



TRABAJO FINAL DE GRADO

ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA RESOLVER LAS FILTRACIONES EN LA CERRADA DE LA PRESA DE ALLOZ (NAVARRA)

ANEJO Nº7: DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

Valencia, Junio de 2018

Titulación: *Grado en Ingeniería Civil*

Curso académico: *2017/2018*

Autor: *Vicente Juan Campos*

Tutor: *Julio Garzón Roca*

Cotutor: *Francisco Javier Torrijo Echarri*

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 5

2. PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN 5

2.1 TIPOLOGÍA DEL MORTERO 5

2.2 SEPARACIÓN DE LAS PERFORACIONES Y PROFUNDIDAD 7

2.3 TÉCNICA DE INYECCIÓN 8

2.4 EQUIPOS A EMPLEAR 10

2.5 ACCESOS 11

3. MODELIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN 12

3.1 PROGRAMA DE CÁLCULO Y PROCEDIMIENTO 12

3.2 OBTENCIÓN DE LAS PERMEABILIDADES DE LOS MATERIALES 13

3.3 FLUJO RESULTANTE CON LA PANTALLA EJECUTADA 15

3.3.1 Sección P-1 16

3.3.2 Sección P-2 18

4. CONCLUSIONES 19

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 20

1. INTRODUCCIÓN

En este Anejo se desarrolla la solución escogida en el Anejo nº 6 con el fin de eliminar las filtraciones existentes a través de las laderas en la cerrada de la Presa de Alloz. La solución escogida ha sido la realización de pantallas de inyección de mortero de cemento a fin de crear una barrera estanca que impida el paso del agua desde el embalse.

En primer lugar, se planteará el desarrollo de la ejecución de las inyecciones indicando desde la composición de la mezcla a emplear hasta el equipamiento necesario para llevarlas a cabo. Posteriormente, se modelizará la solución empleando el software comercial de elementos finitos RS², de la firma ROCSCIENCE, a fin de comprobar que la profundidad alcanzada es suficiente para reducir los caudales que atraviesan el macizo.

En la siguiente imagen se muestra la propuesta de eje para la pantalla de impermeabilización junto con los puntos en los que afloran los flujos de agua, los cuales presentan valores de 12 l/s y 2 l/s en la margen derecha e izquierda, respectivamente, en la actualidad.



Figura 1. Eje de la pantalla de impermeabilización y fugas de caudal. Fuente: Propia

2. PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

La inyección como método constructivo tiene por objeto la impermeabilización o consolidación de cuerpos porosos y permeables, tales como rocas fisuradas, gravas, arenas o aluviones. Esto se consigue mediante la inyección a presión de mortero por los taladros realizados a través de los huecos a inyectar.

En función de la naturaleza del terreno, los morteros empleados y la técnica de inyección son distintos, por lo que en el presente estudio nos centraremos en el caso de inyección en macizo rocoso fisurado.

Las rocas fisuradas están caracterizadas por tal abundancia de fisuras que una perforación ejecutada en cualquier punto es susceptible de absorber una cantidad de la mezcla inyectada más o menos importante. En este caso, la disolución de los yesos magnifica el orden de las discontinuidades del macizo al incrementar las separaciones naturales tras el paso de continuados caudales de agua procedentes del embalse.

En el presente apartado se establecerá, en primer lugar, la tipología de mortero a emplear, seguido de la separación y el diámetro óptimo de los taladros para cubrir la zona a tratar. A continuación, se establecerá la técnica de inyección a emplear junto con los equipos necesarios y, finalmente, se indicarán los accesos necesarios para la ejecución de la solución.

2.1 TIPOLOGÍA DEL MORTERO

A fin de determinar la naturaleza del mortero a inyectar, se deben conocer el estado interno del macizo en cuanto a discontinuidades se refiere. Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para fisuras muy abiertas que varían entre varios decímetros y varios centímetros su obturación se debe efectuar empleando un mortero extremadamente denso y tixotrópico, inyectando sin apenas presión (alrededor de 1 MPa) a fin de limitar la progresión del mortero y evitar la rotura del macizo. En este caso, las longitudes de tratamiento oscilan entre los 5 y 15 metros de profundidad en cada etapa.
- Para el caso de fisuras finas de tamaño inferior a las anteriores, la inyección se realiza partiendo de taladros con un mayor espaciamiento e inyectando el mortero por tramos de unos 5 metros de longitud. Cada tramo se encuentra limitado en un parte superior por un obturador y en su parte inferior por el fondo de la perforación, pudiendo ser el terreno natural o el mortero, según se inyecte de arriba abajo o de abajo a arriba, respectivamente. El hecho de realizar la inyección por tramos evita la sedimentación de los granos de cemento con el agua y la obturación del taladro.

Tal y como se expone en el Anejo nº5: Estudio geotécnico, las fisuras predominantes en el diaclasado son del orden del milímetro. Aun así, no se debe olvidar que la presencia de yesos en diversos estratos del macizo junto con la circulación interna de agua provoca la creación de cavidades considerables que pueden llegar a alcanzar tamaños del orden de 10 centímetros. De este modo, se deben tener en cuenta tanto las pequeñas fisuras del diaclasado así como los huecos o cavidades debidas a la solubilidad y arrastre de los yesos en contacto con el agua.

A continuación, se establece el tipo de mezcla a inyectar en función de las características mencionadas a fin de conseguir el relleno, tanto de las pequeñas fisuras debidas al diaclasado, como de los huecos de mayor tamaño existentes en el macizo.

El mortero de base para la inyección de un macizo rocoso es la simple suspensión de cemento, empleándose de forma muy diluida. Sin embargo, para el caso de huecos notables se debe optar por el empleo de un mortero estable de cemento-arcilla o cemento-bentonita.

En la siguiente tabla se muestran los materiales a emplear según la norma española referente a procedimientos de inyección (UNE-EN 12715):

Medio	Categoría	Inyección sin desplazamiento			Inyección con desplazamiento
		Impregnación	Fisura/contacto	Relleno	
Suelo granular	Grava, arena gruesa y grava arenosa $K > 5 \times 10^{-3}$ m/s	Suspensión de cemento puro suspensión de base cemento			
	Arena 5×10^{-5} m/s $< K < 5 \times 10^{-3}$ m/s	Suspensiones microfinas, disoluciones			Suspensión de base cemento, morteros
	Arena fina a media 5×10^{-5} m/s $< K < 1 \times 10^{-4}$ m/s	Suspensiones, microfinas, disoluciones, productos especiales			
Roca fisurada	Fallas, fracturas, karst $e > 100$ mm		Morteros de base cemento, suspensiones de base cemento (arcilla, fillers)	Mortero, suspensión de base cemento de fraguado rápido, espuma de poliuretano, otros productos reactivos al agua	
	Fracturas fisuras $0,1 \text{ mm} < e < 100 \text{ mm}$		Suspensión de base cemento, suspensiones microfinas		
	Microfisuras $e < 0,1 \text{ mm}$		Suspensiones microfinas, geles de silicato, productos especiales		
Cavidades	Huecos importantes			Mortero de base cemento de fraguado rápido, espuma de poliuretano, otros productos reactivos al agua	

e = Anchuras de las grietas

Tabla 1. Materiales de inyección. Fuente: Norma UNE-EN 12715

Tal y como aparece indicado en la Tabla 1, nos encontramos en el caso más desfavorable de macizo con roca fisurada, decidiéndose optar, en este caso, por realizar dos fases de inyección. En la primera de ellas se ejecutará inyectando un mortero estable de alta densidad a fin de rellenar los huecos y fracturas más notables. Este mortero consistirá en una suspensión de arcilla-cemento, la cual estará compuesta por una mezcla de cemento portland y agua con una relación agua/cemento igual a 5 y por un lodo de arcilla.

Gracias a la inclusión de la arcilla en la mezcla, ésta actuará como filler aumentando el contenido de finos de la mezcla mejorando la capacidad de penetrar en el terreno, reduciendo el consumo de cemento y mejorando la estabilidad y viscosidad de la suspensión, debido a la propia capacidad de la arcilla para formar geles, estabilizando de este modo la mezcla de cemento, tal y como se expone en el Artículo 676.2.2.2 del PG-3.

Esta arcilla estará fuertemente dosificada en la mezcla en comparación con el cemento, debido a que el único objetivo será el de impermeabilizar. En caso de que se buscase la consolidación del terreno con fines estructurales, esta dosificación sería contraria, aumentando la cantidad de cemento en la mezcla.

Además, se empleará también arena como filler gruesa en la mezcla para mejorar las propiedades de la misma, tal y como viene indicado en el Artículo 676.2.2.3 del PG-3. Esta arena deberá estar limpia y de granos redondeados.

A continuación, en una segunda fase se inyectará una suspensión de cemento muy diluido a fin de rellenar las fisuras más finas que hayan quedado sin rellenar tras la primera fase. En esta segunda fase, se realizará un taladro entre cada dos de los realizados anteriormente en la primera fase.

La lechada a inyectar tendrá una dosificación agua/cemento igual a 12 a fin de conseguir rellenar las fracturas más finas de la roca que no hayan sido alcanzadas por la primera fase de inyecciones. En esta suspensión, las partículas de cemento permanecerán en suspensión por la agitación de la mezcla a través de las tuberías, por lo que el diámetro de las mismas deberá estar limitado a un máximo de 25 milímetros.

En la siguiente tabla se muestran resumidas las dos fases de inyecciones a realizar:

Fase	Mortero empleado	Dosificación	
		Agua	5
1	Agua + Cemento + Arcilla + Arena	Cemento	1
		Arcilla	3
		Arena	2
2	Agua + Cemento	A/C = 12/1	

Tabla 2. Dosificación de materiales. Fuente: Propia

Para determinar la presión adecuada en las inyecciones de impregnación, ésta debe ser inferior a la presión de rotura del macizo. Además, en función de la orientación del diaclasado se deben tener en cuenta los siguientes condicionantes:

- En caso de un macizo rocoso con un sistema de fracturas principal paralelo a la superficie, la presión debe ser igual al peso del terreno o de la sobrecarga a colocar. A medida que se incrementa la profundidad, la presión puede ir aumentándose ligeramente.
- En el caso de macizos en los que las familias de diaclasas estén inclinadas o verticales, la presión debe ser inferior a la presión con la que se produzcan la rotura de la roca, por lo que esta presión puede ser únicamente determinada con ensayos.

En nuestro caso, nos encontramos ante familias de diaclasas predominantemente verticales, tal y como se expuso en el Anejo nº 5 y se indica en la siguiente tabla:

Sistema	Dirección de buzamiento (°)	Buzamiento (°)
J1	161	89
J2	260	89
J3	61	64
J4	171	50
S0	341	67

Tabla 3. Orientación de las discontinuidades. Fuente: Propia

Es por esto que la presión a establecer deberá estar condicionada por la resistencia a compresión global del macizo más desfavorable de entre las distintas unidades geotécnicas analizadas en el Anejo nº 5. Esta resistencia se corresponde con la U.G.2 (Margas con yesos) y presenta un valor de 1,097 MPa, por lo que se empleará una presión de inyección de 0,8 MPa a fin de no modificar la estructura del macizo.

UNIDAD GEOTÉCNICA	Litología	Resistencia a compresión del macizo (σ_{cm})
UG-1	Gravas limosas	-
UG-2	Margas yesosas	1,097 MPa
UG-3	Brechas y conglomerados	6,134 MPa
UG-4	Calizas	10,55 MPa
UG-5	Margas con calizas	1,414 MPa

Tabla 4. Resistencia a compresión del macizo. Fuente: Propia

2.2 SEPARACIÓN DE LAS PERFORACIONES Y PROFUNDIDAD

Una vez establecida la presión de inyección, se debe decidir la separación de las perforaciones o sondeos a inyectar posteriormente, a fin de crear una barrera lo más estanca posible y que cierre el mayor número de fisuras o huecos posible. Puesto que nos encontramos en el caso de un macizo rocoso, la separación óptima de los taladros se encuentra en un rango de entre 2,5 y 6 metros, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tipos de obra	Terreno	Disposición de los taladros
Pantallas de impermeabilización	Roca	Una o dos filas de taladros paralelos. Separación entre taladros: 2,5 a 6 m.
	Gravas y suelos	Dos o más filas de taladros paralelos Separación entre taladros: 1 a 3 m.
Tratamiento masivo del terreno	Roca	Cuadrícula del orden de 3 x 3 m.
	Gravas y suelos	Cuadrícula del orden de 1 x 1 m. a 3 x 3 m.
Fondos impermeables	Roca	Cuadrícula del orden de 4 x 4 m.
	Gravas y suelos	Cuadrícula

Tabla 5. Separación de los taladros. Fuente: Vidosa F. G.

