultados en ambos casos 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.

Un último aspecto que se toca en la presente investigación es el criterio económico, planteándose dos cuestiones claves y que normalmente se pasan por alto: ¿cuál es la finalidad del tratamiento, es decir la permeabilidad objetivo? y ¿de qué presupuesto disponemos?

RESUMEN (en Inglés)

Predicting the behaviour of a fluid through a rock joint is of particular interest in civil engineering and underground applications, as it allows optimisation of fluid injection parameters into the rock mass in order to seal water infiltrations.

At present, there are no standards to analyse and characterise the flow through a rock joint. There are several bibliographic references that address this issue, but all the proposed tests do not allow the flow to be bidirectional, forcing it through the direction of the considered roughness.

However, due to the anisotropy of rock joints, imposing a single advance direction can cause significant deviations in the behaviour of the analysed fluid compared to the one which actually exists in the natural environment. Therefore, in order to adequately predict the behaviour in real conditions, it is mandatory to understand how different roughnesses interact in the presence of several fluids that have sufficient freedom to advance through any of them.

In order to analyse this advance through a rock surface at laboratory scale, it has been necessary to develop a system that allows to regulate the fluid inlet pressure, the normal stress that the joint is supporting and, at the same time, allows recording the inlet and outlet flow rates in each of the advance directions. Due to the above mentioned lack of standards, a new type of test has been conceptually defined and developed to meet the objectives set out in this research.



Firstly, all the CRB patterns have been reproduced in 1 cm thick methacrylate sheets and photoelasticity techniques have been used to analyse their qualitative behaviour when the joint is subjected to a compression that tends to close its opening. These tests have demonstrated the enormous influence of the roughness and stress in the joint on the anisotropic flow distribution.

Subsequently, a quantitative analysis of the directional flow with different fluids (water, cement and microcement) was carried out. For this purpose, four representative roughness profiles were selected: JRC 0-2, JRC 10-12 and JRC 18-20 crossed with a smooth direction without roughness and a very rough surface, corresponding to JRC 18-20 in all directions.

The tests have been carried out with the injection fluid at different pressures (between 1 and 6 bar) (two tests per injection pressure) and for normal stresses applied on the joint between 0.5 MPa and 2.0 MPa.

As a check on the anisotropic model, a field study has also been carried out. It analyses the use of cement-based grouts and microcement to solve a real-scale problem: the water supply from a canal near the basement floors of a recently constructed building in the city of Bilbao (Bizkaia, Spain).

Among other conclusions, it should be noted that the results in both cases show an anisotropic distribution of the slurry, which can be justified by analysing the influence on its movement of the families of discontinuities found in the surroundings of the borehole. A new model is presented, in which the slurry injection undergoes a directional redistribution both horizontally and vertically from the injection zone, causing different levels of affection. Based on the case study, correction parameters for the radius of influence are proposed, taking into account these redistribution phenomena and allowing a more accurate estimation of the distance between injection boreholes.

A final aspect addressed in this research is the economic criterion, with two key questions that are usually overlooked: what is the purpose of the treatment, i.e. the target permeability, and what is the available budget?

Índice de contenidos

Capítulo 1 : Introducción	1
Capítulo 2 : Objetivos	4
Capítulo 3 : Estado del arte.....	5
3.1 Los primeros criterios de inyectabilidad	5
3.2 Caracterización de las lechadas de inyección.....	10
3.3 Modelos experimentales de inyectabilidad en juntas	16
Capítulo 4 : Diseño experimental	22
4.1 Diseño conceptual	22
4.2 Preparación de las muestras	25
4.3 Dispositivo de ensayo	29
4.4 Características de la campaña experimental.....	37
Capítulo 5 : Análisis de resultados	41
5.1 Primeros ensayos	41
5.2 Distribución de tensiones en las juntas.....	44
5.3 Ensayos de inyección de agua	47
5.3.1 JUNTAS CON JRC 0-2	47
5.3.2 JUNTAS CON JRC 18-20	50
5.3.3 JUNTAS CON JRC 18-20 CRUZADO CON JRC 18-20	52
5.4 Comportamiento de las inyecciones de cemento.....	57
5.4.1 JUNTAS CON JRC 0-2	57
5.4.2 JUNTAS CON JRC 18-20	58
5.4.3 JUNTAS CON JRC 18-20 CRUZADO CON JRC 18-20	59
5.5 Comportamiento de las inyecciones de microcemento	61
Capítulo 6 : Modelo anisotrópico	64
6.1 Descripción de la problemática	64
6.2 Caracterización del macizo rocoso	67
6.2.1 CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL TERRENO.....	67

6.2.2 NUEVA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO.....	68
6.3 Planificación de pruebas <i>in situ</i> de inyectabilidad	72
6.4 Selección y caracterización del material a inyectar.....	75
6.5 Equipos y procedimientos empleados en los ensayos de inyección	76
6.5.1 EQUIPO DE MEZCLADO	76
6.5.2 BOMBAS PARA LECHADAS.....	78
6.5.3 REGISTRO DE LOS DATOS DE INYECCIÓN	80
6.5.4 PROCEDIMIENTO	81
6.6 Análisis de los radios de influencia	83
6.6.1 INYECCIÓN DE CEMENTO EN EL SONDEO EY-1.....	84
6.6.2 INYECCIÓN DE MICROCEMENTO EN EL SONDEO EY-2	86
6.7 Modelo de distribución del radio de influencia.....	88
6.8 Criterio económico.....	94
Capítulo 7 : Conclusiones	98
Capítulo 8 Futuras líneas de investigación.....	100
Capítulo 9 : Referencias bibliográficas	102

Índice de figuras

FIGURA 1. CONCEPTOS DE PREINYECCIÓN Y POSTINYECCIÓN	2
FIGURA 2. DIFERENTES TIPOS DE INYECCIÓN EN EL TERRENO (MODIFICADO DE BIELZA FELIÚ, 1999)	2
FIGURA 3. DIFERENCIAS EN VALORES D_{95} DE LOS MICROCEMENTOS COMPARADOS CON EL CEMENTO PORTLAND CONVENCIONAL	3
FIGURA 4. EFECTO DE LA PENETRACIÓN DE LA LECHADA.....	6
FIGURA 5. RANGO DE APLICACIÓN DE MATERIALES DE INYECCIÓN (MODIFICADO DE (KUTZNER, 1996))	6
FIGURA 6. APERTURA EFICAZ O EQUIVALENTE	7
FIGURA 7. TRAYECTORIAS DE INYECCIÓN PARA UN GIN DADO (MODIFICADA DE LOMBARDI, 1993)	8
FIGURA 8. INTENSIDAD DE INYECCIÓN EN FUNCIÓN DEL GIN (LOMBARDI, 2002)	9
FIGURA 9. SECUENCIA TÍPICA DEL PROCESO DE INYECCIÓN (EL TANI AND STILLE, 2017)	10
FIGURA 10. INTERACCIÓN LECHADA-MACIZO ROCOSO (LOMBARDI, 2002)	11
FIGURA 11. COMPARACIÓN ENTRE UN FLUIDO NEWTONIANO Y UNO BINGHAM	12
FIGURA 12.- EVOLUCIÓN DE LA VISCOSIDAD CON EL TIEMPO PARA DISTINTOS PRODUCTOS DE INYECCIÓN	13
FIGURA 13. ESQUEMA DEL ENSAYO SHORT SLOT Y DEL PROCESO DE FILTRADO EN LA MEZCLA	15
FIGURA 14. ESQUEMA DE LA PRUEBA <i>LONG SLOT</i>	15
FIGURA 15. SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA INYECTADA EN UNA JUNTA	16
FIGURA 16. DISPOSITIVO DE ENSAYO (MOHAMMED, PUSCH AND KNUTSSON, 2015)	17
FIGURA 17. DISPOSITIVO DE ENSAYO (LI <i>ET AL.</i> , 2016)	17
FIGURA 18. DISPOSITIVO DE ENSAYO (XU <i>ET AL.</i> , 2019)	18
FIGURA 19. FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE LA JUNTA A BAJA PRESIÓN (IZQUIERDA) Y A PRESIONES ELEVADAS (DERECHA Y ABAJO) (GUERRERO MIGUEL <i>ET AL.</i> , 2018).....	19
FIGURA 20. VALORES DE TRANSMISIVIDAD FRENTE A TENSIÓN NORMAL APLICADA (GUERRERO MIGUEL <i>ET AL.</i> , 2018).....	19
FIGURA 21. ESQUEMA DEL DISPOSITIVO DE ENSAYO PARA JUNTAS IMPRESAS CON RUGOSIDAD	20
FIGURA 22. TABLA CON VALORES DEL JRC PROPUESTA POR BARTON Y CHOUBEY	23
FIGURA 23. DISPOSICIÓN HABITUAL DE ENSAYO, MODIFICADO DE (XIONG <i>ET AL.</i> , 2018)	23
FIGURA 24. ESQUEMA CONCEPTUAL DE LOS ENSAYOS	25
FIGURA 25. PUNTOS DEL PERFIL JRC 10-12 TOMADOS CADA 0,5 MM	26
FIGURA 26. PERFIL CERRADO EN INVENTOR CORRESPONDIENTE AL JRC 10-12	26
FIGURA 27. MODELO 3D OBTENIDO TRAS EXTRUIR EL JRC 10-12	27
FIGURA 28. MODELO 3D OBTENIDO CON EL PERFIL DEL JRC 18-20 SOBRE UN CAMINO DE JRC 10-12.....	27
FIGURA 29. MUESTRAS DE RESINA CON EL JRC 18-20 EN DOS DIRECCIONES PERPENDICULARES.....	27
FIGURA 30. DETALLE DE ORIFICIO SUPERIOR EN PIEZAS TIPO B Y DETALLE DE MUESCA (TIPO A).....	28
FIGURA 31. MUESTRA DE RESINA CON CÁNULA Y RACOR IMPLEMENTADOS.	28
FIGURA 32. PERFIL JRC 16-18 REPRODUCIDO EN PMMA	29
FIGURA 33. ÁREA DE TRABAJO	30

FIGURA 34. DISPOSITIVO DE ENSAYO	31
FIGURA 35. VACIADO CIRCULAR REALIZADO EN LA PLACA DE APRIETE (3)	32
FIGURA 36. CENTRADORES (4).....	32
FIGURA 37. DETALLE DE COMPONENTES EN SU CORRECTA POSICIÓN DURANTE EL MONTAJE	33
FIGURA 38. BANDEJA DE ENSAYO (9)	33
FIGURA 39. DETALLE DE LA DISPOSICIÓN DE LA CÉLULA Y EL CILINDRO DE CARGA, CON LA JUNTA Y LA BANDEJA	34
FIGURA 40. BOMBA DE INYECCIÓN DESOL POWERINJECT SP20.....	35
FIGURA 41. CURVA CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA EMPLEADA	35
FIGURA 42. CAUDALÍMETRO EMPLEADO DURANTE UN ENSAYO QUE REGISTRA 3,7 L/MIN	36
FIGURA 43. SENSOR DE PRESIÓN Y SISTEMA DE PROTECCIÓN	36
FIGURA 44. REGULADOR DE PRESIÓN.....	37
FIGURA 45. COMET MS DATA LOGGER	37
FIGURA 46. DISPOSICIÓN DE LOS EQUIPOS EN LOS ENSAYOS DE FOTOELASTICIDAD (TIPO 1).....	38
FIGURA 47. DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS EN EL ENSAYO TIPO 2	39
FIGURA 48. DIRECCIONES DEFINIDAS SOBRE LA JUNTA.....	40
FIGURA 49. ZONA DE INFLUENCIA DE LA POSICIÓN DE LA ZONA DE INYECCIÓN	42
FIGURA 50.- EVOLUCIÓN DEL CAUDAL CON LA PRESIÓN DE INYECCIÓN EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN MECÁNICA (JCR 0-2)....	43
FIGURA 51.- EVOLUCIÓN DEL CAUDAL CON LA PRESIÓN DE INYECCIÓN EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN MECÁNICA (JCR 18-20)	43
FIGURA 52.- COMPARATIVA DE LOS CUATRO ENSAYOS	44
FIGURA 53. RESULTADOS DE ENSAYOS FOTOELÁSTICOS EN PERFILES JRC.....	45
FIGURA 54. COMPARACIÓN EN LA REDISTRIBUCIÓN DE TENSIONES ENTRE EL JRC 0-2 (A) Y EL JRC 4-6 (B).....	46
FIGURA 55. COMPARACIÓN EN LA REDISTRIBUCIÓN DE TENSIONES ENTRE EL JRC 10-12 (A) Y EL JRC 14-16 (B).....	47
FIGURA 56. CAUDALES DE AGUA EN LAS CUATRO DIRECCIONES PARA JRC 0-2 Y 0,5 MPA	48
FIGURA 57. CAUDALES DE AGUA EN LAS CUATRO DIRECCIONES PARA JRC 0-2 Y 1,0 MPA	49
FIGURA 58. CAUDAL TOTAL DE AGUA PARA JRC 0-2 PARA DISTINTAS TENSIONES NORMALES	49
FIGURA 59. CAUDALES DE AGUA EN LAS CUATRO DIRECCIONES PARA JRC 18-20 Y 0,5 MPA	50
FIGURA 60. CAUDALES DE AGUA EN LAS CUATRO DIRECCIONES PARA JRC 18-20 Y 1,0 MPA	51
FIGURA 61. EVOLUCIÓN DEL CAUDAL QUE CIRCULA POR UNA JUNTA CON JRC 18-20 EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN Y LA TENSIÓN DE CONFINAMIENTO	51
FIGURA 62. CAUDAL TOTAL PARA JRC 0-2 Y JRC 18-20 Y TENSIONES NORMALES DE 0,5 Y 1,0 MPA.....	52
FIGURA 63. MAPA DE CONTORNO JRC 18-20 CRUZADO CON JRC 18-20	52
FIGURA 64. DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES PARA JRC 18-20 CRUZADO 18-20 (0,5 MPA)	53
FIGURA 65. ESQUEMA DE LOS CIRCUITOS DE CIRCULACIÓN SEGÚN LAS DIRECCIONES 1 Y 2.....	53
FIGURA 66. ÁREAS DE INFLUENCIA DE LAS DIRECCIONES 1 Y 2.....	54
FIGURA 67. CAUDALES COMBINADOS POR DIRECCIONES PARA JRC 18-20 CRUZADO 18-20 (0,5 MPA)	55
FIGURA 68. CAUDALES COMBINADOS POR DIRECCIONES PARA JRC 18-20 CRUZADO 18-20 (1,0 MPA)	55
FIGURA 69. CAUDALES TOTALES PARA JRC 18-20 CRUZADO 18-20.....	56
FIGURA 70. CAUDALES TOTALES QUE TRAVIESAN LA JUNTA PARA LOS JRC ANALIZADOS	56

FIGURA 71. SURGIMIENTO HOMOGÉNEO A LO LARGO DE LA JUNTA PARA TENSIONES Y PRESIONES DE INYECCIÓN BAJAS.....	57
FIGURA 72. SURGIMIENTO EN FORMA DE CHORRO, CARACTERÍSTICO DE TENSIONES Y PRESIONES ELEVADAS.....	57
FIGURA 73. CHORRO DE LECHADA EN LA DIRECCIÓN 1 PARA JRC 18-20 Y TENSIÓN NORMAL DE 2,0 MPA.....	59
FIGURA 74. ALCANCE DE LA INYECCIÓN DE CEMENTO EN JUNTA CON JRC 18-20 CRUZADO	60
FIGURA 75. MAPA DE CONTORNO PARA EL JRC 18-20 CRUZADO CON JRC 18-20.....	60
FIGURA 76. EVOLUCIÓN DE LA ZONA MUERTA SIN LECHADA	62
FIGURA 77. AVANCE DE LA FASE ACUOSA TRAS BLOQUEARSE LA INYECCIÓN DEL MICROCEMENTO.....	63
FIGURA 78. FOTOGRAFÍAS DEL CANAL DE DEUSTO EN 1960 DURANTE SU CONSTRUCCIÓN,	64
FIGURA 79. MUELLE DEL CANAL DE DEUSTO EN 1969 (FUENTE: PINTEREST)	65
FIGURA 80. PLANEAMIENTO URBANÍSTICO DE LA ISLA DE ZORROTZAURRE	65
FIGURA 81. PERFIL CONSTRUCTIVO DE LOS SÓTANOS Y EDIFICIOS Y APORTES DE AGUA DURANTE LA EXCAVACIÓN	66
FIGURA 82. VISTA EN PLANTA DE LOS NUEVOS SONDEOS CON RELACIÓN A LA PARCELA Y AL CANAL Y FOTOGRAFÍAS DURANTE LA EJECUCIÓN.....	68
FIGURA 83. CAMBIOS EN EL NIVEL FREÁTICO DERIVADOS DE LAS MAREAS.....	69
FIGURA 84. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LUGEON	71
FIGURA 85. CORRELACIÓN ENTRE GSI Y PERMEABILIDAD LUGEON.....	72
FIGURA 86. EFECTIVIDAD EN FUNCIÓN DE LA PERMEABILIDAD (STADLER AND KRENN, 2012)	73
FIGURA 87. VISTA EN PLANTA DE LOS SONDEOS PARA LAS PRUEBAS DE INYECCIÓN	74
FIGURA 88. MEZCLADOR DE PALETAS PARA LECHADAS	77
FIGURA 89. MEZCLADOR DE TIPO COLOIDAL	78
FIGURA 90. COMPARACIÓN ENTRE EL SANGRADO CON MEZCLADORA CON PALETAS O COLOIDAL (RESCHKE, 1998)	78
FIGURA 91. BOMBA DE CAVIDAD PROGRESIVA (BOMBA DE TORNILLO TIPO MOYNO).....	79
FIGURA 92. PULSACIÓN DE LAS BOMBAS DE PISTÓN.....	80
FIGURA 93. OBTURADOR HIDRÁULICO INFLABLE	81
FIGURA 94. PRESIÓN VS PROFUNDIDAD, CRITERIOS AMERICANO Y SUECO (WEAVER, 1991).....	83
FIGURA 95. DISPOSICIÓN DE LOS SONDEOS DE CONTROL DURANTE LAS PRUEBAS	85
FIGURA 96. DISPOSICIÓN DE SONDEOS DURANTE LAS PRUEBAS MICROCEMENTO	87
FIGURA 97. ALCANCE DE LA INYECCIÓN EN MACIZO ROCOSO FRACTURADO (RQD=55)	90
FIGURA 98. ALCANCE DE LA INYECCIÓN EN MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO (RQD=35)	90
FIGURA 99. FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES ALREDEDOR DEL SONDEO EY-1	91
FIGURA 100. EJEMPLO DE MEJORA TÍPICA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO DEBIDO A LA LECHADA (SUBASH ET AL. 2016)	95
FIGURA 101. RELACIÓN COSTE TRATAMIENTO FRENTE A LA REDUCCIÓN DE PERMEABILIDAD EN UL.....	97

Índice de tablas

TABLA 1. TIPOLOGÍA DE LA LECHADA EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS FISURAS DEL MACIZO ROCOSO	7
TABLA 2. INYECTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO EN FUNCIÓN DE SU PERMEABILIDAD	8
TABLA 3. COMPARACIÓN DE LOS DOS MODELOS DE FLUIDO EN UNA INYECCIÓN	12
TABLA 4. ELEMENTOS DEL DISPOSITIVO DE ENSAYO.....	31
TABLA 5. VALORES DE CAUDAL REGISTRADOS PARA EL JRC 0-2 CON LECHADA DE CEMENTO 2:1	58
TABLA 6. CAUDALES REGISTRADOS EN LA INYECCIÓN DE CEMENTO PARA JRC 18-20.....	58
TABLA 7. PROPIEDADES MÁS REPRESENTATIVAS DE LA ROCA Y EL MACIZO ROCOSO.....	67
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LOS SONDEOS	69
TABLA 9. CARACTERIZACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES BASADA EN EL TEST LUGEON.....	70
TABLA 10. PROPIEDADES DE DIFERENTES LECHADAS DE CEMENTO Y MICROCEMENTO.	75
TABLA 11. RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA INYECCIÓN EN EL SONDEO EY-1	84
TABLA 12. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LUGEON TRAS LA INYECCIÓN EN EY-1.....	85
TABLA 13. RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA INYECCIÓN EN EL SONDEO EY-2	87
TABLA 14. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS LUGEON TRAS LA INYECCIÓN EN EY-2.....	87
TABLA 15. RADIOS DE INFLUENCIA EN LOS DIFERENTES TRAMOS DEL SONDEO EY-1	91
TABLA 16. FAMILIAS QUE FACILITAN LA COMUNICACIÓN ENTRE EY-1 Y EL RESTO DE SONDEOS	92
TABLA 17.- FACTOR DE CORRECCIÓN POR EL NÚMERO DE FAMILIAS EN CADA DIRECCIÓN.....	92
TABLA 18. RADIOS DE INFLUENCIA CORREGIDOS CON EL NÚMERO DE FAMILIAS	92
TABLA 19. FACTOR DE CORRECCIÓN F_b PARA LOS SONDEOS DE CONTROL	93
TABLA 20. RADIOS DE INFLUENCIA FUNCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS FAMILIAS DE JUNTAS	93
TABLA 21. EFICIENCIA DEL SELLADO (KONIETZKY, 2020).....	95

Capítulo 1 : Introducción

Hoy en día, las inyecciones cobran cada vez más importancia en las obras mineras y civiles, tanto en superficie como subterráneas.

Con este tipo de tratamientos se pretende introducir en el terreno un material que, bien rellenando huecos, 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 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 ejecutase tratamiento alguno.

Este tipo de trabajos se han hecho prácticamente imprescindibles en Europa en las obras subterráneas en áreas urbanas, con un alto desarrollo de infraestructura en superficie, y también en áreas que por diversas razones sean sensibles a las fluctuaciones en los niveles de agua subterránea. El aumento en las últimas décadas de los proyectos de construcción de infraestructuras subterráneas ha traído un incremento en cuanto a exposición a la opinión pública de este tipo de trabajos. Este foco de atención no solo se dedica al costo y cronogramas de los proyectos, si no que se examinan cuidadosamente las consecuencias causadas por la disminución del agua subterránea en el medioambiente, como la afección a la flora y la fauna, los asentamientos del terreno o los daños a los acuíferos. El objetivo actual es incorporar en Proyecto el respeto por el medioambiente y el concepto de sostenibilidad.

La utilización de las tecnologías de inyección y preinyección (Figura 1) puede dotar a la industria de construcción de túneles de una herramienta muy potente para obtener costos y plazos de ejecución predecibles. Más aún, teniendo en cuenta que el reto de la Ingeniería para el siglo XXI es la reducción de costes a largo plazo, considerando el ciclo de vida del Proyecto, que incluye la fase de explotación, estas tecnologías resultan aún más atractivas.

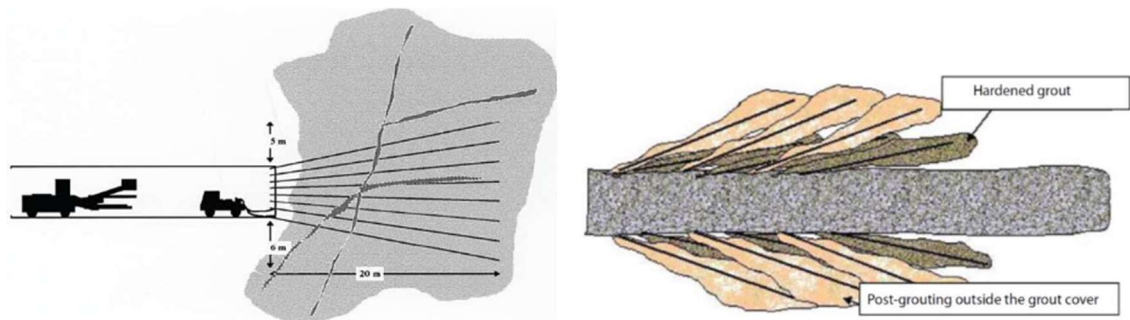


Figura 1. Conceptos de preinyección y postinyección¹

En el proceso de inyección, la permeabilidad del terreno juega un papel esencial y determina, junto a las características del fluido inyectado, el tipo particular de inyección. En la Figura 2 se recogen los tipos de inyección más representativos. En el caso de macizos rocosos la inyección que se emplea es la de fracturación, en la que la lechada penetra por las fracturas ya existentes y desarrolla nuevas fracturas, rellenándolas.

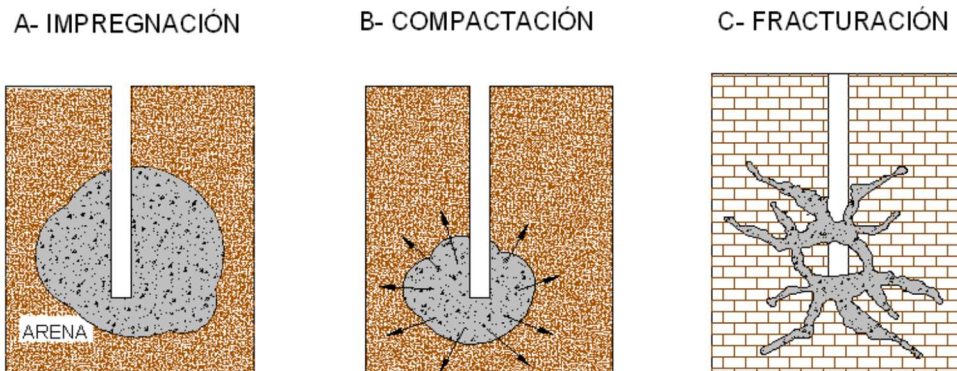


Figura 2. Diferentes tipos de inyección en el terreno (modificado de Bielza Feliú, 1999)

Los materiales que se utilizan en las inyecciones para la consolidación de terrenos son:

- 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 porosos. Su tiempo de fraguado (tiempo de apertura) es de unas 6 horas, dependiendo de la aditivación que se emplee. Para la inyección de juntas más finas o suelos de grano más fino se utilizan las lechadas de *microcemento*, que

¹ "Rock mass grouting in Norwegian Tunnelling", Norwegian Tunnelling Society Publication No. 20

poseen un tamaño de partícula más pequeño (incluso en torno a 6-9 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 1 ó 2 horas. En la Figura 3, 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 agua y estabilización de suelos débiles.

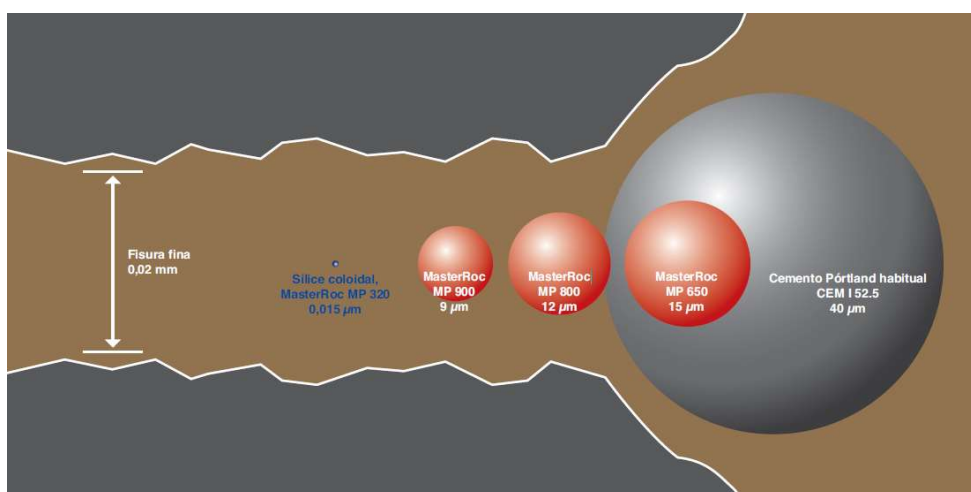


Figura 3. Diferencias en valores D_{95} de los microcementos comparados con el cemento Portland convencional²

² <https://www.master-builders-solutions.basf.es>

Capítulo 2 : Objetivos

El objetivo principal de esta tesis doctoral es llegar a establecer un modelo de flujo de lechadas de inyección en macizos rocosos que permita predecir el alcance de la inyección teniendo en cuenta la anisotropía del terreno inyectado. Este modelo será de mucha utilidad en los proyectos de ingeniería, puesto que permitirá definir la distancia entre perforaciones, optimizándola en función de dicha anisotropía. Es decir, se podrán diseñar mallas de inyección no regulares (actualmente cuadradas), reforzando con más sondeos las zonas de menor penetrabilidad y disminuyendo su densidad en las de mayor penetrabilidad. Al mismo tiempo, se conseguirá una mayor confiabilidad en los resultados, puesto que se tendrá una idea más precisa del alcance de las lechadas.

Se trata, por tanto, de un objetivo ambicioso, que debe estar sustentado por pruebas a escala de laboratorio y a escala real. Para poder alcanzarlo, se definen una serie de objetivos parciales intermedios:

1. Evaluar las fortalezas y debilidades de los actuales procedimientos de diseño y de los ensayos a pequeña y media escala que se desarrollan a nivel mundial.
2. Diseñar un ensayo a escala de laboratorio que tenga en cuenta tanto la rugosidad de las juntas como el estado tensional en las mismas y permita medir como se distribuye el fluido de inyección en cada dirección, puesto que no se conoce ninguno que cumpla los tres objetivos.
3. Evaluar cualitativa y cuantitativamente el proceso de inyección de una lechada a través de una junta con rugosidad y tensión normal, en función de la presión de inyección, observando su progresión, la aparición de segregación y/o filtración
4. Confirmar la influencia de la tensión normal sobre la junta en la distribución del flujo, demostrando que no son solo los efectos geométricos (rugosidad) los que condicionan la anisotropía.
5. Comprobar, en un caso real, la viabilidad de un modelo anisotrópico sencillo, que pueda aplicarse sin demasiados parámetros complejos o difíciles de obtener, de forma rápida a partir de la información recogida en una prueba de inyección in situ y que, por tanto, constituya una herramienta útil para el ingeniero proyectista del tratamiento.

Capítulo 3 : Estado del arte

La inyección de terrenos es una técnica que, en su vertiente más simple y antigua, data del siglo XIX habiéndose utilizado con el objetivo de mejorar las características de resistencia, deformabilidad e impermeabilidad del terreno. La primera utilización en minería de la que se tiene noticias (1882), fue la impermeabilización de una fisura para cortar una entrada de agua que provocó el hundimiento de un pozo de extracción en una mina de carbón de LENS (Francia), donde se inyectó cemento por gravedad.

Desde la década de los ochenta, se han producido importantes progresos en las técnicas de inyección, gracias al mejor conocimiento de la penetrabilidad, viscosidad y cohesión de las mezclas, a la presión de inyección y al desarrollo de nuevos materiales para las mezclas y controles, tanto en laboratorio como *in situ*.

3.1 Los primeros criterios de inyectabilidad

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 4), 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 (Burwell, 1958) 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.

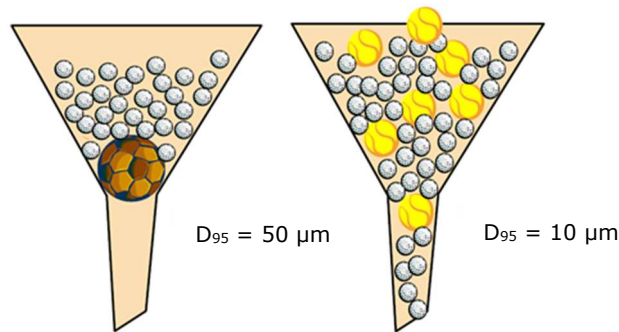


Figura 4. Efecto de la penetración de la lechada

En la Figura 5 se observa el rango de aplicación de los materiales de inyección según el tipo de terreno y el tipo de materiales a inyectar:

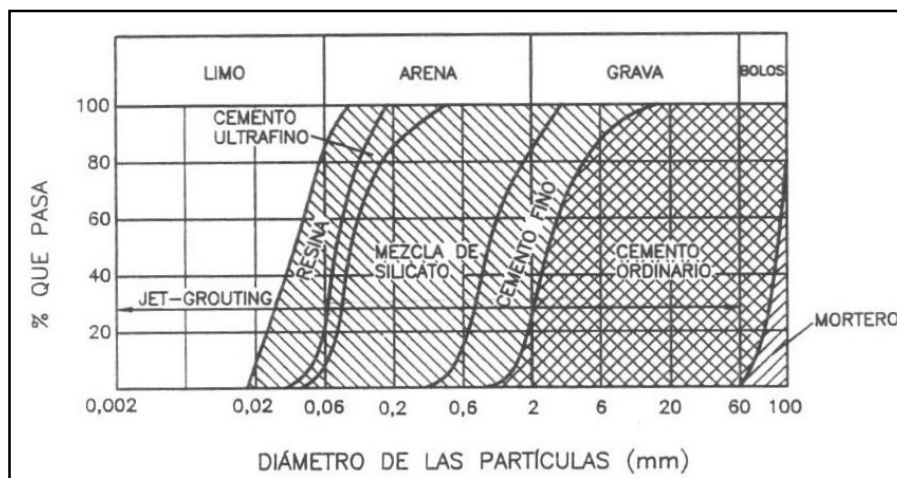


Figura 5. Rango de aplicación de materiales de inyección (modificado de (Kutzner, 1996))

En el caso de macizos rocosos, Weaver (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.

Sin embargo, debe diferenciarse entre apertura media real (E_{media}) y la apertura hidráulica, eficaz o equivalente (e), que resulta menor debido al efecto de la rugosidad (véase la Figura 6), tal y como se definen en (Barton, 2004).

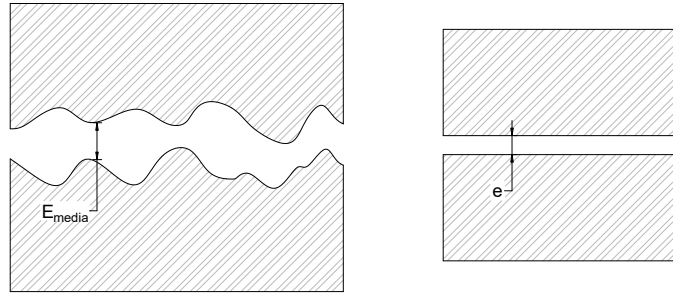


Figura 6. Apertura eficaz o equivalente

La apertura eficaz de las juntas puede estimarse a partir de ensayos de permeabilidad tipo Lugeon (Quiñones-Rozo, 2010). Así, siguiendo de nuevo a (Barton, 2004) se tiene que:

$$e \approx \sqrt{6 \cdot UL \cdot S \cdot 10^{-8}} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

- e, en mm, es la apertura eficaz o equivalente,
- UL es el resultado del ensayo Lugeon,
- S, en mm, es el espaciamiento medio de las discontinuidades.

Por otra parte, conocido el *Joint Roughness Coefficient* o JRC (Barton and Choubey, 1977), puede determinarse la apertura eficaz como (Barton, 2004):

$$e = JRC^{2,5} \cdot E_{media}^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

La Tabla 1 se puede utilizar como criterio para seleccionar la tipología de la lechada en función del tamaño de las fisuras que presente el macizo rocoso.

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 1. Tipología de la lechada en función del tamaño de las fisuras del macizo rocoso³

A su vez, la Tabla 2 (USACE, 2017), relaciona la inyectabilidad del macizo rocoso con la permeabilidad Lugeon:

³ CEN (1998) "Execution of special geotechnical works-Grouting". Technical committee 28, standard nº pr EN 12715

Pemeabilidad Lugeon (UL)	Inyectabilidad del macizo rocoso
>100	Fácilmente inyectable (red de fracturas bien conectadas, fracturas grandes, alta frecuencia de fracturas)
≈10	Marginalmente inyectable
≈1	Apenas inyectable
≈0.1	Límite inferior para las inyecciones de cemento

Tabla 2. Inyectabilidad del macizo rocoso en función de su permeabilidad

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

Lombardi y Deere (1993) idearon un método basado en el denominado *Número de Intensidad de Inyección* (GIN), que resulta el producto de la presión final de inyección, P (en MPa), por la admisión A_d (volumen de materia seca inyectada en cada taladro por unidad de longitud).

$$GIN = P \cdot A_d \quad (\text{Ec. 3})$$

Este número se fija en función de la calidad del macizo rocoso tratado y de la separación entre los sondeos de inyección. Depende del RMR del macizo rocoso y, fundamentalmente, del grado de fracturación y de la persistencia o longitud de las fracturas. En la Figura 7 se han representado diferentes trayectorias de inyección para un GIN dado por una hipérbola.