De este modo, se escoge una separación media de 5 metros entre perforaciones. La separación de los sondeos ejecutados en la Fase 1 será igual a 10 metros, mientras que los sondeos de la Fase 2 se situarán entre los de la primera fase, de modo que la separación final entre perforaciones sea de 5 metros.

En cuanto a la profundidad de las perforaciones, se debe tener en cuenta que, a mayor profundidad de pantalla, mayor será la reducción del caudal circulante a través del macizo. En caso de encontrarnos ante la situación en la que existe un estrato impermeable por debajo de la zona de circulación de flujo, la pantalla alcanzaría el mismo hasta hincarse en él y evitar así el paso del flujo. Puesto que no nos encontramos ante tal situación, se debe llegar a una solución de compromiso en la que la pantalla ejecutada reduzca de forma potencial el caudal circulante sin llegar a una profundidad demasiado excesiva. De este modo, se escoge una profundidad de 60 metros desde la superficie, pues tal y como se detallará más adelante en el apartado 3, con esta solución se consigue un resultado efectivo.

Por otra parte, las perforaciones tendrán una inclinación de 60° en dirección hacia el embalse, por lo que la longitud total del sondeo será de 69,3 metros. De este modo, conseguimos que la pantalla ejecutada intercepte de forma más rápida un mayor número de líneas de corriente que parten desde el vaso del embalse, a diferencia de haber realizado la pantalla de forma completamente vertical.

En la siguiente figura se puede observar la disposición de las perforaciones en un corte transversal a la pantalla de inyecciones:

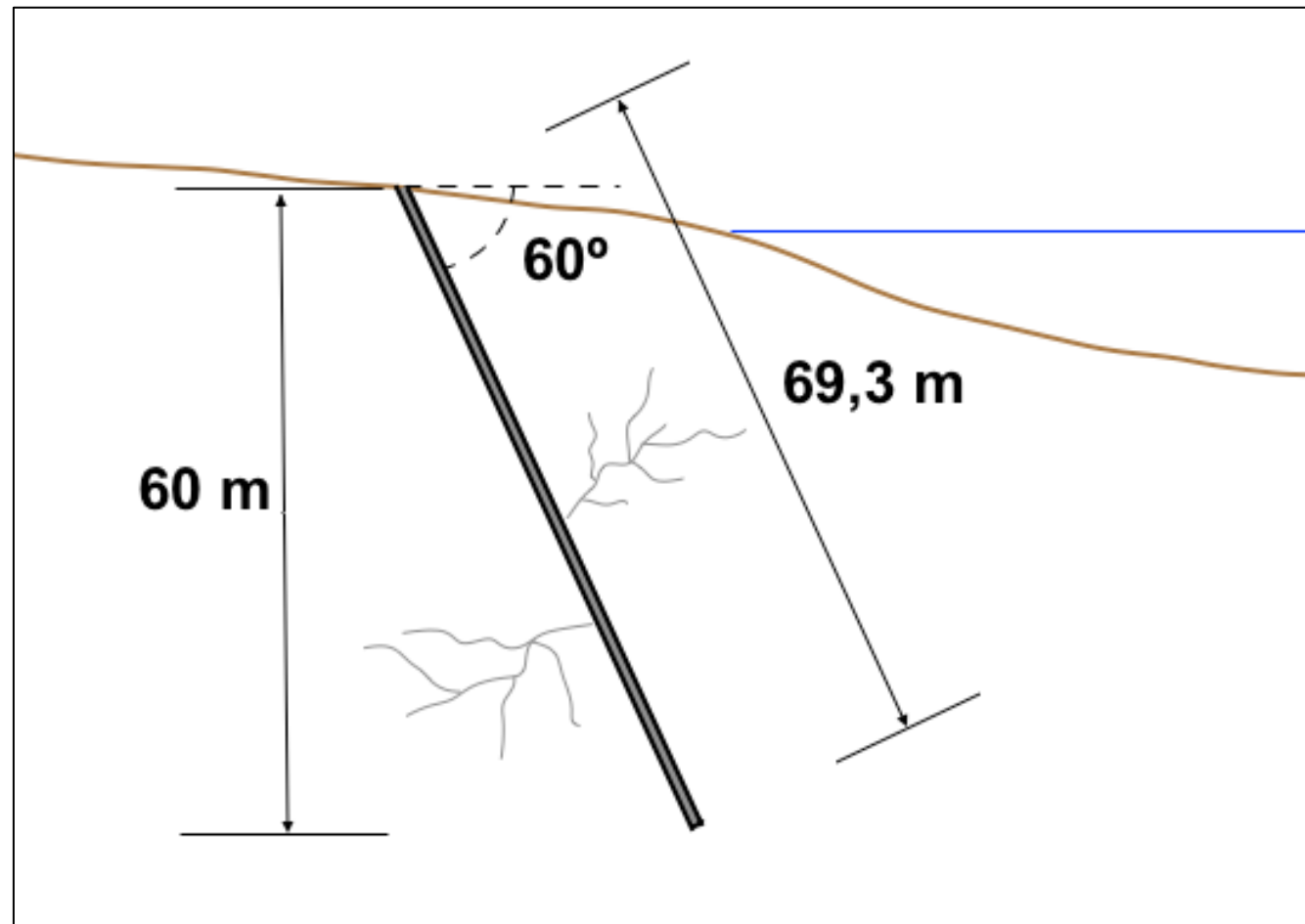


Figura 2. Perfil transversal de la pantalla. Fuente: Propia

Por su parte, las perforaciones S-21 hasta S-26, mostradas en la Figura 3, junto con las intercaladas en la Fase 2 en esta zona, se llevarán a cabo desde la galería de servicio de la presa situada 10 metros por debajo de la coronación de la misma, alcanzando la misma profundidad que en el resto de casos y con la misma inclinación. En la Fase 2, las perforaciones cubrirán la misma profundidad desde el punto de ejecución y presentarán el mismo ángulo de inclinación.

Las disposiciones en planta y alzado de las perforaciones quedan reflejadas en el Documento nº 2: Planos informativos, aunque a modo de esquema, en la siguiente figura se muestra la distribución en planta de los sondeos, con un total de 34 taladros en la Fase 1 (S) separados alrededor de unos 10 metros entre sí, siendo la separación máxima entre ellos de 12,55 metros (entre los sondeos S-9 y S-10) y la mínima igual a 8,46 metros (entre los sondeos S-8 y S-9). Por su parte, los sondeos de la segunda fase aparecen indicados con el identificativo (P), constando un total de 33 en la misma.

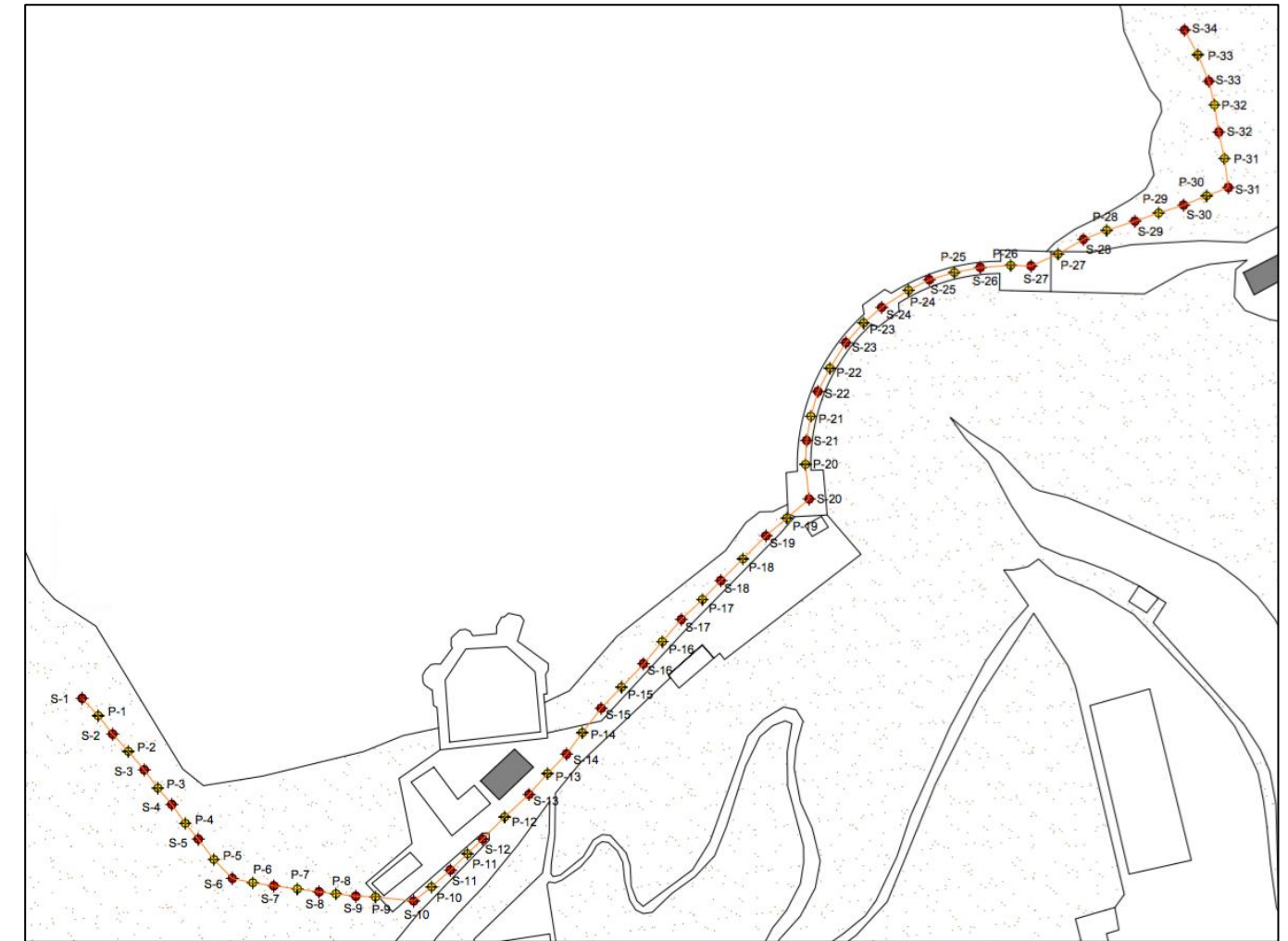


Figura 3. Disposición en planta de los taladros. Fuente: Propia

Una vez fijada la disposición y separación de cada perforación, se obtiene como resultado una pantalla de inyecciones ejecutada en dos fases con una longitud total igual a 335 metros.

2.3 TÉCNICA DE INYECCIÓN

Puesto que las inyecciones a realizar superarán una profundidad de 10 metros, estas deberán realizarse por etapas a fin de proporcionar un mayor control del área afectada y minimizar la exudación y drenaje de la mezcla en los sondeos.

Existen varios métodos para llevar a cabo la inyección por etapas: el método de etapas descendentes y el método de etapas ascendentes.

En el método de etapas ascendentes se realiza la perforación e inyección desde la superficie por etapas siendo el método más caro de inyección, ya que implica mayor tiempo debido a la necesidad de ir perforando por tramos. Además, con este método se debe instalar el sistema de inyección en cada

tramo. Esta técnica es aplicable en cualquier tipo de roca y con cualquier condición de discontinuidades y en zonas con flujos de agua a través de huecos interconectados.

Por otra parte, el método de etapas ascendentes es mucho más simple y barato, aunque únicamente aplicable en zonas donde las perforaciones no colapsan, es decir, zonas donde el macizo rocoso presenta buena calidad. Esto se debe a que la perforación se realiza hasta su profundidad máxima y, a continuación, se va inyectando la mezcla con un único obturador por etapas ascendentes. En cuanto a casos con circulación de agua subterránea, este método tampoco es aconsejable debido a la posible inestabilidad de la perforación.

Se opta, por tanto, por realizar la inyección siguiendo el método de etapas descendentes, a pesar de su mayor coste, debido a la mala calidad del macizo y a la circulación de agua por el mismo. Por otra parte, cabe destacar que el hecho de realizar el método descendente nos ofrece la posibilidad de extraer testigos del terreno tratado y así corregir la presión de inyección o la dosificación de la mezcla en función de los resultados obtenidos.

Mediante este método, se suelen perforar tramos de entre 5 y 15 metros de profundidad, en función del equipo a emplear y de la estabilidad del propio macizo. En nuestro caso, las perforaciones se dividirán en tramos o etapas de 10 metros, por lo que se llevará a cabo el proceso de inyección en 7 etapas hasta alcanzar la longitud total del sondeo de 69,3 metros anteriormente expuesta.

En la siguiente imagen queda definido el proceso genérico a seguir en el método de etapas descendentes:

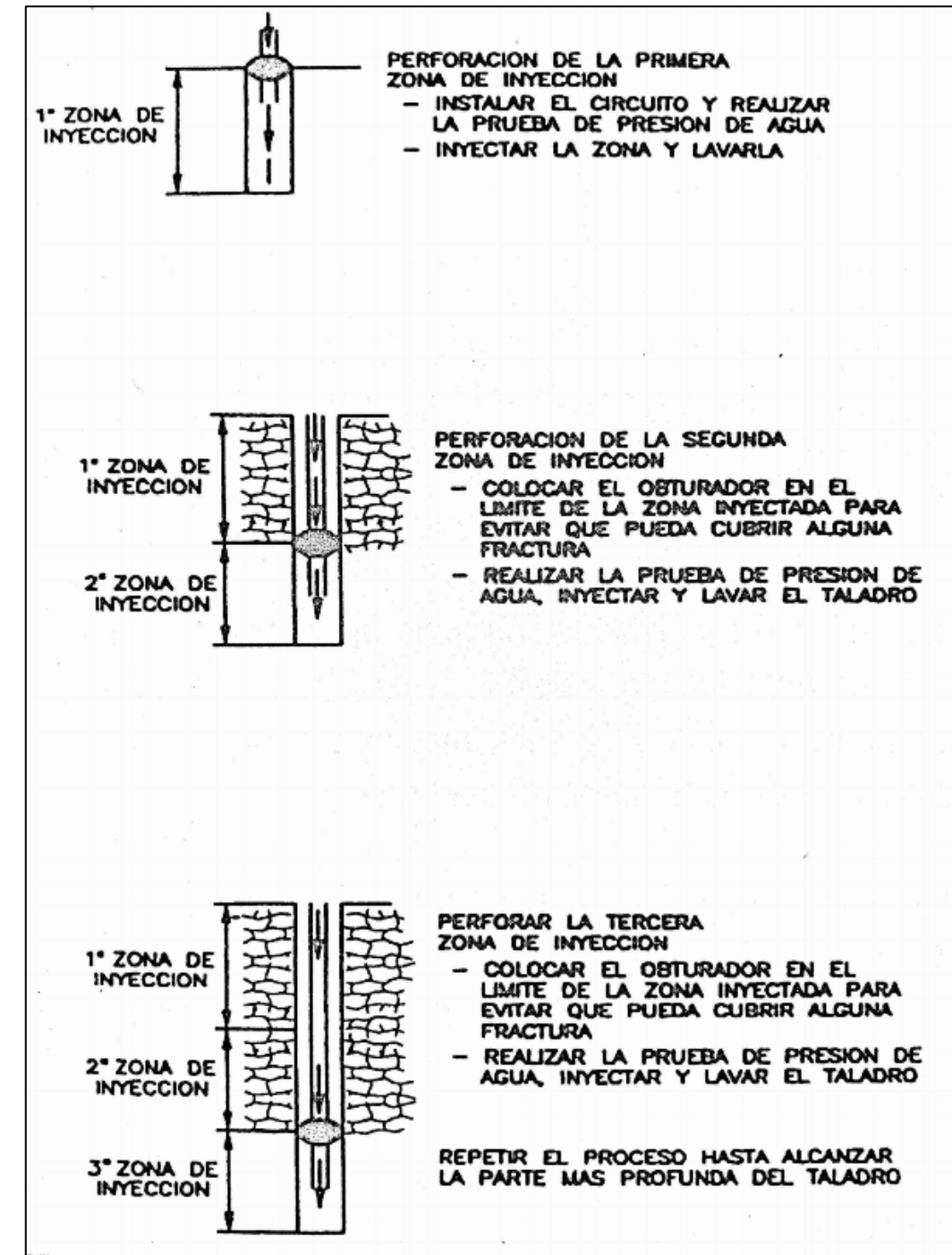


Figura 4. Ejecución por etapas descendentes. Fuente: Bielza A

Para llevar a cabo el proceso de inyección se emplearán varillajes de acero de 75 mm de diámetro mientras que las perforaciones se efectuarán a rotación. Además, se deberá tener en cuenta que las perforaciones no deberán desviarse en más de un 3% respecto a la orientación prevista en longitudes no superiores a 20 metros.

2.4 EQUIPOS A EMPLEAR

Respecto a los equipos a emplear para la realización de las inyecciones, serán necesarias las siguientes unidades:

- Máquina de sondeos geotécnicos.
- Mezclador coloidal.
- Agitador.
- Bomba.
- Líneas de circulación.
- Mangueras y obturadores.

El proceso básico de las inyecciones será el siguiente: el cemento, el agua y las adiciones empleadas en la Fase I del tratamiento serán añadidos al mezclador coloidal, donde serán mezclados de forma enérgica gracias a la velocidad que posee el mismo. Transcurridos unos minutos, la mezcla será impulsada al agitador, donde será batida de forma lenta manteniéndola agitada hasta el momento de realizar la inyección. A continuación, la bomba de inyección aspirará la mezcla desde el agitador a través de las líneas de inyección hasta el sondeo. Finalmente, una vez dentro del sondeo los obturadores permitirán distribuir la mezcla de forma correcta.

En primer lugar, para la realización de las perforaciones se empleará una máquina para sondeos geotécnicos montada sobre orugas de tamaño medio a fin de poder acceder sin inconvenientes a las zonas a inyectar en las laderas. Para inyectar la zona de la presa, se empleará maquinaria de menor tamaño a fin de acceder a la galería de la presa y poder inyectar desde la misma.

En cuanto al equipo para la preparación de la mezcla constituido por mezclador agitador y bomba, se realizarán dos centrales de inyección situadas junto a la caseta del desagüe de fondo de la presa y junto al estribo izquierdo de la presa, respectivamente (Figura 4). En cada central se colocarán dos mezcladoras, dos agitadores y dos bombas que distribuirán la mezcla a cada una de las perforaciones a través de las líneas de circulación. Puesto que las longitudes a cubrir por las líneas de circulación serán elevadas, en caso de grandes caídas de presión en el transporte de la mezcla en obra, se emplearán bombas intermedias.



Figura 5. Localización de las centrales de inyección. Fuente: Propia

En primer lugar, los mezcladores empleados funcionarán como mínimo a 1500 rpm y como máximo a 3000 rpm disponiendo de un impulsor que trabaje en combinación con una acción de ciclón, que al trabajar a alta velocidad hace que el cemento y los demás compuestos sean sometidos a una acción violenta de disgregación, eliminando cualquier impureza superficial de los granos, individualizando y amasando a fondo todas las partículas. Las capacidades de los mezcladores oscilarán entre 200 y 400 litros.

Seguidamente, los agitadores mantendrán la mezcla en estado de suspensión hasta que sea bombeada al sondeo. Se trata de un recipiente, con una capacidad igual al doble de la del mezclador, provisto de una serie de paletas que giran lentamente, a unas 100 r.p.m. A la entrada dispondrá de un tamiz para impedir que las partículas sólidas gruesas penetren en la bomba de inyección.

En cuanto a las bombas de inyección a emplear, encontramos predominantemente dos tipos de ellas:

- De rotor o tornillo helicoidal, las cuales proporcionan presiones de hasta 1,5 MPa y caudales de hasta 4000 l/min. Este tipo de bombas no necesita el empleo de válvulas.
- De pistón, que proporcionan presiones superiores (> 10 MPa) aunque caudales inferiores a las helicoidales (< 200 l/min). Este tipo de bombas necesita válvulas para su control.

En este caso, puesto que la presión efectiva máxima será de 0,8 MPa, basta con emplear una bomba de rotor o tornillo helicoidal que, además, nos proporcionará caudales mayores en los trabajos de inyección. El funcionamiento de esta bomba consiste en el giro excéntrico de un rotor helicoidal

metálico dentro de un estator elastomérico. El ajuste interdiferencial entre el rotor y el estator produce una cavidad constante que desplaza la mezcla, bombeándola continuamente.

Una vez definido el equipo de bombeo, se deben establecer las líneas de circulación por las que se transportará la mezcla hasta cada una de las perforaciones. Existen dos tipologías de líneas de circulación: con o sin retorno. Las líneas con retorno poseen a su vez dos líneas: la de la salida de la inyección, que conecta la bomba a los accesorios de inyección en el sondeo, y la de retorno, que une el sondeo con el agitador, de nuevo.

En este caso, se emplearán líneas con retorno a fin de que el fluido que no sea aceptado por el sondeo, sea devuelto al agitador y no se pierda. Los diámetros interiores de las líneas a emplear serán de 20 mm a fin de evitar la posible obturación de las mismas.

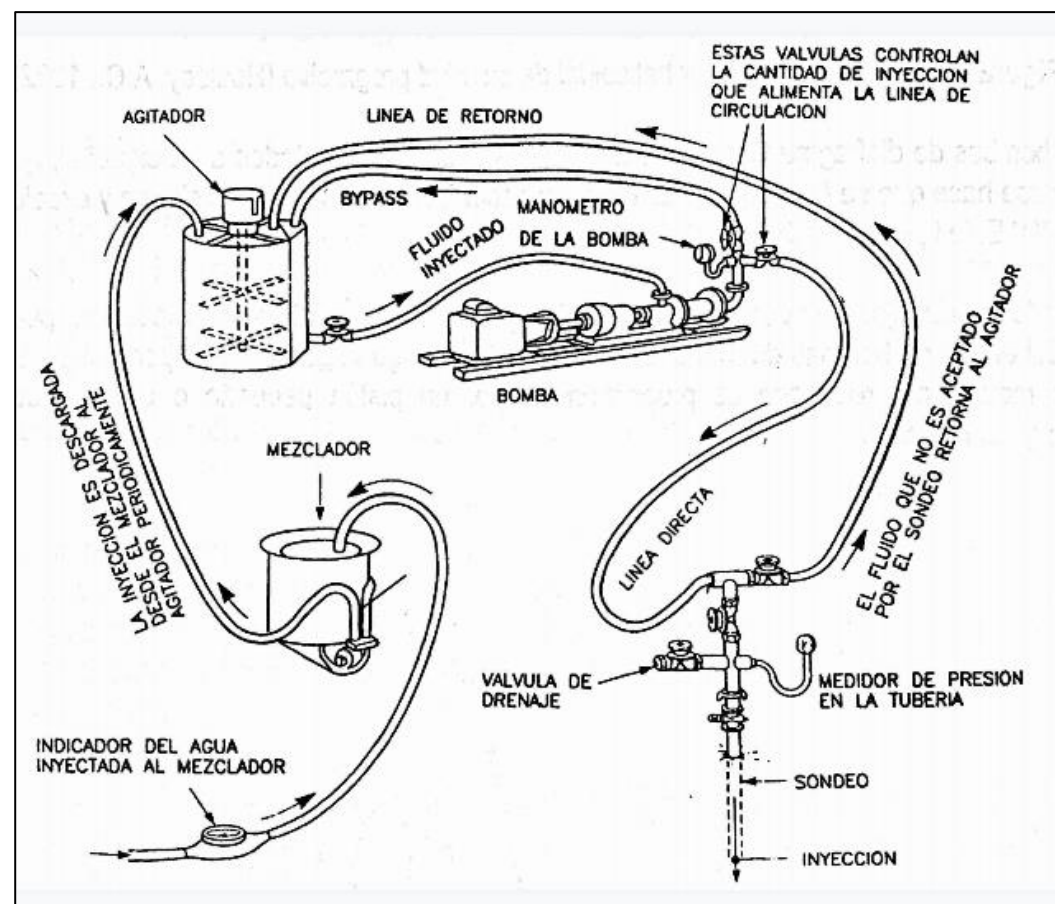


Figura 6. Equipo de inyección. Fuente: Bielza A.

Finalmente, se utilizarán equipos de control y de medición de la ejecución, es decir, manómetros de presión y caudalímetros, los cuales se instalarán en los sondeos. También se hará uso de obturadores, que se introducirán en los sondeos a fin de aislar cada uno de los tramos que ya se hayan inyectado. Los obturadores a emplear serán de tipo mecánico, los cuales son mucho más resistentes que los neumáticos y proporcionan un mejor aislamiento entre tramos.

2.5 ACCESOS

La zona de trabajo, como se ha descrito en el Anejo nº 1, se sitúa entre la sierra de Urbasa y Andia, por lo que uno de los condicionantes principales en cuanto a los accesos será la pendiente del terreno, de tal modo que ésta sea compatible con la circulación de los camiones que deban transportar el equipamiento necesario descrito anteriormente.

En la siguiente imagen aparece indicado en color rojo el tramo de carretera NA-7171 que accede al municipio de Lerate, vía que servirá como acceso a la zona de la margen izquierda. Por su parte, en amarillo, se indica el camino privado de acceso a la presa, de modo de que sirva de acceso a la zona de la margen derecha.