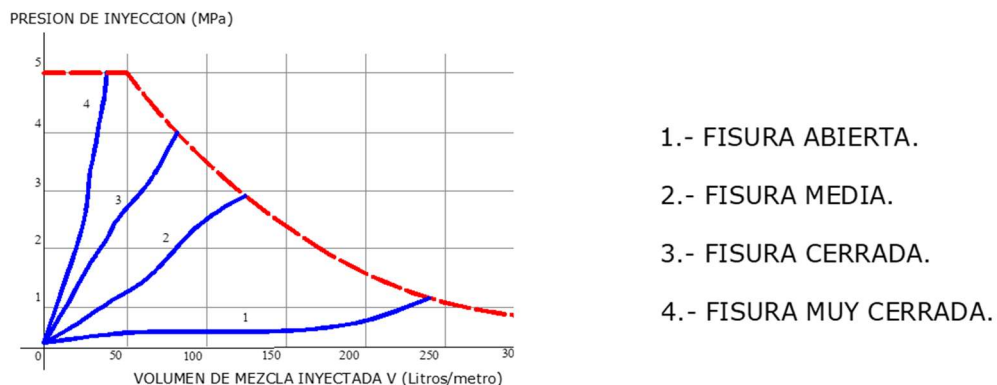
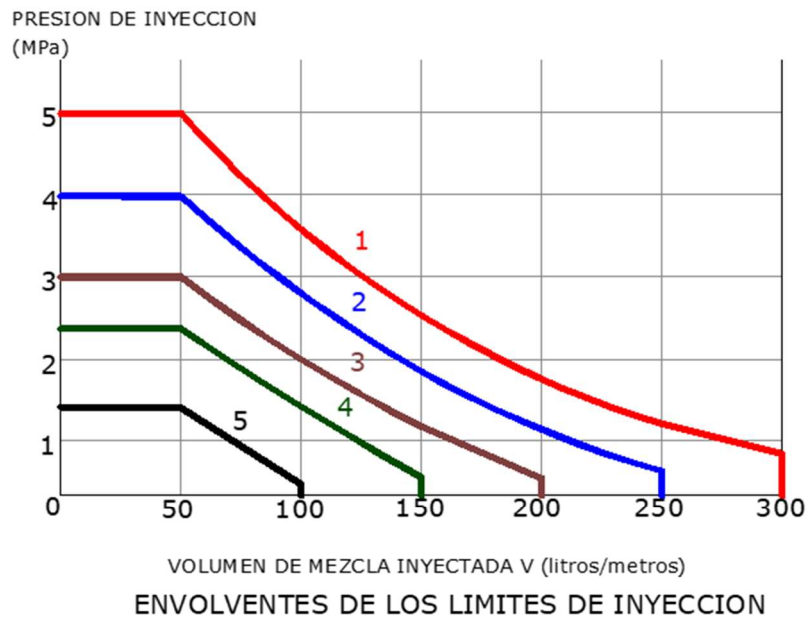


Figura 7. Trayectorias de inyección para un GIN dado (modificada de Lombardi, 1993)

En función de la apertura de las fracturas del macizo rocoso, se sigue una trayectoria diferente hasta alcanzar el GIN. Así, si las fisuras son muy abiertas se trabaja con presiones de inyección bajas y volúmenes de inyección elevados, mientras que para

fisuras muy cerradas se tienen presiones elevadas y volúmenes de inyección pequeños.

En la Figura 8 se recoge una gráfica comparativa de cinco terrenos distintos, con sus números GIN correspondientes, que precisan distintas intensidades de inyección.



INTENSIDAD	G.I.N.	MPa	V (l/m)
1.- Muy Alta	1.500	5	300
2.- Alta	1.000	4	250
3.- Moderada	600	3	200
4.- Baja	330	2,2	150
5.- Muy Baja	150	1,5	100

Figura 8. Intensidad de inyección en función del GIN (Lombardi, 2002)

Habitualmente, para un GIN dado, el proceso de inyección se divide en tres tramos (Figura 9):

1. Trayectoria a caudal constante.
2. Trayectoria a presión constante.
3. Trayectoria a energía constante (GIN).

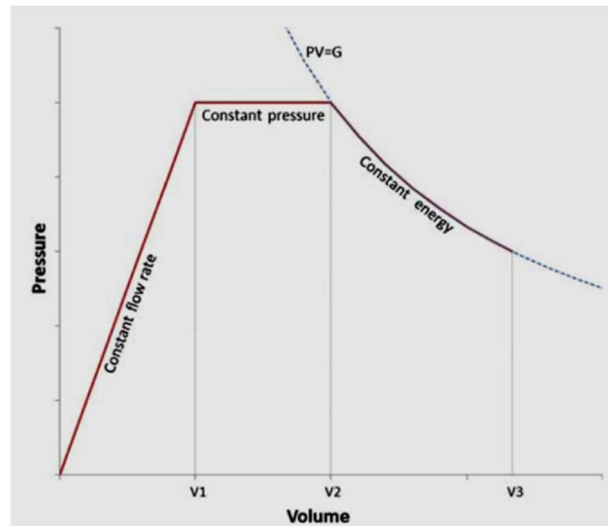


Figura 9. Secuencia típica del proceso de inyección (el Tani and Stille, 2017)

3.2 Caracterización de las lechadas de inyección

Los materiales más utilizados en los proyectos de inyección del terreno son las lechadas de base cemento. A la hora de caracterizar una lechada de cara a su inyección en macizos rocosos se puede hablar de sus propiedades intrínsecas como el sangrado, el endurecimiento, la resistencia y las propiedades relacionadas con la reología⁴ o bien de la penetrabilidad de la lechada en el medio, que resulta de la interacción de algunas las anteriores con el terreno

Es una falsa idea pensar que mezclas más líquidas penetrarán mejor en las fisuras que las más espesas. Es el tamaño de los granos y de los clústeres que pueden formarse en relación con el tamaño de poro/apertura de la junta el que determina la penetrabilidad, no el contenido en agua. El agua fluiría alrededor de los granos y continuaría su camino en el terreno mientras los granos sedimentan, apareciendo un efecto filtro (véase la Figura 10).

Tradicionalmente se ha definido la capacidad de la mezcla de penetrar en las cavidades que existen en el terreno mediante la viscosidad o fluidez de la mezcla.

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, es una propiedad clave para caracterizar el procedimiento más adecuado.

⁴ La reología es la rama de la física que se estudia el modo en que los materiales se deforman o fluyen en respuesta a fuerzas o tensiones aplicadas. Las propiedades de los materiales que rigen la forma específica en que se producen estos comportamientos de deformación o flujo se denominan propiedades reológicas

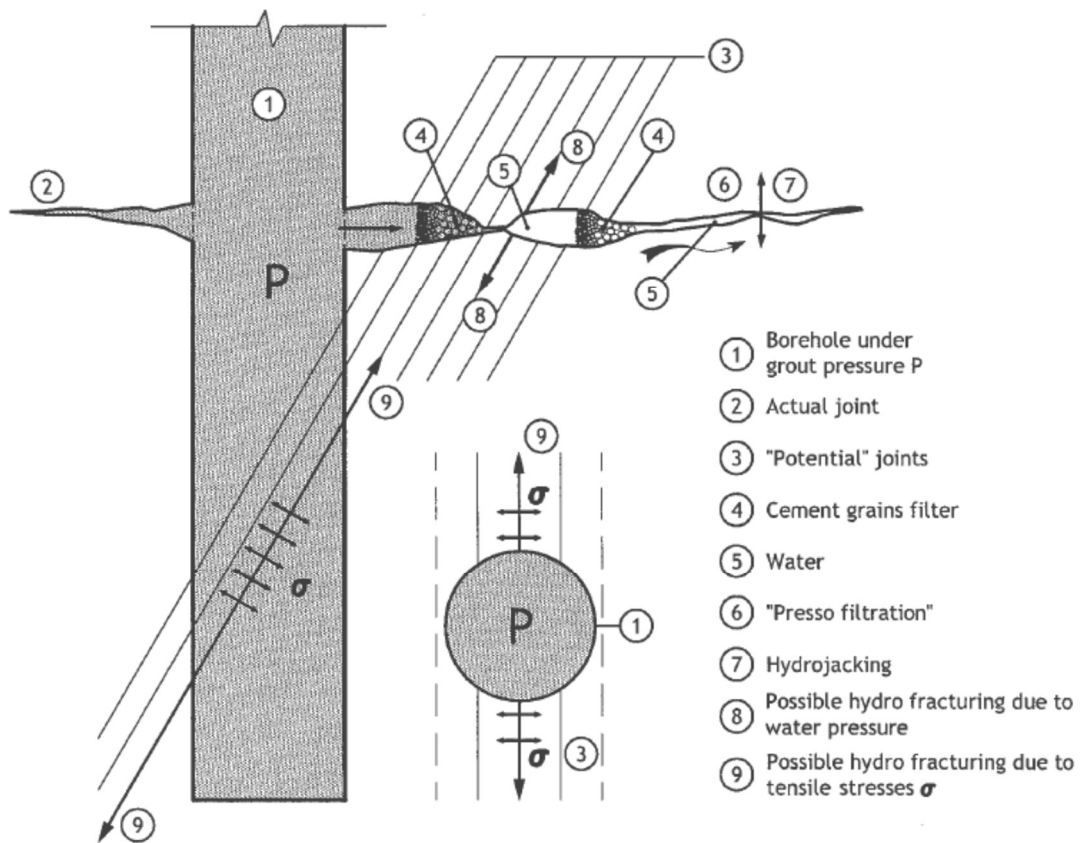


Figura 10. Interacción lechada-macizo rocoso (Lombardi, 2002)

La viscosidad dinámica (que se denota con la letra griega μ) 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, ya que los líquidos en régimen laminar se deslizan en forma de capas o láminas, y su resistencia dependerá del número de estas láminas (y por tanto del espesor). Sus unidades son Pa·s.

En el caso de los denominados *fluidos newtonianos*, se trata de una constante, pero en los denominados *no newtonianos* o Bingham (casi todos los productos inyectables) la viscosidad depende del modo de aplicación de la fuerza tangencial que produce el movimiento. La Figura 11 representa la diferencia de comportamiento entre ambos modelos de fluido.

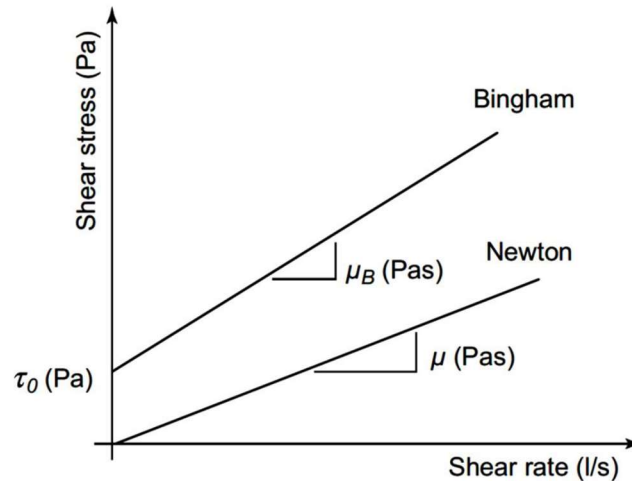


Figura 11. Comparación entre un fluido newtoniano y uno Bingham

La Tabla 3 resume, según (Konietzky, 2020), las ventajas e inconvenientes de utilizar uno u otro tipo de fluido en las inyecciones en el terreno.

Tipo de fluido inyección	Ventajas	Inconvenientes
Newtoniano	Alta penetrabilidad	Poca rigidez post-curado
	Tiempo de curado bajo	Costes elevados
	Bajo riesgo de lavado	Mayor dificultad de operación
Bingham	Menores costes	Penetrabilidad limitada
	Facilidad de manejo	Tiempos de curado altos
	Alta rigidez post-curado	Baja resistencia

Tabla 3. Comparación de los dos modelos de fluido en una inyección

Por su parte, la viscosidad cinemática (ν) 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.

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.

Se trata, además, de una propiedad que evoluciona con el tiempo, pues el material inyectado debe ir endureciendo progresivamente (véase la Figura 12).

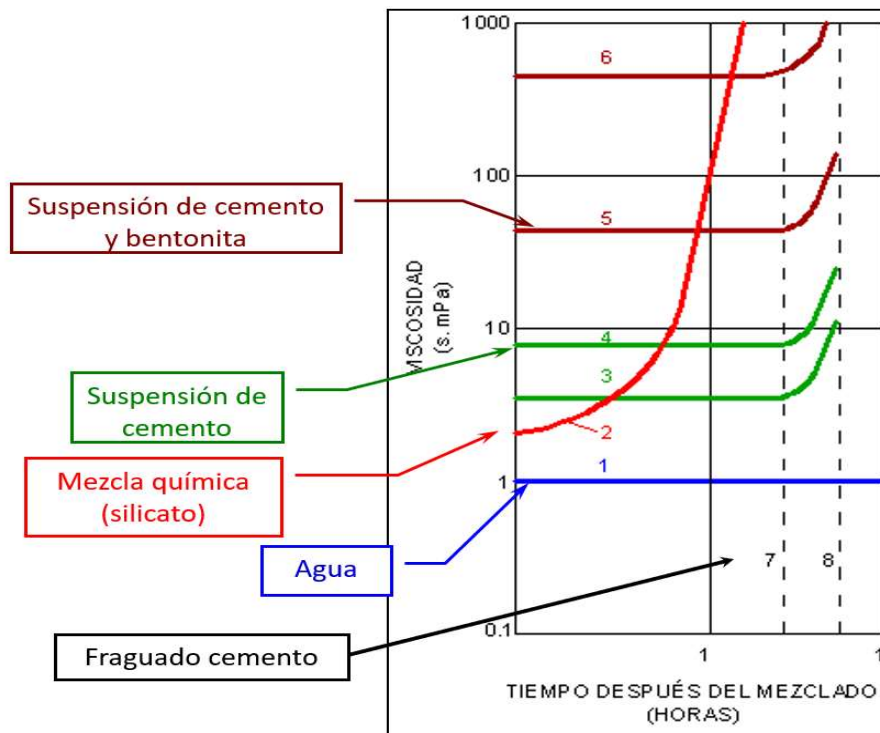


Figura 12.- Evolución de la viscosidad con el tiempo para distintos productos de inyección

Uno de los procedimientos más utilizados para medir la viscosidad es el cono de fluidez o cono Marsh⁵. El método consiste en llenar el cono Marsh con 800 ml de pasta y medir el tiempo que tarda en salir a través de su boquilla de 8 mm de diámetro una cantidad de 200 ml. Este tiempo se relaciona con el grado de consistencia de la mezcla, de tal forma que un tiempo de salida alto indica una mezcla poco fluida y por tanto de difícil bombeo.

Como expone (Konietzky, 2020), en la práctica es común utilizar el criterio tomado de la Ingeniería del Petróleo que relaciona la permeabilidad Lugeon convencional (al agua) con la permeabilidad a otro fluido (denominada permeabilidad aparente) a través de las viscosidades dinámicas de ambos fluidos obtenidas con el cono Marsh:

$$UL_{aparente} = \frac{\mu_{Mar\ lechada}}{\mu_{Mar\ agua}} \cdot UL_{agua}$$

Una relación $UL_{aparente}/UL$ menor que 1 indicaría que la penetración de la lechada es menor que la penetración con agua. Por tanto, se debe lograr una relación cercana a uno, que se puede alcanzar o bien aumentando la presión de inyección o cambiando el material de la lechada.

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

⁵ norma UNE-EN 445:2009

(movilizar y reemplazar) los fluidos presentes en el propio terreno (que será mayor cuanto mayor sea la viscosidad).

La estabilidad de una lechada de cemento se define como la capacidad de mantener la homogeneidad, es decir, de no separarse en dos fases. Esta separación puede producirse por dos procesos: el sangrado (el agua libre se separa de los sólidos por gravedad) y la filtración (los sólidos crean un tapón al flujo que impide el paso de nuevas partículas, pero no del agua de la lechada, con lo que el tapón crece). Existen numerosas pruebas a escala de laboratorio para definir la penetrabilidad de una lechada en función de su estabilidad, destacando entre ellas (Nejad Ghafar, 2017):

- a. **Penetrability meter** (Medidor de penetrabilidad): Es un método que fue desarrollado en 2003 (Eriksson and Stille, 2003), y es ampliamente utilizado en los proyectos en Suecia, por su sencillez en laboratorio y campo. El equipo utilizado es un depósito para la lechada, conectado a una bomba de aire comprimido en la parte superior y con una válvula de salida en la inferior, conectada a un filtro tubular. La lechada, presurizada a 1 bar, se impulsa en sucesivas pruebas sobre diferentes filtros y se establecen dos parámetros b_{min} y b_{crit} . Se define b_{min} como el tamaño máximo de filtro al que se le puede asociar un peso pasante despreciable. Representa la abertura mínima por la que puede pasar la lechada. Por su parte b_{crit} representa el tamaño máximo que permite el paso de un determinado volumen de lechada (en este caso 1 litro). Representa la apertura mínima que el fluido puede atravesar sin que se produzca segregación y filtración.
- b. **Filter pump** (Bomba de filtrado): Este método fue desarrollado por Hansson (Hansson, 1995). La mezcla es empujada manualmente por un pistón a través de un tubo de 25,6 mm de diámetro y 583 mm de longitud, en cuyo extremo se colocan en sucesivos ensayos filtros con aperturas de 32, 45, 75, 100 y 125 μm . Posteriormente se hace una gráfica para relacionar la apertura de filtro con el volumen que pasa, que sirve de base para obtener b_{min} y b_{crit} (en este caso para un volumen de 0,3 litros).
- c. **Short slot** (Ranura corta): Desarrollado por Draganovich & Stille en 2011, consiste en disponer dos placas metálicas de acero paralelas configurando una ranura, de forma que se simulan dos canales de flujo con diferentes aperturas, existiendo diferentes configuraciones de estas, entre 300 y 30 μm . Se controla el caudal que circula impulsado por una presión de hasta 20 bares, lo que permite detectar fluctuaciones de caudal, que serían indicadoras de problemas de filtración. La Figura 13 (Draganović and Stille, 2011) representa un

esquema del ensayo y de los mecanismos que desencadenan los problemas de filtrado del flujo.

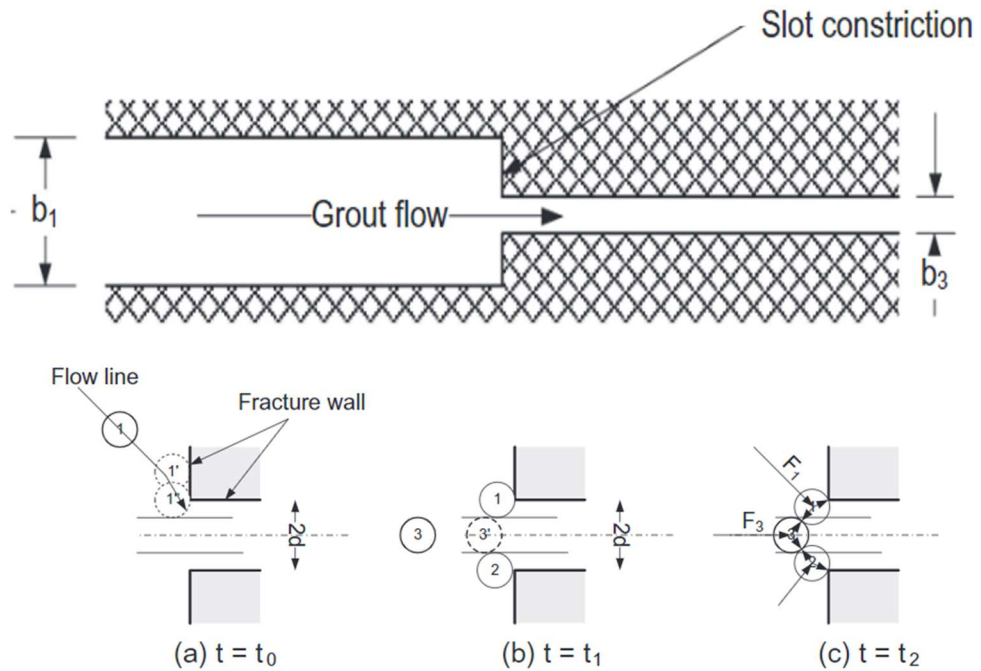


Figura 13. Esquema del ensayo short slot y del proceso de filtrado en la mezcla

- a. **Long slot** (ranura larga): Se trata de otro método desarrollado por los mismos autores (Draganović and Stille, 2014) más próximo al problema real en una junta. La ranura en este caso tiene 4 m de longitud, 10 cm de ancho y una reducción central a $75 \mu\text{m}$ (véase el esquema de la Figura 14). Mediante cuatro sensores de presión (representados como P1 a P4 en dicha figura) se controla el gradiente hidráulico durante el flujo de una lechada a presión (menor de 20 bares).

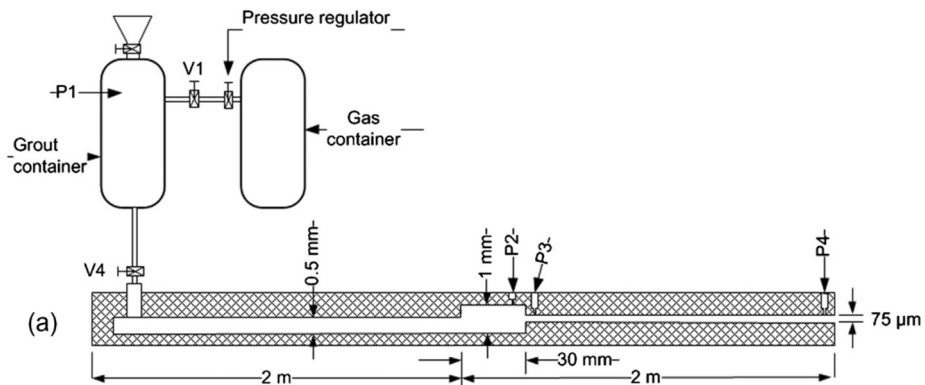


Figura 14. Esquema de la prueba long slot

En Zhou (Zhou *et al.*, 2019), además de la estabilidad de la mezcla se aborda el estudio de su resistencia. En Sonebi (Sonebi and Perrot, 2019), se ensayan diferentes

composiciones desde el punto de vista de su comportamiento reológico e hidromecánico.

Por último, (Shamu, Zou and Håkansson, 2021) , proponen una metodología para mejorar el diseño de las inyecciones y superar las limitaciones derivadas de utilizar un modelo teórico Bingham que no tenga en cuenta las peculiaridades de las suspensiones cementíticas. Su modelo se basa adaptar el flujo radial de un fluido Bingham considerando los efectos de pared u aportan un nomograma para facilitar su aplicación.

3.3 Modelos experimentales de inyectabilidad en juntas

Lombardi (Lombardi, 2002) ya discute sobre la estabilidad de las mezclas al ser inyectadas a través de las juntas y su progresión diferente en función de la dirección (Figura 15).

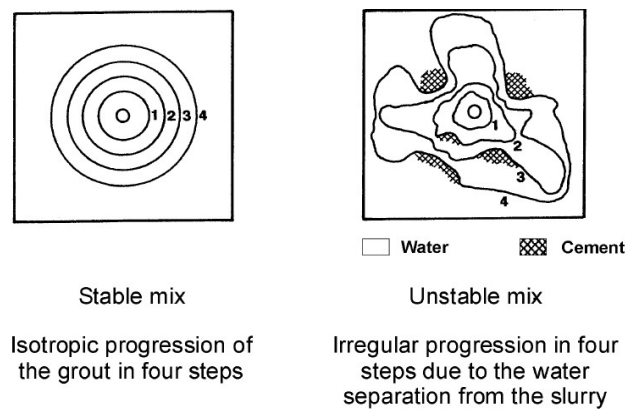


Figura 15. Segregación de una mezcla inyectada en una junta

Como puede verse en dicha figura, ni el agua ni el cemento se distribuyen uniformemente, si bien en las zonas de baja penetración del agua implican un mayor efecto filtro de los granos de cemento y una baja penetración de la lechada. Además del efecto geométrico, en la mayor penetración del fluido influyen dos efectos tensionales: la presión a la que se inyecta y el estado tensional en la junta.

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, Pusch and Knutsson (2015), cuyo ensayo consiste en dos discos de plexiglás, de 50 cm de diámetro, unidos mediante pernos para fijar una apertura de junta o una tensión de apriete, a través de la cual se inyecta la lechada (véase la Figura 16). 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.

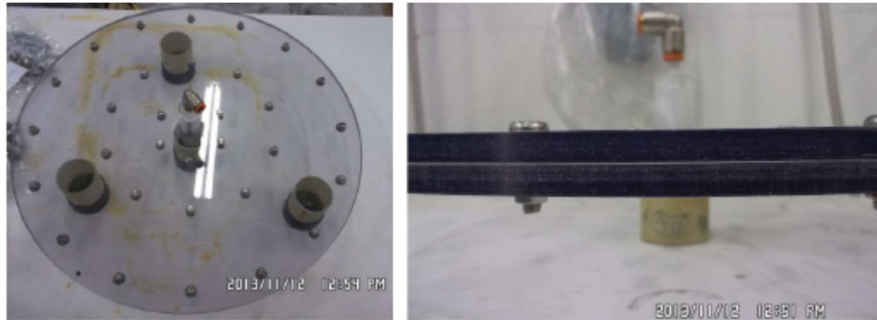
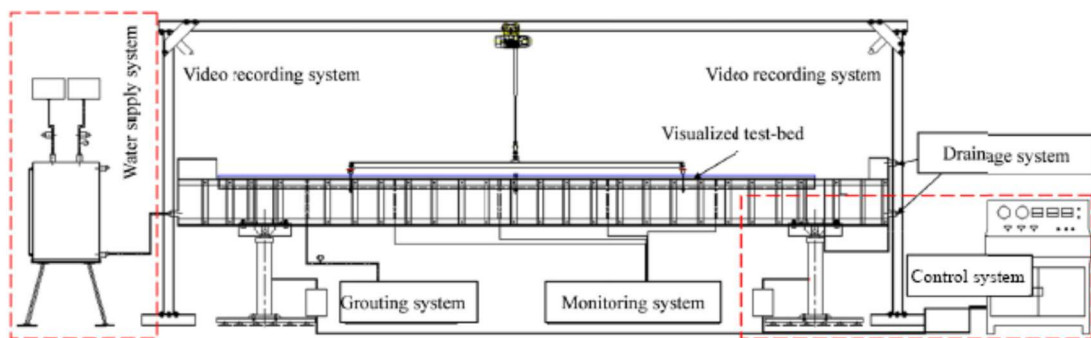


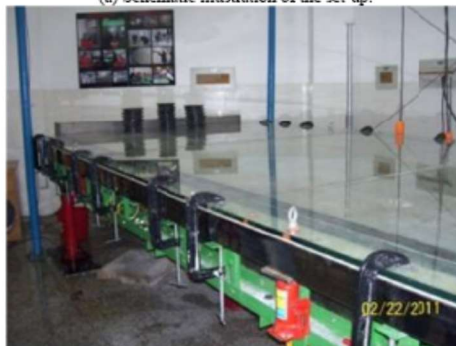
Figura 16. Dispositivo de ensayo (Mohammed, Pusch and Knutsson, 2015)

Ese mismo año se publican dos trabajos interesantes sobre inyección en suelos (Jorne, Henriques and Baltazar, 2015a, 2015b) que continúan en 2016 (Jorne and Henriques, 2016) y, al mismo tiempo, Yoon & el Mohtar (Yoon and el Mohtar, 2015) utilizan los resultados de pruebas a escala de laboratorio para calibrar los parámetros de un modelo empírico de inyectabilidad.

A mayor escala es la prueba desarrollada por Li et al. (2016), que simula fracturas de 4 m de longitud, 2 m de ancho y 5 mm de apertura (véase la Figura 17), aunque de nuevo, sin tener en cuenta la rugosidad y anisotropía de la junta, ni el estado tensional.



(a) Schematic illustration of the set-up.



(b) Experimental set-up.

Figura 17. Dispositivo de ensayo (Li et al., 2016)

En 2018 Funehag & Thörn (Funehag and Thörn, 2018)) publican un trabajo comparativo entre modelos analíticos de penetrabilidad y ensayos a pequeña escala sobre juntas fabricadas con vidrio (carentes, por tanto, de la rugosidad de una junta). 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. Si bien proponen un modelo analítico, no resulta muy próximo a la realidad, puesto que no se considera la rugosidad y, por tanto, la posible anisotropía del flujo.

En (Xu *et al.*, 2019) se desarrolla un ensayo similar al de ranura larga pero utilizando materiales cementílicos. Generan muestras de tipo cilíndrico de unos 122 mm de diámetro en el interior de tubos de acero que pueden acoplarse sucesivamente en tramos de 0,5 m de longitud (Figura 18). El sistema permite aplicar presiones de inyección altas, de hasta 45 MPa. Las ranuras se crean introduciendo unas placas de acero de entre 0,2 y 8 mm de espesor durante el fraguado de la mezcla cementítica, que se extraen posteriormente, lo que permite dotarlas de una cierta rugosidad (aunque de una manera limitada). Si bien permite evaluar la inyectabilidad en una determinada dirección, no tiene en cuenta el estado tensional de las juntas.



Figura 18. Dispositivo de ensayo (Xu *et al.*, 2019)

Según los ensayos efectuados por Guerrero Miguel *et al.* (2018) en juntas de roca en las que se inyecta agua a diferentes presiones, el flujo de agua no atraviesa las juntas uniformemente, incluso para presiones de fluido elevadas, y con independencia de la

carga normal aplicada. El agua mana por puntos localizados de manera discontinua a lo largo de cada arista de la junta. Dicho efecto puede verse en la Figura 19.



Figura 19. Flujo de agua a través de la junta a baja presión (izquierda) y a presiones elevadas (derecha y abajo) (Guerrero Miguel et al., 2018)

Este resultado confirma que el agua no fluye con homogeneidad y, por tanto, la junta no puede considerarse un área de paso de fluido a efectos de cálculo de la permeabilidad. Por esta razón, se considera la transmisividad (T) un parámetro más adecuado para estudiar el flujo a través de las juntas. En la Figura 20 se muestran los resultados en función de la tensión normal sobre la junta.

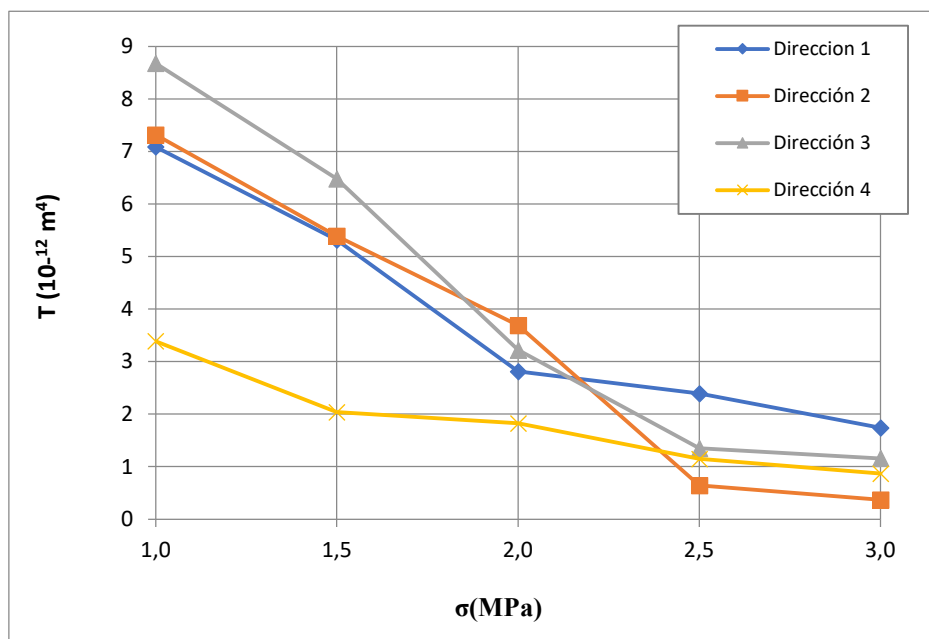


Figura 20. Valores de transmisividad frente a tensión normal aplicada (Guerrero Miguel et al., 2018)

En 2021 se publica un nuevo estudio (Wang *et al.*, 2021) utilizando igualmente un equipo de grandes dimensiones que, esta vez, si tiene en cuenta la rugosidad. El sistema permite simular, mediante impresión 3D, la rugosidad de una junta y modificar su apertura, evaluando, en tiempo real, el progreso de la lechada en su interior (Figura 21). Si bien el procedimiento es mucho más realista que los precedentes y a una escala de trabajo muy próxima a la realidad (2 m x 0,5 m), presenta como inconveniente el no tener en cuenta el estado tensional en la junta, que condiciona su apertura y la presencia de zonas de flujo muy restringido (anisotropía) en las que los procesos de segregación y filtración son claves.

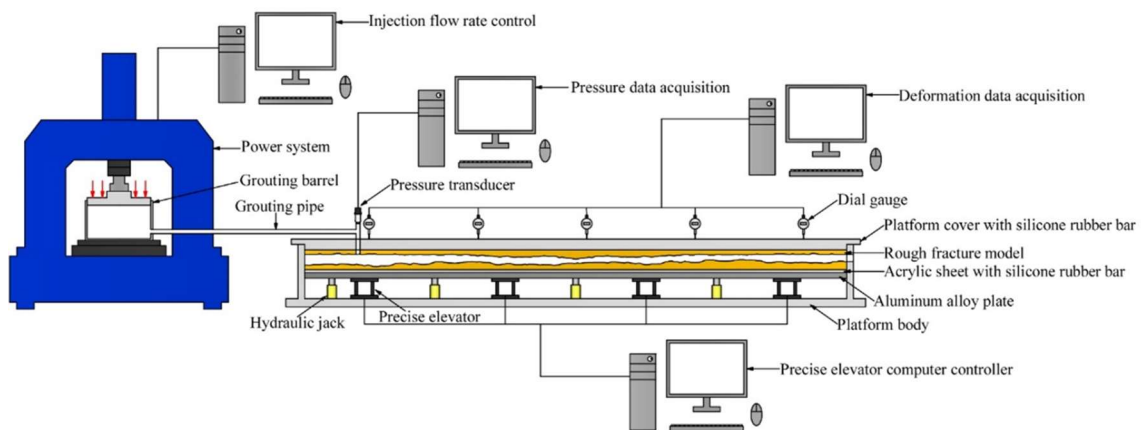


Figura 21. Esquema del dispositivo de ensayo para juntas impresas con rugosidad

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 (Xiao, Zhao and Chen, 2017), (Zou, Håkansson and Cvetkovic, 2018), (Li *et al.*, 2019) para lechadas poliméricas o (Trybala *et al.*, 2019), también para lechadas poliméricas; y los modelos numéricos de (Liu *et al.*, 2021) y (Boschi, di Prisco and Ciantia, 2020). En 2018 (Mozumder, Laskar and Hussain, 2018) 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 (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. En (Jorne, Henriques and Baltazar, 2015a) se analiza esta mejora para inyecciones en suelos.

Por último, Corson y su equipo abordan, en (Corson *et al.*, 2021), un tema de gran relevancia, como es el control de la progresión de la lechada a escala real. Presentan un sistema de trazabilidad basado en añadirle magnetita y monitorizar el campo magnético. Los ensayos a escala de laboratorio demuestran que esta adición al microcemento no perjudica la reología de la lechada ni su resistencia. Las pruebas en campo consistieron en la inyección de este material en un sondeo a una profundidad de 40-50 m y monitorizar los cambios del campo magnético en una malla de seis sondeos, que permitieron comprobar el flujo preferente por dos planos de estratificación interceptados y a través de determinados materiales más permeables.

Capítulo 4 : Diseño experimental

Predecir el comportamiento de un fluido a través de una junta en roca es de especial interés en aplicaciones de ingeniería civil y obra subterráneas, puesto que permite optimizar los parámetros de inyección de fluidos en el macizo rocoso, ya sean estos para provocar el sellado de infiltraciones o bien para mejorar las propiedades del mismo.

En dichos procesos se ven involucrados una gran serie de factores entre los que cabe destacar la presión del fluido inyectado, la viscosidad, el tamaño representativo de partículas en suspensión, el nivel de fracturación del macizo, la rugosidad de las juntas presentes y la abertura existente entre sus labios.

4.1 Diseño conceptual

La apertura de la junta juega un papel determinante en el flujo a través de la superficie. Cuanto mayor sea la distancia entre los labios de la misma, el fluido avanzará con mayor facilidad al disponer del espacio suficiente para poder desprestigiar los efectos que se producen en la intercara entre el fluido y la superficie. Sin embargo, cuando la apertura es pequeña (o incluso inexistente) la rugosidad juega un papel determinante al imponer restricciones al tránsito del fluido, que se ve forzado a avanzar adaptándose a la geometría de esta. Por ello, es necesario caracterizar y clasificar adecuadamente la rugosidad de la junta en cuestión y su interacción con el flujo a su través.

En este sentido, se destacan dos factores principales: las asperezas, irregularidades de la junta en una escala de milímetros o inferior, y las ondulaciones, irregularidades geométricas de órdenes de magnitud decimétrica o métrica. Ambas se distribuyen de manera aleatoria a lo largo de la superficie que define la junta de roca real.