Figura 7. Accesos. Fuente: Google Maps

El tramo de acceso a la margen derecha (amarillo) tiene una longitud aproximadamente de 500 metros, siendo el camino de acceso privado a la central. Esta vía se encuentra pavimentada y tiene una anchura de 7 metros y posee fuertes pendientes, siendo la máxima de 41,6% y una media de 11,8%, como se puede ver en la siguiente figura.

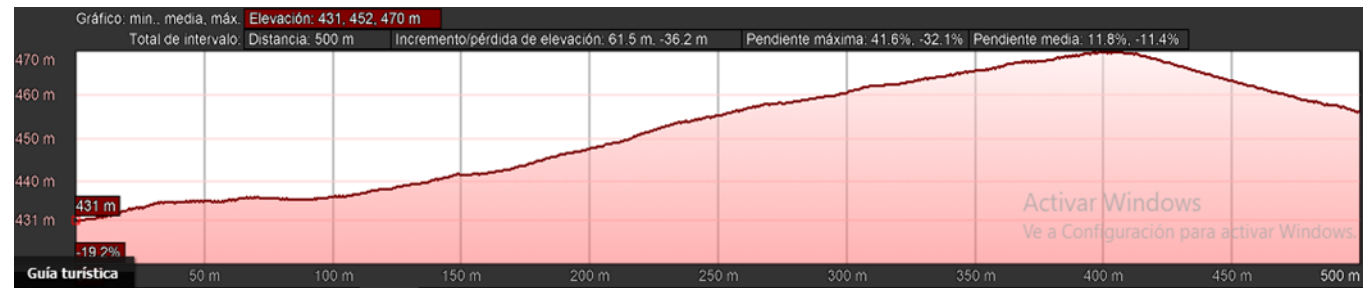


Figura 8. Perfil de elevación acceso margen derecha. Fuente: Google Earth

El tramo de acceso a la margen izquierda tiene una longitud aproximadamente de 1700 metros, tratándose de la carretera NA-7171. Esta tiene una anchura de 7 metros y se encuentra pavimentada en su totalidad a excepción de la zona de acceso al estribo izquierdo. Al igual que en el anterior caso, el tramo presenta fuertes pendientes y curvas cerradas. La pendiente máxima es de 26,3% y una media de 8,2%, como se puede ver en la siguiente figura.



Figura 9. Perfil de elevación acceso margen izquierda. Fuente: Google Earth

Tanto en el primer y segundo sector, las actuaciones necesarias para permitir el acceso serían mínimas, ya que la anchura de la pista permite el acceso con vehículos todoterrenos y camiones para trasladar los materiales y equipos necesarios.

En la margen izquierda, habría que modificar la entrada en la zona de actuación puesto que no existe carretera como tal, sino más bien una zona no asfaltada con una anchura alrededor de los 3,5 metros, con lo cual dificultaría el acceso de la maquinaria.

Los transportes de los materiales se llevarán a cabo mediante camiones, que no superarán una anchura de 3,5 metros y, si en algún caso superan esta anchura, serán acompañados de un equipo especial para no producir ningún problema en la circulación que transcurre por la carretera NA-7171.

3. MODELIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN

3.1 PROGRAMA DE CÁLCULO Y PROCEDIMIENTO

Una vez establecidas las características y el modo de ejecución de las inyecciones, se procede a comprobar la efectividad de la solución mediante el software comercial de elementos finitos RS², de la firma ROCSCIENCE. Este programa permite el análisis de las filtraciones de agua subterránea empleando el método de los elementos finitos, pudiéndose determinar las presiones de agua, así como el flujo a través de una sección determinada y el gradiente, en función de las condiciones de contorno hidráulico y la conductividad hidráulica del material.

Para modelizar la solución, se debe configurar el programa en modo *Steady State* (Estado estacionario) e introducir dos *Stages* (Etapas) diferenciadas. En la primera etapa se realiza el cálculo para el modelo sin incluir la actuación propuesta, y en la segunda, se dispone la pantalla de inyección a fin de determinar su efectividad en términos de reducción de flujo en la sección de salida.

El análisis se ha realizado en dos secciones, P-1 y P-2, las cuales, como muestra la imagen siguiente, cortan a la pantalla de inyecciones y pasan por los puntos de salida de agua mencionados anteriormente:



Figura 10. Secciones de cálculo para el modelo. Fuente: Propia

La primera de las secciones (P-1) muestra un corte en el cual la totalidad del material que se atraviesa es la U.G. 2 (Margas yesosas), mientras que la segunda sección (P-2) atraviesa las U.G. 2 y 4 (Calizas). Puesto que no se conoce el valor de la permeabilidad de los materiales atravesados, ésta se ha obtenido mediante la calibración del modelo a partir de los datos existentes: niveles de agua, caudal de salida y sección atravesada.

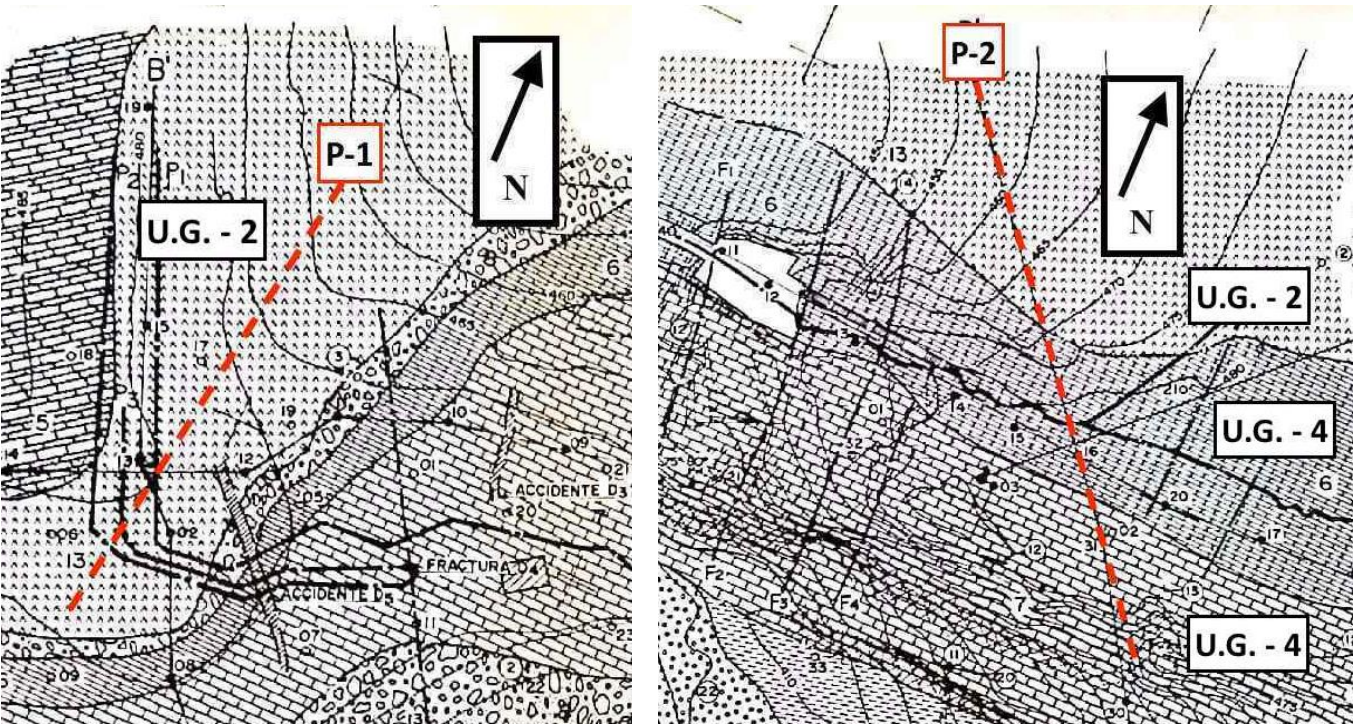


Figura 11. Materiales atravesados por las secciones de cálculo. Fuente: Mapa geológico local

Se ha comenzado definiendo la sección P-1 y, puesto que se conoce el valor del nivel de agua en el embalse para nivel máximo normal (468 msnm) y el caudal total en el punto de salida (12 l/s), se ha ido calibrando el modelo con distintos valores de permeabilidad hasta obtener un caudal resultante de salida similar al que se registra en los caudalímetros.

Conocida la permeabilidad de la U.G. 2, se ha procedido a realizar el mismo proceso para obtener la permeabilidad de la U.G. 4 hasta obtener un caudal de salida igual o similar al registrado, el cual es de 2 l/s en este caso.

Una vez finalizado este proceso en el primero de los Stages y conocidas las permeabilidades, se puede introducir la pantalla de inyecciones en ambas secciones en el segundo Stage a fin de conocer la efectividad de la solución.

3.2 OBTENCIÓN DE LAS PERMEABILIDADES DE LOS MATERIALES

Tal y como se ha comentado anteriormente, se ha comenzado el análisis calibrando el modelo a fin de que la permeabilidad de los materiales dé como resultado el caudal de salida conocido.

Se ha definido la geometría sección P-1 en el programa, así como la diferenciación de materiales presentes en la misma. Puesto que sólo encontramos la UG-2 en esta sección, no ha sido necesario dividirla por materiales.

Una vez definida la geometría, se debe proceder al mallado del modelo. En este caso se decidió llevar a cabo el mallado mediante triángulos de 6 nodos, con un total de 200 nodos.

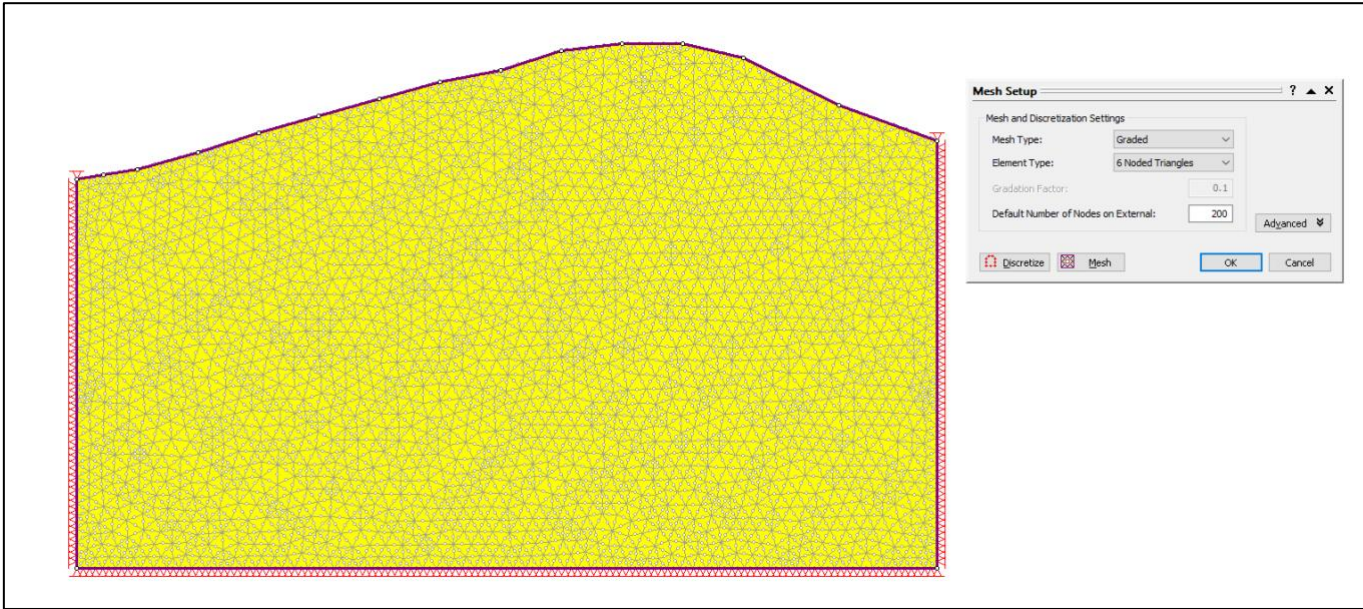


Figura 12. Geometría y mallado de la sección P-1. Fuente: RS2

El siguiente paso es definir las condiciones de contorno hidráulicas. Para ello, el programa dispone de varias opciones a la hora de establecer estas condiciones, tal y como se muestra en la siguiente figura:

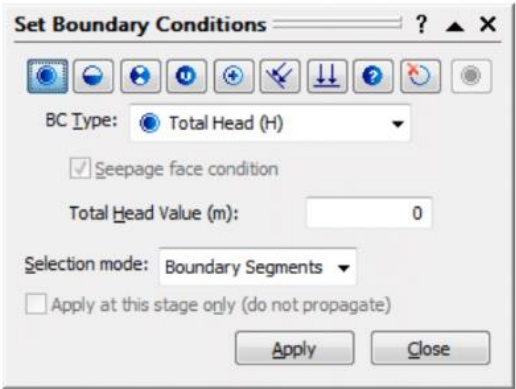


Figura 13. Condiciones de contorno hidráulicas en RS2. Fuente: RS2

Los dos modelos, tanto para la margen derecha como el de la margen izquierda siguen el mismo patrón respecto a estas condiciones de contorno hidráulicas. En primer lugar, para definir la altura piezométrica en cada zona de la sección se emplea la condición *Total Head*, tal y como se muestra en la Figura 13. El valor a establecer tanto en el límite derecho de la sección como en la zona de la ladera aguas arriba es de 468 metros (valor correspondiente al Nivel Máximo Normal en el embalse), mientras que en el límite izquierdo el valor a establecer es de 420 metros, de modo que el nivel de altura piezométrica queda definido justo en la superficie del macizo, zona en la que se producen las salidas de flujo de caudal igual a 12 l/s.