Actualmente, se determina la rugosidad empleando un peine de púas para reproducir la superficie de la junta de roca en papel y, posteriormente, se compara el dibujo obtenido con la tabla mostrada en la Figura 22, propuesta por Barton y Choubey en 1977 (Barton and Choubey, 1977), asignándole el valor del JRC (siglas en inglés de *Joint Roughness Coefficient*, coeficiente de rugosidad de la junta en castellano) que presenta un mayor parecido visual.



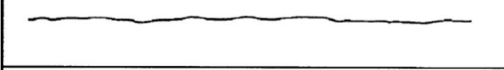
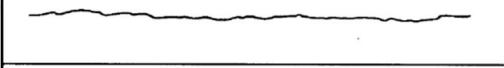
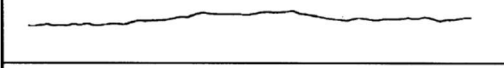
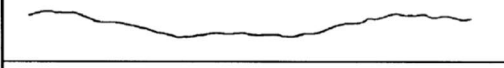
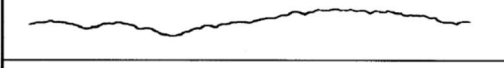
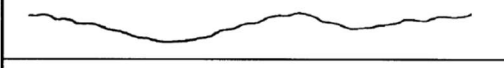
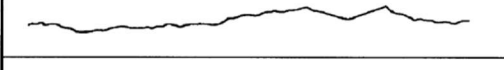
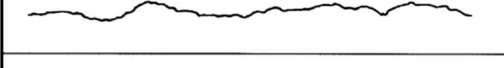
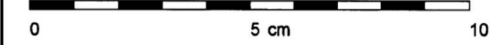
	JRC = 0 - 2
	JRC = 2 - 4
	JRC = 4 - 6
	JRC = 6 - 8
	JRC = 8 - 10
	JRC = 10 - 12
	JRC = 12 - 14
	JRC = 14 - 16
	JRC = 16 - 18
	JRC = 18 - 20
	

Figura 22. Tabla con valores del JRC propuesta por Barton y Choubey

En la actualidad, no existe normativa para analizar y caracterizar el flujo a través de una junta de roca. Sin embargo, existen abundantes referencias bibliográficas que abordan esta temática en el ámbito de la investigación científica y técnica. A este respecto cabe destacar que, en todas ellas, la metodología es similar. En primer lugar, se toma o bien una muestra real de roca o bien una creada *exprofeso* con geometría prismática. Posteriormente, se determina la rugosidad de la superficie a ensayar y se sellan las caras laterales, para evitar que el agua escape por ellas. Aquellas caras perpendiculares a la dirección de la rugosidad se emplean para inyectar el fluido por un extremo y recogerlo por el contrario, como se muestra en la Figura 23.

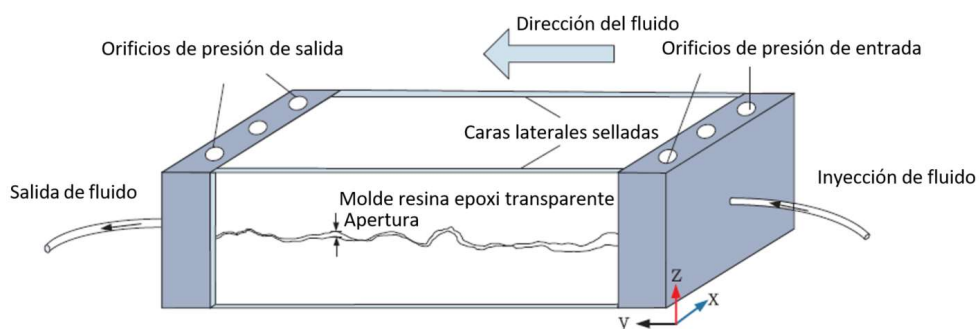


Figura 23. Disposición habitual de ensayo, modificado de (Xiong et al., 2018)

De esta forma, sólo existe la posibilidad de que el avance del fluido de inyección sea a través de la dirección de la rugosidad considerada, sin posibilidad de que emane por ninguna de sus caras laterales. Sin embargo, debido a la anisotropía propia de las juntas de roca, imponer una única dirección de avance puede provocar desviaciones significativas del comportamiento del fluido analizado a escala de laboratorio del que efectivamente se desarrolla en el medio natural. Por tanto, predecir adecuadamente el comportamiento en condiciones reales implicaría comprender cómo interactúan rugosidades diferentes en presencia de un fluido que dispone de libertad suficiente para avanzar por cualquiera de ellas.

En la bibliografía, se considera que un fluido puede atravesar una discontinuidad en roca experimentando un flujo laminar o turbulento. En el primer caso, la relación entre el gradiente hidráulico $-\Delta P$ y el caudal circulante Q es lineal y se rige bajo la ley de Darcy mostrada en la (Ec. 4). Nótese que el término $-\Delta P = (P_f - P_0)/L$, donde P_f y P_0 son las presiones final e inicial del fluido respectivamente y L la longitud recorrida por el fluido entre los puntos de P_f y P_0 . A su vez, μ es la viscosidad dinámica del fluido considerado, w el espesor de la junta y e la apertura hidráulica.

$$-\Delta P = \frac{12\mu}{we^3} Q \quad (\text{Ec. 4})$$

Sin embargo; dicha ley, conocida como también ley cúbica, predice el flujo asumiendo que este se produce a través de un canal comprendido entre dos superficies perfectamente planas y paralelas. En el caso de las juntas de roca, dicha hipótesis simplifica en exceso el problema, debido a que las superficies de rotura se caracterizan por presentar una geometría irregular, como se ha explicado previamente. Además, la presencia de la rugosidad impone una desviación con respecto al flujo laminar, pudiendo hacer que se desarrolle de manera turbulenta. En este último caso, es habitual emplear la ley de Forchheimer, mostrada en la (Ec. 5, para establecer la relación entre el gradiente de presiones y el caudal circulante.

$$-\Delta P = aQ + bQ^2 \quad (\text{Ec. 5})$$

Considerando todo lo anterior, para analizar el avance de un fluido a través de una superficie rocosa a escala de laboratorio es necesario desarrollar un sistema que permite regular la presión de entrada del fluido, la tensión normal que está soportando y que, a su vez, permita registrar los caudales de entrada, salida y presión.

Debido a esta falta de normativa es necesario definir conceptualmente un nuevo tipo de ensayo que permita dar respuesta a los objetivos planteados en la presente Tesis Doctoral. Para ello será necesario disponer de un material transparente en el que se haya reproducido fielmente la rugosidad deseada. Posteriormente, será necesario aplicar a dicha junta una cierta tensión normal σ que reproduzca las condiciones existentes en el macizo rocoso. Además, será necesario un sistema de inyección de fluido que permita regular la presión de entrada P_0 y un dispositivo que permita medir el caudal que mana por la junta en las cuatro direcciones.

Con el objetivo de permitir al fluido avanzar libremente por cualquier dirección posible en la junta, este se debe inyectar por el punto central de la discontinuidad, y no por un lateral. Además, no se sellará ninguna de las caras laterales de la muestra, por lo que el fluido podrá manar por cualquiera de ellas. A cada uno de los caudales registrados en cada dirección y sentido se les nombrará con la letra Q y el subíndice correspondiente a su ubicación según el esquema gráfico mostrado en la Figura 24.

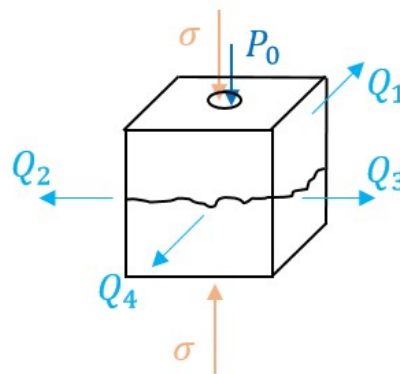


Figura 24. Esquema conceptual de los ensayos

Conocidos los valores tensión aplicada σ , presión de inyección P_0 y los caudales obtenidos en cada sentido, es posible representar gráficamente los pares de valores (Q , $-\Delta P$) que permiten analizar el comportamiento del fluido en cada caso, determinando si el régimen es laminar o turbulento en cada sentido y comparar la diferencia existente entre ellos, que dará cuenta de la anisotropía de la junta.

4.2 Preparación de las muestras

Las muestras empleadas están definidas por una superficie tridimensional en la que se combinan dos perfiles pertenecientes a la tabla JRC en dos direcciones perpendiculares.

El primer paso, consiste en obtener los perfiles JRC a partir de la tabla propuesta por Barton y Choubey en 1977. Usando el PDF de su publicación científica, se extrajo la imagen de cada uno de los perfiles de rugosidad que propusieron para definir el

parámetro de rugosidad JRC y se introdujo ésta en AutoCAD, escalándola adecuadamente para que la longitud total de la misma fuera de 100 mm, por ser esta la longitud sobre la que se definió originalmente el JRC. Posteriormente, se trazó una "spline" sobre cada imagen digitalizando el perfil. Finalmente, se trazaron rectas verticales que intersectaban a la "spline" trazada cada 0,5 mm y, con la ayuda de una macro, se exportaron las coordenadas X e Y de todos los puntos de intersección (Figura 25) a una hoja de Excel.

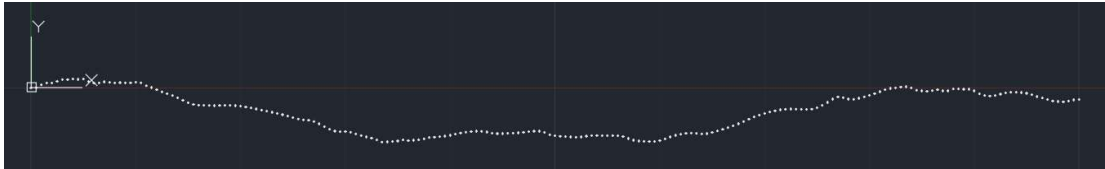


Figura 25. Puntos del perfil JRC 10-12 tomados cada 0,5 mm

Las coordenadas de los puntos así extraídas se importan en Autodesk Inventor. Para ello, se crea un boceto en el programa y se utiliza la orden "Importar Puntos", disponible en el panel *Insertar* del menú *Boceto*, utilizando la opción de importar los puntos y unirlos mediante una *spline*.

Una vez importado el perfil JRC, se crea un perfil cerrado con el que poder trabajar en Inventor (Figura 26) y que sea susceptible de futuras operaciones de modelado 3D.

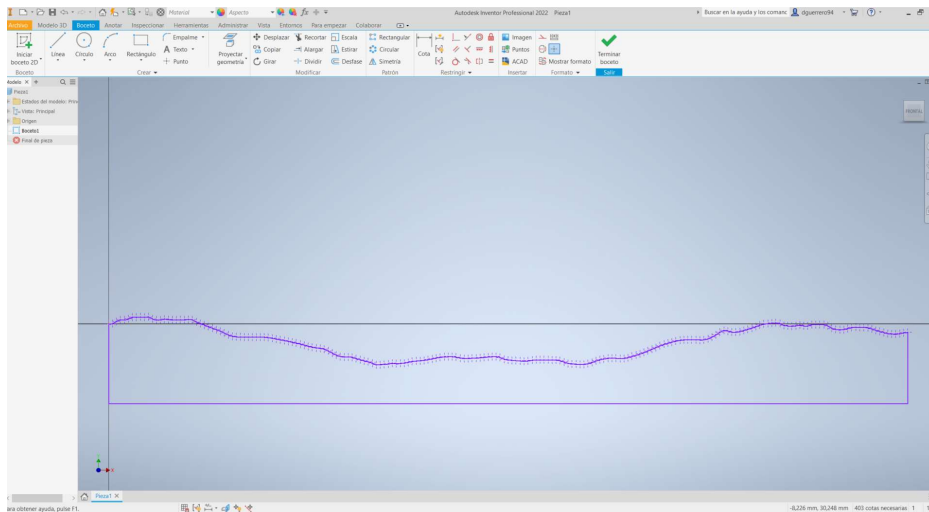


Figura 26. Perfil cerrado en Inventor correspondiente al JRC 10-12

En este punto, se podría crear un modelo 3D con el JRC deseado extruyéndolo el perfil cerrado. Se conseguiría entonces una pieza como la mostrada en la Figura 27, que permite combinar un perfil JRC con una superficie lisa.

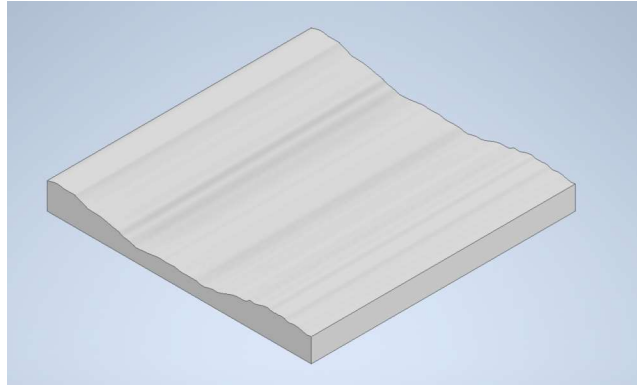


Figura 27. Modelo 3D obtenido tras extruir el JRC 10-12

En el caso de las muestras con JRC cruzados; es decir, aquellos que tienen un JRC en una dirección y otro en la perpendicular, se utiliza el comando *barrido*, que permite que un determinado perfil cerrado recorra un camino prefijado. Así, se hace que un JRC recorra el camino fijado por otro (Figura 28).

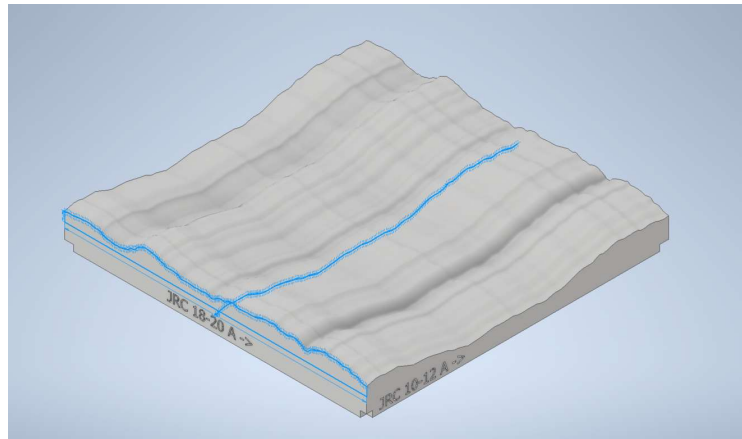


Figura 28. Modelo 3D obtenido con el perfil del JRC 18-20 sobre un camino de JRC 10-12

Este modelo 3D que combina los perfiles deseados se imprime posteriormente en resina (Figura 29). Se consigue así reproducir con elevada precisión la rugosidad deseada en material transparente.

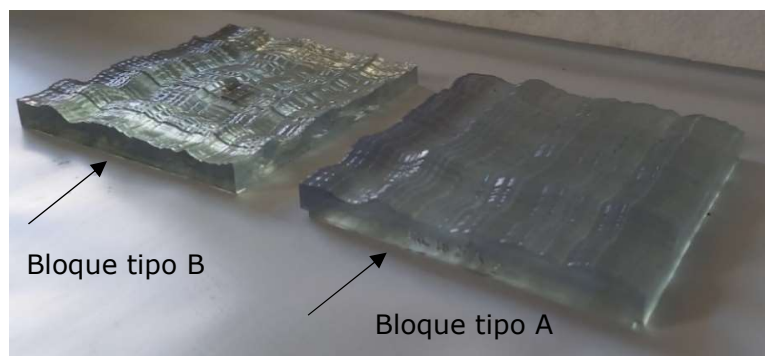


Figura 29. Muestras de resina con el JRC 18-20 en dos direcciones perpendiculares

Como se puede observar en la Figura 29, cada muestra está formada por dos bloques de resina, correspondientes al labio superior e inferior de la junta. Al ser modeladas cada una de ellas expresamente para los ensayos propuestos, las piezas tipo B (correspondientes con la mitad superior de las juntas) presentan un orificio circular por el que introducir el fluido a inyectar (Figura 30) y las piezas tipo A (las inferiores) presentan unas muescas cuadradas de 2 mm de lado que permiten posicionarlas adecuadamente con el resto de los elementos.

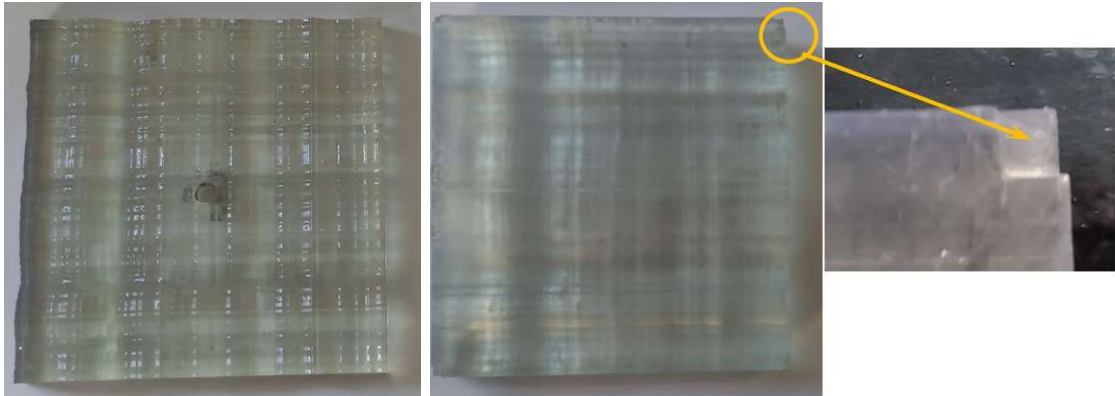


Figura 30. Detalle de orificio superior en piezas tipo B y detalle de muesca (tipo A)

Finalmente, se adhiere a las piezas tipo una cánula de poliamida 6 mm de diámetro y 1,5 mm de espesor empleando un pegamento bicomponente. Esta cánula permite introducir el fluido directamente en el punto central de la superficie a ensayar. En el tramo final de la misma, se acopla un racor roscado destinado a facilitar el acoplamiento de cada muestra al resto del sistema hidráulico. En la Figura 31, se puede observar el aspecto final de una muestra una vez instaladas en ella la cánula y el racor.

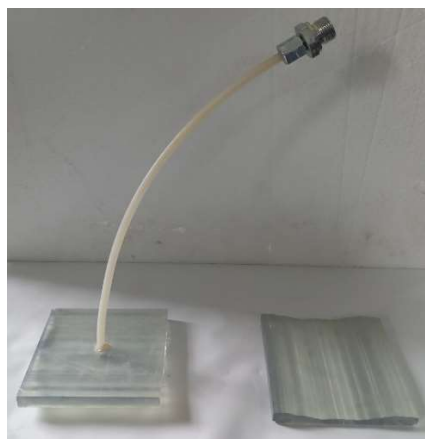


Figura 31. Muestra de resina con cánula y racor implementados.

Se han seleccionado cuatro perfiles de rugosidad representativos: JRC 0-2, JRC 10-12 y JRC 18-20 cruzados con una dirección lisa sin rugosidad y el JRC 18-20 cruzado

consigo mismo. Nótese que no sería estrictamente correcto decir que las tres primeras muestras suponen el cruce de los citados JRC con el JRC 0-2, puesto que este último no es perfectamente liso ni horizontal.

También se han preparado una serie de muestras en metacrilato de 1 cm de espesor para evaluar el contacto entre las asperezas de las juntas y definir su influencia en la circulación de fluidos. Para ello, partiendo de la tabla JRC mostrada en la Figura 22, se reproducen los perfiles en AutoCAD y, posteriormente, se emplea una macro para extraer las coordenadas de los puntos con espaciamentos de 0,5 mm entre ellos. Al estar definido cada perfil JRC sobre una longitud de 10 cm, se tienen en total 202 puntos en cada perfil. Posteriormente, se crea un archivo de dibujo vectorizado (con extensión *.dwg) y se importa en una máquina de corte por láser, que lo reproduce cinco veces consecutivas en placas de polimetilmetacrilato (PMMA) de: 500 mm de longitud, 148 mm de altura y 10 mm de espesor. A modo representativo, se muestra en detalle la junta JRC 16-18 en la Figura 32.

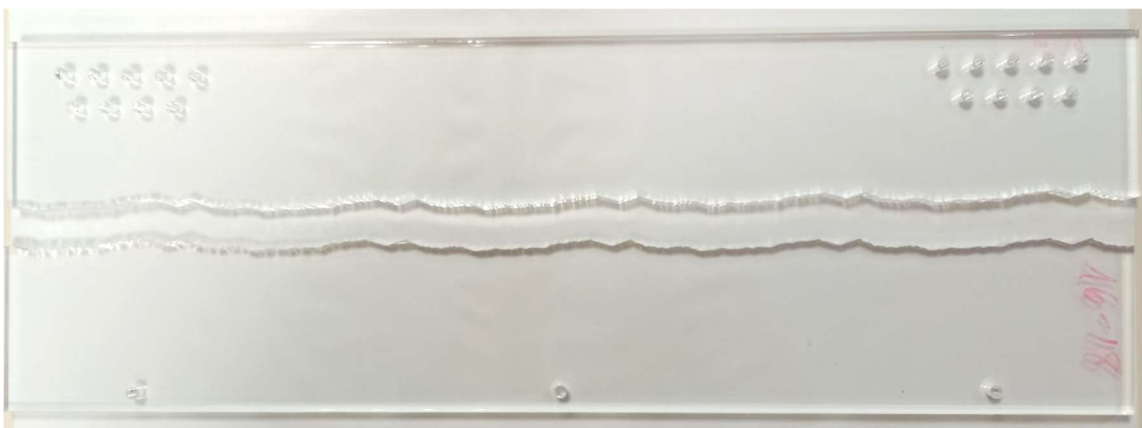


Figura 32. Perfil JRC 16-18 reproducido en PMMA

4.3 Dispositivo de ensayo

Con el objetivo de estudiar el comportamiento del fluido tanto a nivel cuantitativo como cualitativo, se han desarrollado tres disposiciones de ensayo diferentes:

1. Ensayos TIPO 1, en los que no se ha trabajado con fluidos, si no que se pretende visualizar el comportamiento de una junta rugosa cuando se somete a una compresión que tiende a cerrar su apertura. Estos ensayos se han llevado a cabo en láminas de metacrilato de 1 cm de espesor y se han utilizado técnicas de fotoelasticidad.

2. Ensayos TIPO 2, destinados a caracterizar el flujo a través de la discontinuidad atendiendo a los caudales que manan por cada una de las cuatro direcciones posibles, buscando definir la anisotropía de la junta.
3. Ensayos TIPO 3, buscando conocer a nivel cualitativo como diferentes fluidos avanzan por una misma discontinuidad. Para poder explicar algunos de los comportamientos observados ha sido necesario llevar a cabo un nuevo tipo de ensayo.

Los tres tipos de ensayo se han realizado en la misma área de trabajo (Figura 33), compartiendo una serie de elementos comunes. Se equipó la zona con una estantería metálica con tres alturas montada sobre ruedas, que sirve de banco de trabajo para disponer de todo el equipo de fontanería y herramientas necesarias para la realización de los ensayos. A su vez, la última altura de dicha estantería se usa como mesa, en la que se emplazan la tarjeta de adquisición de datos tipo DEWE, con la que se registra la tensión aplicada sobre la junta, y el ordenador portátil que permite gestionar el software de toma de datos. La máquina de inyección se sitúa junto a un datalogger COMET que registra la presión de fluido para que una persona pueda controlar las principales variables de ensayo (tensión aplicada y presión de fluido) desde una misma ubicación. Además, los ensayos se grabaron empleando dos cámaras: una cámara frontal montada sobre un trípode y otra cámara trasera, de forma que se puedan visionar las cuatro caras laterales.



Figura 33. Área de trabajo

Reproducir las condiciones del terreno a escala de laboratorio supone implementar un sistema que permita regular la tensión aplicada sobre la junta y la presión del fluido de inyección. Para conseguirlo se han empleado conjuntamente una prensa manual con un circuito hidráulico, como se muestra en la Figura 34, cuyos elementos se definen en la Tabla 4.

La combinación de ambos sistemas es posible gracias al empleo del cilindro de carga y la placa de apriete. El primero, consiste en un cilindro de aluminio (2) que encaja en el vaciado circular realizado en la parte superior de la placa de apriete (3) (Figura 35) para garantizar la alineación de los diferentes elementos que conforman el dispositivo.

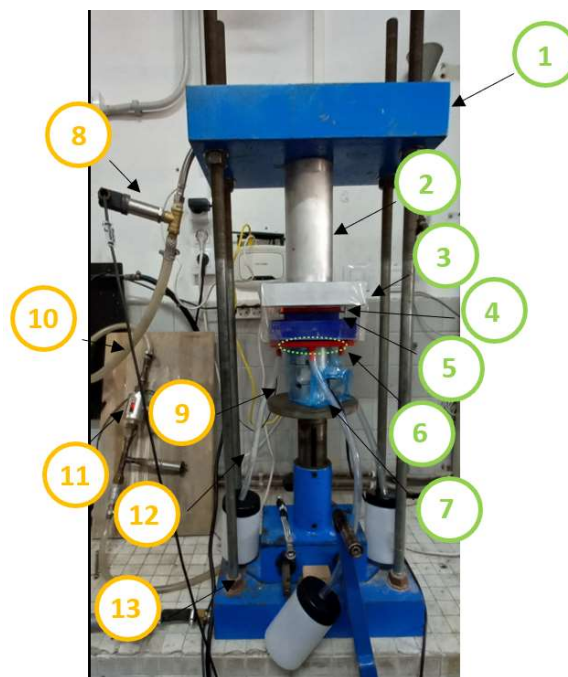


Figura 34. Dispositivo de ensayo

Identificación	Elemento
Sistema mecánico	
1	Prensa universal manual
2	Cilindro de carga
3	Placa de apriete
4	Centradores
5	Goma de apoyo
6	Placa centradora
7	Célula de carga
Sistema hidráulico	
8	Sensor de presión
9	Bandeja de ensayo
10	Manguera de suministro
11	Caudalímetro
12	Tubo de goma
13	Depósitos

Tabla 4. Elementos del dispositivo de ensayo



Figura 35. Vaciado circular realizado en la placa de apriete (3)

Además, el cilindro (2) posee un agujero pasante para permitir el paso de la cánula y el racor. De esta forma, es posible conectar la cánula a la tubería que conecta con la toma de suministro. Cabe destacar que es posible sustituir el cilindro de aluminio (2) por un sistema de pesas que cumpla la misma función; es decir, que garantice la alineación de los elementos y permita el paso de la cánula.

Sin embargo, el diámetro del taladro pasante mostrado en la Figura 35, si bien permite el paso del racor, supone el inconveniente de que permite que la cánula, de mucho menor diámetro, se ubique en su interior en cualquier punto sin ser necesariamente el centro de dicho hueco. Por ello, es necesario emplear unas piezas intermedias denominadas centradores (4) (Figura 36), que han sido modeladas en 3D e impresas posteriormente en material plástico PLA.

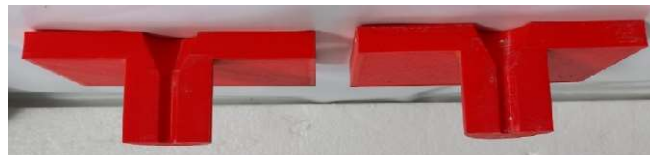


Figura 36. Centradores (4)

En el montaje final, se emplean dos centradores que, usados conjuntamente, permiten reducir el diámetro del agujero pasante en la placa de apriete (3) hasta los 6 mm de la cánula, asegurando que esta se encuentra en el centro. En su parte inferior, se ha realizado un vaciado tronco cónico que permite alojar aquellos excesos de adhesivo bicomponente situados en la unión entre cánula y muestra. En la Figura 37 se muestra en detalle el proceso de montaje en el que se colocan en sus debidas posiciones, bloque tipo B (en este caso en material plástico PLA de color azul) con la cánula, la placa de apriete y uno de los centradores.



Figura 37. Detalle de componentes en su correcta posición durante el montaje

Al permitir que el fluido mane por cualquiera de las caras laterales de la muestra, es necesario recoger el caudal que atraviesa cada dirección y sentido. Para ello, se ha empleado la bandeja (9) mostrada en la Figura 38, formada a su vez por dos piezas: una superior (9.1), de color azul en esta ocasión, y otra inferior (9.2), de color rojo.



Figura 38. Bandeja de ensayo (9)

La pieza superior que compone la bandeja permite recoger la cantidad de fluido que mana por cada dirección sin que se junte con la procedente del resto de direcciones. Para ello, se ubica la muestra en la plataforma central cuadrada, haciendo encajar los rebajes modelados en los bloques tipo A de las juntas, con los situados en los extremos de dicha plataforma.

Rodeando la plataforma, existe una segunda zona formada por cuatro pilares cuadrados que separan las zonas de recogida de fluido correspondientes a cada dirección. El espacio entre pilares está formado por una superficie de doble curvatura destinada a facilitar la evacuación del fluido por los orificios pasantes situados en su parte inferior.

En la parte inferior de esta pieza (9.1), se adhiere otra (9.2), que permite acoplar los tubos de goma (12) necesarios para conducir el fluido recogido hasta los

correspondientes depósitos (13). Una vez terminado el ensayo, se pesa la cantidad de agua acumulada por cada depósito. Conocido este dato, y el tiempo de duración del ensayo, es posible determinar el caudal medio circulante en cada dirección y sentido.

El cilindro de carga (2) puede ser sustituido por un conjunto de pesas que desempeñen la misma función, como el mostrado en la Figura 39. En dicha figura, también puede observarse que la célula de carga (7) está envuelta en una funda de plástico para proteger los elementos electrónicos.



Figura 39. Detalle de la disposición de la célula y el cilindro de carga, con la junta y la bandeja

Para bombear los fluidos se utiliza, la máquina de inyección DESOL Powerinject SP20 (véase la Figura 40). Se trata de una bomba de tornillo helicoidal que, permite alcanzar una presión máxima de 15 bares.



Figura 40. Bomba de inyección Desol PowerInject SP20

Una de las primeras labores llevadas a cabo ha sido obtener la curva característica de la bomba, que se puede observar en la Figura 41, y que relaciona cada valor de caudal con la presión entregada por la bomba.

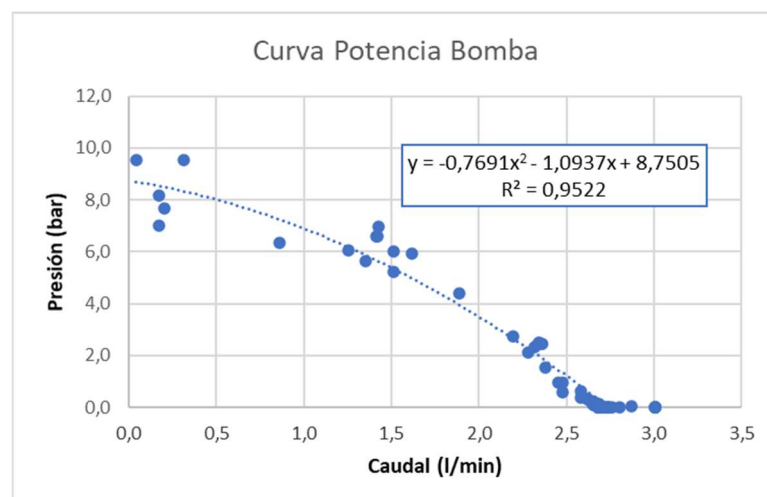


Figura 41. Curva característica de la bomba empleada

El caudal total inyectado se controla mediante un caudalímetro magneto-inductivo que se sitúa en serie con la tubería por la que discurre el fluido tal y como se muestra en la Figura 42. 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 42 Caudalímetro empleado durante un ensayo que registra 3,7 l/min

Por su parte, la presión en el circuito de inyección se controla con un sensor de presión, como el de la Figura 43, que 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 trabajen 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 43. Sensor de presión y sistema de protección

En muchos de los ensayos se ha utilizado también un regulador de presión, que permite 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 44 se puede observar el regulador de presión ensamblado en el circuito. Tal y como se observa el fluido 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.

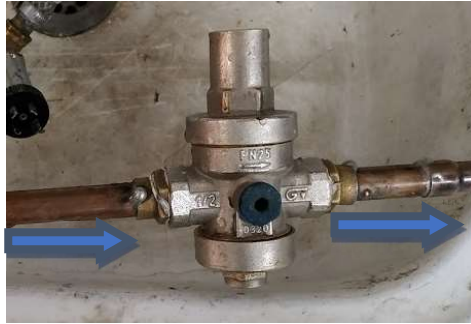


Figura 44. Regulador de presión

Por último, 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 45. Se ha configurada de forma que registre los datos de cada sensor cada segundo. Esos datos se almacenan en la memoria de la tarjeta y, conectando la central a un ordenador, se pueden descargar los datos exportándolos a un fichero tipo Excel para su posterior tratamiento y análisis.



Figura 45. Comet MS Data Logger

4.4 Características de la campaña experimental

Respecto a los ensayos TIPO 1, se ha realizado un estudio cualitativo de la distribución de tensiones en diferentes perfiles de rugosidad con el objetivo de determinar si el contacto a lo largo de todos los labios de la junta se produce de manera uniforme o si existen zonas en las que se concentren las tensiones demostrándose así que existe un contacto desigual a lo largo de todas ellas. El ensayo fotoelástico, consiste en proyectar luz sobre una muestra de material, de manera que

esta se polariza según dos direcciones perpendiculares entre sí, conocidas como eje rápido y eje lento. Cada una de estas direcciones, posee un índice de refracción diferente, lo que provoca un retardo entre la luz que viaja por un eje y el otro a la salida de la muestra. En función del retardo producido, se observará un color diferente en la muestra, que puede ser correlacionado directamente con el estado tensional en dicho punto. Para apreciar la variedad cromática es necesario disponer un polariscopio plano (dispositivo óptico formado por un emisor de luz blanca, un filtro polarizador y otro polarizador adicional). La disposición de los distintos elementos durante un ensayo puede verse en la Figura 46.

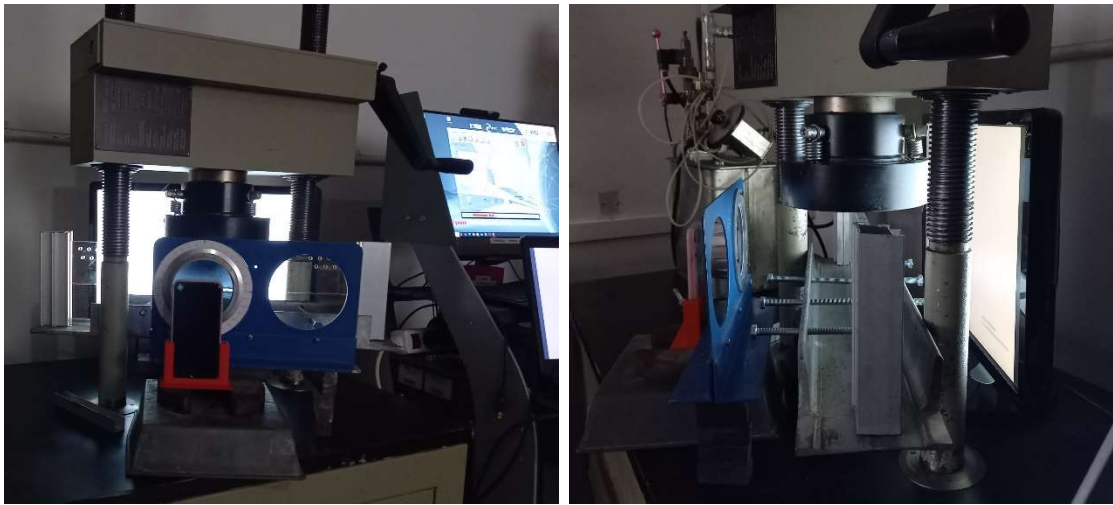


Figura 46. Disposición de los equipos en los ensayos de fotoelasticidad (TIPO 1)

En este caso, no se han aplicado los principios de la fotoelasticidad hasta su máximo alcance, si no que únicamente se ha llevado a cabo un análisis cualitativo del estado tensional inducido en el interior de la muestra, atendiendo a las diferencias cromáticas entre puntos.

Utilizando los sistemas descritos en el apartado anterior, se han llevado a cabo los ensayos TIPO 2, con los que se pretende caracterizar el flujo con agua en muestras cuyas rugosidades correspondan con el JRC 0-2, el JRC 10-12, el JRC 18-20 y el JRC 18-20 cruzado (aquel que contiene el mismo perfil en dos direcciones perpendiculares). Los ensayos se han realizado a presiones de fluido de: 1,7 (1,9), 3, 4, 5 y 6 bares para tensiones normales aplicadas sobre la junta de 0,5 MPa y 1,0 MPa.