Por consiguiente, en la parte superior de la sección, que pertenece a la parte superior de la ladera se ha definido la condición de contorno existente como “información desconocida”, puesto que no se sabe con exactitud qué condiciones existen.

En la siguiente figura se muestran las condiciones aplicadas al modelo (468 metros en la zona derecha y 420 metros en la zona izquierda por la que sale el flujo de agua hacia el exterior):

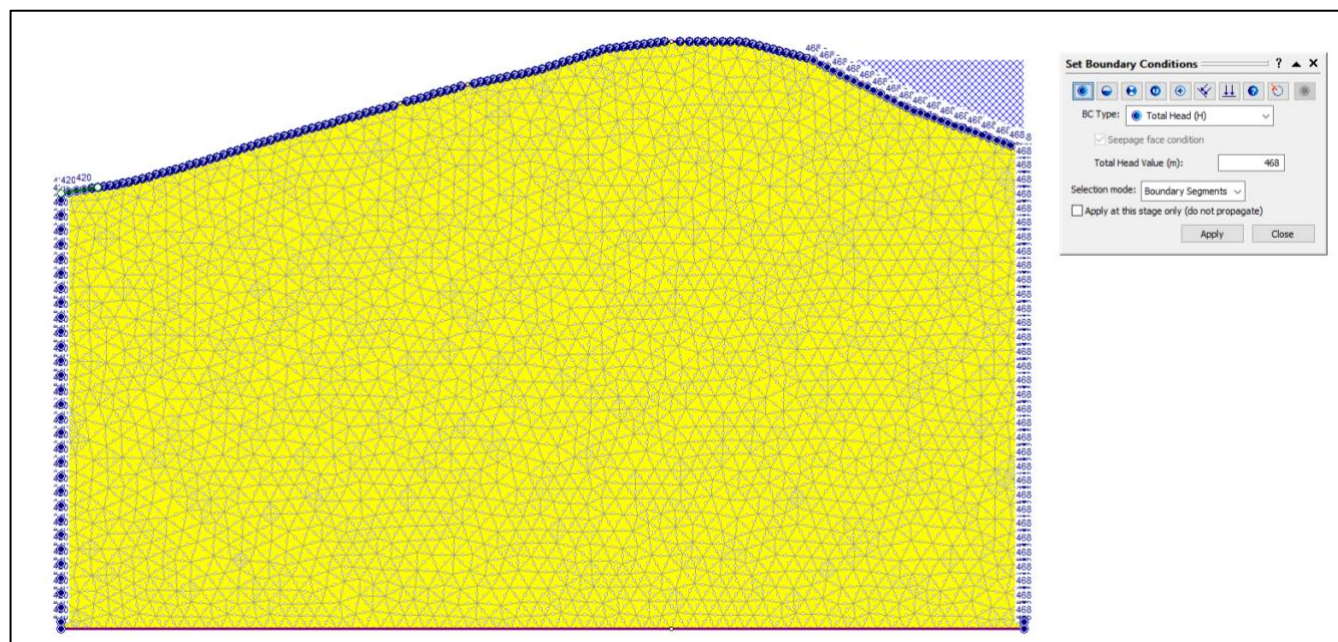


Figura 14. Condiciones de contorno hidráulicas de la sección P-1. Fuente: RS2

Finalmente, se deben establecer las secciones de control de flujo, las cuales aparecerán indicadas en verde y con flechas indicando la dirección del flujo. Estas se situarán tanto en la zona de salida de las filtraciones al exterior como en la zona del vaso, tal y como aparece indicado en las sucesivas figuras.

Una vez preparado el modelo, se ha calibrado probando varios valores de permeabilidad para el material hasta obtener un caudal de salida igual o muy similar a 0,012 m³/s. Tras llevar a cabo este proceso, el valor de permeabilidad (K) asociado a la UG-2 ha sido igual a 0,0067 m/s. Con este valor se ha alcanzado un caudal de salida igual a 0,00117 m³/s. Además, se puede observar en la Figura 15 que

el caudal que se infiltra desde el vaso es igual a 0,073 m³/s, el cual se comparará con el existente una vez ejecutada la solución.

En la siguiente imagen se muestra el resultado, donde se pueden ver las equipotenciales junto con las líneas de corriente a través del macizo, así como los caudales a través de las secciones de control establecidas:

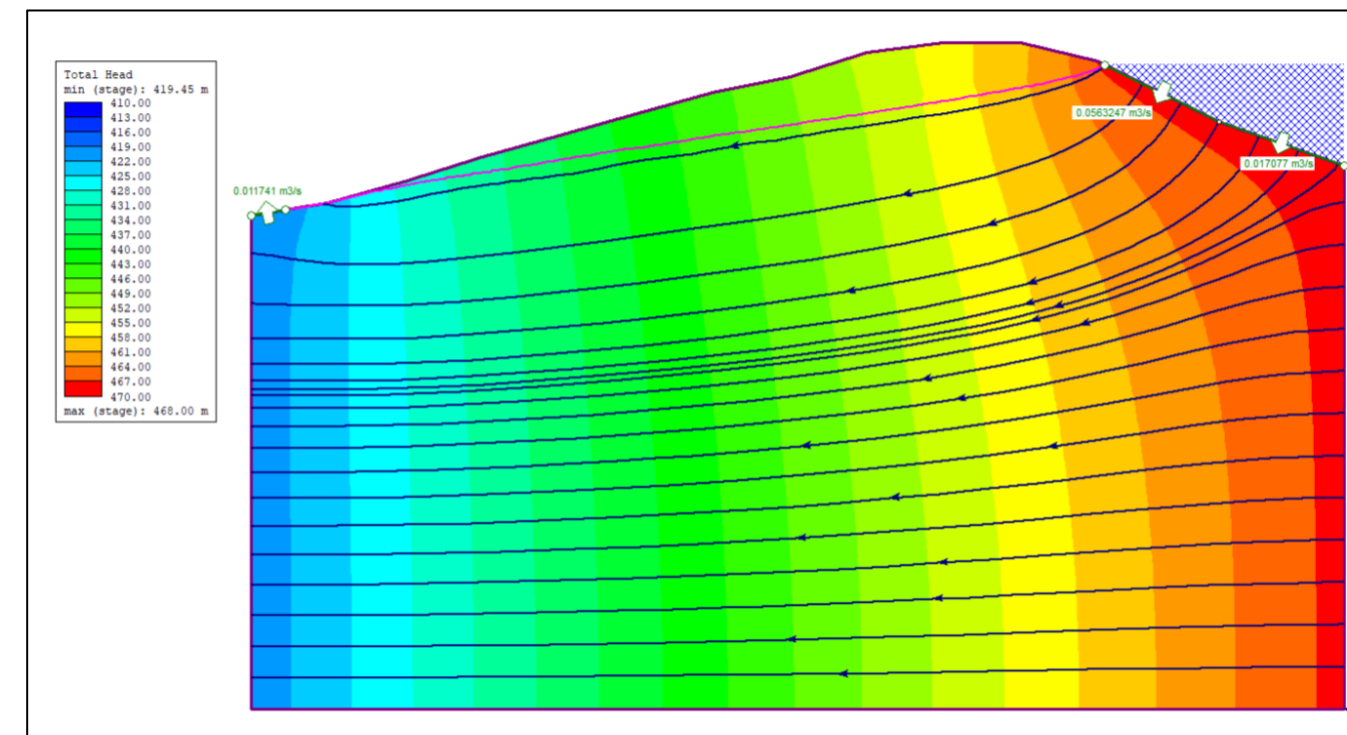


Figura 15. Flujo resultante en P-1 sin realizar actuación. Fuente: RS2

Conocida la permeabilidad de la UG-2, se procedió a definir la geometría de la sección P-2 a fin de obtener la permeabilidad de la UG-4. Siguiendo el mismo proceso que para la sección P-1, se empleó el mismo mallado para el modelo (triángulos de 6 nodos con un total de 200 nodos) y se definieron las condiciones de contorno hidráulicas, tal y como se muestra en la Figura 16.

Esta vez, las condiciones de contorno hidráulicas fueron las mismas que para el perfil anterior, a diferencia que en el límite izquierdo del mismo se estableció la altura piezométrica a un nivel de 440 metros de altura, debido a que es en esta zona en la que se producen las fugas de caudal iguales a 2 l/s. Tanto en el límite derecho como en la zona la ladera aguas arriba se vuelve a establecer una altura de 468 metros, mientras que en el resto de la parte superior se establecen condiciones desconocidas de nuevo.

En este caso, se definieron dos materiales distintos (UG-2 y UG-4), introduciendo para UG-2 la permeabilidad ya conocida de 0,0067 m/s y dejando como variable la permeabilidad de UG-4.

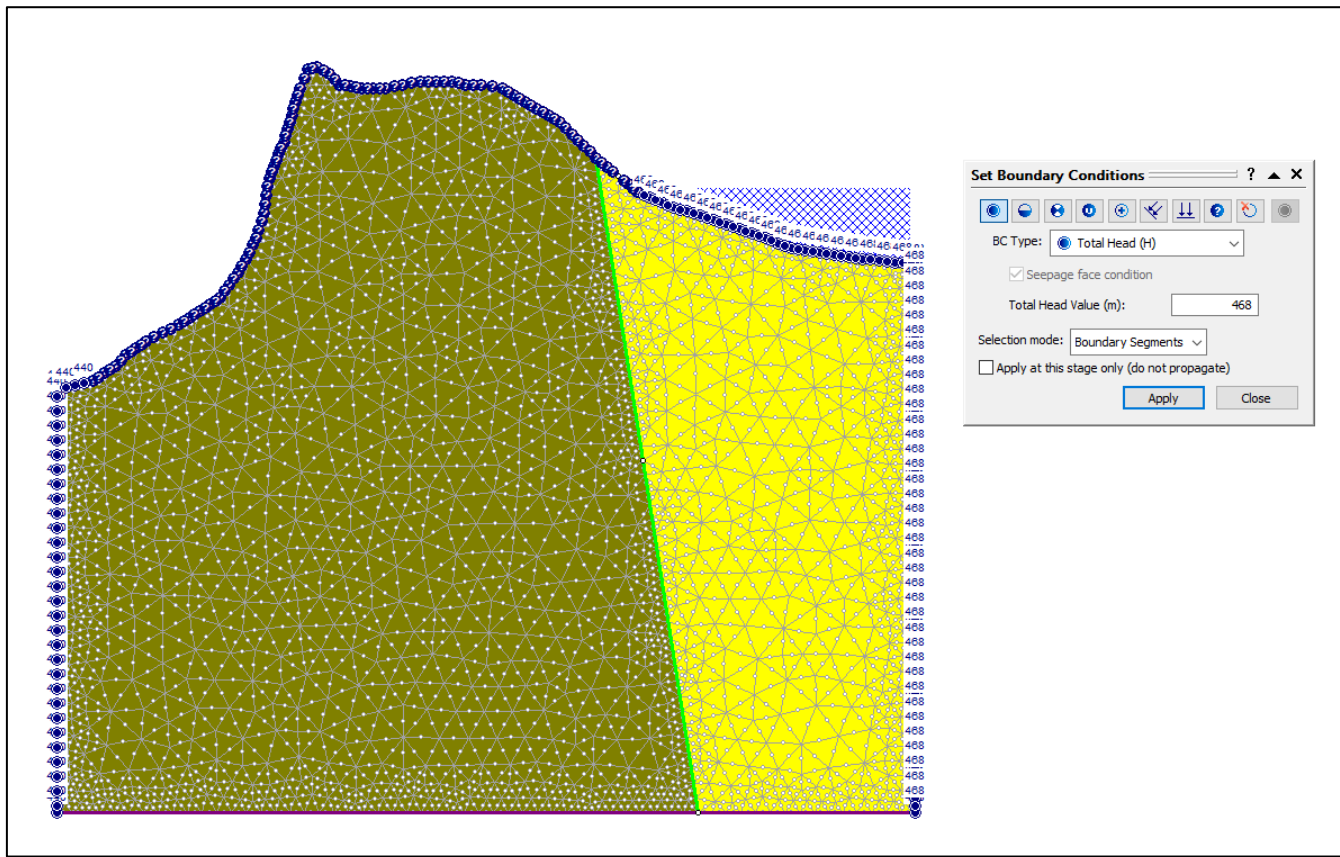


Figura 16. Geometría, mallado y condiciones de contorno de la sección P-2. Fuente:RS2

Probando con varios valores de permeabilidad hasta obtener un caudal de salida igual a 0,002 m³/s, se asocia a la UG-4 una permeabilidad de 0,001 m/s. Como se puede observar, esta es una permeabilidad inferior a la de la UG-2, debido a que las mayores discontinuidades se encontraban en ésta al estar formada por margas yesíferas con mayores oquedades en su estructura interna.

Además, igual que para el perfil P-1, se ha establecido también una sección de control de flujo justo en el vaso del embalse a fin de conocer el caudal que se infiltra a través de este y, así, poder compararlo con el infiltrado una vez ejecutada la solución. Tenemos en este caso, que se infiltra un caudal igual a 0,012 m³/s.

En la siguiente imagen se muestra el resultado del flujo a través de este segundo perfil, donde aparecen reflejadas las líneas de corriente, las líneas equipotenciales y los caudales a través de las secciones de control:

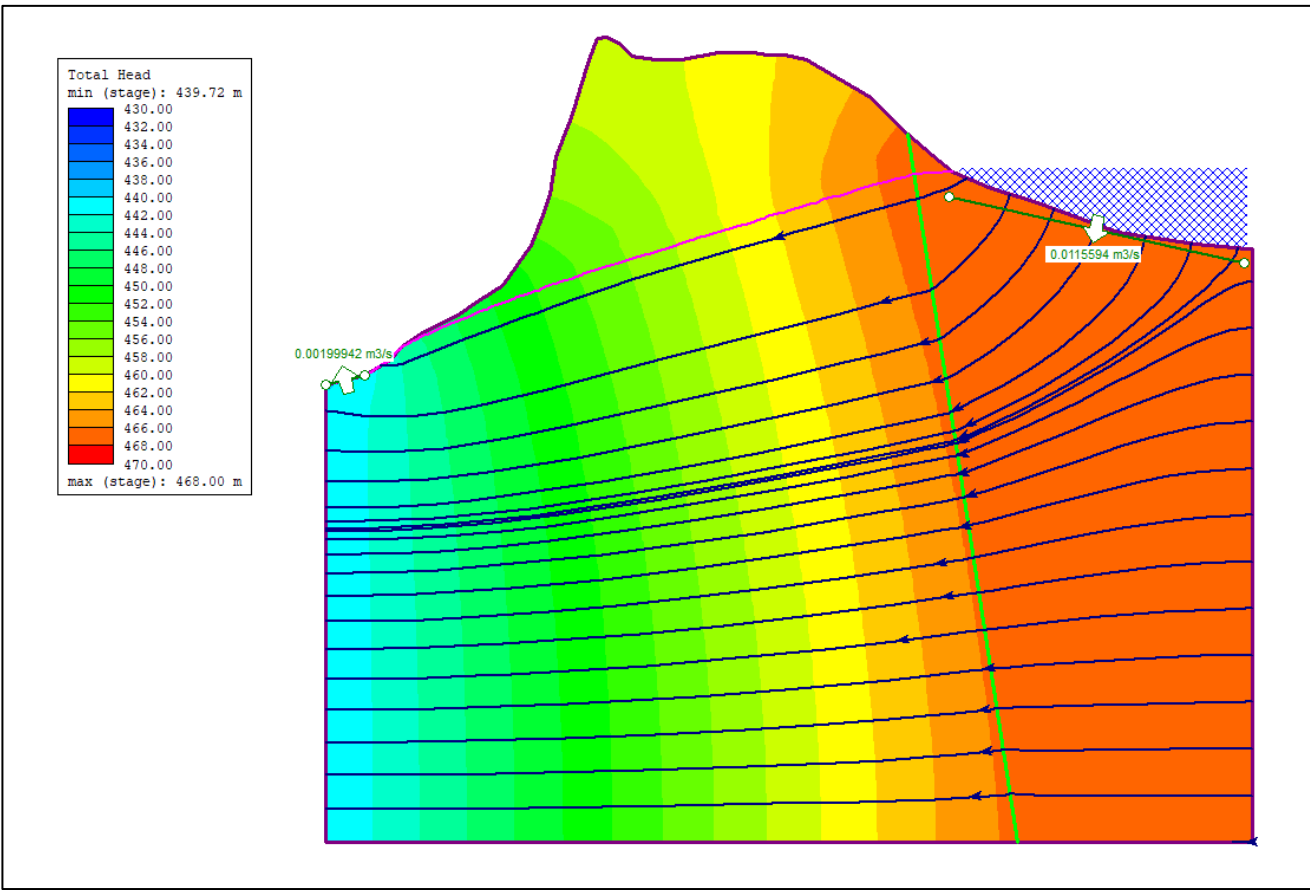


Figura 17. Flujo resultante en P-2 sin realizar actuación. Fuente:RS2

Finalmente, se muestran recogidas en la siguiente tabla los resultados obtenidos en el presente sub-apartado:

Unidad Geotécnica	K (m/s)
UG-2	0,0067
UG-4	0,0010

Tabla 6. Permeabilidad de los materiales. Fuente: Propia

3.3 FLUJO RESULTANTE CON LA PANTALLA EJECUTADA

Una vez definida la geometría y las condiciones de contorno en el primer *Stage* del modelo, y conocida la permeabilidad de cada uno de los materiales, se procede a colocar la pantalla de inyección en el segundo *Stage*. Para ello, se emplea la función del programa llamada *Structural Interface*, la cual permite incluir en el modelo una estructura lineal que sirve como barrera impermeable frente al paso de flujo.

Además, cabe destacar que las condiciones de contorno hidráulicas se han mantenido para este segundo Stage, así como la geometría de los perfiles y las propiedades hidráulicas de los materiales atravesados, siendo la única modificación realizada con respecto al primer Stage es la inclusión de la barrera impermeable representativa de la pantalla a ejecutar.

A continuación, se muestran a modo de recopilación las características que se han empleado en los modelos:

- Permeabilidad (K) de la UG-2: 0,0067 m/s
- Permeabilidad (K) de la UG-4: 0,0010 m/s
- Cota embalse a NMN: 468 msnm
- Caudal salida en sección P-1: 0,012 m³/s
- Caudal salida en sección P-2: 0,002 m³/s

De este modo, se puede proceder a la colocación de la pantalla en ambos perfiles para conocer la efectividad de la solución. La pantalla deberá alcanzar una profundidad de 60 metros desde la superficie del terreno y ésta tendrá una inclinación igual a 60° en dirección al embalse, tal y como se muestra en las Figuras 18 y 19.

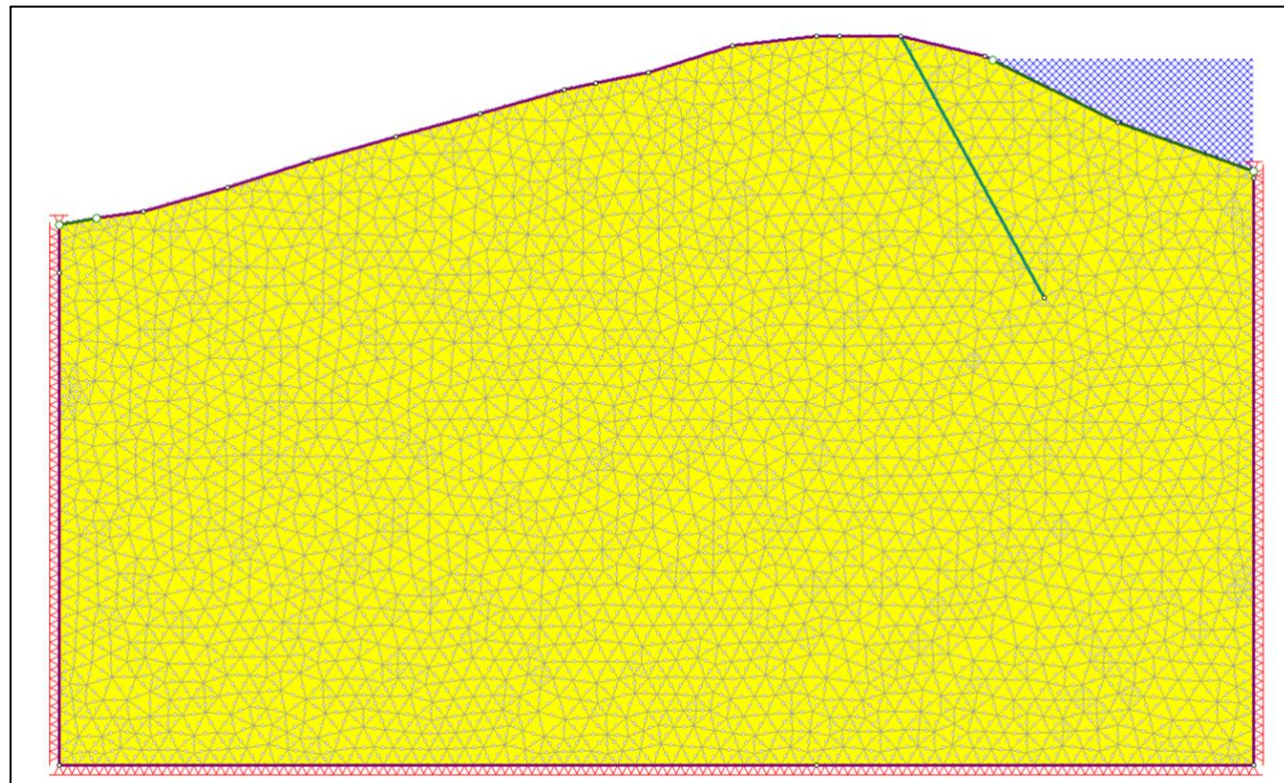


Figura 18. Colocación de la pantalla en P-1. Fuente: RS2

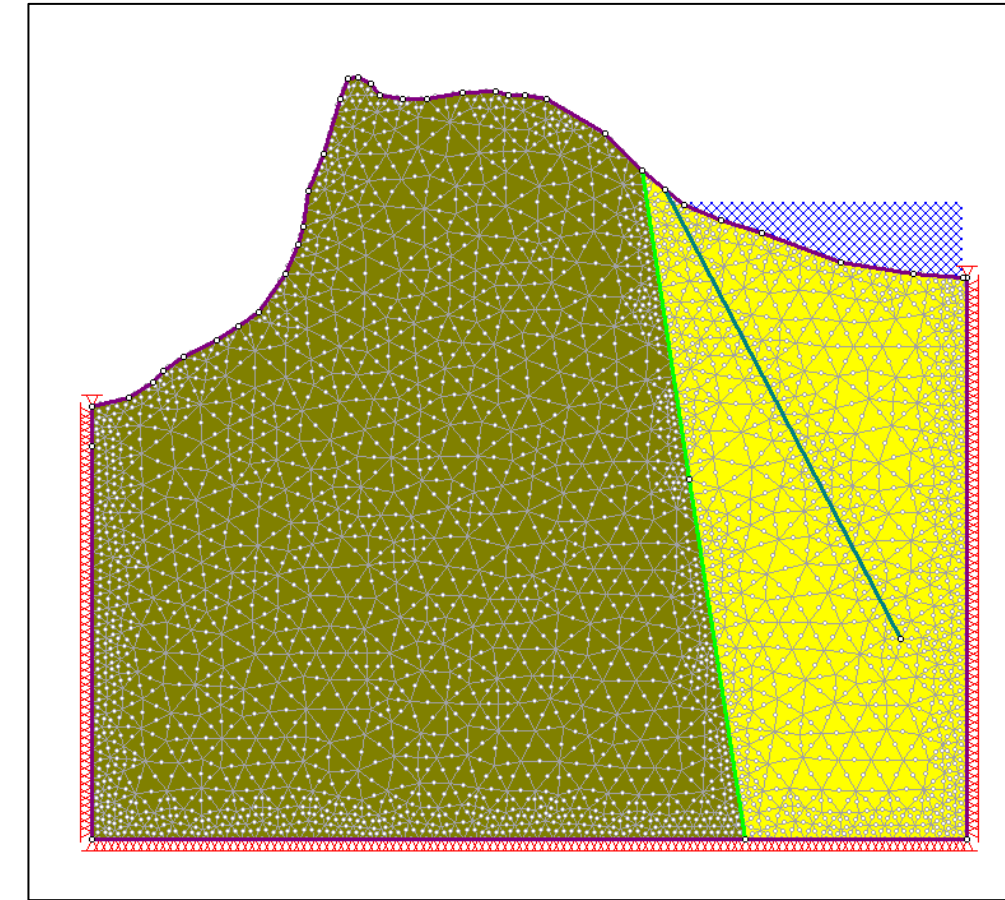


Figura 19. Colocación de la pantalla en P-2. Fuente: RS2

3.3.1 Sección P-1

Comenzamos con el perfil de la margen derecha (P-1), el cual presentaba una pérdida de caudal de 0,012 m³/s por el punto de salida. La infiltración total desde el talud del embalse a través del macizo era igual a 0,073 m³/s antes de realizar la pantalla, tal y como se muestra en las Figuras 15 y 20.