Para extraer información sobre el camino recorrido por el fluido hasta llegar a la cara lateral de la muestra (ensayos TIPO 3) se hace necesario modificar la configuración de ensayo, de forma que permita grabar en vídeo la inyección de fluido en el interior de la junta. Se dispone la célula de carga en la parte superior de la prensa y se aplica

la tensión sobre la junta empleando un bloque de polimetilmetacrilato (PMMA) que permite observar a su través el proceso de inyección (Figura 47).



Figura 47. Disposición de los elementos en el ensayo TIPO 2

Debido a que las muestras están pensadas para inyectar el fluido a través de los bloques tipo B, ubicados sobre los A en los ensayos TIPO 2, es necesario invertir la colocación de la muestra en la bandeja, para que el fluido se inyecte desde abajo. A su vez, es necesario emplear una nueva bandeja, que debe tener agujerada su base para permitir el paso del racor y la cánula (Figura 47).

Los ensayos TIPO 3 se han realizado empleando: agua, cemento y microcemento; con el objetivo de analizar las diferencias en el avance de diferentes tipos de fluido en el interior de la junta.

Las inyecciones con agua se realizaron siempre sin tensión aplicada, para humedecer la superficie rugosa previamente a la inyección de cemento o microcemento. De esta forma, se reproducen las condiciones más comunes en obras de ingeniería subterránea, en las que el agua está presente de manera natural en el macizo rocoso antes de iniciar la inyección.

En el caso del cemento, se han ensayado los perfiles con rugosidad simple, es decir, los que contienen el JRC 0-2, el JRC 18-20 en una única dirección, y el JRC 18-20 cruzado consigo mismo, para tensiones aplicadas de $\sigma = 0$ MPa y $\sigma = 2$ MPa. Dichos

valores de tensión se escogieron en base a los resultados previos obtenidos en la caracterización con agua y teniendo en cuenta que el cemento, por su mayor densidad, presentaría mayor dificultad a la hora de transitar por la junta, alcanzándose así antes los valores de la tensión de cierre (aquella que no permite el paso de fluido por una dirección concreta).

Por último, se realiza una inyección con microcemento, con una tensión normal 0,1 MPa, y una presión de 1 bar, elevándose posteriormente hasta los 10 bares.

Para facilitar la toma de datos se han establecido dos direcciones, perpendiculares entre sí, definidas sobre el dispositivo y en las que, a su vez, se han definido cuatro sentidos, tal y como se recogen en la Figura 48. Al ser estas direcciones definidas sobre la prensa mecánica, es posible conocer la orientación del JRC ensayado si se registran los sentidos de inicio y fin del mismo. En lo sucesivo, se hará uso indistinto de los términos dirección y sentido para referirse a los sentidos indicados en la Figura 488. Además, esto permite denotar el caudal medido por cada dirección mediante la letra Q seguida de un subíndice que indica la dirección hacia la que ha avanzado el fluido desde el punto de inyección.



Figura 48. Direcciones definidas sobre la junta

Por último, cabe destacar que los perfiles JRC se colocan orientados siempre según aparecen normalizados en la Tabla JRC (Figura 22), es decir, se colocan en la prensa de manera que el perfil, leído de izquierda a derecha, se oriente de la dirección 2 a la 3.

Capítulo 5 : Análisis de resultados

El análisis de las inyecciones en macizos rocosos se ha centrado en el flujo a través de las juntas, por ser las discontinuidades los elementos que van a marcar el movimiento de los fluidos en la mayoría de los casos.

Se ha realizado un estudio del comportamiento de diferentes fluidos (agua, lechadas de cemento y lechadas de microcemento) al avanzar por superficies recreadas a partir de perfiles de rugosidad normalizados para juntas de roca. De esta manera, se pueden extrapolar los resultados obtenidos al caso de inyecciones en macizos rocosos reales. Los resultados muestran que el contacto entre las superficies que forman la junta es el factor determinante en el comportamiento del fluido, dependiendo dicho contacto tanto de la rugosidad como de la tensión normal a la que las juntas se ven sometidas como consecuencia del estado tensional del terreno.

5.1 Primeros ensayos

Los primeros ensayos se han llevado a cabo con agua tintada. Las dos piezas que simulan los labios de la junta se introducen en una prensa de carga axial, mediante la que se aplica una tensión normal controlada, sobre la junta. En el centro de la junta se inyecta el fluido, sometido a su vez a una presión de inyección, que puede variarse entre 1 y 10 bares. El fluido se desplaza por el interior de la junta y mana por la cara correspondiente, recogándose en cuatro depósitos independientes que permiten conocer cómo se distribuye el caudal de inyección en dos direcciones perpendiculares y, dentro de una dirección, en cada uno de los dos sentidos.

Se han llevado a cabo una batería de ensayos para comparar el comportamiento de juntas lisas (JRC 0-2) y juntas muy rugosas (JRC 18-20). Cada prueba se repitió tres veces con el fin de poder obtener un valor medio representativo. La primera conclusión importante de estos ensayos es la enorme influencia de la dirección en el flujo, confirmando la anisotropía del fenómeno.

Cuando se analiza el flujo en las muestras de baja rugosidad, se observa cómo se distribuye el caudal entre la dirección de rugosidad 0 (junta lisa) y su perpendicular (la correspondiente a un JRC 0-2). Cuando la tensión mecánica sobre la junta es 1 MPa, el 69 % del flujo discurre en la dirección "lisa" y sólo el 31 % lo hace en la dirección rugosa. Al aumentar la tensión mecánica a 2 MPa, aumenta el caudal en la dirección más favorable (rugosidad 0) hasta un 73 % de media, disminuyendo en la dirección rugosa. Aumentar la presión de inyección, en estos casos, solo hace que el

fenómeno se intensifique, llegando hasta un 77 % del caudal en la dirección más favorable.

En el caso de las muestras de alta rugosidad, el 100 % del caudal circula en la dirección de menor rugosidad (perfil liso). Además, este caudal no se distribuye uniformemente por toda la junta, si no que el fluido únicamente rellena las zonas más accesibles (los "valles" más próximos a la zona de inyección) y discurre por estos a la máxima velocidad posible (función de la presión de inyección y la viscosidad), de forma que solo si el volumen de material aportado es mayor de lo que puede evacuarse por esa sección, el nivel sube y permite a parte del fluido acceder a zonas nuevas de la junta. Esta idea se ha plasmado en la Figura 49, donde puede verse la zona de influencia en función del punto de inyección. Así, la circulación a través de estos canales preferenciales puede verse favorecida cuanto menos viscoso sea el líquido, haciendo que la distribución de la lechada sea menos homogénea si el caudal de aporte y la presión de inyección no son los adecuados.

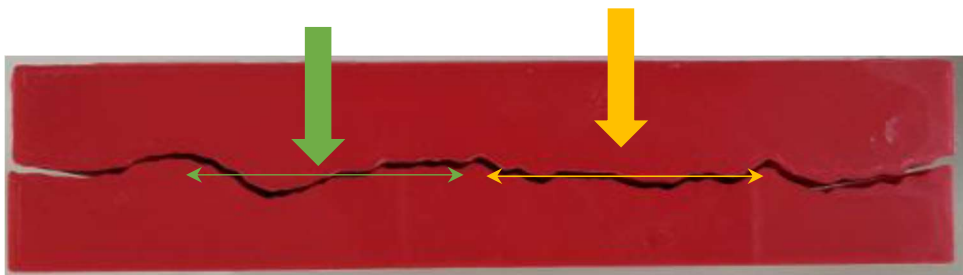


Figura 49. Zona de influencia de la posición de la zona de inyección

Para poder comparar las distintas rugosidades se han llevado a cabo una segunda batería de ensayos impidiendo el flujo en la dirección de rugosidad nula, mediante el sellado de los correspondientes laterales. De esta forma se comprueba que, una vez que el fluido ha rellenado los canales que siguen esa dirección, comienza a avanzar en la perpendicular (más rugosa).

En la Figura 50 se puede ver, para la junta menos rugosa (JCR 0-2), la evolución creciente del flujo al aumentar la presión de inyección y como este caudal disminuye cuando el material está más confinado (aumenta la tensión mecánica sobre la junta de 1 MPa a 2 MPa). Se ha representado un ajuste de tipo lineal, por afinidad con la ley de Darcy.

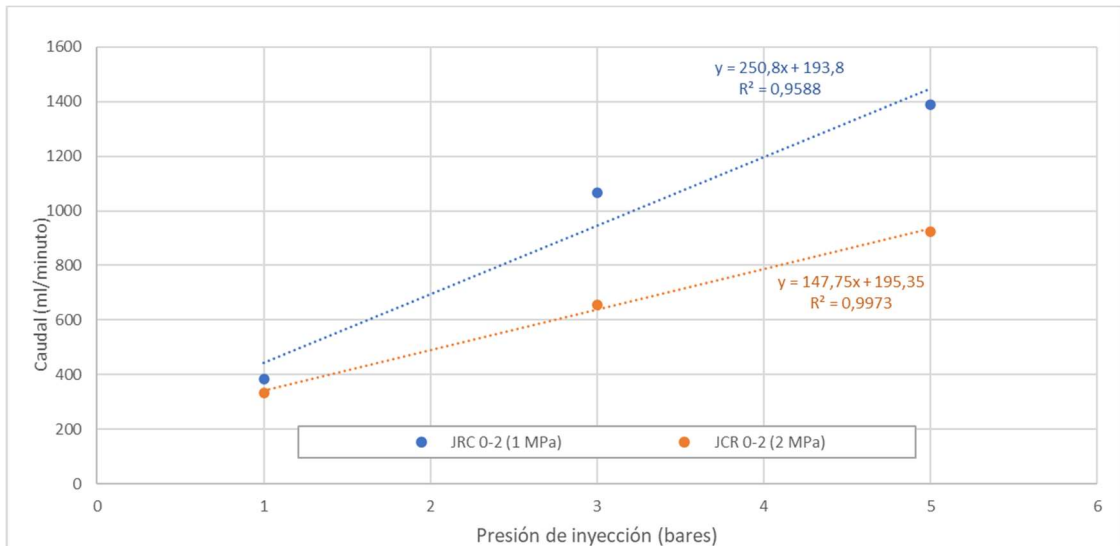


Figura 50.- Evolución del caudal con la presión de inyección en función de la tensión mecánica (JCR 0-2)

La Figura 51 representa los resultados del ensayo equivalente para una junta muy rugosa (JCR 18-20).

En este caso, las líneas de tendencia para ambas tensiones mecánicas son prácticamente paralelas y se observa un comportamiento diferente a bajas presiones de inyección (no coinciden los caudales). Esto puede ser debido a que en las juntas rugosas el flujo es muy anisotrópico (menos homogéneo) y tiende a producirse a través de los canales preferenciales más fácilmente accesibles.

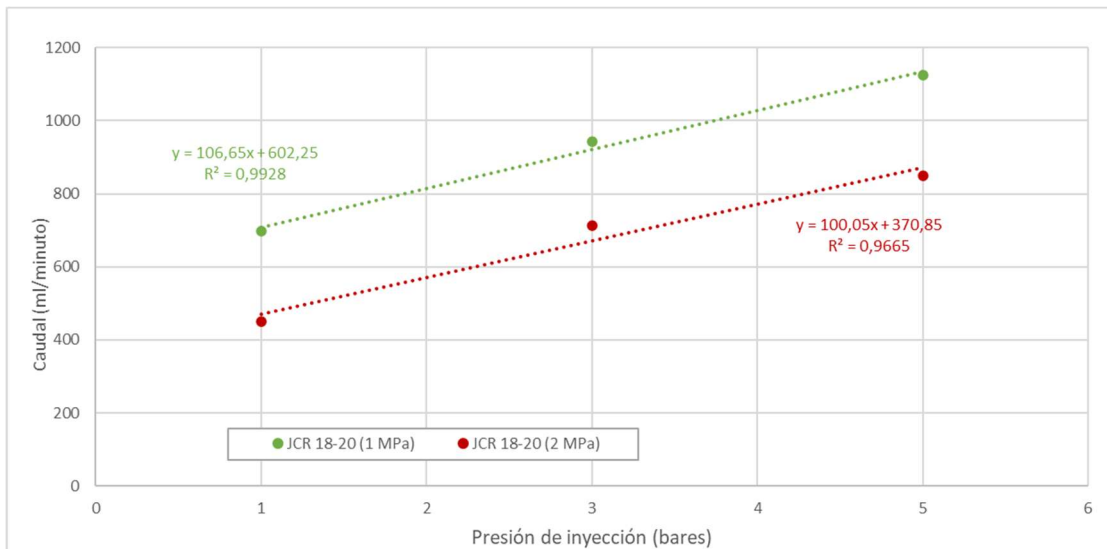


Figura 51.- Evolución del caudal con la presión de inyección en función de la tensión mecánica (JCR 18-20)

Cuando se representan juntos los cuatro ensayos (Figura 52) se ve como, en líneas generales, el caudal a través de la junta muy rugosa es algo menor que a través de la más lisa. Esta diferencia es más importante cuanto mayores son el confinamiento

y la presión de inyección, hasta el punto de que, para tensiones de 2 MPa, los flujos a través de una junta poco rugosa y otra muy rugosa aparentan ser muy similares.

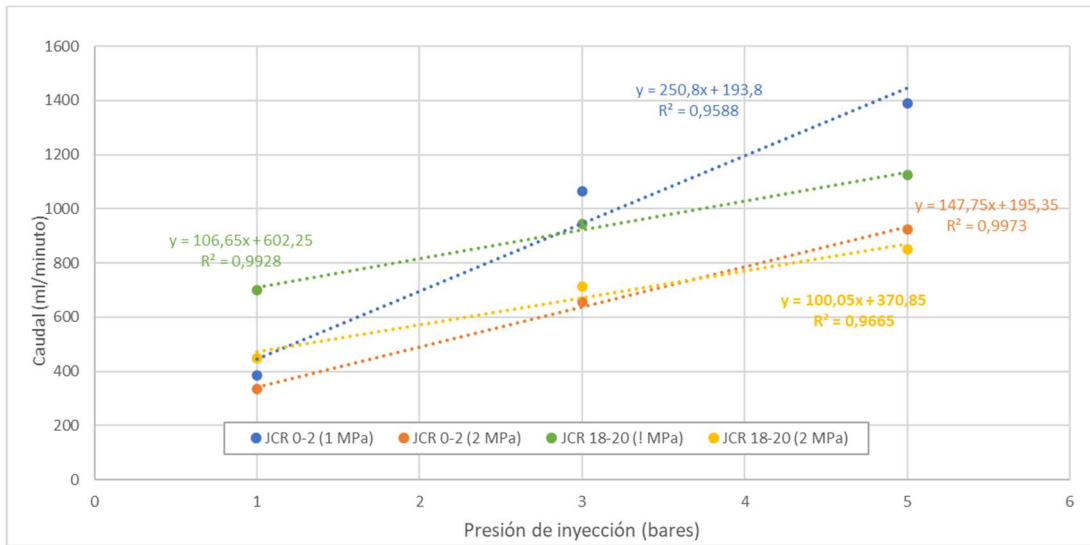


Figura 52.- Comparativa de los cuatro ensayos

5.2 Distribución de tensiones en las juntas

Aprovechando las propiedades birrefringentes⁶ del PMMA (polimetilmetacrilato), se someten las diferentes muestras a dos ensayos simultáneos. Por un lado, se aplica progresivamente carga a cada perfil de rugosidad hasta alcanzar los 20 kN. Por otro, se implementa un polariscopio plano y se registra el ensayo en vídeo. De esta forma, es posible analizar la evolución cualitativa del campo tensional en cada perfil de rugosidad en función de la carga aplicada.

Los campos tensionales en los diferentes perfiles de rugosidad en el momento de máxima aplicación de carga (20 kN) se muestran en la Figura 53. En dicha figura cada color representa un valor de tensión, de forma que las zonas en las que se aprecia gran variedad cromática indican importantes gradientes de tensión (como son, por ejemplo, los entornos de las juntas), mientras que las más homogéneas cromáticamente indican tensiones uniformes.

⁶ La **birrefringencia** es la propiedad física de un material en el que la luz se propaga de forma anisotrópica. En un medio birrefringente, el índice de refracción no es único, depende de la dirección de polarización de la onda de luz.

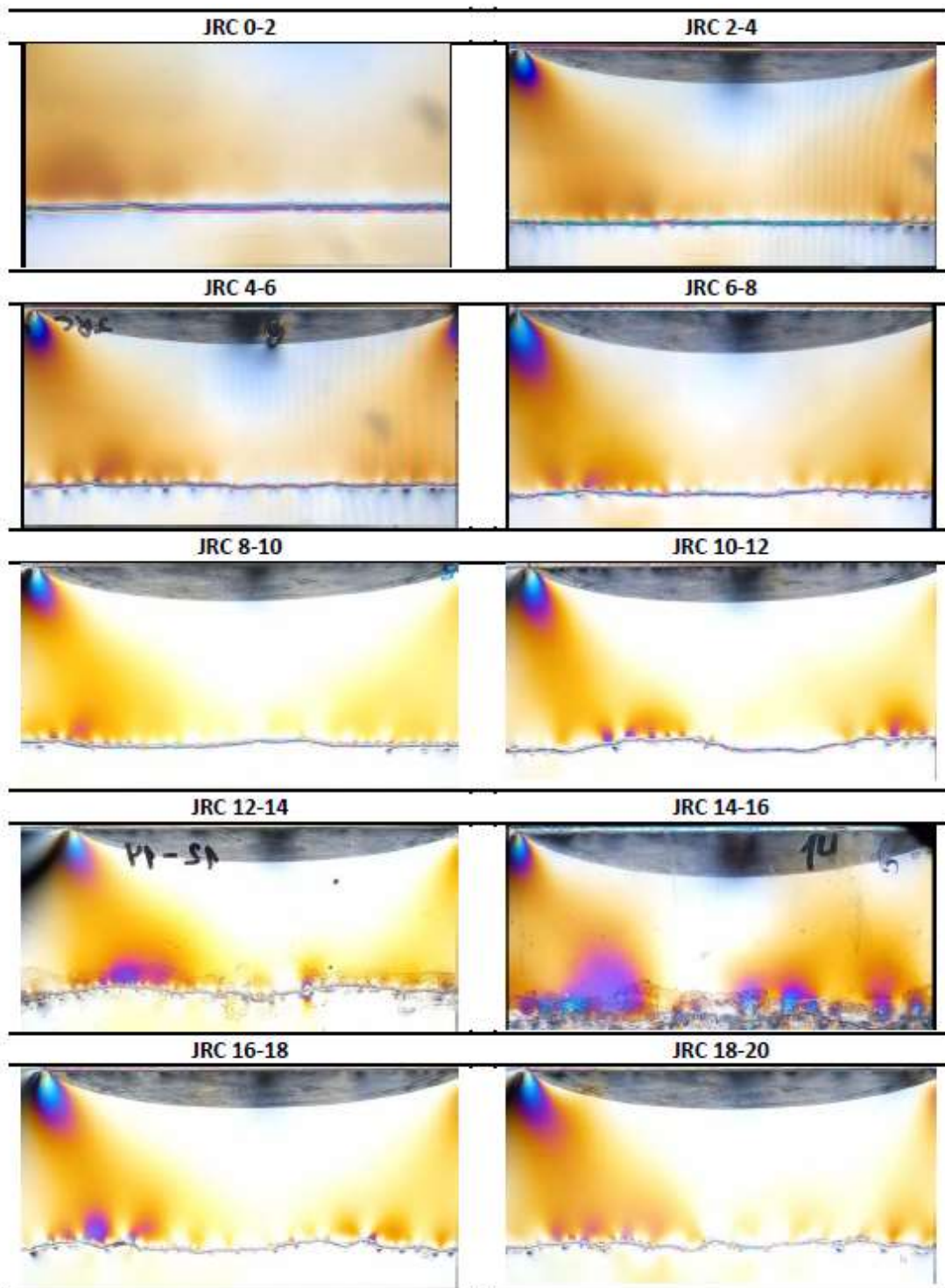


Figura 53. Resultados de ensayos fotoelásticos en perfiles JRC

A este respecto conviene comentar que, aunque la tensión transmitida por el plato de la prensa no es uniforme, se van a analizar los comportamientos a pequeña escala (cerca de las asperezas/ondulaciones de la junta) en zonas en las que si que las tensiones de partida son bastante homogéneas.

A partir de los resultados mostrados en la Figura 53, se puede afirmar que existen tres comportamientos diferentes en función de la rugosidad:

1. Comportamiento tipo I: característico de rugosidades que se puedan agrupar en el intervalo de rugosidad marcado por el JRC 0-2. Cuanto menor es la presencia de asperezas y ondulaciones, las tensiones a lo largo de los labios de la junta tienden a repartirse más uniformemente
2. Comportamiento tipo II: para aquellas rugosidades en el intervalo entre el JRC 2-4 y el 8-10. En este caso, el comportamiento está marcado por la presencia de asperidades, que provocan una redistribución de tensiones muy local.
3. Comportamiento tipo III: para aquellas rugosidades en el intervalo entre el JRC 12-14 y el 18-20, el comportamiento está ligado a la combinación de aspereza y ondulación.

En el caso de las asperezas, su influencia se puede analizar atendiendo a los resultados de los perfiles comprendidos entre JRC 0-2 y el JRC 8-10 debido a la reducida ondulación de estos se comprueba que estas provocan una redistribución de tensiones en sus proximidades, tal y como se muestra en detalle en la Figura 54, donde se compara el JRC 0-2 (a) con el JRC 4-6 (b). Las zonas más claras indican tensiones más bajas y las oscuras más altas, mostrando los diferentes grados de contacto a lo largo del perfil de rugosidad.

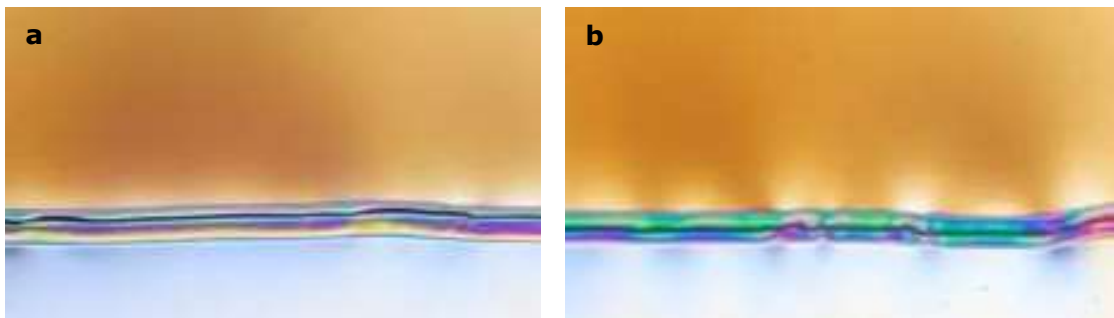


Figura 54. Comparación en la redistribución de tensiones entre el JRC 0-2 (a) y el JRC 4-6 (b)

A partir del perfil JRC 10-12, la ondulación de la junta cobra influencia y provoca que aquellas asperezas colocadas sobre los puntos de mayor cota en el labio alcancen las tensiones más elevadas, como se muestra en la Figura 55.

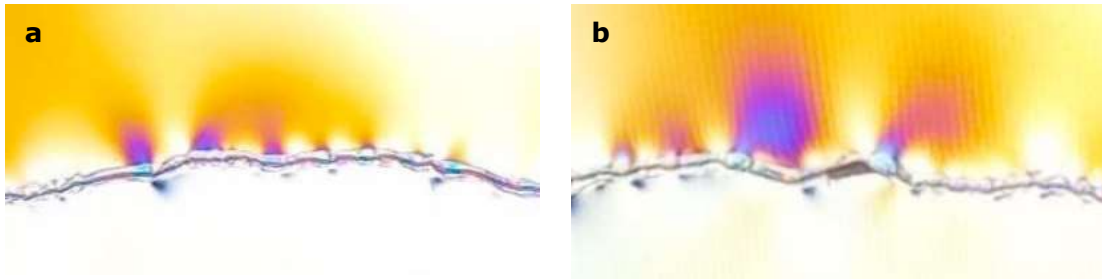


Figura 55. Comparación en la redistribución de tensiones entre el JRC 10-12 (a) y el JRC 14-16 (b)

De esta forma, se ve que no todos los canales de circulación se cierran de manera homogénea al aplicar una tensión normal, lo que justifica que el fluido se concentre en algunos de ellos y explica la salida no homogénea de chorros a presión que se había observado. Además, se comprueba que el cierre de canales es más homogéneo cuanto menor es la aspereza, lo que explica el menor caudal recogido en muchos de los ensayos en las direcciones más lisas.

5.3 Ensayos de inyección de agua

El estudio de la inyectabilidad de juntas debe comenzar realizando pruebas con agua, debido a dos razones fundamentales: en los macizos rocosos a inyectar las juntas están rellenas de agua y ésta debe ser reemplazada por el fluido de inyección y, por otra parte, el agua sirve como fluido patrón a la hora de analizar el comportamiento con cementos y microcementos.

A la hora de analizar los resultados obtenidos, debe mencionarse que se han efectuado siempre al menos dos ensayos en las mismas condiciones de tensión normal y presión de fluido, representándose la media de las pruebas.

Se han evaluado las relaciones caudal (Q) – gradiente de presión (ΔP) en los cuatro sentidos de la junta, teniendo en cuenta que cuando la relación es lineal pueden considerarse como válidos el flujo laminar y la ley de Darcy, de forma que la pendiente de dicha relación está directamente relacionada con la permeabilidad (o más correctamente con la transmisividad).

5.3.1 Juntas con JRC 0-2

Se han efectuado 20 ensayos con presiones de inyección de 1,7; 3; 4; 5 y 6 bares (dos ensayos por presión de inyección) y tensiones normales a la junta de 0,5 y 1,0 MPa, evaluando los caudales medios recogidos en cada una de las cuatro direcciones (Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4). La presión de inyección más baja de la serie resulta ser la mínima para que el fluido alcance los laterales de la pieza. Los resultados obtenidos para 0,5 MPa se han representado en la Figura 56, agrupando los caudales en las direcciones

1-4 y 2-3. Para presiones de inyección pequeñas, el flujo es prácticamente inapreciable, aumentando el caudal al aumentar la presión. Sin embargo, pese a tratarse de una junta con una rugosidad muy homogénea, se puede comprobar como la distribución de caudales no es en absoluto equitativa, predominando el flujo en la dirección 2-3, que en este caso es más rugosa que la 1-4, lo que confirma la idea de que cuanto más lisa es la junta, menor es su apertura al aplicarle una tensión normal, incluso cuando la diferencia es tan pequeña que se está comparando una rugosidad 0-2 con una 0.

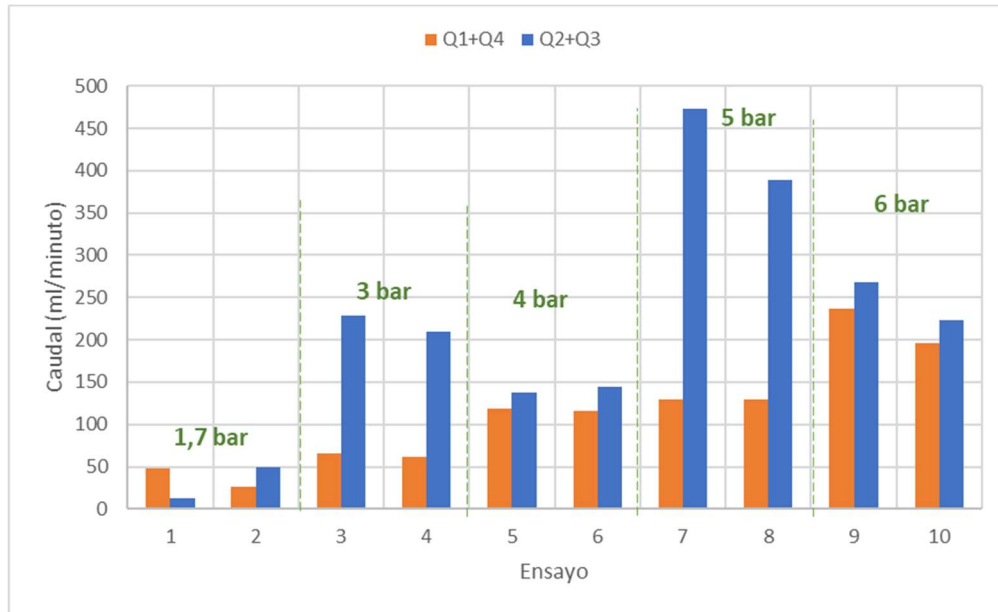


Figura 56. Caudales de agua en las cuatro direcciones para JRC 0-2 y 0,5 MPa

Se aprecia también como una mayor presión de inyección se traduce en un mayor caudal total, si bien esta tendencia se ve enmascarada por la distribución no homogénea entre las direcciones de flujo. La idea que se puede extraer es que el flujo se produce preferentemente en la dirección más favorable hasta que la presión de inyección permite abrir nuevas vías de circulación que generan un reparto más homogéneo. Así, entre 1,7 y 3 bares se ve como el flujo crece en ambas direcciones pero mucho más en la 2-3 (más favorable). Al pasar a 4 bares, la distribución de caudales es más homogénea, disminuyendo en la dirección mas favorable a favor de la otra. Al aumentar la presión de inyección a 5 bares, el flujo en la dirección 1-4 se mantiene prácticamente constante, pero se reactiva fuertemente la dirección 2-3. La siguiente subida de presión a 6 bares reactiva esta vez la dirección 1-4, dividiendo el caudal total de forma más homogénea entre ambas direcciones, al compensar completamente la presión de inyección a la tensión normal.

Al aumentar la tensión sobre la junta (Figura 57) se observa una drástica reducción de caudal derivada de la disminución de apertura. De hecho los caudales, si bien van

creciendo moderadamente, son prácticamente despreciables hasta presiones de inyección de 5 bares. Se sigue apreciando que la dirección dominante es la 2-3, si bien a las presiones ensayadas no se detectan los fenómenos de activación/reactivación anteriormente descritos.

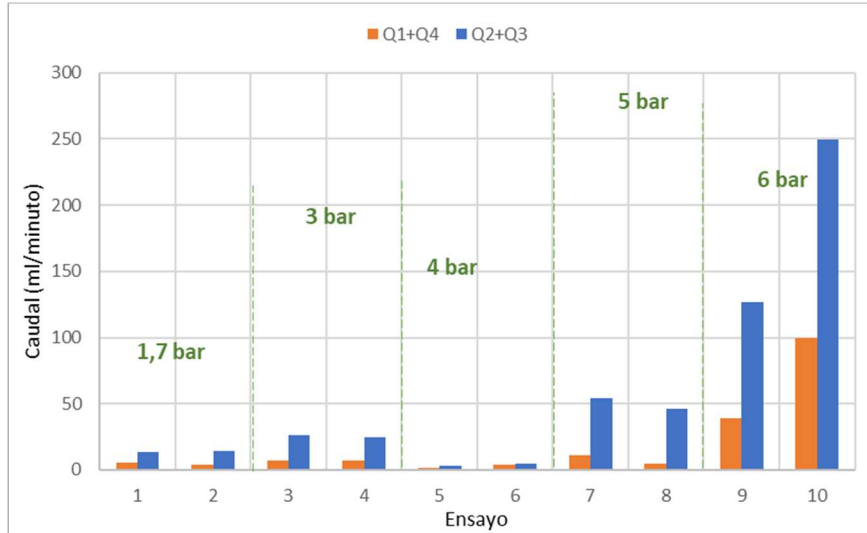


Figura 57. Caudales de agua en las cuatro direcciones para JRC 0-2 y 1,0 MPa

Para analizar los caudales totales a través de la junta en función de la presión de inyección, el mejor ajuste se obtiene considerando que el flujo desarrollado en el interior de la junta es laminar y, por tanto, se puede modelar mediante la ley de Darcy (véase la Figura 58). La pendiente del ajuste lineal se correlaciona con la transmisividad, mientras que su intersección con el eje de ordenadas representaría la presión mínima a la que el fluido debe ser inyectado para poder recorrer la junta, que varía entre 0,7 y 1,9 bares en función de la tensión sobre la junta.

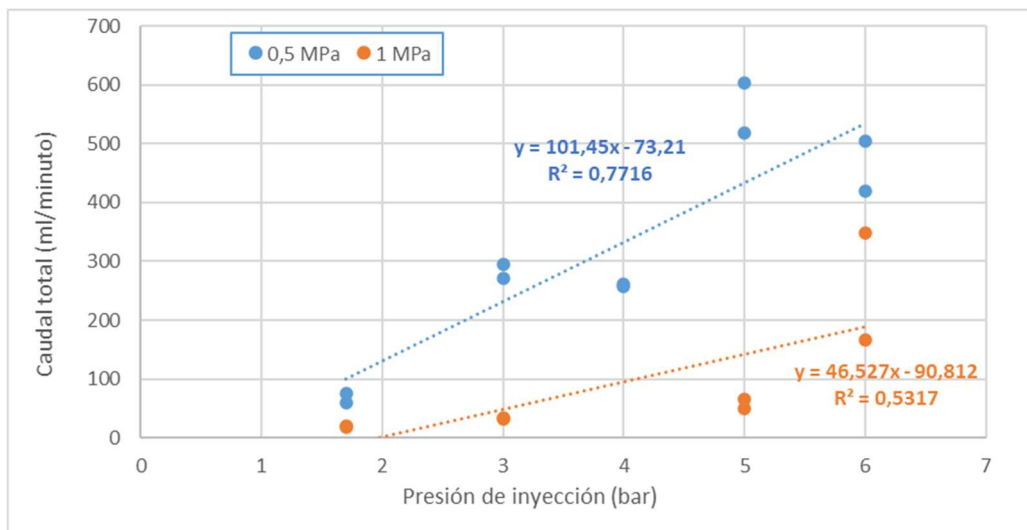


Figura 58. Caudal total de agua para JRC 0-2 para distintas tensiones normales

5.3.2 Juntas con JRC 18-20

Se analiza a continuación el comportamiento de una junta en el otro extremo de la clasificación de rugosidad, con un JRC 18-20. En la Figura 59 se recogen los caudales correspondientes a la dirección de la rugosidad (2-3) y la dirección lisa (1-4) para distintas presiones de inyección y una tensión normal media en la superficie de 0,5 MPa. En primer lugar, debe mencionarse que los resultados correspondientes a presión de 6 bares son anómalamente bajos, por lo que no se tendrán en cuenta en el análisis.

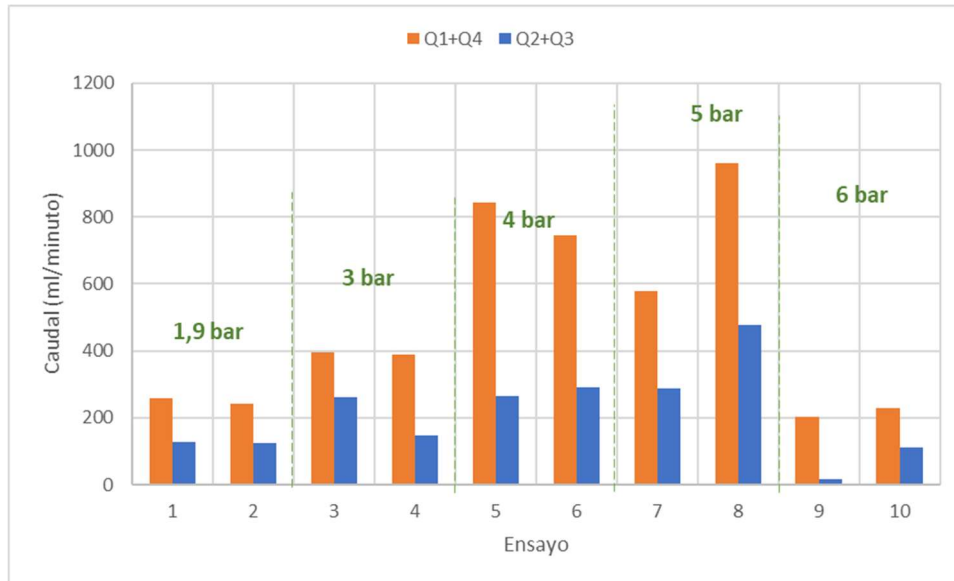


Figura 59. Caudales de agua en las cuatro direcciones para JRC 18-20 y 0,5 MPa

En cuanto al resto de ensayos, se comprueba que los caudales, en todos los casos, son mayores que para la rugosidad JCR 0-2, debido a que las asperezas ocasionan una distribución no homogénea de la tensión normal y permiten el flujo a través de determinados circuitos o conductos. Se observa también el mismo fenómeno que en las pruebas anteriores, con distribuciones no homogéneas entre ambas direcciones.

Cuando se aumenta la tensión normal a 1 MPa se tienen los resultados representados en la Figura 60. En este caso, resultan discordantes los ensayos a 5 bares. Estas anomalías detectadas en las dos series de ensayos (0,5 y 1,0 MPa) dejan patente como cualquier alteración en el ajuste entre ambos labios de la discontinuidad puede generar cambios radicales en el comportamiento hidráulico.