En la Figura 15 se observan las líneas equipotenciales junto con las líneas de flujo, las cuales discurren perpendicularmente a las primeras. Se tiene un potencial máximo de 468 metros, correspondiente el nivel de agua en el embalse, mientras que el potencial mínimo en la sección es igual a 419,45 metros.

Por otra parte, la figura 20 muestra las presiones efectivas, alcanzándose un máximo de 2,05 MPa en la zona más baja de la columna de agua justo debajo del agua embalsada a la cota 468.

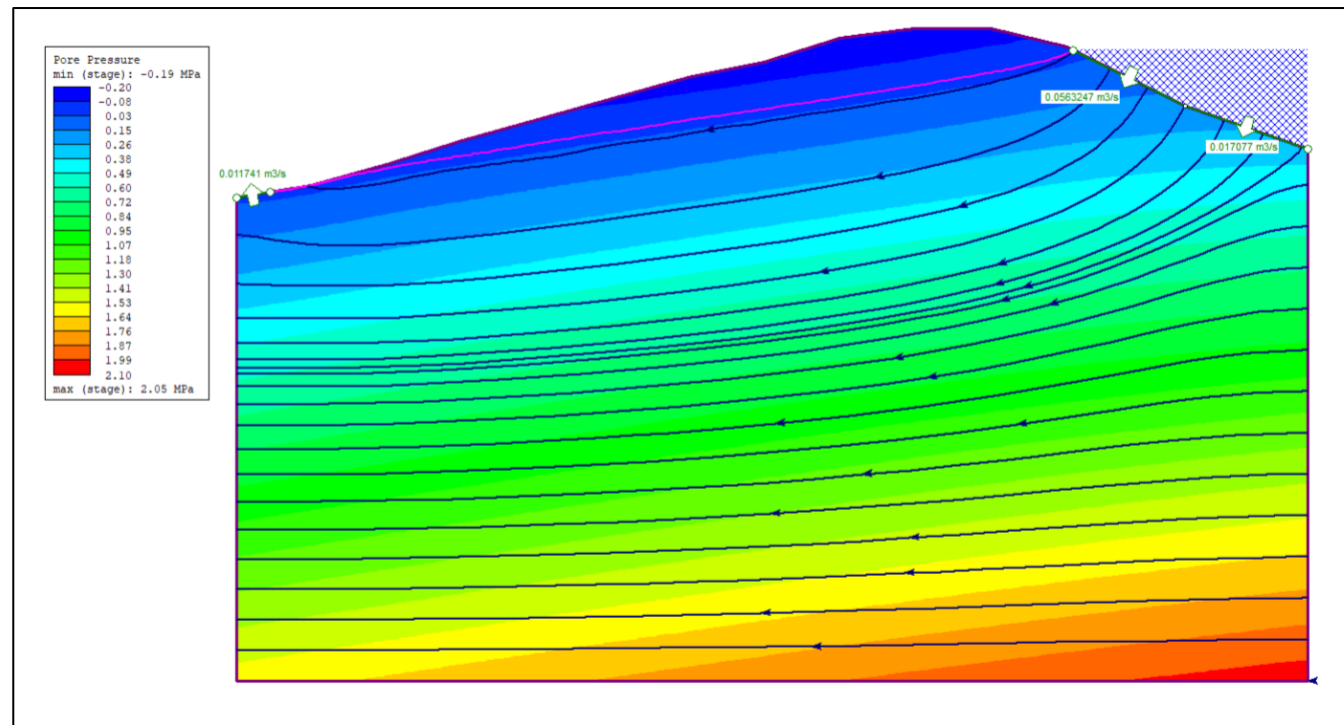


Figura 20. Líneas de corriente y presiones efectivas en P-1 sin realizar actuación. Fuente: RS2

Una vez ejecutada la pantalla con una inclinación de 60° y a una profundidad medida en vertical desde el punto más alto de la superficie de 60 metros, se observa que se elimina el punto de salida de agua anterior reconduciéndose las líneas de corriente hacia el nivel freático original del terreno, marcado con una línea en color magenta en el modelo. También cabe destacar que la infiltración de agua a través del embalse se ha reducido de 0,073 m³/s hasta 0,035 m³/s, por lo que ésta ha disminuido en más de la mitad de su valor.

En las siguientes figuras se muestran las equipotenciales junto con las líneas de corriente, así como las presiones efectivas existentes en el terreno. El mínimo potencial hidráulico se encuentra en 404 metros en este caso, habiéndose reducido en un total de 15,45 metros, mientras que las presiones efectivas se han mantenido, observando un ligero aumento de las mismas aguas arriba de la pantalla. Además, se puede comprobar como todas las líneas de corriente discurren por la parte inferior de la pantalla ejecutada subiendo en este caso hacia el nivel freático debido a la diferencia de potencial existente.

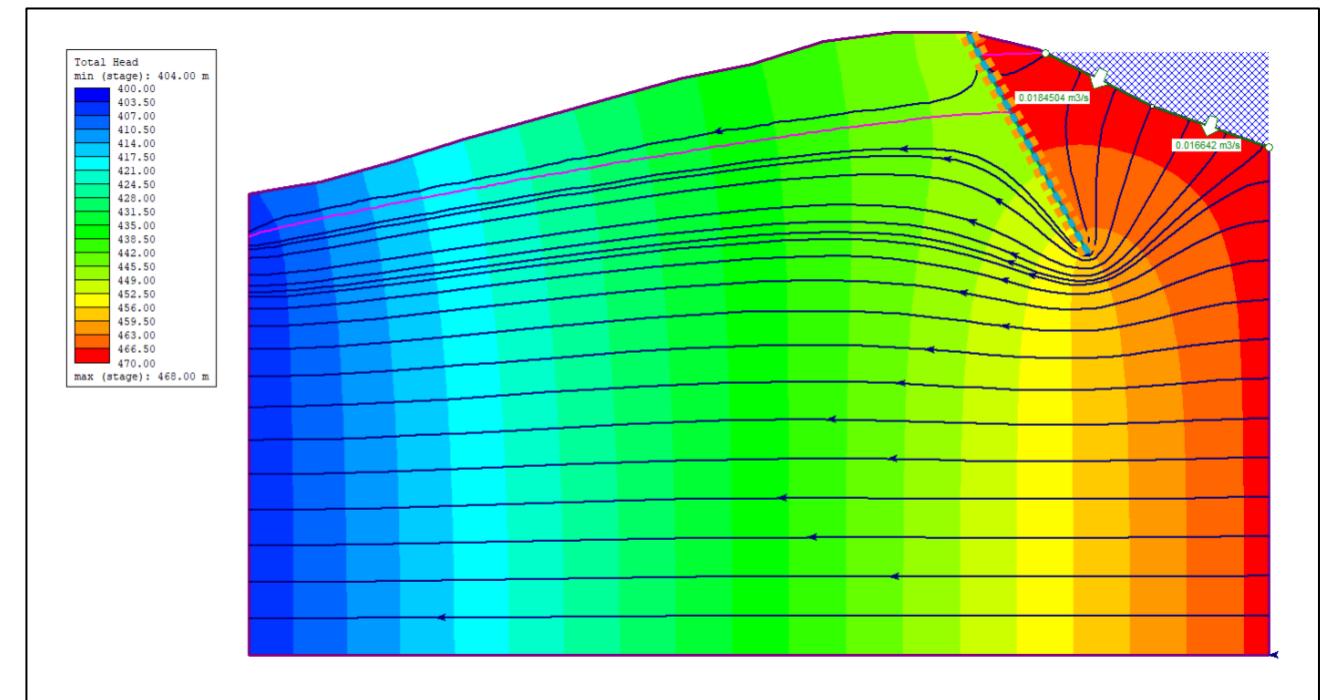


Figura 21. Líneas de corriente y equipotenciales en P-1 con la actuación realizada. Fuente: RS2

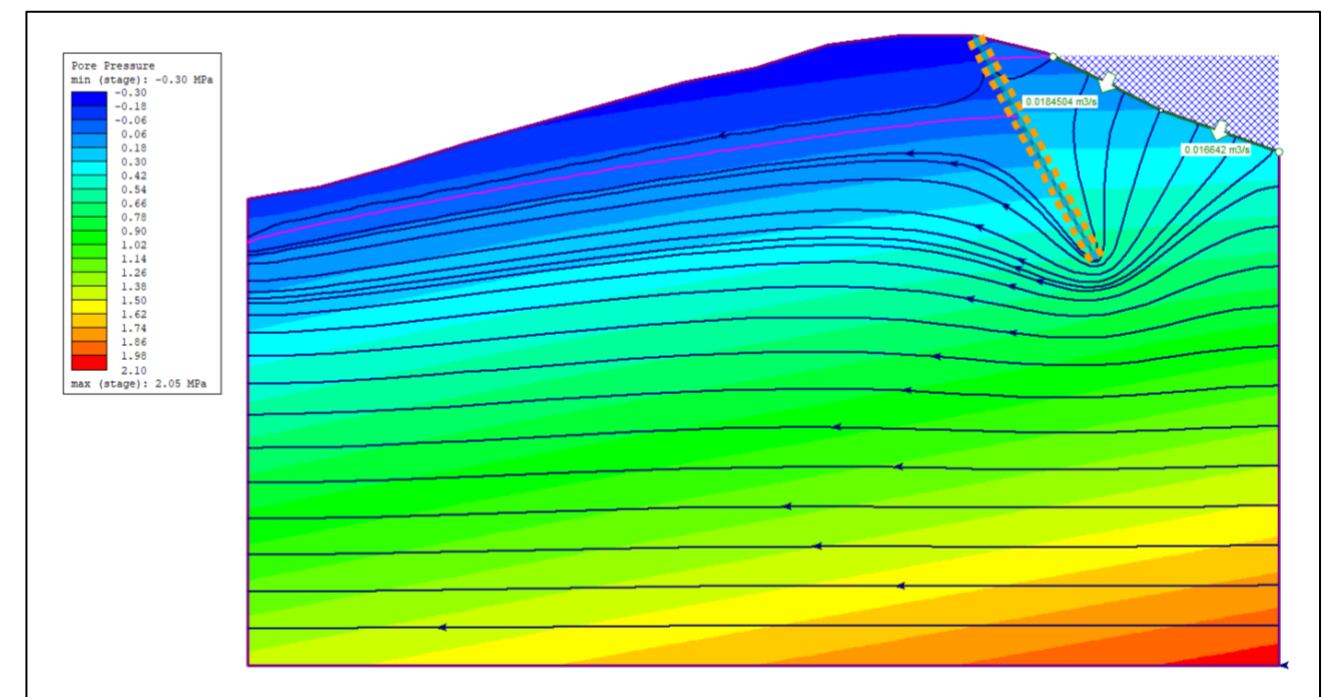


Figura 22. Líneas de corriente y presiones efectivas en P-1 con la actuación realizada. Fuente: RS2

3.3.2 Sección P-2

Una vez analizado el comportamiento del flujo a través del perfil P-1, se procede al análisis del segundo perfil. Previa construcción de la pantalla se registraba una pérdida de caudal por el punto de salida igual a $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$, así como una infiltración a través de la base del embalse igual a $0,012 \text{ m}^3/\text{s}$, tal y como se observa en las Figuras 17 y 23.

En primer lugar, observamos en la Figura 17 las líneas equipotenciales junto con las líneas de flujo, teniéndose un potencial máximo de 468 metros, correspondiente al nivel de agua en el embalse y el cual abarca la totalidad de la UG-2, mientras que el potencial mínimo en la sección es igual a 419,45 metros.

A continuación, podemos observar en la siguiente figura las presiones efectivas registradas, las cuales aumentarán ligeramente aguas arriba de la pantalla, tal y como se mostrará más adelante.