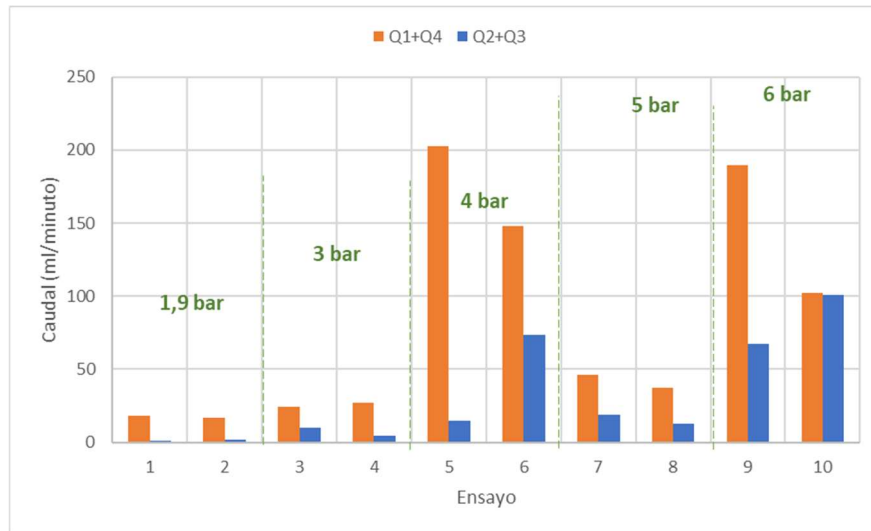


Figura 60. Caudales de agua en las cuatro direcciones para JRC 18-20 y 1,0 MPa

Si se evalúa el caudal total que circula por la junta (independientemente de la dirección), se tiene la Figura 61. Como es lógico, se tiene mayor caudal a mayor presión de inyección y menor tensión (confinamiento) sobre la junta. La presión de inyección mínima para que el fluido circule es de 0,5 y 1,7 bares (para 0,5 y 1,0 MPa de tensión normal respectivamente). Estos valores son ligeramente menores a los obtenidos para el JRC 0-2, confirmando una mayor facilidad de flujo en la junta más rugosa.

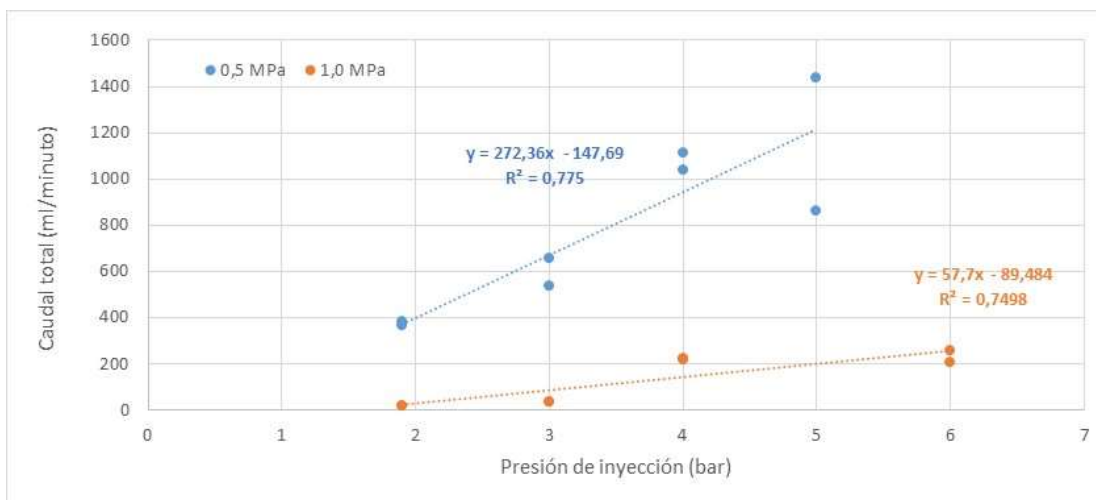


Figura 61. Evolución del caudal que circula por una junta con JRC 18-20 en función de la presión de inyección y la tensión de confinamiento

Para poder comparar el comportamiento de los dos JRC extremos (0-2 y 18-20) se presenta la Figura 62. El caudal que fluye a través de la junta es siempre mayor a mayor presión de inyección y rugosidad de la junta, si bien la influencia de ambos parámetros es menos cuanto mayor es la tensión normal. Es decir, al crecer la tensión normal en la junta pierde influencia su rugosidad.

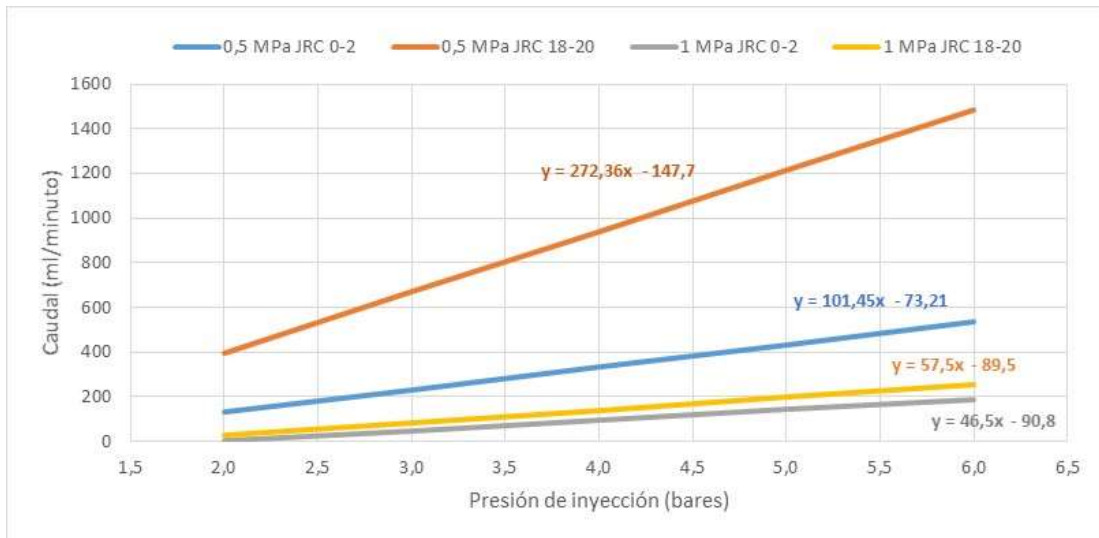


Figura 62. Caudal total para JRC 0-2 y JRC 18-20 y tensiones normales de 0,5 y 1,0 MPa

5.3.3 Juntas con JRC 18-20 cruzado con JRC 18-20

En este caso se ha intentado reproducir la rugosidad de una junta con JRC 18-20 en tres dimensiones, de forma que en las cuatro direcciones se corresponda con el patrón del JRC deseado.

Para analizar en detalle la forma de las asperezas y su distribución se ha representado la elevación de cada punto de la superficie y se han dibujado las curvas de nivel correspondientes (Figura 63). Los tonos azules representarían las zonas de valle, más profundas cuanto más intenso sea el azul. Los tonos cálidos (naranjas y amarillos) se asociarían a las zonas más elevadas. A la derecha de la figura se tiene la misma representación junto con el punto de inyección de agua y las direcciones de flujo.

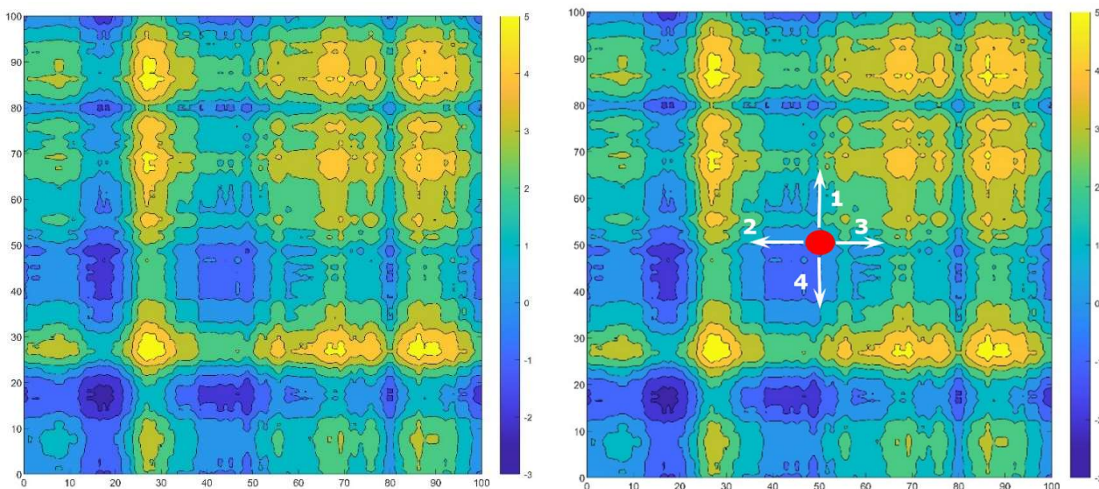


Figura 63. Mapa de contorno JRC 18-20 cruzado con JRC 18-20

Los perfiles de rugosidad que forman la superficie de la junta van dirigidos desde la dirección 2 a la 3 y de la 4 a la 1. En este sentido, se podría esperar un caudal similar (aunque no idéntico) en las direcciones 1 y 3, como efectivamente ocurre (Figura 64), y 2 y 4, entre las que, sin embargo, existen grandes diferencias.

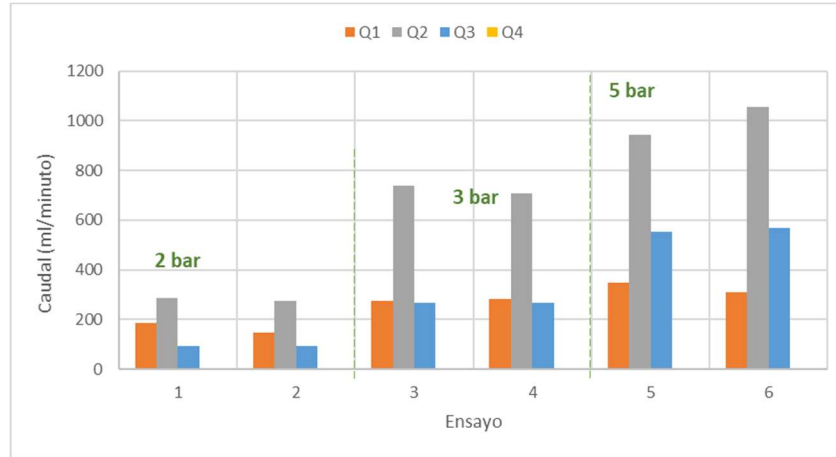


Figura 64. Distribución de caudales para JRC 18-20 cruzado 18-20 (0,5 MPa)

Estas diferencias pueden ser debidas a que una pequeña anomalía en el contacto entre los dos labios de la junta puede hacer que la interacción entre las diferentes asperezas favorezca a una de las dos direcciones equivalentes, en este caso la dirección 2. Para analizarlo, se puede utilizar la Figura 65. En dicha figura se han representado los circuitos de flujo del agua y la distribución de caudales según las direcciones 1 y 2, resultando equivalentes para la 3 y la 4.

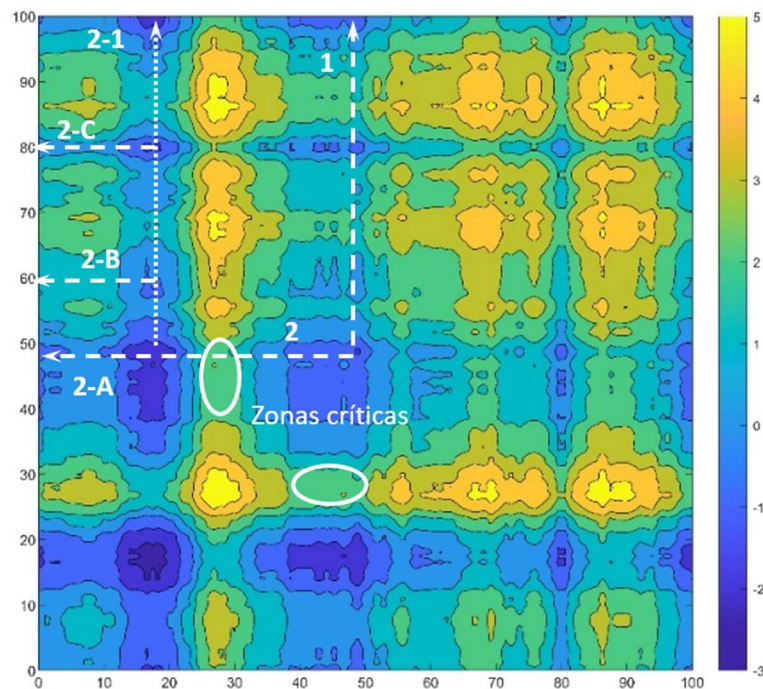


Figura 65. Esquema de los circuitos de circulación según las direcciones 1 y 2

Para que el fluido circule hacia las direcciones 2 y 4 debe salvar una pequeña elevación (mientras que en las direcciones 1 y 3 hay un pequeño canal a cota más baja), que se ha marcado en la figura como zona crítica. Cualquier anomalía que suponga una elevación un poco superior o un mejor ajuste de los labios en esa zona impedirá el paso del agua en esa dirección. En el caso de la dirección 1, la "topografía" de la junta, dirige claramente el flujo a través de un canal, de forma que no puede dispersarse a izquierda (dirección 3) ni derecha (dirección 2) porque se encuentra con zonas más altas que dificultan el paso del agua. En el caso de la dirección 2, una vez superada la primera dificultad topográfica (zona crítica), el flujo se distribuye, entre diferentes canales que, a su vez, se van ramificando (flujo 2-A, 2-B, 2-C, 2-1). El agua se va a distribuir entre la dirección 1 y la 3 de forma proporcional al área de influencia de cada una (Figura 66), resultando la de la dirección 2 el triple que la de la 1. Esta proporción no se refleja completamente en la distribución de caudales, puesto que una parte del flujo inicialmente asociable a la dirección 2 acaba manando por la 1 (flujo 2-1 de la Figura 65) y contribuyendo por tanto al caudal Q1.

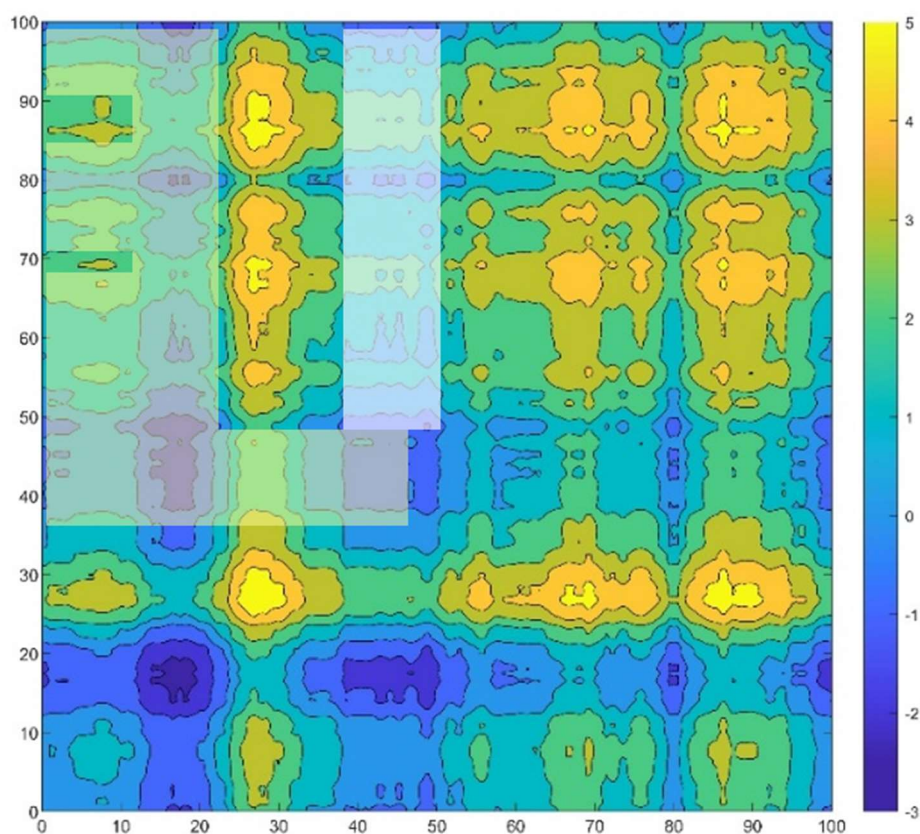


Figura 66. Áreas de influencia de las direcciones 1 y 2

La mayor prevalencia de la dirección 2 puede comprobarse en la Figura 67, donde se han representado la suma de los caudales correspondientes a direcciones que deberían ser equivalentes (es decir, 1 y 3 por una parte y 2 y 4 por otra). Pese a

que, en este caso concreto, la dirección 4 no aporta un caudal significativo, el caudal correspondiente a la 2 supera la suma de los caudales Q1 y Q3.

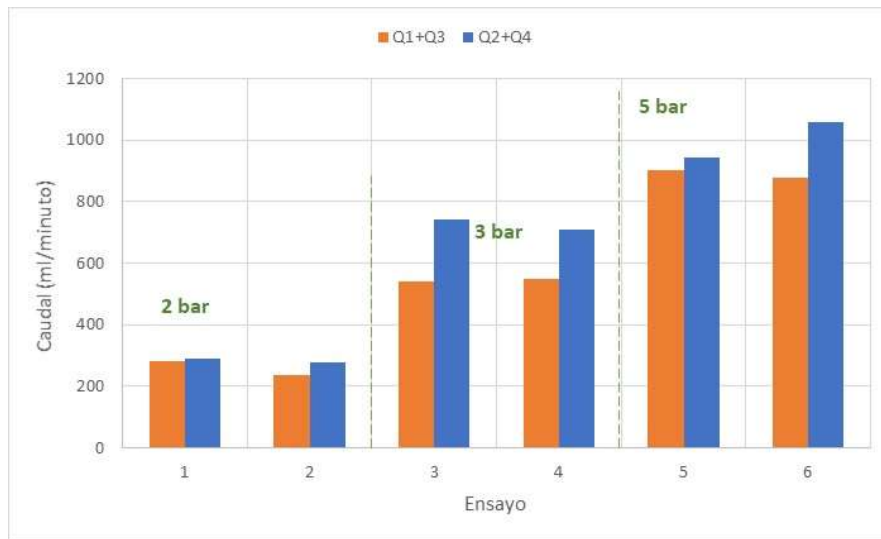


Figura 67. Caudales combinados por direcciones para JRC 18-20 cruzado 18-20 (0,5 MPa)

Al aumentar la deformación de las diferentes asperidades como consecuencia del aumento de tensión aplicada hasta 1,0 MPa, se produce una reducción del caudal que circula por la junta (Figura 68). Si bien su distribución es similar a la que tenía lugar para una tensión de 0,5 MPa, la prevalencia de la dirección 2 sobre la 1 y 3 es mucho más marcada.

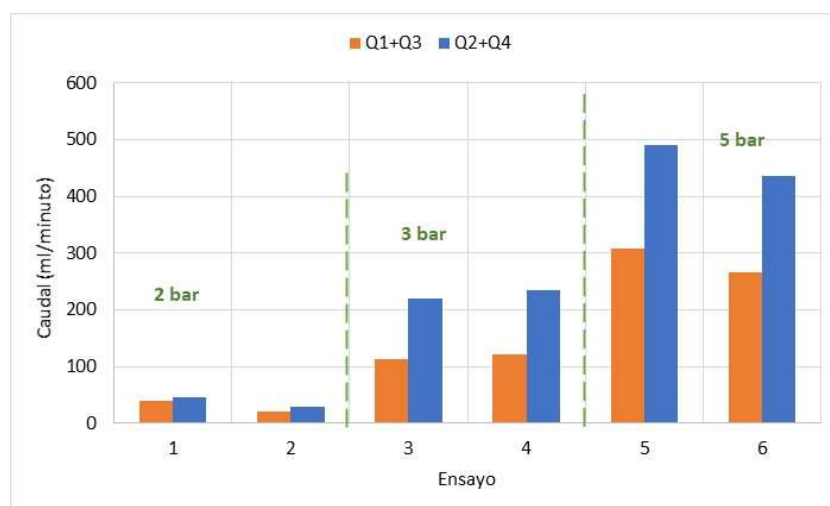


Figura 68. Caudales combinados por direcciones para JRC 18-20 cruzado 18-20 (1,0 MPa)

Respecto al caudal total que consigue atravesar la junta en función de la presión de inyección y la tensión normal, se ha representado en la Figura 69.

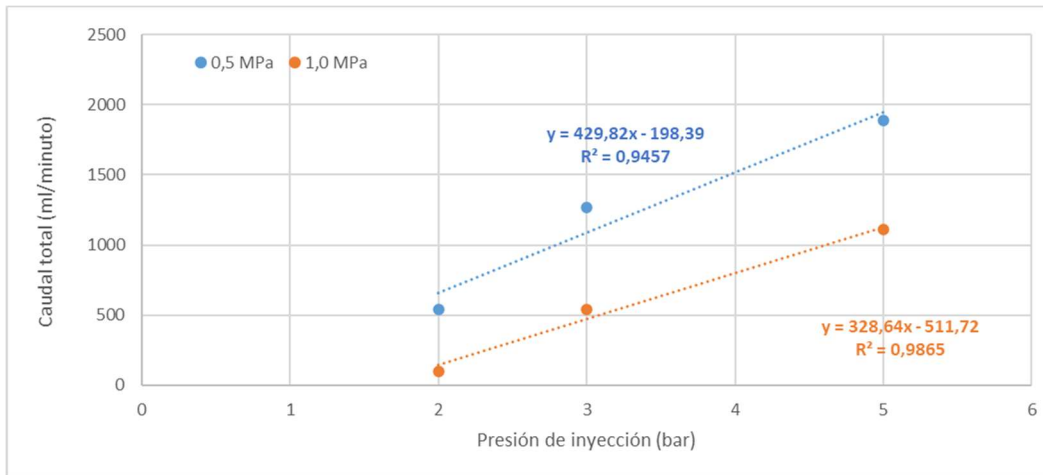


Figura 69. Caudales totales para JRC 18-20 cruzado 18-20

Si se comparan estos valores con los obtenidos para JRC 0-2 (liso en la dirección perpendicular) y JRC 18-20 (liso en la dirección perpendicular), se comprueba que se cumple que una mayor rugosidad favorece el flujo de agua a través de la junta (véase la Figura 70), confirmando la idea de que la rugosidad impide el acople perfecto de ambos labios y la distribución homogénea de tensiones.

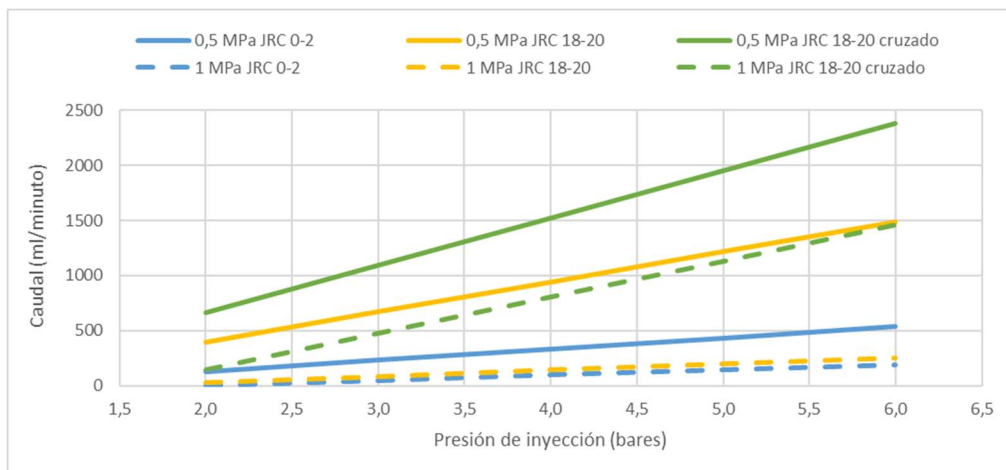


Figura 70. Caudales totales que atraviesan la junta para los JRC analizados

Si se analizan en conjunto todos los ensayos se observa como cuando se somete la junta a una tensión normal baja, el fluido tiende a manar por sus caras laterales de manera bastante homogénea (véase la Figura 71), aunque con una diferencia de caudales significativa en cada dirección que demuestra la anisotropía. Sin embargo, al elevar la tensión de manera significativa, será necesario incrementar también la presión de fluido para lograr que este atraviese la discontinuidad, surgiendo el agua en forma de chorro en puntos concretos y muy localizados (véase la Figura 72), con caudales elevados.



Figura 71. Surgimiento homogéneo a lo largo de la junta para tensiones y presiones de inyección bajas



Figura 72. Surgimiento en forma de chorro, característico de tensiones y presiones elevadas

5.4 Comportamiento de las inyecciones de cemento

Una vez comprobado el funcionamiento de las inyecciones de agua, se sustituye este fluido por una lechada de cemento. Se ha utilizado cemento Portland, concretamente CEM II/B-M (V-L) 32,5R. En este caso se ha optado por una dosificación 2:1, lo que corresponde a una densidad de $1,12 \text{ t/m}^3$.

Se han ensayado los mismos perfiles de rugosidad (JRC 0-2, JRC 18-20 y JRC 18-20 cruzado con JRC 18-20) que en las pruebas de inyección con agua.

Entre los diferentes ensayos se procede a desmontar la muestra para poder limpiar con agua los dos bloques que la componen, eliminando restos de lechada y garantizando, de esta forma, que la inyección se realiza siempre en las mismas condiciones iniciales para la junta.

5.4.1 Juntas con JRC 0-2

El flujo de cemento en estas juntas ha demostrado ser muy sensible a la tensión normal. Como ya se había observado en las pruebas de fotoelasticidad, se produce

una distribución más homogénea de las tensiones que contribuye a un cierre uniforme de los canales de circulación.

En el caso del flujo de agua este flujo es pequeño, pero existe. En el caso de la inyección de cemento, la propia granulometría de este material impide el paso a través de los conductos cuando están cerrados. De hecho, para una tensión normal de tan solo 0,5 MPa, no se ha conseguido que la lechada salga por ninguna de las caras, ni aun aumentando la presión de inyección a 10 bares. Por esta razón se decide ir aumentando progresivamente la tensión normal de 0,1 en 0,1 MPa. En la Tabla 5 se resumen los resultados obtenidos, comparándolos con el agua a 0,5 MPa.

Para una tensión normal de 0,1 MPa fue necesario aumentar la presión de inyección de la lechada hasta 6 bares. El flujo es muy anisotrópico, ya que en las direcciones 2 y 3 es nulo, concentrándose principalmente por la dirección 1. Al aumentar la tensión sobre la junta hasta los 0,2 MPa, se observó que el fluido se distribuye preferentemente por las direcciones 2 y 3, si bien es necesario aumentar la presión de inyección hasta los 10 bares.

Tensión normal (MPa)	Fluido	Presión fluido (bar)	Q1+Q4 (ml/min)	Q2+Q3 (ml/min)
0,5	Agua	6	236,8	268,0
0,1	Cemento 2:1	6	331,9	0
0,2	Cemento 2:1	10	627,0	25,2
0,3	Cemento 2:1	10	0	0

Tabla 5. Valores de caudal registrados para el JRC 0-2 con lechada de cemento 2:1

Por último, para tensiones normales de 0,3 MPa y superiores no se consigue inyectar la lechada.

5.4.2 Juntas con JRC 18-20

A diferencia de lo que ocurría en el JRC 0-2, para JRC 18-20 se consigue inyectar la lechada de cemento incluso con tensiones normales de 0,5 MPa, ya que como se ha ido analizando previamente, la mayor rugosidad favorece la existencia de canales abiertos de circulación. En la Tabla 6 se resumen los resultados obtenidos.

Tensión aplicada (MPa)	Fluido	Presión fluido (bar)	Q1+Q4 (ml/min)	Q2+Q3 (ml/min)
0,5	Agua	6	768,1	382,4
0,1	Cemento 2:1	6	838,8	505,2
0,5	Cemento 2:1	10	199,8	0
1,0	Cemento 2:1	10	-	-
2,0	Cemento 2:1	10	-	-

Tabla 6. Caudales registrados en la inyección de cemento para JRC 18-20

Para tensiones normales bajas, el fluido avanza por las cuatro direcciones, si bien con preferencia por las de rugosidad más baja (1 y 4). Sin embargo, para 0,5 MPa, ya no se consiguió que la lechada fluya hacia las direcciones 2 y 3. En este caso, la limitación en el flujo viene dada, probablemente por la presión de inyección utilizada, que está limitada a 10 bares.

Los ensayos realizados para tensiones normales de 1,0 y 2,0 MPa no han permitido cuantificar el caudal en las caras laterales, si bien cualitativamente se ha observado que es prácticamente despreciable en las caras 2, 3 y 4, restringiéndose por tanto a la dirección 1 (véase la Figura 73).



Figura 73. Chorro de lechada en la dirección 1 para JRC 18-20 y tensión normal de 2,0 MPa

5.4.3 Juntas con JRC 18-20 cruzado con JRC 18-20

Se han llevado a cabo pruebas de inyección con cemento 2:1 en una muestra de resina con el perfil JRC 18-20 en dos direcciones perpendiculares.

Durante el ensayo, realizado a 0,5 MPa y en el que se alcanzó una presión de fluido máxima de 12 bares, no se consiguió en ningún momento que la lechada recorriera la muestra y llegará a manar por ninguna de sus caras laterales. Finalmente, se cesó la inyección y se mantuvo la tensión normal durante 24 horas, tras lo cual se procedió al desmontaje para analizar la región de inyección (Figura 74).

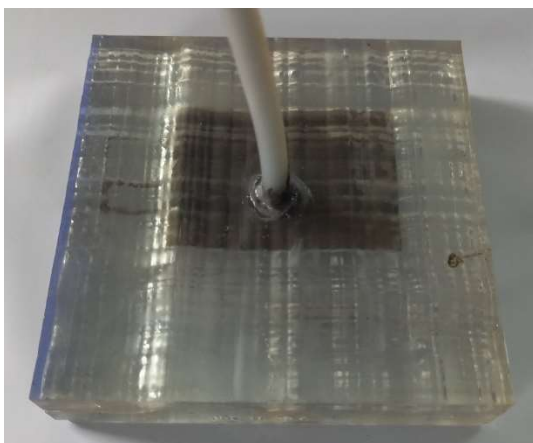


Figura 74. Alcance de la inyección de cemento en junta con JRC 18-20 cruzado

La zona inyectada está definida por un rectángulo. Al comparar las direcciones 1 y 4, se observa que el fluido ha conseguido progresar una mayor longitud a favor de la dirección 1. Al analizar el mapa de contorno de la superficie de la junta (Figura 75) se observa que, si bien presenta "elevaciones" similares en ambas direcciones, en la dirección 1 existe una mayor concentración de zonas de depresión (tonalidad azul rodeadas de verde), que pueden facilitar el paso de fluido. En la dirección 4 se aprecia una mayor uniformidad en las cotas que actuarían de barrera. Por otro lado, destaca que a lo largo de la dirección 2 se aprecian dos pequeños hilos de lechada que han sido capaces de progresar hacia la cara lateral de la junta y comienzan a dispersarse. Estos dos hilillos muestran como se produce el proceso de avance del fluido, atravesando las asperezas por zonas más favorables (deprimidas).

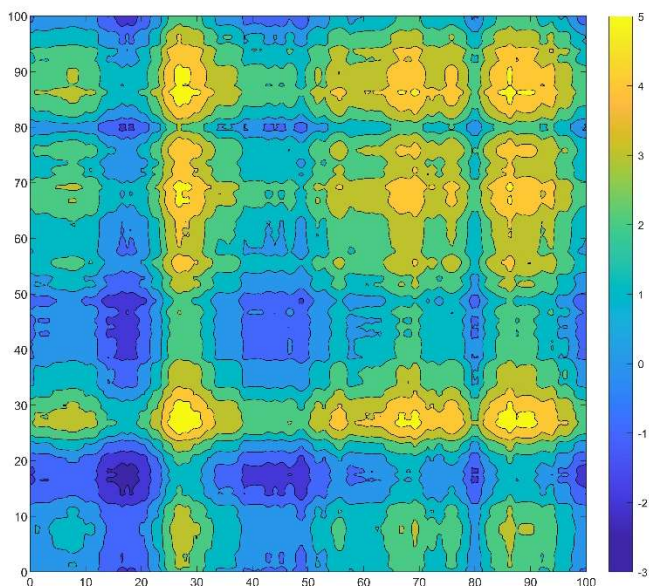


Figura 75. Mapa de contorno para el JRC 18-20 cruzado con JRC 18-20

Los resultados obtenidos para el caso de rugosidad compuesta contrastan significativamente con los obtenidos para el caso del JRC 18-20 en rugosidad simple. En el primer caso, la lechada no fue capaz de superar las asperidades más elevadas quedando atrapada en un área rectangular mientras que, en el segundo caso, el flujo se mantuvo incluso para tensiones normales cuatro veces superiores.

De ello se deduce que para estudiar el flujo en el interior de una diaclasa es necesario caracterizar la superficie tridimensionalmente y no sólo a partir uno sólo de los perfiles que la conforman, aunque este sea el de máxima rugosidad.

5.5 Comportamiento de las inyecciones de microcemento

Para completar esta batería de ensayos se han realizado una serie de pruebas con objetivos cualitativos (más que cuantitativos) inyectado microcemento en una junta con una rugosidad intermedia, la de JRC 10-12. La lechada se ha fabricado según las indicaciones del fabricante, alcanzando una densidad de $1,20 \text{ t/m}^3$. En este caso se ha determinado la presión a la que es necesario inyectar la lechada para que sea capaz de recorrer la junta. Para simular mejor una junta en condiciones reales, primero se procedió a saturar la junta de agua.

Cuando la tensión normal sobre la muestra es $0,1 \text{ MPa}$ se necesita una presión de 1 bar para que se produzca el avance en todas las direcciones (Figura 76). La lechada avanza más rápidamente en las direcciones 1 y 4 es decir, las de menor rugosidad, si bien en la dirección 4 se aprecia una zona muerta, cuya extensión va disminuyendo al progresar el ensayo. Esta distribución irregular parece debida a pequeños desajustes al encajar unas piezas en otras, corroborando la idea de que cualquier cambio en la rugosidad afecta a la distribución del flujo en sus primeros estadios. Sin embargo, una vez que la lechada se ha distribuido por toda la junta, el caudal máximo se produce en la dirección perpendicular (2 y 3), especialmente la dirección 3.

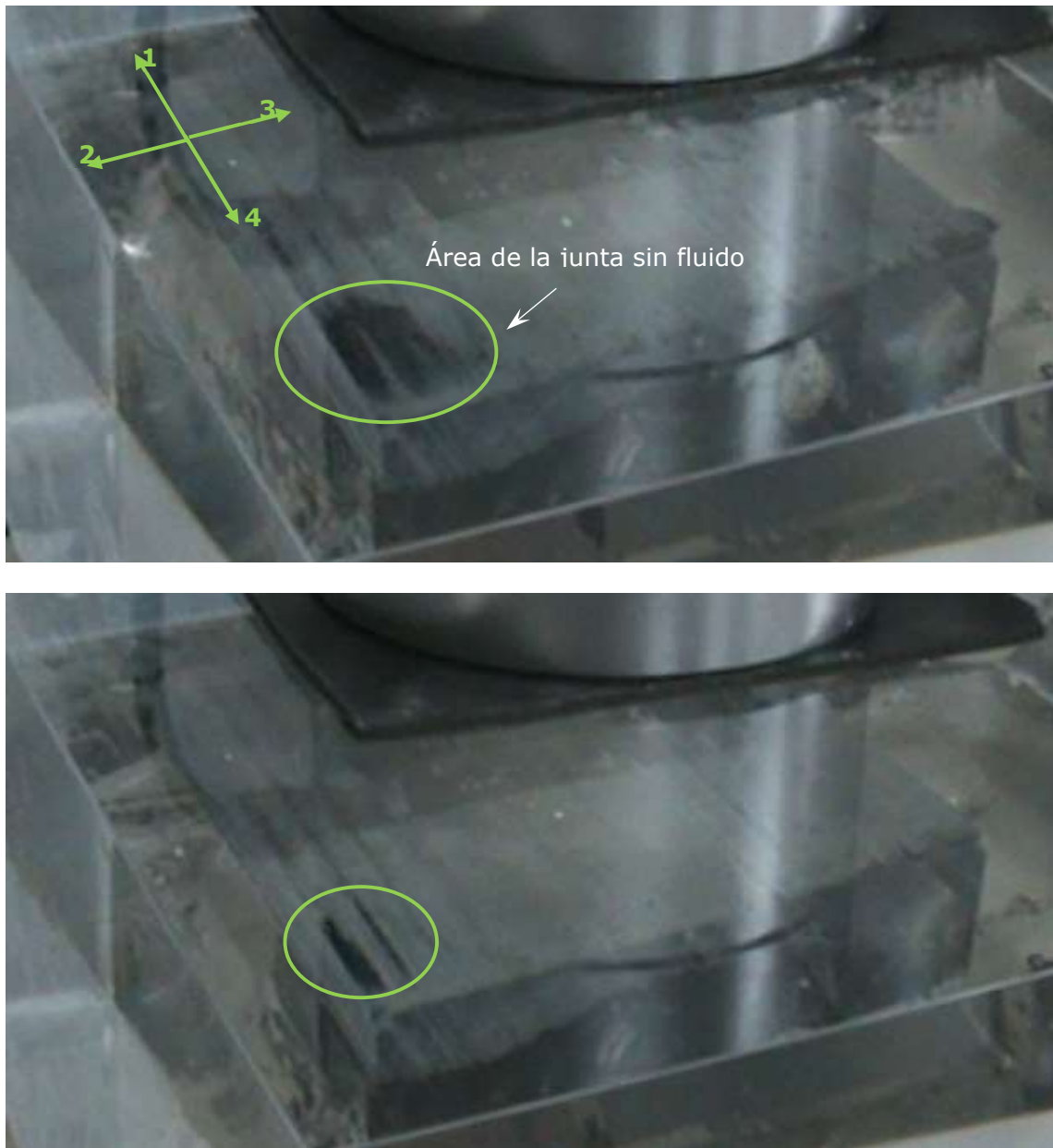


Figura 76. Evolución de la zona muerta sin lechada

Una vez completada la inyección de microcemento en estas condiciones, se procedió a repetir el proceso manteniendo tanto la tensión normal como la presión de inyección.

En un primer momento, se produce la segregación de la mezcla y la fase acuosa barre la junta en la dirección 1. Esta segregación puede haberse producido por el sistema de mezclado en laboratorio, que no es una mezcladora de alta velocidad como en el proceso a escala real y en el que no se dispone de un depósito mezclador que mantenga la mezcla estable cuando cesa la inyección. Tampoco se han utilizado aditivos estabilizadores. Cuando la lechada vuelve a ser homogénea, penetra principalmente por la dirección 1, ya que ha sido lavada en la fase anterior. En el

resto de las direcciones se observa un proceso similar, pero con un cierto retardo respecto a la dirección 1.

Por último, transcurridos 11 segundos desde el inicio de la prueba, se produjo la obstrucción total de la junta. Se aumentó la presión de inyección hasta los 10 bares sin que se pudiera reactivar el flujo de microcemento. Sin embargo, sí se volvió a observar el proceso de segregación y avance de la fase acuosa desde el punto de inyección (Figura 77). Este fenómeno puede explicarse por la obstrucción progresiva de la junta con las partículas de microcemento al irse produciendo un proceso de obturación y filtrado en el que las propias partículas de microcemento actúan como filtro.

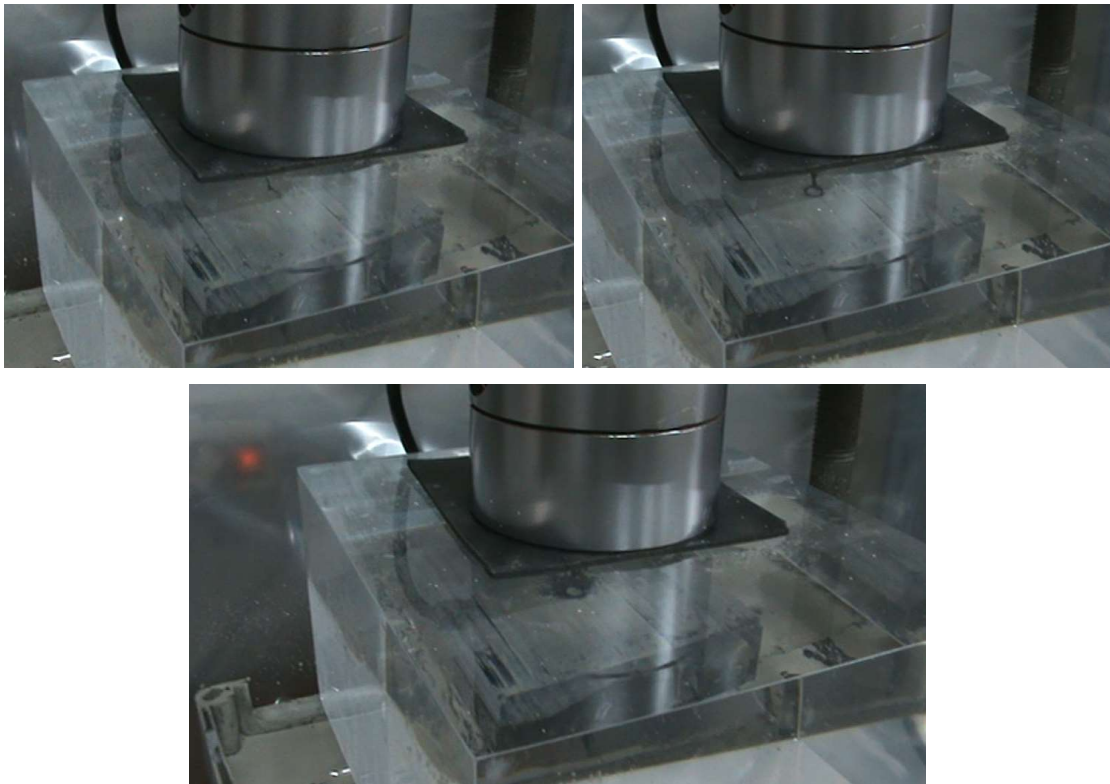


Figura 77. Avance de la fase acuosa tras bloquearse la inyección del microcemento

Estas pruebas dejan patente la mayor penetrabilidad de las lechadas de microcemento y la importancia de trabajar con mezclas que permanezcan estables, puesto que los fenómenos de segregación suponen la sedimentación de las partículas sólidas, que acaban actuando como un filtro que impide el avance de la lechada, permitiendo solo el paso de la componente acuosa y que obtura el sistema, poniendo fin a la inyección sin que se haya conseguido la penetración esperada.

Capítulo 6 : Modelo anisotrópico

En este capítulo, se presenta el uso de lechadas a base de cemento para resolver un problema a escala real: el aporte de agua desde un canal cercano a las plantas de sótano de un edificio de reciente construcción.

Para poder diseñar la solución impermeabilizante se intensifica la campaña de prospección geotécnica y se llevan a cabo una serie de pruebas de inyección a escala real. Además de para el diseño de la solución, se han utilizado los resultados de dichas pruebas para definir un modelo anisotrópico de distribución de las lechadas.

6.1 Descripción de la problemática

El área de estudio se encuentra en la margen izquierda (noreste) de la ría de Bilbao, en el norte de España, junto al Canal de Deusto. El Canal de Deusto es, en realidad, un brazo artificial del río Nervión, con dirección noroeste-sureste. Las obras empezaron en 1950. Fue excavado casi en su totalidad en roca (Figura 78), hasta una profundidad de 7 a 10 m, y está delimitado por muros de hormigón ciclópeos.

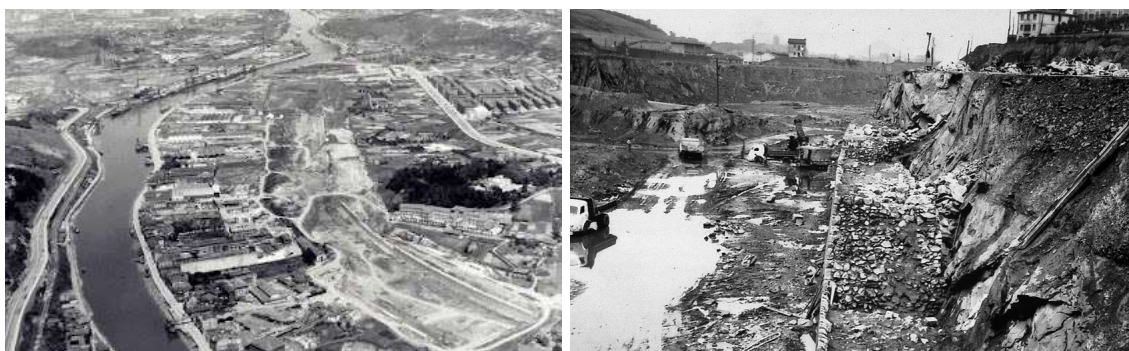


Figura 78. Fotografías del canal de Deusto en 1960 durante su construcción^{7,8}

El canal se pone en funcionamiento como dársena en el año 1968 (véase la Figura 79) y estuvo operativo hasta febrero del 2006, constituyendo la península de Zorrozaurre. En el año 2018 la península se convirtió definitivamente en una isla y comenzaron las obras de recuperación urbanística (Figura 80).

⁷ <https://elblogdefarina.blogspot.com/2016/07/zorrozaurre-mientras-tanto.htm>

⁸ "El registro geológico de la transformación ambiental de la ría de Bilbao durante el Holoceno y el Antropoceno". Eduardo Leorri y Alejandro Cearreta



Figura 79. Muelle del Canal de Deusto en 1969 (fuente: Pinterest)



Figura 80. Planeamiento urbanístico de la isla de Zorrotzaurre⁹

En una zona cercana al canal se inicia la construcción de dos bloques de viviendas con tres plantas de sótano. Durante el vaciado del solar para la construcción de los sótanos se produce una importante afluencia de agua procedente del Canal de Deusto. La parcela rectangular, de 72 m de largo y 31 m de ancho, es paralela al Canal, que se encuentra a unos 20 m de distancia. La profundidad de excavación es de 8,4 m y el nivel más bajo es de -4,8 m. En la Figura 81 se muestra la tipología de la roca excavada, de tipo argilítico-pizarroso, en la que la permeabilidad está asociada a la fracturación y puede verse como, durante la misma, ya se detectaron aportes de agua.

⁹ <https://www.zorrotzaurre.com/planeamiento/16619-2/foto-plan-especial/>

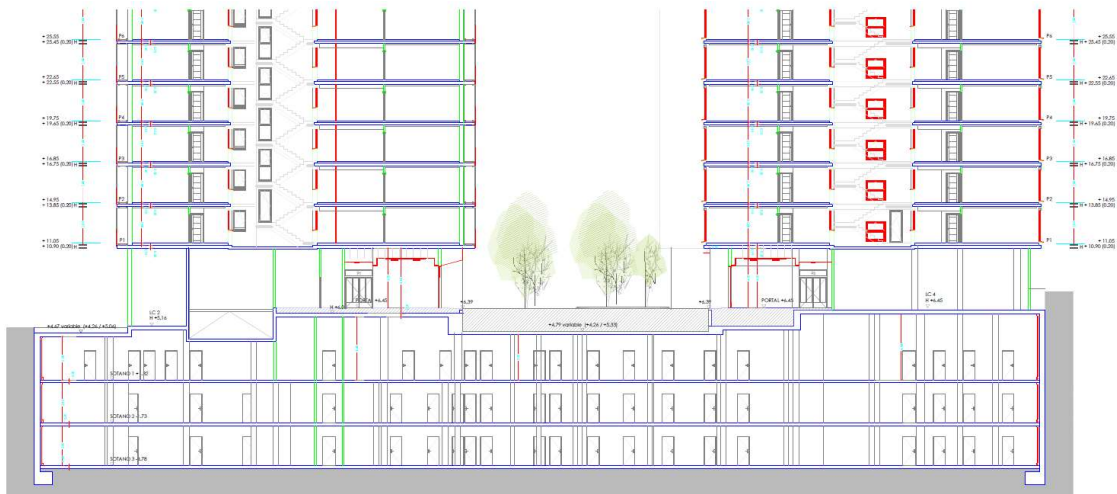


Figura 81. Perfil constructivo de los sótanos y edificios y aportes de agua durante la excavación

Una vez construida la estructura de las plantas de sótano, la entrada de agua a través de los desagües debajo de la tercera planta de sótano obliga a la instalación de un sistema de bombeo con un caudal medio diario de 250 m³/día, y con valores de hasta 400 m³ día en días lluviosos.

Ante esta situación, se analiza como posible solución la inyección de lechada a través de perforaciones para conformar una pantalla impermeabilizante entre el Canal de Deusto y los sótanos.

6.2 Caracterización del macizo rocoso

Inicialmente, en el marco del proyecto constructivo de los edificios, se realiza una primera campaña de sondeos con el fin de conocer las características del macizo rocoso atravesado por la excavación.

6.2.1 Caracterización inicial del terreno

Por debajo de los rellenos antrópicos que recubren la zona (entre 0,8 y 1,5 m de espesor), los materiales pertenecen al Cretácico Inferior. Se trata de una serie de lutitas-limolitas calcáreas grises, hojosas y con pasadas ocasionales de areniscas.

Se dispone de la información de cuatro sondeos con recuperación de testigo de 15 m de profundidad, y del reconocimiento y análisis de los taludes de excavación. Las características del macizo rocoso atravesado se resumen en la Tabla 7.

Característica	Descripción	
Litología	Limolitas calcáreas grises	
Resistencia a compresión simple de la roca	16,65 MPa	
Resistencia a tracción de la roca	5,59 MPa	
Peso específico de la roca	26,3 kN/m ³	
Familias de discontinuidades	S	252/62
	J1	40/40
	J2	185/62
	J3	345/50
	J4	270/75
RQD medio	41	
Grado de meteorización (ISRM)	II a III	
RMR (Clasificación de Bieniawski)	35-55	

Tabla 7. Propiedades más representativas de la roca y el macizo rocoso

La cota máxima del nivel piezométrico se sitúa en pleamar entre 0,0 y 1,5 m y puede descender hasta -1,8 m en bajamar. La permeabilidad inicial que se otorga a este tipo de materiales es del orden de $7,3 \cdot 10^{-6}$ m/s. Sin embargo, como ya se ha comentado, durante el vaciado del vaso, se produce un importante aporte desde la arista más próxima al Canal de Deusto. Este hecho muestra la necesidad de un estudio más profundo, por lo que se lleva a cabo una nueva campaña de ensayos in situ.

6.2.2 Nueva campaña de reconocimiento

Una vez iniciada la construcción en altura de la estructura y detectado el problema de afluencia de agua a los sótanos, se perfora otra batería de 4 sondeos de 21 m de profundidad, separados unos 18 m a lo largo de la arista SO de la parcela (Figura 82). La longitud de los sondeos servirá de apoyo a la hora de definir la profundidad de una posible pantalla de impermeabilización.



Figura 82. Vista en planta de los nuevos sondeos con relación a la parcela y al canal y fotografías durante la ejecución

En la Tabla 8 se resumen las características principales de los terrenos atravesados por los nuevos sondeos. Además, se lleva a cabo un control piezométrico en los mismos para evaluar la influencia de las mareas (Figura 83). Como puede verse, durante la bajamar el nivel freático en toda la zona es muy similar, mientras que la pleamar afecta en distinta medida a unas zonas que a otras, resultando el sondeo S4 el más afectado y el sondeo S3 el menos.

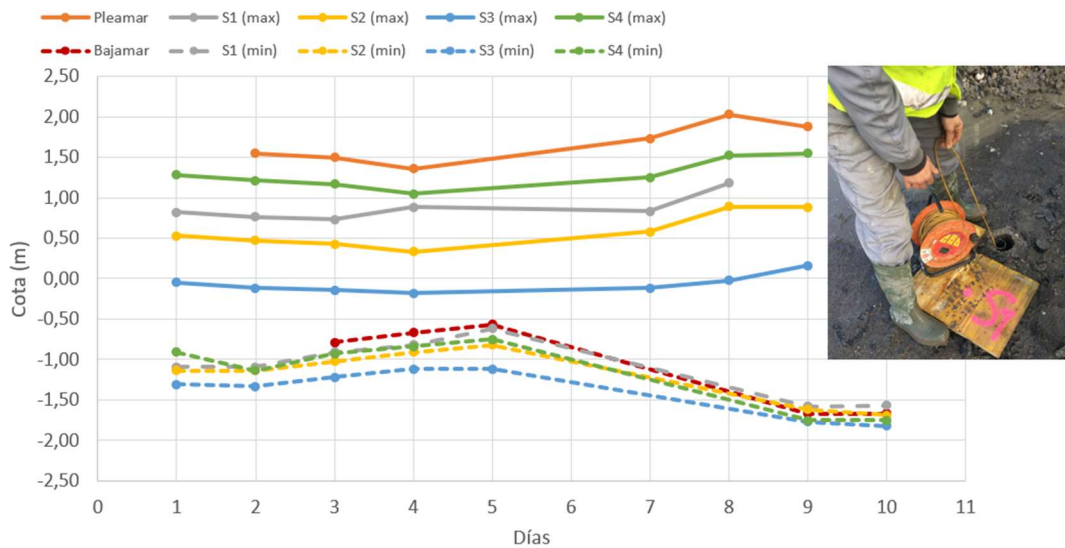


Figura 83. Cambios en el nivel freático derivados de las mareas

SONDEO	Profundidad (m)	Descripción	RQD	GSI
S-1	0-1,4	Rellenos (hormigón, gravas)	-	-
	1,4-8,4	Roca media	60	50
	8,4-11,4	Roca fracturada	30	27
	11,4-17,5	Roca muy fracturada	15	23
	17,5-21,0	Roca media	65	45
S-2	0-0,4	Rellenos (hormigón, gravas)	-	-
	0,4-5,2	Roca fracturada	40	30
	5,2-21,0	Roca sana	85	70
S-3	0-1,2	Rellenos (hormigón, gravas)	-	-
	1,2-2,4	Roca fracturada	40	30
	2,4-16,0	Roca media	62	63
	16,0-17,5	Roca media	60	52
	15,0-21,0	Roca sana	85	75
S-4	0-1,0	Rellenos (hormigón, gravas)	-	-
	1,0-2,4	Roca alterada	-	-
	2,4-9,9	Roca fracturada	50	36
	9,9-11,5	Roca sana	85	72
	11,5-14,2	Roca fracturada	20	28
	14,2-17,5	Roca sana	60	65
	17,5-21,0	Roca media	55	40

Tabla 8. Características de los sondeos

Dado que solo se dispone de los testigos de los sondeos para reconocer el terreno, se ha preferido evaluar su calidad utilizando el GSI (Geotechnical Strength Index)

definido en (Hoek, Kaiser and Badwen, 1995) en lugar del RMR o Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989), puesto que este último requiere identificar y caracterizar las principales familias de diaclasas (espaciamiento, abertura, continuidad, relleno) y esto no es posible con la información disponible.

Si bien hay tramos competentes, con valores de GSI de más de 65, se detectan niveles muy fracturados, con GSI inferiores a 30 a través de los cuales el agua puede circular con facilidad, ya que pueden actuar como canales de comunicación entre el río y la excavación.

Además, durante la perforación de los sondeos, se llevan a cabo ensayos de permeabilidad Lugeon (Quiñones-Rozo, 2010) en tramos de 3 metros y con 5 escalones de carga, es decir, 6 ensayos por sondeo. Sus resultados pueden verse en la Figura 84. En ningún caso se llegan a alcanzar presiones de 1 MPa durante las pruebas, quedando la máxima presión limitada a 0,5 MPa, lo que ya es un indicador de la elevada permeabilidad del conjunto.

Los sondeos S-2 y S-3 tienen una permeabilidad comparativamente más baja, lo que corresponde según la Tabla 9 (Quiñones-Rozo, 2010) a macizos rocosos con juntas cerradas o parcialmente abiertas. Sin embargo, el S-4 se corresponde con un macizo rocoso con algunas juntas abiertas (en al menos tres de sus tramos) y el S-1 con muchas juntas abiertas, haciendo que sean los sondeos más problemáticos. Esto coincide con la gráfica de la Figura 83, en la que se ve que ambos sondeos son los más afectados por las mareas.

Lugeon	Clasificación permeabilidad	Conductividad hidráulica (m/s)	Condición de las juntas
<1	Muy baja	$<1 \times 10^{-7}$	Muy cerradas
1-5	Baja	$1 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-7}$	Cerradas
5-15	Moderada	$6 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-6}$	Pocas parcialmente abiertas
15-50	Media	$2 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-6}$	Algunas abiertas
50-100	Alta	$6 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-5}$	Muchas abiertas
>100	Muy alta	$> 1 \times 10^{-5}$	Abiertas y poco espaciadas, huecos

Tabla 9. Caracterización de las discontinuidades basada en el test Lugeon

Promediando todos los valores obtenidos en los ensayos, se tiene un macizo rocoso con una permeabilidad de 33 UL (Unidades Lugeon) es decir, de tipo medio. Sin embargo, el tramo entre 12 y 15 m de profundidad del sondeo S-1 llega a alcanzar 105 UL de permeabilidad (aproximadamente $1,3 \times 10^{-5}$ m/s). Este valor tan elevado, se asocia a un tramo intensamente fracturado, entre 13,0 y 14,3 m de profundidad (véase la Figura 84).

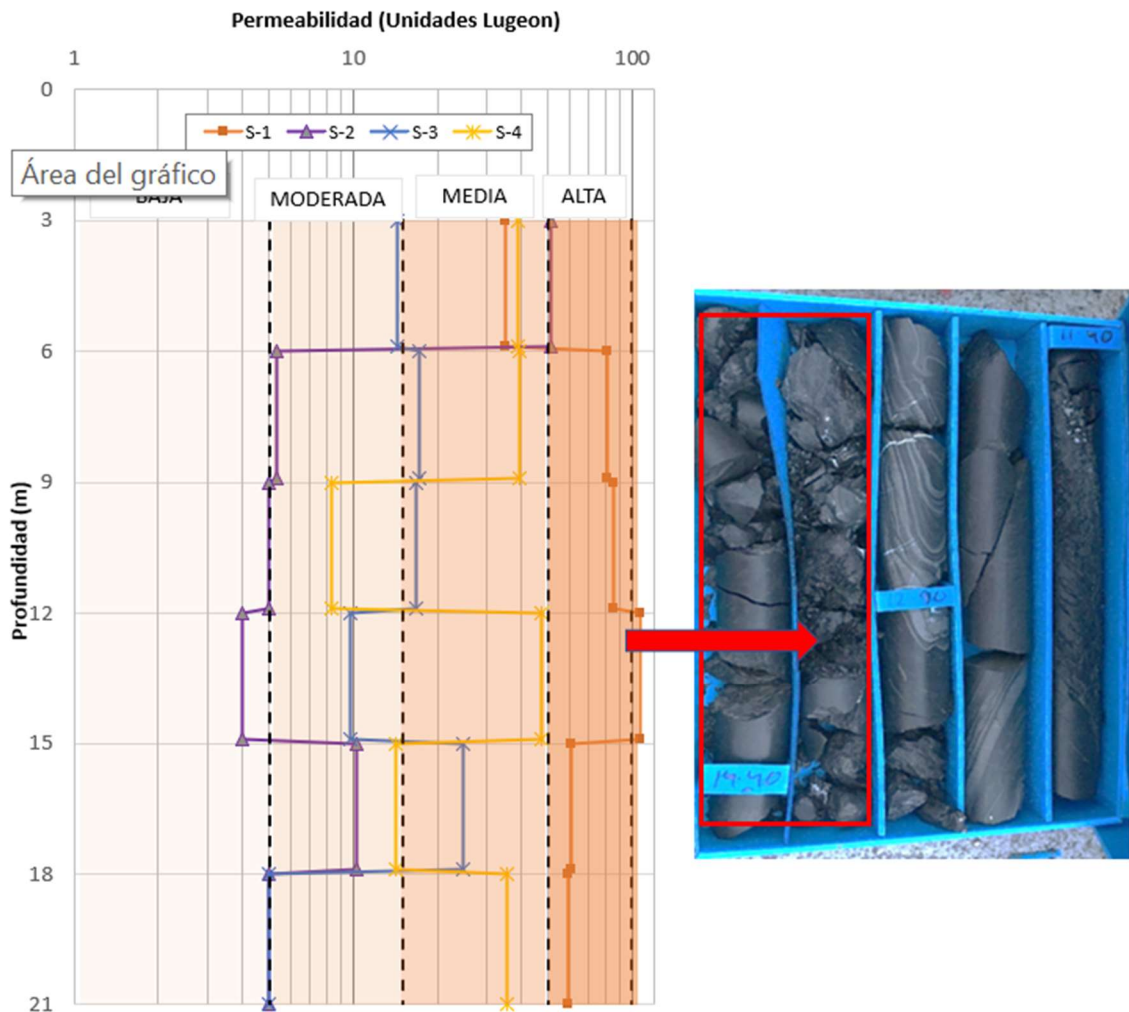


Figura 84. Resultados de los ensayos Lugeon

Uno de los grandes interrogantes que se plantean en este tipo de ensayos es si las pruebas de permeabilidad se han llevado a cabo correctamente. Para verificar estos datos, se suele contrastar la permeabilidad in situ y la calidad del macizo rocoso (Aliaga Robles, 2015; Öge, 2017). La Figura 85 muestra la correlación entre el GSI (Tabla 8) y la permeabilidad para las pruebas realizadas en los cuatro sondeos. En ella se observa una buena correlación entre ambos parámetros, siendo muy buena especialmente con valores altos de GSI.

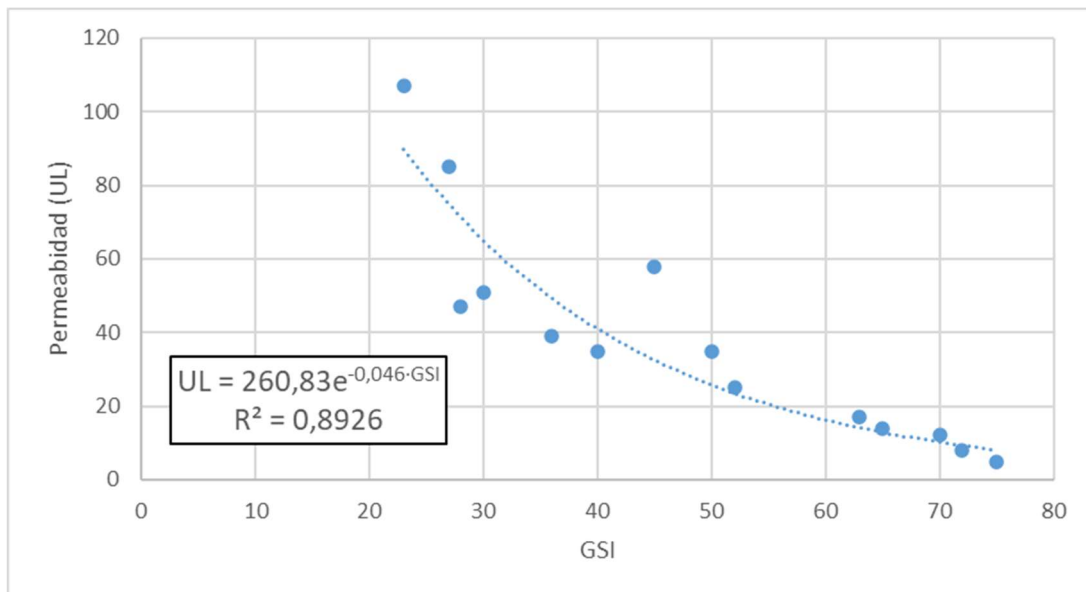


Figura 85. Correlación entre GSI y permeabilidad Lugeon

6.3 Planificación de pruebas *in situ* de inyectabilidad

Del análisis de la campaña de sondeos se deduce que la zona de mayor permeabilidad es la zona situada en las dos esquinas del vaso. Es decir, el entorno de los sondeos S-1 y S-4, siendo especialmente problemático el sondeo S-1. Por el contrario, los sondeos centrales S-2 y S-3 muestran permeabilidades más bajas. Esta circunstancia invita a definir diferentes grados o intensidades en el tratamiento a realizar.

En la Figura 86 (Stadler and Krenn, 2012) puede verse que, para permeabilidades medias y altas, el tratamiento más efectivo es la lechada de cemento (*Ordinary Portland Cement, OPC*), que permite taponar las grandes fisuras por las que cabe una partícula de cemento ordinario de unas 50 μm . A medida que la permeabilidad disminuye, también lo hace la efectividad de las lechadas de cemento y, al mismo tiempo aumenta la de las lechadas de microcemento (MFB). En líneas generales, partir de unas 15-20 UL ya resultaría interesante utilizar microcementos, alcanzando un rendimiento del 70 % para unos 5-6 UL.

Los tratamientos con acrílicos y resinas resultan competitivos técnicamente con los microcementos a partir de valores de permeabilidad mucho más bajos (1,6 UL aproximadamente).

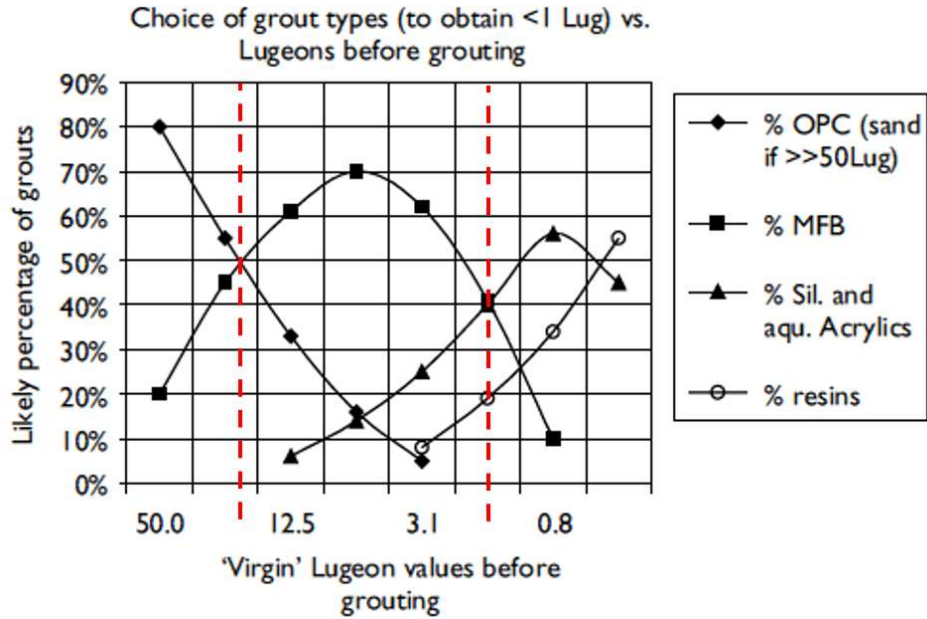


Figura 86. Efectividad en función de la permeabilidad (Stadler and Krenn, 2012)

Por tanto, la permeabilidad observada en el sondeo S-1 (más de 100 UL) hace necesario un tratamiento en fases que vaya reduciendo el aporte de agua de forma progresiva, cerrando las fisuras más grandes con cemento y, cuando se reduce su efectividad, taponando las fracturas más pequeñas, que aún permanecerían abiertas (el cemento, por su tamaño no es capaz de entrar en ellas) con microcemento.

Dejando aparte la especificación del fluido de inyección, las dos variables que hay que establecer para la definición de un tratamiento de inyección de impermeabilización son la presión y el caudal de inyección.

En la actualidad, la determinación de estos parámetros es empírica, basada en la aplicación de experiencias previas. En muchos casos, estas experiencias previas no se realizaron en entornos geológico-geotécnicos similares, y mucho menos en macizos rocosos con las mismas características anisotrópicas, por lo que finalmente se deben realizar pruebas *in situ* para determinar estos parámetros; utilizando el método de ensayo y error.

Con este objetivo, se planifica la ejecución de un área de pruebas en las que comprobar la eficacia de los distintos tratamientos y valorar los volúmenes de lechada necesarios. En la selección de esta área de pruebas se tiene en cuenta la reducción de la permeabilidad en fases, así como los siguientes aspectos:

- Las inyecciones se deben realizar a baja presión, siempre por debajo de 1 MPa, con el fin de evitar daños en el entorno, puesto que ya hay edificios próximos.

- En los sondeos S-1 y S-4 se aprecia una importante permeabilidad entre 12 y 15 m de profundidad. Incluso en el S-1 se observa una permeabilidad de 60 UL entorno a los 21 m. Por tanto, aunque la construcción alcance una profundidad de 8,4 m, se debe incrementar la profundidad de la pantalla con el objetivo de evitar el aporte de agua por debajo de la misma.
- Se plantea como objetivo para cada fase reducir al 50% la permeabilidad inicial por lo que:
 - En el entorno del sondeo S-1 que se encuentra en niveles "altos" (50 a 100) o "muy altos" (>100) se plantea como objetivo alcanzar el nivel "medio" (15 a 50).
 - En el entorno del sondeo S-3 que se encuentra en nivel "medio", se plantea como objetivo alcanzar el nivel "moderado" (5 a 15 UL).

Con esos objetivos, de reducción de permeabilidad, se realizan dos taladros de 76 mm de diámetro para inyección, denominados EY-1 y EY-2 (Figura 87). Se selecciona este diámetro por considerarse estándar en cuanto a los útiles de perforación y obturación, no siendo necesario para esta prueba ir a diámetros mayores que encarecerían el ensayo sin aportar mejores resultados. El sondeo EY-1 se sitúa a 1 m de distancia del sondeo S-1 y tiene una profundidad de 21 m, debido a la alta permeabilidad en ese entorno y a esa profundidad. El sondeo EY-2 se sitúa a 1 m de distancia del sondeo S-3 y tiene una profundidad de 15 m. Los sondeos S-1 y S-3 están ya perforados y con tubería ranurada de PVC instalada.

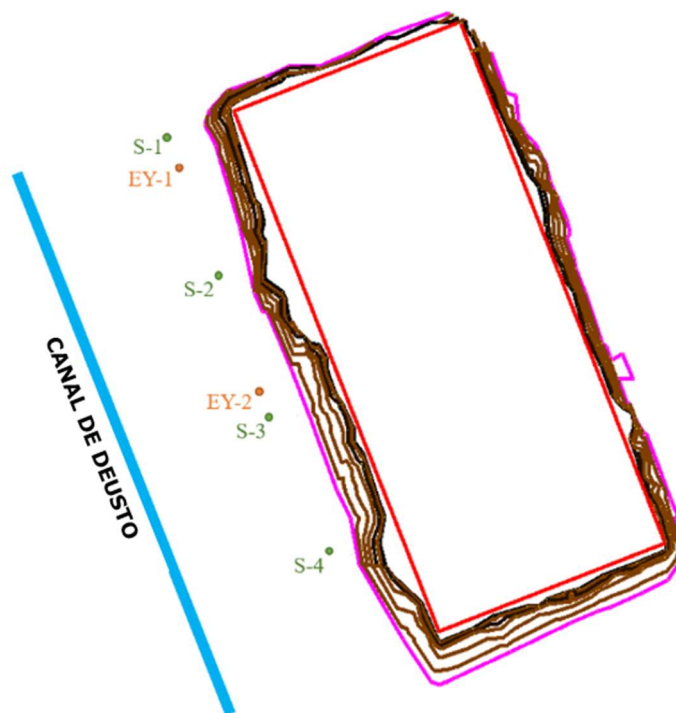


Figura 87. Vista en planta de los sondeos para las pruebas de inyección

6.4 Selección y caracterización del material a inyectar

Al mismo tiempo que se ejecutan los sondeos para las pruebas de inyección se llevan a cabo ensayos de laboratorio con el fin de caracterizar los dos materiales que se van a inyectar en las pruebas de inyección: cemento y microcemento.

Se plantea trabajar con un cemento tipo CEM I-52,5 en el sondeo EY-1 situado en un entorno con gran permeabilidad y grandes fracturas y un microcemento en el sondeo EY-2 en un entorno de permeabilidad media con la presencia de microfracturas.

Se llevan a cabo ensayos de densidad, sangrado, viscosidad, fraguado y resistencia. El objetivo es conseguir una mezcla con buena trabajabilidad, es decir, que sea fácil de manejar e inyectar sin que se produzca un fraguado demasiado rápido y que sea capaz de retener el agua aun estando en contacto con superficies absorbentes como el macizo rocoso.

En la Tabla 10 se recogen los valores de las propiedades analizadas para ambos tipos de mezclas. En el caso del cemento se evalúan las propiedades para diferentes proporciones de agua/cemento y en el caso de microcementos diferentes marcas comerciales y aditivos. Dado el elevado precio del microcemento, las pruebas se concentran en las relaciones agua/cemento más elevadas.

Material	Relación agua/cem	Densidad (g/cm ³)	Cono Marsh (s)	Exudación (%)	Fraguado inicial	Resistencia 2 días (MPa)	Resistencia 7 días (MPa)
CEM I 52,5	0,6	1,74	72	4,8	8 horas	24,5	30,3
	0,7	1,66	49	5,2	9 horas	16,4	22,4
	0,8	1,65	38	17	10 horas	-	-
	1	1,52	29	32	10 horas	-	-
	1,2	1,49	27	19	10 horas	-	-
	1,7	1,22	21	51	10 horas	-	-
MICRO 1	0,6	1,63	149	1	12 horas	2,5	3,5
MICRO 2	0,7	1,47	116	1,2	14 horas	2,2	3,1
MICRO 3	1,5	1,36	34	8	18 horas	7,7	23,7
MICRO 4	1,5	1,34	38	12	19 horas	5,7	35
MICRO 5	1,5	1,27	34	10	5,5 horas	6,9	37
MICRO 6	1,5	1,35	38	20	1,5 horas	0	2,5
MICRO 7	1,5	1,28	45	4	10 horas	2,2	4,1

Tabla 10. Propiedades de diferentes lechadas de cemento y microcemento.

La densidad afecta a la capacidad de bombeo de la mezcla, de tal forma que una densidad baja favorece el bombeo, pero al mismo tiempo que la densidad descende, se produce una menor retención del agua de la mezcla, lo que se conoce como sangrado o exudación. En el sangrado, los áridos se van compactando y el agua tiende a elevarse hacia la superficie, creando una superficie delgada, débil y porosa que no tiene resistencia y que puede crear fisuras de tracción cuando su evaporación es rápida. Por tanto, es necesario buscar un compromiso entre densidad y sangrado.

En general, las mezclas de inyección pueden llegar a tener hasta un 4% de exudación en volumen, aunque el agua debe reabsorberse pasadas 24 horas¹⁰.

El fraguado afecta al tiempo de manejo de la mezcla ya que recoge el momento en el que la mezcla cambia de estado fresco a estado endurecido. En este caso se ha evaluado el tiempo de fraguado inicial o tiempo que transcurre desde el momento que el cemento recibe el agua hasta que comienza a perder fluidez y se eleva su temperatura.

A la vista de los resultados, se decide trabajar y probar la inyectabilidad de las lechadas de cemento con relación agua/cemento entre 0,6 y 1,7, mientras que se selecciona para las pruebas con microcemento el MICRO 5.

6.5 Equipos y procedimientos empleados en los ensayos de inyección

Hay muchas maneras de ejecutar una inyección de cemento y, debido al costo relativamente bajo del material, a veces se cree que la improvisación puede traer pocas consecuencias negativas. Esto es del todo incorrecto y el resultado de tal enfoque en una obra de inyección de cemento es un aumento de los costos en general, una eficiencia pobre y una calidad considerablemente inferior de los trabajos realizados.

Hay muchos fabricantes especializados que producen equipos de alta calidad para lechadas de cemento y no es el propósito de esta tesis, recomendar alguno en particular. Sin embargo, si se recomienda que seleccione un conjunto completo fabricado por una empresa especializada antes de comenzar cualquier tipo de inyección. Esto es especialmente relevante si se requiere el uso de microcemento, ya que la pérdida de material de alto coste puede ser elevada por no utilizar equipos de diseño adecuado.

6.5.1 Equipo de mezclado

Todo el proceso comienza mezclando cemento seco con agua y otros componentes, como aditivos químicos y a veces bentonita, arena u otros materiales. El punto crucial aquí es conseguir que todas las partículas de cemento queden adecuadamente humectadas y envueltas por el agua. Esto puede parecer una tarea sencilla, pero si se trata de hacer de forma manual con una pequeña cantidad de cemento, se comprueba que no es una tarea tan sencilla pues, aunque visualmente la mezcla parezca homogénea, esto no significa que todas las partículas individualmente se

¹⁰ Instrucción de Hormigón estructural (EHE-09) Método de ensayo para determinar la estabilidad de la inyección" del Anejo nº 6.

hayan humedecido. El cemento fresco comenzará a aglomerarse con la humedad del aire y en el momento de la mezcla, muchas de las «partículas» son en realidad aglomeraciones de varias partículas individuales. Por tanto, el tamaño de partícula teórica y práctica será muy diferente. Esto sólo se puede evitar con equipos de mezclado que garanticen elevados esfuerzos de corte.

Los equipos de mezclado de cemento para las obras de inyección se dividen en dos principales categorías:

1. Mezcla por agitación, se trata de equipos representados por mezcladoras de paletas similares a la de la Figura 88. La agitación crea una turbulencia en la mezcla y después de algún tiempo la mezcla queda uniformemente humedecida. El inconveniente con este método es que cuesta romper grumos y floculaciones. La tensión superficial del agua tiende a preservar estas aglomeraciones produciendo una segregación de lechada, bloqueo de los pequeños orificios y la acumulación en codos, válvulas y otras partes del equipo. Un mezclado más prolongado no resolverá el problema.
2. Mezcla por la acción de corte de alta intensidad (Antunes and Reschke, 2016), que se desarrolla en los denominados mezcladores coloidales (Figura 89). La mezcla agua-cemento se hace circular por deflectores, hélices e impulsores especiales que giran entre 1500 y 2000 rpm. De esta manera se garantiza la generación de alta turbulencia y elevados esfuerzos cortantes en el fluido, consiguiendo una suspensión coloidal que garantiza una humectación homogénea, una mezcla más estable y evita la floculación.

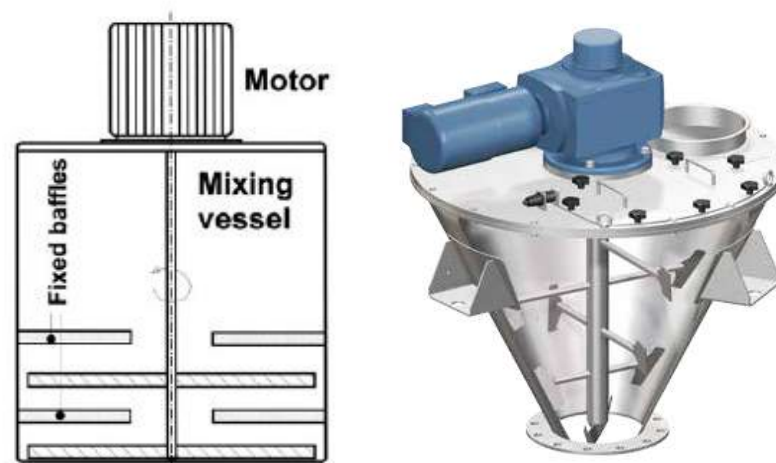


Figura 88. Mezclador de paletas para lechadas

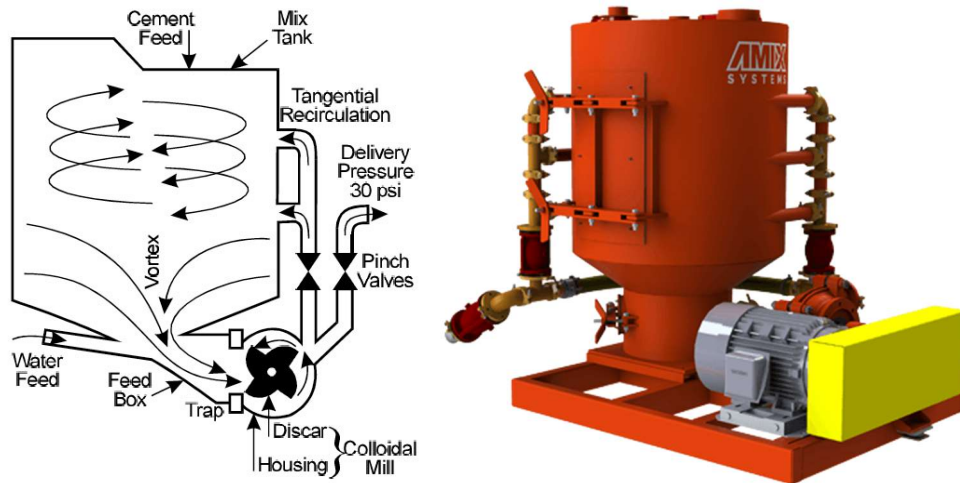


Figura 89. Mezclador de tipo coloidal

Reschke (Reschke, 1998) demostró la mayor estabilidad de las lechadas mezcladas con mezcladora coloidal al comparar el sangrado de lechadas de cemento con distintas proporciones agua/cemento (Figura 90).

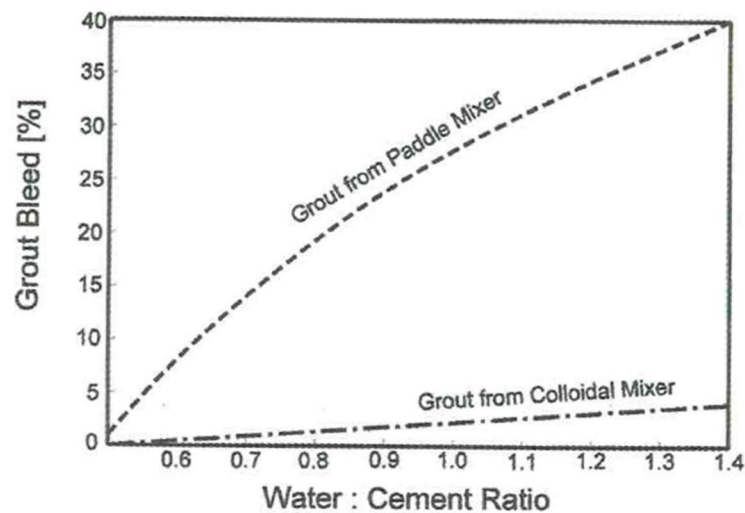


Figura 90. Comparación entre el sangrado con mezcladora con paletas o coloidal (Reschke, 1998)

Dado que se trata de realizar ensayos para evaluar los volúmenes a inyectar, se considera suficientemente adecuada una mezcladora convencional de paletas.

6.5.2 Bombas para lechadas

Para ser capaz de ejecutar y controlar las presiones de inyección en los macizos rocosos, es necesario contar con una adecuada bomba de inyección.

Las bombas progresivas de cavidad (véase la Figura 91) se han utilizado durante décadas en numerosos proyectos (principalmente para cimentaciones de presas y otras inyecciones de terreno) si bien hoy en día está claro que este tipo de bomba no

es el adecuado para la mayoría de las operaciones. Las razones son varias, pero las más importantes son que la presión máxima está limitada, el costo de desgaste en el rotor y estator y el sistema de control de presión, que resulta poco práctico, proporcionado por una línea de retorno en el fondo de la tolva, a través de una válvula reguladora de caudal.

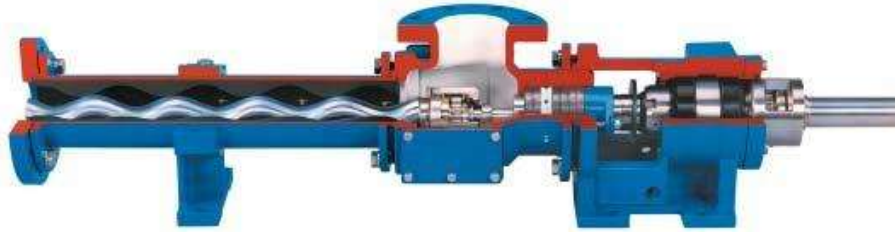


Figura 91. Bomba de cavidad progresiva (bomba de tornillo tipo Moyno¹¹)

Actualmente, en los proyectos de inyección, se da preferencia a la bomba de émbolo de pistón, con sistema de accionamiento hidráulico. Tales bombas normalmente trabajan en una sola línea de inyección. Este sistema de bombeo requiere y permite presiones de lechada independientes y el control de flujo de lechada sin ningún tipo de válvulas o partes mecánicas de control en contacto con la lechada. Por razones de uso y fiabilidad, esto es especialmente importante a altas presiones. La operatividad, exactitud, fiabilidad y el control son muy buenos con esta metodología. Las bombas de pistón, además, tienen la ventaja de bajo desgaste, incluso con lechadas abrasivas y operan de manera confiable a una velocidad de salida muy baja. Los picos de presión (por encima del nivel establecido) al inicio de una carrera del pistón (debido a la inercia de la columna de lechada de cemento) son desfavorables y no ocurren en los equipos modernos.

En cuanto a los efectos de la pulsación de presión, algo usual en bombas de pistón, existe un desacuerdo general en la industria. Algunos dicen que una presión y flujo constante es lo mejor, otros que la caída de presión entre los golpes de la bomba es en realidad una ventaja (véase la Figura 92). La experiencia práctica apoya la idea de que las caídas de presión en realidad mejoran la penetración de la lechada. La razón de esto se debe a la reordenación de las partículas que están a punto de bloquear un puente y estrechan la articulación (causando filtración a presión y el bloqueo completo) cuando aumenta la presión en forma repentina. Cuando la presión aumenta en el siguiente golpe, las mismas partículas pueden volver a avanzar, pero ahora sin puente.

¹¹<https://docplayer.es/73671099-Bombas-moyno-la-diferencia-evidente-en-soluciones-de-bombeo.html>

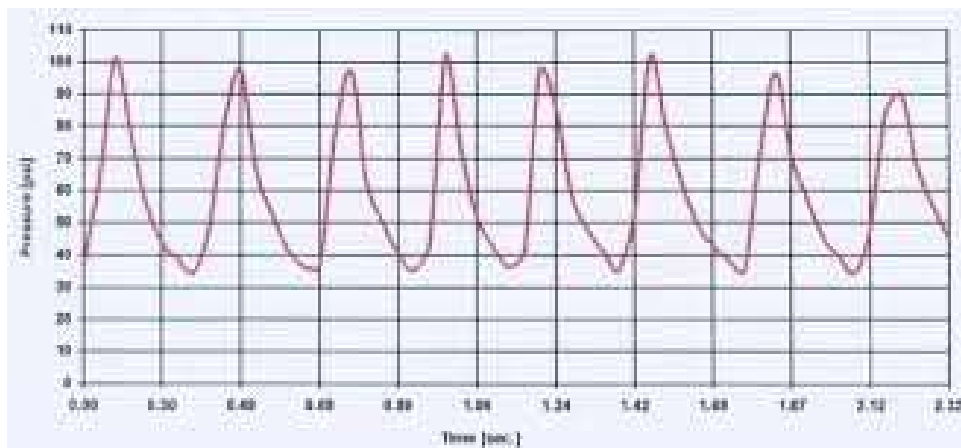


Figura 92. Pulsación de las bombas de pistón¹²

En este caso se decide emplear una bomba de émbolo con doble línea de inyección, tipo DOMINE PH 2x5 ya que es el equipo disponible, si bien no sería necesaria por los requerimientos en cuanto a volúmenes a inyectar.

6.5.3 Registro de los datos de inyección

La forma tradicional de registro de los datos de la inyección ha sido la grabación manual de los parámetros de la inyección principal con la lectura de los instrumentos anotándolos en formularios previamente impresos a intervalos definidos.

Los parámetros de control son la presión de inyección, la cantidad de cemento, el tipo de diseño de la mezcla en cada perforación junto con los datos generales como lugar, fecha y hora. En realidad, esta parte del trabajo puede requerir de una persona extra sólo para mantener el registro, especialmente si los procedimientos son complicados y los diferentes parámetros tienen que ser registrados con precisión. Cuando a menudo sucede que más de una perforación se inyecta a la vez, la tarea de registro manual se torna imposible.

Hoy en día existe un variado número de alternativas disponibles para mejorar el registro de datos y para reducir la carga de trabajo para los operadores. El dispositivo más simple es un transductor de presión y un medidor de flujo de acoplamiento inductivo en la lechada de línea, visualizando los datos en un registrador gráfico. Como alternativa, con una precisión bastante razonable, el volumen de lechada puede registrarse en base al conteo de impulsos de la bomba.

¹² <https://docplayer.es/141237699-Hydraulic-pulsation-presentado-por-blahco-fluid-control-inc-p12111-021.html>

En este caso se ha utilizado un controlador 2PI_GIN que permite el control y registro de las dos líneas de inyección a través de dos caudalímetros electromagnéticos SITRANS F M MAG 5000/6000 de Siemens.

6.5.4 Procedimiento

En primer lugar, se perforan los taladros de inyección hasta su profundidad total para, posteriormente iniciar el proceso de inyección desde el fondo en tramos de 6 metros de longitud

En el caso de aparecer fuertes caudales y/o arrastres de finos durante la perforación, puede plantearse la interrupción de la misma para inyectar a dicha profundidad.

Durante la perforación se debe llevar un registro de perforación que incluya la posición y longitud de los tramos perforados, la posición y longitud de tramos donde se detecte afluencia de agua o pérdidas de agua de perforación y la posible existencia de taladros comunicados.

Debido a que la longitud de los taladros a inyectar es distinta, los volúmenes de inyección se refieren siempre a litros de fluido de inyección por metro lineal de barreno (l/m). Para poder inyectar en los tramos predeterminados es necesario realizar previamente su obturación, mediante obturadores de accionamiento mecánico o inflables de tipo bimbar (hidráulicos), como el de la Figura 93.

Los obturadores hidráulicos se expanden (o son inflados) a través de agua a alta presión, suministrada a través de una manguera hidráulica hasta el obturador. El obturador se controla a través de una única manguera, que se utiliza también para el transporte de lechada después de la expansión del obturador. La longitud de los obturadores (la parte que se expande) va desde 0,5 m a más de 1 metro.



Figura 93. Obturador hidráulico inflable¹³

¹³ <https://www.codan.com>

Permiten obturar mejor en terrenos difíciles (blandos o de mala calidad), debido a su mayor capacidad de expansión. Son muy prácticos, porque se expanden, se desinflan y se mueven rápidamente, con bajo riesgo de reflujo en torno al obturador, debido a las buenas propiedades de sellado. Sin embargo, son más caros que los mecánicos y se pierden en muchas ocasiones al no poder ser retirados después de que la lechada haya fraguado.

Los obturadores mecánicos no pueden trabajar adecuadamente en un terreno débil o fracturado y es muy difícil sellarlos sin tener reflujos, pudiendo deslizarse en el taladro bajo presión durante la inyección y, a veces, quedando atascados en la posición incorrecta. Una combinación de obturadores hidráulicos y obturadores desechables de cierre automático pueden ser muy útil y económico en condiciones difíciles. Los obturadores hidráulicos permiten la expansión del obturador desechable lanzado por delante y el obturador hidráulico ayudará a evitar el reflujo y el deslizamiento durante la inyección. Después de una corta espera para el establecimiento de la lechada, el obturador hidráulico puede ser eliminado mientras que el desechable permanecerá en su lugar.

Para el control de densidad de la lechada se utiliza una balanza de lodos y para control de viscosidad un viscosímetro de embudo Marsh.

Los ensayos en cada taladro se realizarán empezando por la cota inferior, progresando de abajo a arriba, obturando en tramos de 3 m.

Debido a que se van a realizar varios ensayos de inyección en el mismo taladro, utilizando obturadores simples, después de cada episodio de inyección, será necesario esperar un tiempo mínimo de fraguado antes de continuar con el siguiente episodio. En el caso de inyecciones basadas en lechadas de microcemento, el tiempo de espera será de dos horas, en las basadas en cemento, el tiempo será de cuatro horas.

Para definir los parámetros de inyección y cese iniciales se tomaron las experiencias previas realizadas en el entorno de la estación de Txurdinaga de la Línea 3 de Metro de Bilbao (Bizkaia), adoptándose los siguientes criterios:

- El caudal máximo de inyección será de 10 l/min.
- La inyección cesará si se alcanza la presión máxima de inyección prefijada, debiéndose mantener esta presión un mínimo de 2 minutos, con caudales no superiores a 3 l/min en el caso de las mezclas con cemento ordinario y de 2 l/min, para las de microcemento. El criterio de parada por presión máxima es función de la calidad del macizo rocoso y de la profundidad de inyección. Se han seguido las recomendaciones del criterio americano que emplea presiones

más bajas que las empleadas en el criterio sueco (Warner, 2004) (Figura 94). Aunque en países como Noruega o China se prefiere trabajar con mayores presiones, una limitación en la presión permite reducir el riesgo de deformaciones en el terreno, afección a las estructuras próximas y las pérdidas de lechada.

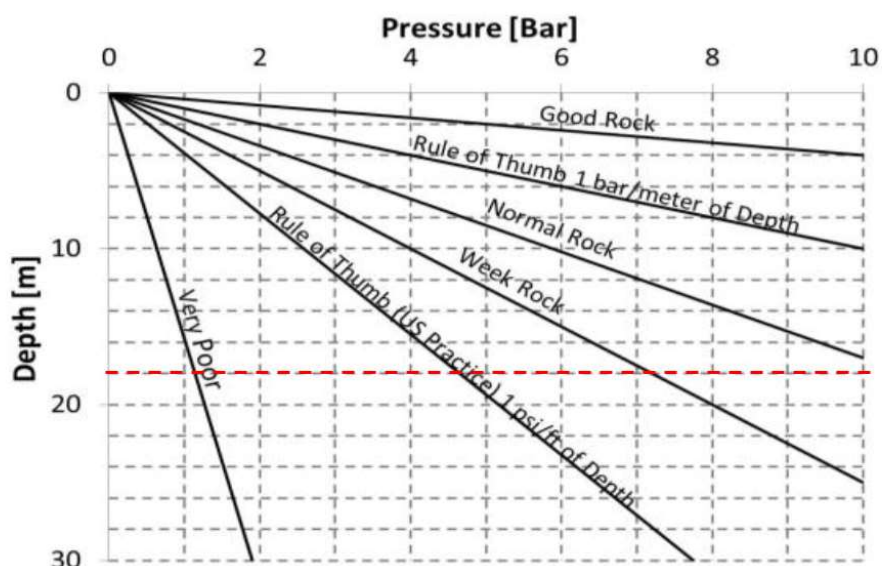


Figura 94. Presión vs profundidad, criterios americano y sueco (Weaver, 1991)

- Si no se alcanzara la presión de inyección fijada, pero se supera un volumen predeterminado de lechada inyectada, también se deberá cesar la inyección. En el caso de lechadas basadas en CEM, el volumen de inyección máximo será de 450 l/m de taladro ensayado. En el caso de lechadas basadas en MICRO, este volumen será de 180 l/m de taladro ensayado.

Posteriormente, se perforan cuatro sondeos de control en el entorno de cada uno de los de inyección, en los que se realizarán ensayos Lugeon en tramos de 3 m con 5 escalones. Los sondeos S-1 y S-3, una vez extraída la tubería ranurada se utilizan también como sondeos de control mediante nuevos ensayos Lugeon.

6.6 Análisis de los radios de influencia

Una vez caracterizadas las distintas mezclas se decide inyectar cemento en el sondeo EY-1 y microcemento en el sondeo EY-2. En el primer caso se varía la proporción de agua/cemento en función de la profundidad de inyección con el objetivo de analizar su capacidad de impermeabilización. En el segundo, se inyecta microcemento (concretamente la mezcla MICRO 5) con una relación de agua/cemento constante, pero variando la presión de bombeo en función de la profundidad.

6.6.1 Inyección de cemento en el sondeo EY-1

Como ya se mencionó previamente, en las pruebas de inyección el objetivo es reducir la permeabilidad entorno al sondeo S1 aproximadamente al 50 %, pasando de una permeabilidad alta y/o muy alta a una permeabilidad media (Tabla 9). Con este objetivo, se realiza el sondeo EY-1 de longitud 21 m y situado a 1 m del sondeo S-1.

En este sondeo EY-1 se definen 6 tramos de inyección de 3 m de longitud cada uno, dejando el tramo superficial de 0 a 3 m sin inyectar como zona de protección. En los tramos de inyección se emplean diferentes dosificaciones agua/cemento, incrementando la relación con el aumento de la profundidad, para compensar una menor viscosidad con una presión de inyección limitada siguiendo el modelo americano (Figura 94).

Las relaciones agua/cemento y la presión máxima de inyección seleccionadas para cada tramo se resumen en la Tabla 11. En la misma tabla se indica para cada tramo el volumen inyectado durante la prueba, los kg de cemento empleados y el tiempo de inyección.

Profundidad (m)	Lechada	Volumen inyectado (litros)	kg de cemento	Tiempo (min)	Presión final (MPa)
3-6	a/c=0,6	172	187	17	0,2
6-9	a/c=0,6	450	490	44	0,2
9-12	a/c=0,8	360	322	36	0,2
12-15	a/c=1,0	34	26	4	0,2
15-18	a/c=1,2	173	114	15	0,3
18-21	a/c=1,7	50	25	5	0,6
	Total	1239	1165		

Tabla 11. Resultados numéricos de la inyección en el sondeo EY-1

La Tabla 11 muestra que en los tramos entre 6 y 12 m se inyecta más volumen de lechada, es decir, las admisiones son mayores que en los tramos entre 12 y 21 m donde el volumen de inyección es bajo, y por tanto el resultado de la inyección no es positivo.

Con el fin de comprobar la extensión de las lechadas inyectadas, se perforan cuatro sondeos de control entorno al sondeo de inyección EY-1, denominados T-1, T-2, T-3 y T-4, todos separados 1 m de EY-1 con excepción del T-4 que dista 2 m (Figura 95).

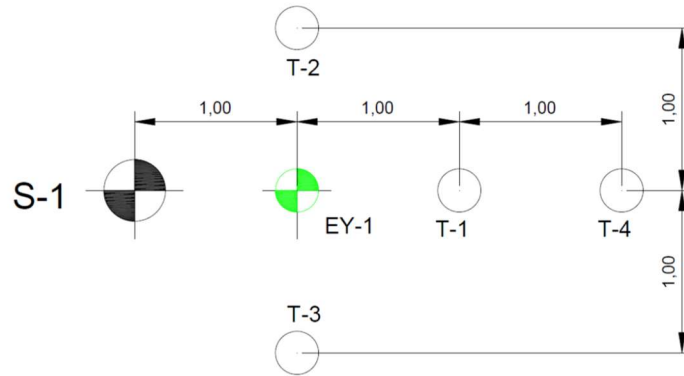


Figura 95. Disposición de los sondeos de control durante las pruebas

Los sondeos de control se perforan 24 horas después de las inyecciones y se parte de la hipótesis de que, dada su proximidad, las permeabilidades iniciales en ellos son similares a las obtenidas en el sondeo S-1. Aunque se barajó la posibilidad de perforarlos antes de la inyección y medir de manera más objetiva dichas permeabilidades, la idea se desechó por considerarse que tal concentración de perforaciones en tan reducido espacio podía alterar la circulación de fluidos durante las pruebas de inyección.

Una vez perforados los sondeos de control, tanto en ellos como en el S-1 se efectúan ensayos de permeabilidad en tramos de 3 m para comparar los resultados con la permeabilidad inicial. En la Tabla 12 se muestran los resultados de las pruebas Lugeon antes y después de la inyección.

Profundidad (m)	S-1 (antes)	S-1 (después)	T-1	T-2	T-3	T-4
3-6	35	35	35	31	48	35
6-9	82	41	34	31	59	43
9-12	85	85	42	29	55	26
12-15	107	107	31	36	82	28
15-18	62	62	18	30	65	26
18-21	59	59	30	28	69	42
Media	72	65	32	31	63	33

Tabla 12. Resultados de los ensayos Lugeon tras la inyección en EY-1

A continuación, se analizan los resultados tramo a tramo:

- Tramo de 3 a 6 m: No se aprecia mejora en el sondeo S-1, situado a 1 m del EY-1 y tampoco parece que haya ningún tipo de influencia sobre la permeabilidad del resto de los sondeos. Por tanto, se puede decir que la zona de influencia de la inyección es inferior a 1 m, considerando que los sondeos se sitúan a una distancia de 1m.

- Tramo de 6 a 9 m: En este tramo es clara la influencia del tratamiento, especialmente en los sondeos T-1 y T-2, con menor influencia en el S-1 y, sobre todo en el T-3
- Tramo de 9 a 12 m: Pese a que se ha inyectado un volumen considerable de lechada, no se aprecia influencia en el valor de la permeabilidad en el sondeo S-1. Sin embargo, en el resto de sondeos se observa un menor valor de permeabilidad, con una menor mejoría en el T-3.
- Tramo de 12 a 15 m: Pese al pequeño volumen inyectado, el patrón de comportamiento en este tramo es similar al del tramo anterior.
- Tramo de 15 a 18 m: De nuevo, se tiene el mismo patrón de comportamiento, sin influencia en los sondeos S-1 y T-3.
- Tramo de 18 a 21 m: En este caso, el efecto de la inyección parece detectarse fundamentalmente en los sondeos T-1 y T-2 y sin influencia aparente en los sondeos S-1 y T-3.

Los resultados muestran una distribución anisotrópica de la lechada, que se puede justificar analizando la influencia que sobre el movimiento de dicha lechada tienen las cinco familias de discontinuidades que se encuentran en el entorno del sondeo EY-1.

6.6.2 Inyección de microcemento en el sondeo EY-2

El sondeo EY-2 situado en el entorno del sondeo S-3, tiene como finalidad reducir la permeabilidad del entorno desde un nivel medio a un nivel moderado (Tabla 9).

En este sondeo se perforan 15 m de profundidad, diferenciándose 4 tramos de inyección de 3 m de longitud cada uno. Se inyecta una lechada de tipo MICRO 5 con la una relación agua/microcemento igual a 0,6 en todos los tramos, pero variando la presión de inyección en función de la profundidad. Es decir, a mayor profundidad, mayor presión. Como en el caso anterior se deja un tramo superficial desde 0 a 3 m sin inyectar, como zona de protección.

La Tabla 13 muestra, para cada tramo, las presiones de inyección, el volumen inyectado, los kg de microcemento empleados y el tiempo de inyección. En ella se observa que en los últimos tramos entre 9 y 15 m se inyecta más volumen de lechada, por tanto, las admisiones son mayores que en los tramos más superficiales.

Profundidad (m)	Presión (MPa)	Volumen inyectado (litros)	kg de cemento	Tiempo (min)
3-6	0,10	14	10,4	2
6-9	0,10	15	11,1	2
9-12	0,15	255	188,7	30
12-15	0,20	188	139,1	20
	Total	472	349,3	

Tabla 13. Resultados numéricos de la inyección en el sondeo EY-2

Como en el caso anterior, 24 horas después de la inyección, se perforan cuatro sondeos de control entorno al sondeo EY-2, denominados T-5, T-6, T-7 y T-8. Estos sondeos se encuentran a una distancia de 1m respecto al sondeo EY-2, con excepción del T-8 que dista 2 m (Figura 96).

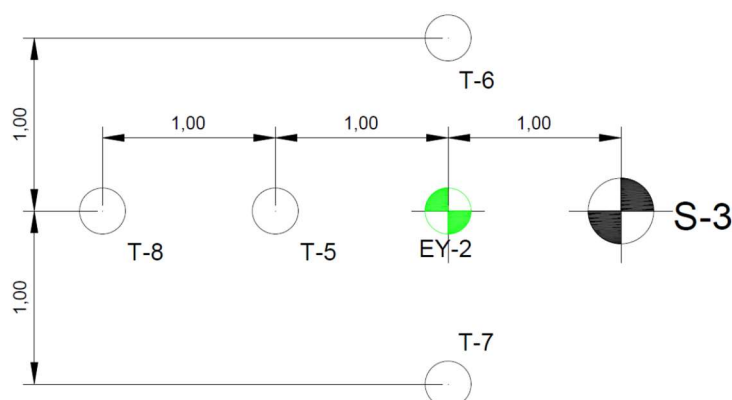


Figura 96. Disposición de sondeos durante las pruebas microcemento

Una vez perforados los sondeos de control, y considerando que inicialmente su permeabilidad es similar al sondeo S-3 se efectúan ensayos de permeabilidad en tramos de 3 m para comparar los resultados con la permeabilidad inicial. En la Tabla 14 se muestran los resultados de las pruebas Lugeon antes y después de la inyección.

Profundidad (m)	S-3 (antes)	S-3 (después)	T-5	T-6	T-7	T-8
3-6	14	14	24	26	16	66
6-9	17	17	17	4	34	98
9-12	17	7	8	30	16	86
12-15	25	10	16	22	22	27
Media	18	12	16	21	22	69

Tabla 14. Resultados de los ensayos Lugeon tras la inyección en EY-2

Del análisis de estos resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En los dos tramos más superficiales (entre 3 y 9 m de profundidad) los volúmenes de lechada inyectados son tan bajos que no pueden haber afectado a su entorno, lo que concuerda con los ensayos Lugeon.
- Siguiendo el modelo de anisotropía descrito para el EY-1, los sondeos más afectados por la inyección deberían ser el S-3, seguido del T-5 y el T-7, y los menos afectados el T-6 y el T-8 (este último por distancia). En los tramos 9-12 y 12-15 se detecta mejoría en los sondeos S-3 y T-5, pero no queda clara la influencia en el resto.
- Por tanto, la longitud de influencia puede ser en torno a 1 m en la dirección más favorable, pero es inferior a este valor en el resto de las direcciones.

6.7 Modelo de distribución del radio de influencia

El análisis de las discontinuidades indica que la inyección de lechada sufre una redistribución tanto horizontal como vertical desde la zona de inyección, provocando niveles de afección diferentes sobre los sondeos de control. El análisis del radio máximo de influencia a distintas profundidades permitiría obtener el modelo tridimensional de la distribución de la lechada. Este estudio se ha realizado con el sondeo EY-1 y la inyección de cemento, puesto que la inyección de microcemento ha seguido los mismos patrones.

Tomando como hipótesis que la inyección se realiza en cada tramo de forma homogénea, el volumen de lechada inyectada se puede obtener a partir de la (Ec. 6).

$$V = A \cdot E \quad (\text{Ec. 6})$$

donde:

- A es el área inyectada y definida por la (Ec. 7), en la que r representa el radio de influencia. El diámetro del sondeo se considera despreciable.

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (\text{Ec. 7})$$

- E es la apertura real de las familias de diaclasas, es decir la parte del macizo rocoso que realmente se puede inyectar.

Para el cálculo de la apertura real se tiene en cuenta el modelo de Snow (Snow, 1969), en donde el macizo rocoso fracturado se sustituye por una red cúbica de fracturación con una permeabilidad media constante y una apertura hidráulica equivalente del macizo rocoso e ($E_{\text{media}} \approx e$) función de la permeabilidad de dicho

macizo rocoso UL y del espaciamiento S entre los planos paralelos de las familias de juntas.

$$e \approx \sqrt[3]{6 \cdot UL \cdot S \cdot 10^{-8}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Para n familias de juntas, se define el índice volumétrico de juntas J_v o número de discontinuidades por unidad de volumen mediante la (Ec. 9), pero al mismo tiempo dicho índice se relaciona con el índice RQD mediante la fórmula de Palmstrøm (Palmstrøm, 1975).

$$J_v = \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_n} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$RQD = 115 - 3,3 \cdot J_v \quad (\text{Ec. 10})$$

Operando en las ecuaciones anteriores y despejando en la ecuación (Ec. 6) el valor del radio de influencia se obtiene la (Ec. 11):

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot \sqrt[3]{6 \cdot UL \cdot \left(\frac{3,3}{115 - RQD}\right) \cdot 10^{-8}}}} \quad (\text{Ec. 11})$$

Por tanto, con este modelo simple, se puede estimar cuál es el radio de alcance de la inyección, a partir de una serie de datos geotécnicos (RQD y permeabilidad Lugeon) y del volumen de fluido inyectado.

Esta metodología permitiría construir ábacos simples para estimar el volumen que hay que bombear en un taladro para conseguir que la inyección penetre por las juntas a una distancia determinada. A continuación, se presentan dichos ábacos para perforaciones de 64 mm de diámetro y valores de RQD entre 35 (Figura 97) y 55 (Figura 98).

Por ejemplo, para el caso de $RQD=55$, si se bombean 175 l de lechada por metro de taladro, el alcance de la inyección estaría entre 0,62 y 0,75 m en el caso de macizos rocosos con una permeabilidad de 100 UL o de 35 UL respectivamente.

Por tanto, para un volumen de bombeo determinado, en función de la permeabilidad inicial del macizo rocoso y del RQD, se podría estimar la separación entre los taladros de inyección.

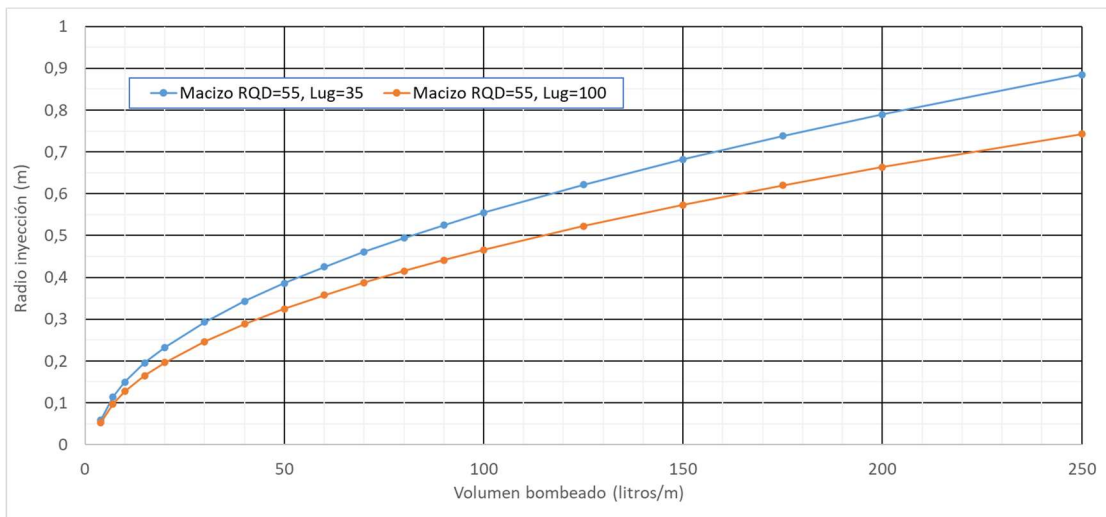


Figura 97. Alcance de la inyección en macizo rocoso fracturado (RQD=55)

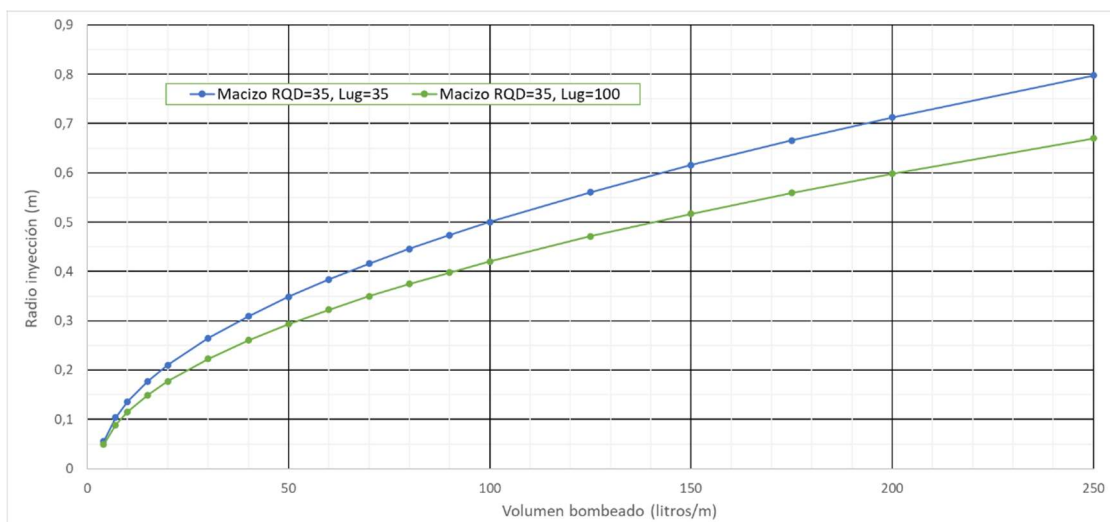


Figura 98. Alcance de la inyección en macizo rocoso muy fracturado (RQD=35)

En la Tabla 15 se recogen los valores de los radios de influencia para los distintos tramos del sondeo EY-1.

Analizando los radios de influencia reflejados en la Tabla 15, con excepción del tramo 12-15, en el que el volumen inyectado fue muy bajo, se tendría que haber notado la influencia de la inyección en todos los sondeos de control, excepto en el T-4, situado a 2 m, que solo sería alcanzado en la inyección del tramo 6-9 m. Esta hipótesis no concuerda con lo observado en la realidad, donde se detectó una menor influencia en los sondeos S-1 y T-2 debido al comportamiento anisotrópico de los macizos rocosos.

Profundidad (m)	Volumen inyectado (litros)	RQD	Jv	UL	r (m)
3-6	172	60	16,67	35	1,65
6-9	450	60	16,67	82	3,09
9-12	360	30	25,76	85	1,72
12-15	34	15	30,30	107	0,63
15-18	173	15	30,30	61	1,74
18-21	50	65	15,15	59	1,87

Tabla 15. Radios de influencia en los diferentes tramos del sondeo EY-1

La Figura 99 muestra la disposición de las familias de discontinuidades en relación a los sondeos de ensayo. En la Tabla 16 se resumen las familias que facilitan la comunicación entre el sondeo de inyección EY-1 y cada uno de los de control, teniendo en cuenta la dirección y buzamiento de cada familia. Así, por ejemplo, se puede ver que en el caso del sondeo S-1, tanto la estratificación como las familias J1, J3 y J4 favorecen la comunicación con el EY-1, mientras que para la perforación T-1, únicamente lo hacen la estratificación y J2.

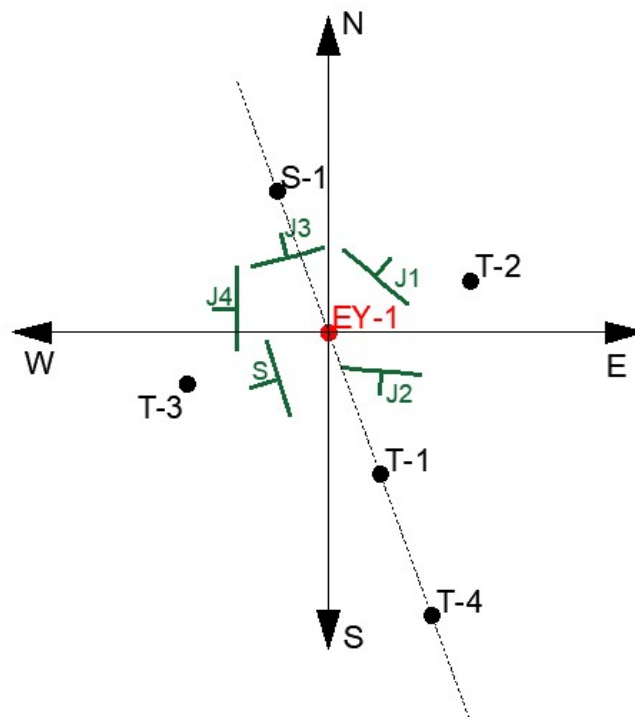


Figura 99. Familias de discontinuidades alrededor del sondeo EY-1

Esto se traduce en que la lechada inyectada en EY-1, en la dirección del sondeo S-1 tiene que distribuirse entre cuatro familias de discontinuidades, por lo que, para un volumen dado de lechada, el radio de influencia será menor, mientras que en la dirección del taladro T-1 solo lo tiene que hacer entre dos familias, por lo que la lechada puede progresar a mayor distancia.

SONDEOS	S-1	T-1	T-2	T-3
FAMILIAS	S	S	J1	S
	J1	J2	J3	J2
	J3			J3
	J4			J4

Tabla 16. Familias que facilitan la comunicación entre EY-1 y el resto de sondeos

Para tener en cuenta este efecto se propone tener en cuenta un factor de corrección del radio de influencia que tenga en cuenta el número de familias. Este factor de corrección por el número de familias implicadas, que se ha denominado F_N , se ha tabulado en la Tabla 17

Número de familias	Factor F_N
2	1
3	0,75
4	0,5
5 o mas	0,25

Tabla 17.- Factor de corrección por el número de familias en cada dirección

Aplicando estos factores, los radios de influencia en las direcciones de los sondeos de control se ven modificados según se recoge en la Tabla 18 para cada uno de los tramos de inyección.

Profundidad (m)	S-1	T-1 (T-4)	T-2	T-3
3-6	0,82	1,65	1,65	0,82
6-9	1,54	3,09	3,09	1,54
9-12	0,86	1,72	1,72	0,86
12-15	0,31	0,63	0,63	0,31
15-18	0,87	1,74	1,74	0,87
18-21	0,93	1,87	1,87	0,93

Tabla 18. Radios de influencia corregidos con el número de familias

Tal y como puede verse, esta corrección permite explicar la menor influencia observada en los sondeos S-1 y T-3, ya que reduce el radio de influencia en dichas direcciones por debajo de 1 m en todos los tramos de inyección excepto a la profundidad 9-12 m. Sin embargo, hay que tener en cuenta también que las discontinuidades tienen un buzamiento, de forma que una lechada inyectada en un punto, al viajar a través de la discontinuidad se va a desplazar tanto horizontalmente como en vertical, ayudada por la gravedad. Por esta razón, puede darse el caso de que la lechada inyectada en un tramo de profundidad en un sondeo afecte al tramo inferior de un sondeo próximo, en función de la distancia entre ellos y el buzamiento. Esto hace necesario una segunda corrección, utilizando un factor que se ha denominado factor de buzamiento (F_B) para tener en cuenta este efecto. En este caso

se ha optado por realizar un ajuste lineal, aplicando un factor 0 cuando las juntas son horizontales (buzamiento 0°) y 1 si fueran verticales (90°). Por simplicidad, se ha decidido adoptar como valor representativo para calcular el factor F_B en cada dirección el valor medio de los buzamientos de todas las familias consideradas previamente en el factor F_N . Los valores utilizados se recogen en la Tabla 19.

Sondeo	Buzamiento medio	F_B
S-1	56,8	0,624
T-1 (T-4)	62	0,682
T-2	45	0,495
T-3	62,3	0,685

Tabla 19. Factor de corrección F_B para los sondeos de control

A la hora de aplicar este factor de corrección debe tenerse en cuenta que el alcance en un determinado tramo se ve reducido en dicho factor por la migración vertical, pero a su vez se ve incrementado por el aporte procedente del tramo superior. Considerando este balance, los radios de influencia obtenidos se resumen en la Tabla 20.

Profundidad (m)	S-1	T-1	T-2	T-3
3-6	0,31	0,52	0,74	0,26
6-9	1,10	2,11	2,30	1,05
9-12	1,29	2,65	2,47	1,33
12-15	0,66	1,37	1,23	0,69
15-18	0,52	0,98	1,13	0,49
18-21	0,89	1,78	1,80	0,89

Tabla 20. Radios de influencia función de la distribución de las familias de juntas

Si comparamos los radios de influencia (Tabla 20) con los valores de permeabilidad después de la inyección (Tabla 12), se observa que:

- En la dirección del sondeo S-1, los radios de influencia por encima de 1 m se encuentran en el tramo que va de 6 a 9 m, coincidiendo con el tramo donde se produce una bajada de permeabilidad y en el 9-12 m, lo cual no concuerda. Por el contrario, en el resto de los tramos el radio de influencia es menor que 1 m, lo que se corresponde con la no variación en el valor de la permeabilidad.
- En la dirección de los sondeos T1-T4 se observa que el radio de influencia es superior a 1 m (e incluso a 2 m) en todos los tramos excepto en el 15-18 m. Esto es coherente con los resultados de permeabilidad, excepto para dicho tramo. Sin embargo, en este caso, el valor obtenido de 0,98 m es tan próximo a 1 m, que puede admitirse como válido el resultado.

- En la dirección del sondeo T-2 los radios de influencia son siempre superiores a 1 m, lo que se corresponde con la reducción en la permeabilidad.
- En la dirección del sondeo T-3 se observa concordancia entre los radios de influencia obtenidos y los tramos con reducción significativa de la permeabilidad.
- Además, como norma general, cuanto mayor es el radio de influencia en una determinada dirección, mayor es la reducción observada en la permeabilidad, por lo que es coherente relacionar un mayor radio de influencia con una mayor intensidad de la inyección.
- La migración vertical de la lechada permite explicar que tramos que, a priori, no deberían mostrar mejoría si la experimentan, al recibir fluido de otros tramos superiores.

6.8 Criterio económico

Como se ha visto a lo largo de la presente investigación, tradicionalmente cuando se plantea un protocolo de inyección los parámetros a determinar son principalmente; geometría de perforación, material a emplear, granulometría, reología de la mezcla, caudal, presión de inyección y criterios de cese.

Dejaremos a un lado el trabajo científico que se viene desarrollando, para plantear ahora dos cuestiones claves y que normalmente se pasan por alto:

- ¿cuál es la finalidad del tratamiento?, es decir, el objetivo de mejora y,
- ¿de qué presupuesto se dispone?

Ambas cuestiones están íntimamente ligadas y se debe de encontrar el equilibrio entre ellas.

En primer lugar, se tiene que definir si se trata de un tratamiento ligero con el objetivo de mejorar la impermeabilización del terreno en varias decenas de UL o por lo contrario se debe reducir la permeabilidad del macizo al máximo posible porque se deba cumplir con algún requisito medioambiental, social, etc.

A este respecto, en Subash et al. 2016, se presenta la mejoría que se obtiene sobre diferentes propiedades mecánicas tras un tratamiento de preinyección (Figura 100).

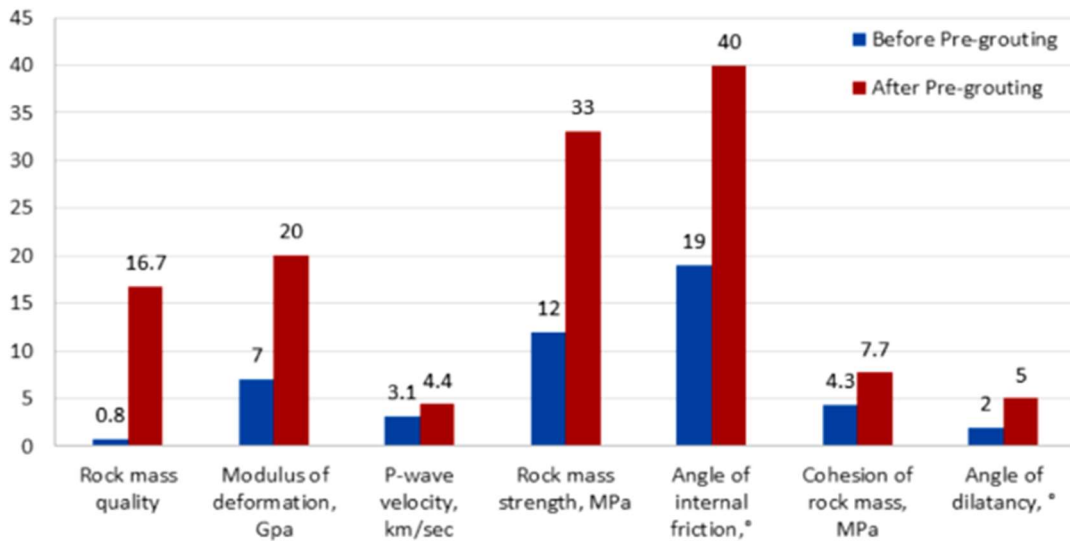


Figura 100. Ejemplo de mejora típica de las propiedades mecánicas del macizo rocoso debido a la lechada (Subash et al. 2016)

En esta línea (Konietzky, 2020) proporciona una guía que correlaciona los objetivos a cumplir con la dificultad del tratamiento (Tabla 21). La eficiencia del sellado (ES) se define a partir de la relación entre las permeabilidades anterior y posterior al tratamiento, como:

$$ES = 1 - \frac{K_{final}}{K_{inicial}}$$

Permeabilidad requerida	Eficiencia de sellado requerida		
	< 90 %	90 a 99 %	> 99 %
> 10 ⁻⁷ m/s	Sencilla	Complejidad media	Difícil
10 ⁻⁷ a 10 ⁻⁸ m/s	Complejidad media	Difícil	Muy difícil
< 10 ⁻⁸ m/s	Difícil	Muy difícil	Muy difícil

Tabla 21. Eficiencia del sellado (Konietzky, 2020)

En segundo lugar, hay establecer un presupuesto aproximado. Es evidente que el precio del material a inyectar y la admisión del macizo son los factores que marcan principalmente el coste total.

En un segundo nivel se debe analizar la malla de la perforación, la relación a/c, los tipos de equipos a emplear en la preparación de la mezcla (en función de los volúmenes estimados y tipos de mezclas), tipos de obturadores (para lo que es clave la posibilidad de su reutilización), mano de obra, plazos, etc.

La geometría juega un papel clave ya que una geometría no bien adaptada al terreno a tratar reducirá la efectividad y aumentará el coste para conseguir la mejora objetivo. Por otra parte, también depende de la lechada a inyectar, ya en un principio si se aplica una mezcla en base cemento la cuadrícula de las perforaciones será más cerrada que si se emplean microcementos, incrementando el coste de perforación (aunque se reduce el de material).

Como también se ha visto, puede ser necesario que el tratamiento se aplique en diferentes etapas o rondas. En ese caso, aparte de los costes ya considerados, hay que tener en cuenta el plazo de ejecución, ya que entre etapa y etapa deberá pasar el tiempo suficiente para que la mezcla fragüe. El efecto del plazo tiene especial importancia cuando se planifican tratamientos en obras subterráneas lineales como túneles, ya que la implicación sobre los costes fijos es muy importante.

La importancia de estos aspectos queda patente en (NTS, 2012), que analiza las conclusiones del análisis de una serie de túneles de transporte público que se excavaron en el área de Oslo en la primera década del siglo XXI, concluyendo que los costes de inyección estuvieron en el mismo orden que los costes de excavación y sostenimiento. En este documento se plantea la importancia de realizar una evaluación exhaustiva tanto de la extensión necesaria como de la elección del esquema de inyección cuando se planifiquen proyectos en los que se necesite una inyección extensiva, así como la de considerar los costos relacionados con la espera y la detención en la operación de excavación.

Este breve análisis se centrará, exclusivamente, en el coste del material a inyectar. Cuanto menor es la granulometría, mayor es el precio del producto. De manera orientativa se pueden adoptar los siguientes valores:

- Cementos convencionales: de 80 a 120 €/tonelada en función de la Resistencia a Compresión y la aditivación.
- Morteros especiales aditivados: 300 €/tonelada.
- Microcementos: Dependiendo de su tipología:
 - A-32 unos 500 €/tonelada
 - A-12 unos 1.000 €/ tonelada
 - A-6 aproximadamente 1.500 €/ tonelada
- Resinas acrílicas: de 3.000 a 6.000 €/ tonelada dependiendo del tipo.
- Sílice Coloidal: 8 €/litro.

La Figura 101 quiere ilustrar a nivel cualitativo cual es la relación entre el coste del tratamiento y su efectividad. A efectos de esta reflexión se han empleado datos aproximados y apoyados en (Stadler and Krenn, 2012).

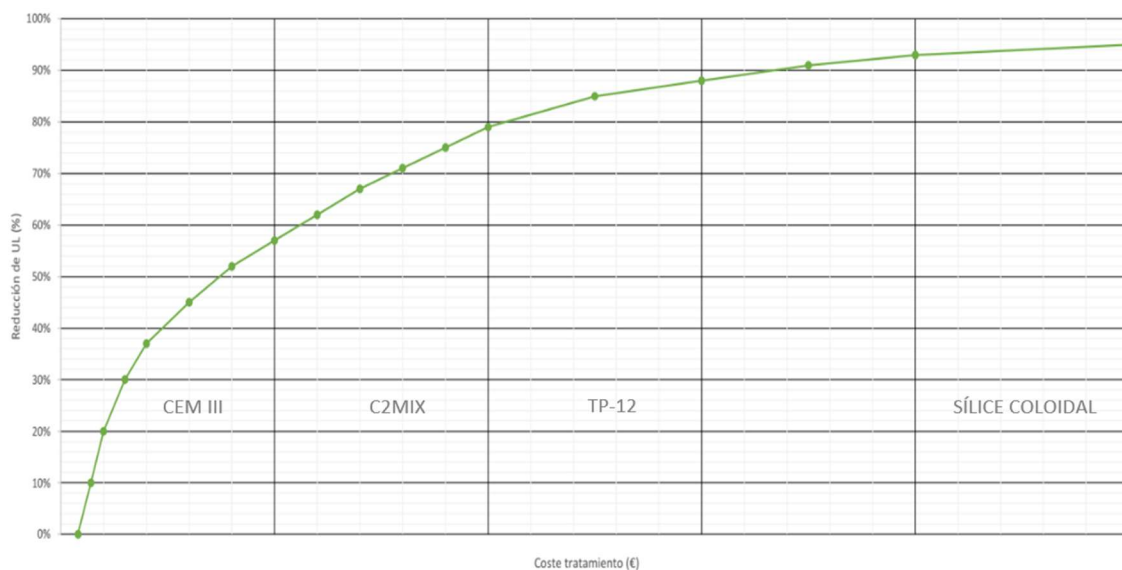


Figura 101. Relación coste tratamiento frente a la reducción de permeabilidad en UL

Para permeabilidades medias y altas, o como primera etapa de un tratamiento en varias fases, el material más efectivo es la lechada de cemento, que permite taponar las grandes fisuras por las que cabe una partícula de cemento ordinario de unas 50 μm , o se puede emplear para generar barreras de deflexión en caso de encontrar flujos de agua que puedan provocar el desplazamiento de la lechada. El mayor porcentaje de mejora de UL con el menor coste se obtiene con este tipo de mezclas, en el entorno de 50-60%.

A medida que la permeabilidad disminuye, también lo hace la efectividad de las lechadas de cemento y es cuando entrarían en juego los morteros aditivados, resultando una solución intermedia previa al empleo de lechadas de microcemento.

Al disponer en el mercado de diferentes granulometrías, se empezaría por las más gruesas y se iría reduciendo el tamaño de partícula en función del objetivo buscado y del presupuesto disponible. En líneas generales, resultaría interesante utilizar microcementos para alcanzar un rendimiento del 80 % al 95%.

Los tratamientos con resinas y sílice coloidal resultan competitivos técnicamente con los microcementos a partir de valores de permeabilidad mucho más bajos (1,6 UL aproximadamente), resultando un muy elevado coste. Este tipo de tratamientos no se suelen dar con carácter extensivo, si no únicamente para tratar zonas muy concretas y limitadas espacialmente.

Capítulo 7 : Conclusiones

A continuación, se exponen las conclusiones más relevantes obtenidas en la presente investigación conducente a tesis doctoral:

- I. Se ha desarrollado una campaña experimental para evaluar el flujo de diferentes fluidos (agua, lechadas de cemento y microcemento) a través de juntas de diferente rugosidad. Para ello ha sido necesario realizar el diseño conceptual de los ensayos, modificar y adaptar los equipos de laboratorio y definir nuevas técnicas. Los ensayos han dejado patente la importancia de la experimentación para poder entender los fenómenos físicos implicados en el flujo a través de las juntas.
- II. El procedimiento desarrollado permite comprobar que el contacto entre las superficies que forman la junta es un factor determinante en el comportamiento del fluido, dependiendo dicho contacto tanto de la rugosidad como de la tensión normal a la junta. Ambos factores confieren un marcado carácter anisotrópico al flujo. Se ha comprobado que cuanto menor es la presencia de asperezas y ondulaciones, más uniformemente tienden a repartirse las tensiones a lo largo de los labios de la junta. Por el contrario, la presencia de asperidades y ondulaciones hace que las tensiones se concentren en determinadas zonas, liberando otras y facilitando así que el flujo no se desarrolle de forma homogénea en una dirección, si no a través de determinados canales preferenciales.
- III. La conclusión anterior debe tenerse en cuenta en el diseño de tratamientos, puesto que la alteración del estado tensional que se genere modificará los canales de flujo preferentes, disminuyendo la importancia relativa de algunos y aumentando la de otros.
- IV. Respecto al fluido, además del tamaño de partícula que, lógicamente limita la penetrabilidad de las lechadas, resultan ser dos los parámetros clave: la presión de inyección y la estabilidad de la mezcla. Esta última condiciona que se produzca segregación y filtrado hidráulico.
- V. Las juntas más rugosas admiten caudales de inyección mayores que las lisas, si bien la distribución del flujo no es homogénea. Cualquier cambio en la asperidad o en el contacto de los labios de la junta modifica la distribución del fluido. Al aumentar la tensión normal o la presión de inyección, el efecto de la

rugosidad como condicionante del flujo pierde peso éste se distribuye de forma más homogénea por toda la superficie de la junta.

- VI. Tanto los ensayos de laboratorio como el caso práctico presentado demuestran la anisotropía del flujo de las inyecciones en un macizo rocoso, dejando patentes las limitaciones de los actuales modelos, como el escandinavo, que intentan predecir un radio de influencia de la inyección.
- VII. Se propone un nuevo modelo, que tiene en cuenta tanto la disposición espacial de las discontinuidades como el efecto de la gravedad y que ajusta con gran fiabilidad los resultados obtenidos en el caso práctico analizado. Se definen para ello dos factores de corrección que afectan al radio de influencia, uno función del número de familias y otro de su buzamiento y que permiten recalcular el radio de influencia según diferentes direcciones.
- VIII. El modelo propuesto permite optimizar la malla de sondeos de inyección, aumentando su espaciado en las direcciones de mayor penetración de la lechada y reduciéndolo en las de menor penetración. Esta optimización, además de su influencia en el coste, redundará principalmente en una mayor efectividad y confiabilidad de los tratamientos.
- IX. Queda también demostrada la importancia de acometer el tratamiento de impermeabilización en fases progresivas, que permitan ir reduciendo la permeabilidad en escalones sucesivos, adaptando la lechada de inyección a las condiciones iniciales de cada nueva fase. Este tipo de diseño permite encontrar el óptimo punto entre los resultados técnicos y el coste económico.
- X. A la hora de diseñar un tratamiento para la reducción de permeabilidad, se tendrá que tener en cuenta cuál es la permeabilidad objetivo final y de qué presupuesto se dispone. Ambas cuestiones están íntimamente ligadas y son contrapuestas, por lo que se debe de encontrar el equilibrio entre ellas.

Capítulo 8 Futuras líneas de investigación

Pese a los avances conseguidos en el estado del conocimiento, como en toda investigación, han surgido nuevas vías para continuar avanzando. De entre ellas, destacan las siguientes:

- I. Continuación de los desarrollos experimentales, aumentando la escala de ensayo y modificando la condición de las juntas. En estas pruebas sería interesante evaluar los fenómenos que tienen lugar durante las sucesivas fases de inyección progresiva.
- II. Evaluación del efecto de la inyección dinámica, que alterna episodios de inyección a alta presión con otros a baja presión para reactivar el proceso cuando se producen fenómenos de sedimentación/filtración. La utilización de técnicas de emisión acústica durante estas pruebas aportaría información muy interesante sobre las condiciones en las que se produce la reactivación de la inyección.
- III. Evaluación, a nivel experimental, del efecto de una red de fracturas en la dispersión del flujo. Estas pruebas permitirían establecer un modelo analítico del flujo de la lechada.
- IV. Utilización de modelos numéricos para evaluar la progresión anisotrópica de las lechadas en la red de fracturas de un macizo rocoso en base a modelos tipo DFN (*Discrete Fracture Network*). Los modelos DFN buscan describir tridimensionalmente el sistema de fracturación de un macizo rocoso de manera estadística, generando un macizo rocoso sintético por medio de objetos discretos (discos, hexágonos, rectángulos, etc.) interconectados. La generación de estos objetos se basa en observaciones de campo de las propiedades de las fracturas: orientación, continuidad, apertura, intensidad de fracturación.
- V. Aplicación de técnicas de inteligencia artificial, como las redes neuronales o los algoritmos genéticos, a la predicción de admisiones y radios de afección. Para ello, actualmente se dispone de una gran cantidad de datos almacenados en un software de análisis, desarrollado específicamente para los proyectos de inyecciones y denominado LurJet. En dicha herramienta se almacenan todos los datos de caudales, presiones y volúmenes inyectados en cada una de las perforaciones de proyecto, datos que pueden ser utilizados para entrenar un sistema predictivo. Esta herramienta se desarrolló gracias a un proyecto subvencionado por el CDTI, titulado "Impermeabilización primaria

de túneles mediante inyecciones” (Proyecto IMPETU REF: IDI-20181025), en el cual el autor de esta tesis doctoral tuvo la oportunidad de participar.

- VI. Desarrollo, de manera más precisa, de la optimización de la relación entre costes y reducción de la permeabilidad. Para ello sería necesario continuar los desarrollos experimentales y combinarlos con simulaciones numéricas de diferentes escenarios.

Capítulo 9 : Referencias bibliográficas

Aliaga Robles, P.J. (2015) "Relación Entre la Permeabilidad Insitu y la Calidad del Macizo Rocoso," in ISRM (ed.) *ISRM Regional Symposium - 8th South American Congress on Rock Mechanics*. Buenos Aires.

Antunes, P. and Reschke, A. (2016) *Performance Benefits of Colloidally Mixed Two-Component Grouts*.

Barton, N. (2004) "The why's and how's of high pressure grouting - Part 1," *Tunnels & Tunnelling International*, Ground Stabilisation.

Barton, Nick and Choubey, V. (1977) "The shear strength of rock joints in theory and practice," *Rock Mechanics*, 10, pp. 1-54.

Barton, Nicholas and Choubey, V. (1977) "The shear strength of rock joints in theory and practice," *Rock Mechanics*, 10, pp. 1-54.

Bieniawski, Z.T. (1989) *Engineering Rock Mass Clasifications*. Edited by Wiley.

Boschi, K., di Prisco, C.G. and Ciantia, M.O. (2020) "Micromechanical investigation of grouting in soils," *International Journal of Solids and Structures*, 187, pp. 121-132. doi:10.1016/j.ijsolstr.2019.06.013.

Burwell, E.B. (1958) "Cement and clay grouting of foundations," in *Practice of the corps of engineers*. . ASCE, Soil Mechanics and Foundation Division.

Corson, L. *et al.* (2021) "Field validation of a detectable, magnetic, cementitious grout for rock fracture grouting," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 145. doi:10.1016/j.ijrmms.2021.104853.

Draganović, A. and Stille, H. (2011) "Filtration and penetrability of cement-based grout: Study performed with a short slot," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(4), pp. 548-559. doi:10.1016/j.tust.2011.02.007.

Draganović, A. and Stille, H. (2014) "Filtration of cement-based grouts measured using a long slot," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, pp. 101-112. doi:10.1016/j.tust.2014.04.010.

Eriksson, M. and Stille, H. (2003) "A Method for Measuring and Evaluating the Penetrability of Grouts," in *3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment*. New Orleans, Louisiana,: ASCE., pp. 1326-1337.

- Funehag, J. and Thörn, J. (2018) "Radial penetration of cementitious grout – Laboratory verification of grout spread in a fracture model," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, pp. 228–232. doi:10.1016/j.tust.2017.11.020.
- Guerrero Miguel, D.J. *et al.* (2018) "Permeabilidad en juntas de roca como función del JRC y de la presión del fluido," in *XIV Congreso Internacional en Energía y Recursos Minerales. Sevilla*.
- Hansson, P. (1995) "Filtration Stability of Cement Grouts for Injection of Concrete Structures," in *IABSE Symposiun*. San Fransisco, pp. 1199–1204.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Badwen, W.F. (1995) *Support of Underground Excavation in Hard Rock*. Edited by Balkema. Rotterdam. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/37408005>.
- Jorne, F. and Henriques, F.M.A. (2016) "Evaluation of the grout injectability and types of resistance to grout flow," *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, pp. 171–183. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.032.
- Jorne, F., Henriques, F.M.A. and Baltazar, L.G. (2015a) "Evaluation of consolidation of different porous media with hydraulic lime grout injection," *Journal of Cultural Heritage*, 16(4), pp. 438–451. doi:10.1016/j.culher.2014.10.005.
- Jorne, F., Henriques, F.M.A. and Baltazar, L.G. (2015b) "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*, 4, pp. 140–151. doi:10.1016/j.job.2015.08.007.
- Konietzky, H. (2020) *Rock mass grouting*. Freiberg.
- Kutzner, C. (no date) *GROUTING OF ROCK AND SOIL*.
- Li, S. *et al.* (2016) "Protection against water or mud inrush in tunnels by grouting: A review," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Chinese Academy of Sciences, pp. 753–766. doi:10.1016/j.jrmge.2016.05.002.
- Li, X. *et al.* (2019) "An analytical solution for the radial flow of variable density grout in rock fractures," *Construction and Building Materials*, 206, pp. 630–640. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.089.
- Liu, X. *et al.* (2021) "Grout penetration process simulation and grouting parameters analysis in fractured rock mass using numerical manifold method," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 123, pp. 93–106. doi:10.1016/j.enganabound.2020.11.008.

- Lombardi, G. (2002) "Grouting of rock masses," in. Minusio: 3RDINTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUTING AND GROUT TREATMENT. Available at: www.lombardi.ch.
- Lombardi, G. and D.D. (1993) "Grouting Design and Control Using the GIN Principle," *International Water Power & Dam Construction*, 46, pp. 15–22.
- Mohammed, M.H., Pusch, R. and Knutsson, S. (2015) "Study of cement-grout penetration into fractures under static and oscillatory conditions," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, pp. 10–19. doi:10.1016/j.tust.2014.08.003.
- Mozumder, R.A., Laskar, A.I. and Hussain, M. (2018) "Penetrability prediction of microfine cement grout in granular soil using Artificial Intelligence techniques," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, pp. 131–144. doi:10.1016/j.tust.2017.11.023.
- Nejad Ghafar, A. (2017) *An Experimental Study to Measure Grout Penetrability, Improve the Grout Spread, and Evaluate the Real Time Grouting Control Theory*. KTH Royal Institute of Technology.
- NTS (2012) "Rock mass Grouting," *Norwegian Tunnelling Society, Publication n° 20*. Available at: www.nff.no.
- Öge, I.F. (2017) "Assessing Rock Mass Permeability Using Discontinuity Properties," in *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd, pp. 638–645. doi:10.1016/j.proeng.2017.05.373.
- Palmstrøm, A. (1975) *Characterization of degree of jointing and rock mass quality*. Oslo.
- Quiñones-Rozo, C. (2010) "LUGEON TEST INTERPRETATION, REVISITED," in *Collaborative Management of Integrated Watersheds. 30th Annual USSD Conference*. Sacramento: United States Society on Dams, pp. 405–414.
- Reschke, A.E. (1998) "The Development of Colloidal Mixer Based CRF Systems," in Dr. M. Bloss. Australian Institute of Mining and Metallurgy (ed.) *MINEFILL 98*, pp. 65–70.
- Salimian, M.H. *et al.* (2017) "Effect of grouting on shear behavior of rock joint," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 98, pp. 159–166. doi:10.1016/j.ijrmms.2017.07.002.
- Shamu, T.J., Zou, L. and Håkansson, U. (2021) "A nomogram for cement-based rock grouting," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 116. doi:10.1016/j.tust.2021.104110.

Snow, D.T. (1969) "Anisotropic Permeability of Fractured Media," *Water Resources Research*, 5(6), pp. 1273–1289.

Sonebi, M. and Perrot, A. (2019) "Effect of mix proportions on rheology and permeability of cement grouts containing viscosity modifying admixture," *Construction and Building Materials*, 212, pp. 687–697. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.022.

Stadler, G. and Krenn, H. (2012) "Permeation grouting," in CRC Press (ed.) *Ground Improvement*.

Subash, T. et al. (2016) "Pre-grouting for Leakage Control and Rock Improvement," *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 6(3). doi:10.4172/2165-784x.1000226.

el Tani, M. and Stille, H. (2017) "Grout Spread and Injection Period of Silica Solution and Cement Mix in Rock Fractures," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(9), pp. 2365–2380. doi:10.1007/s00603-017-1237-8.

Trybala, A. et al. (2019) "Interaction of liquid foams with porous substrates," *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. Elsevier Ltd, pp. 212–219. doi:10.1016/j.cocis.2019.01.011.

USACE (2017) *Engineering and design Grouting Technology, EM 1110-2-3506*.

Wang, X. et al. (2021) "Grouting characteristics in rock fractures with rough surfaces: Apparatus design and experimental study," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 184. doi:10.1016/j.measurement.2021.109870.

Warner, J. (2004) *PRACTICAL HANDBOOK OF GROUTING. Soil, Rock, and Structures*. John Wiley and sons.

Weaver, K. (1991) *Dam foundation grouting*. ASCE press, USA.

Xiao, F., Zhao, Z. and Chen, H. (2017) "A simplified model for predicting grout flow in fracture channels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, pp. 11–18. doi:10.1016/j.tust.2017.06.024.

Xiong, F. et al. (2018) "Nonlinear flow behavior through rough-walled rock fractures: The effect of contact area," *Computers and Geotechnics*, 102, pp. 179–195. doi:10.1016/j.compgeo.2018.06.006.

Xu, Z. et al. (2019) "Full-scale physical modelling of fissure grouting in deep underground rocks," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 89, pp. 249–261. doi:10.1016/j.tust.2019.04.008.

Yoon, J. and el Mohtar, C.S. (2015) "A filtration model for evaluating maximum penetration distance of bentonite grout through granular soils," *Computers and Geotechnics*, 65, pp. 291–301. doi:10.1016/j.compgeo.2015.01.004.

Zhou, Z. *et al.* (2019) "Strength and filtration stability of cement grouts in porous media," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 89, pp. 1–9. doi:10.1016/j.tust.2019.03.015.

Zou, L., Håkansson, U. and Cvetkovic, V. (2018) "Two-phase cement grout propagation in homogeneous water-saturated rock fractures," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 106, pp. 243–249. doi:10.1016/j.ijrmms.2018.04.017.