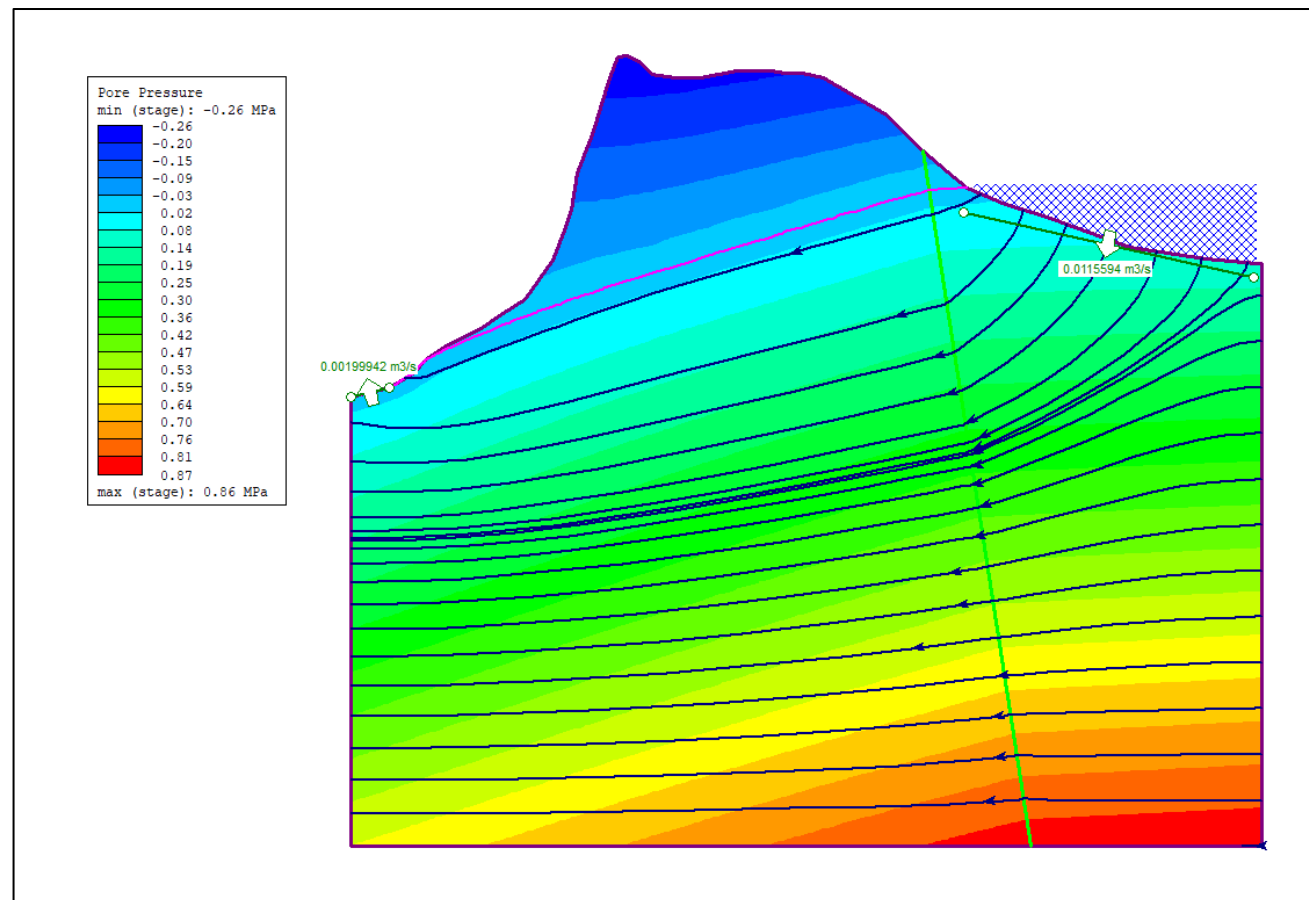


Figura 23. Líneas de corriente y presiones efectivas en P-2 sin realizar actuación. Fuente: RS2

Una vez estudiada la situación previa a la construcción de la pantalla, se procede a comparar con los valores obtenidos tras la ejecución de la pantalla, la cual presenta la misma inclinación y profundidad media que para el anterior perfil. Con la pantalla de inyecciones se ha reconducido el flujo hacia el nivel freático original, del mismo modo que en el caso anterior y la infiltración a través del macizo, cuyo valor antes de la solución era de $0,012 \text{ m}^3/\text{s}$, se ha reducido hasta un valor prácticamente insignificante igual a $0,0002 \text{ m}^3/\text{s}$.

A continuación, se muestran los resultados del modelo, donde se puede observar como el mínimo potencial ha disminuido en 5,72 metros hasta un valor de 434 metros, así como la nueva circulación de las líneas de corriente, las cuales se concentran en su mayor parte junto a la línea del nivel freático.

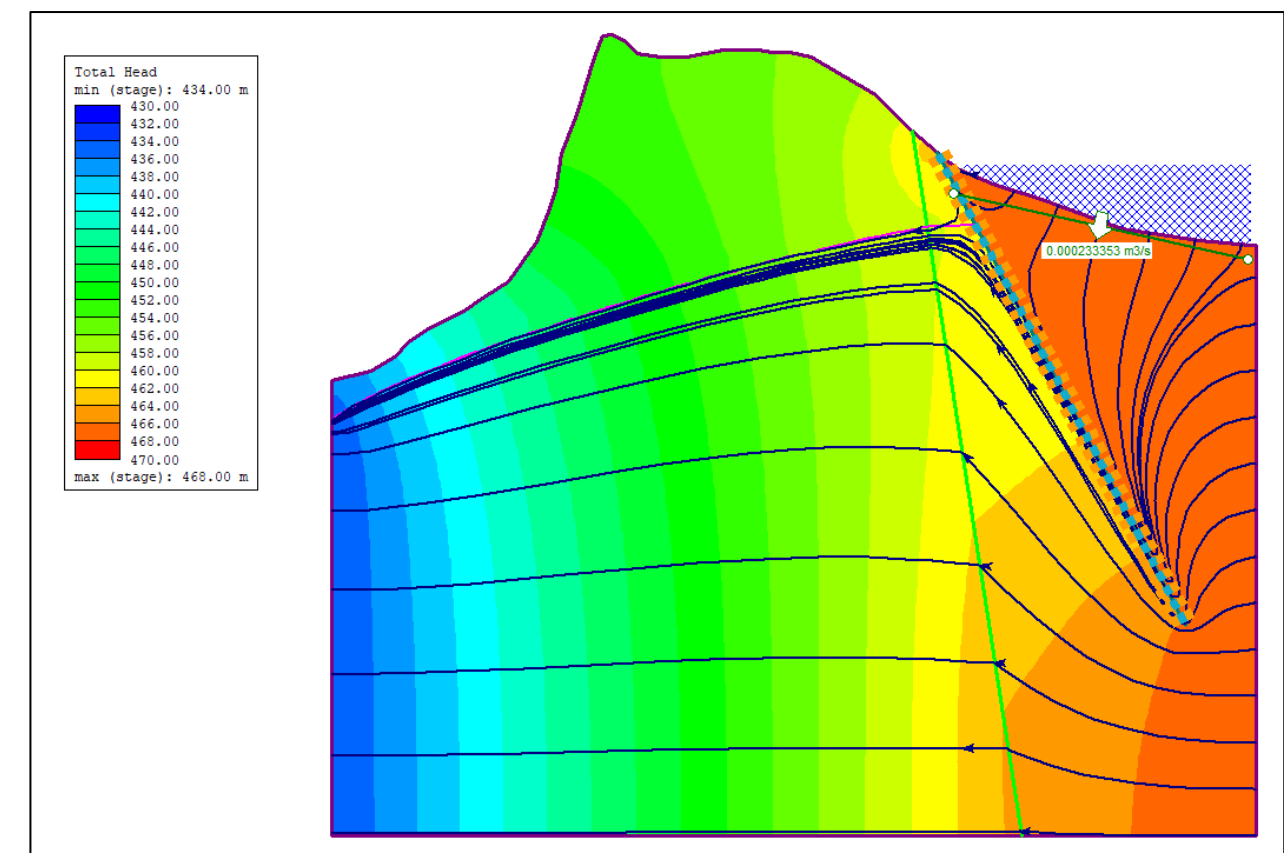


Figura 24. Líneas de corriente y equipotenciales en P-2 con la actuación realizada. Fuente: RS2

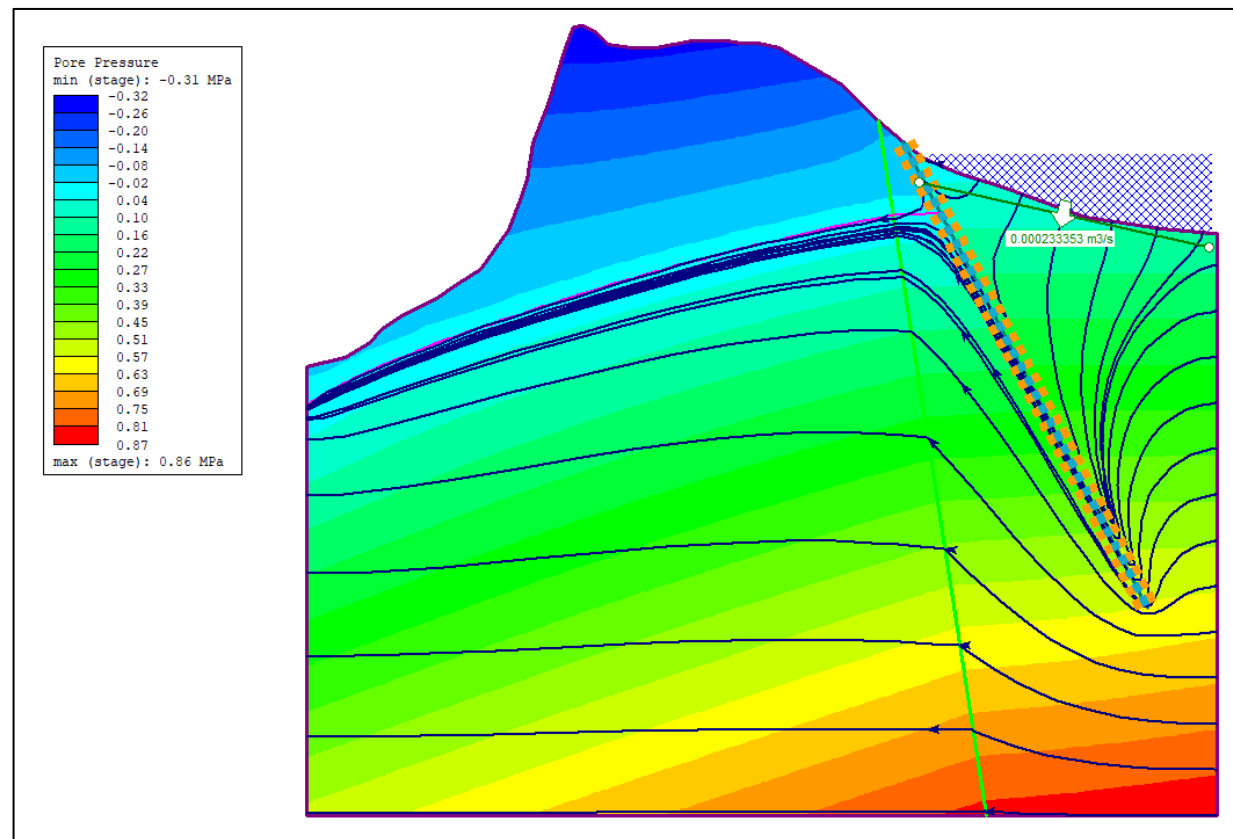


Figura 25. Líneas de corriente y presiones efectivas en P-2 con la actuación realizada. Fuente: RS2

4. CONCLUSIONES

Con el fin de resolver las filtraciones en la cerrada de la presa de Allos, se ha optado por realizar una pantalla de inyecciones en dos fases diferenciadas: una primera fase mediante una mezcla estable de cemento, arcilla, agua y arena, y una segunda, mediante mezcla inestable de lechada de cemento. Los taladros de la primera fase quedan separados en un total de 10 metros, mientras que los de la segunda fase se encuentran entre estos primeros a fin de rellenar fisuras más finas en el terreno, de modo que se tiene una separación media final entre taladros de unos 5 metros aproximadamente.

La inyección se realizará mediante fases descendentes en tramos de 10 metros con una presión de inyección de 0,8 MPa y el equipo de auscultación y control se encontrará activo durante todo el proceso a fin de corregir los parámetros que sean necesarios.

Tras plantear las características que poseerá la solución, se ha llevado a cabo la modelización del comportamiento del flujo antes y después de ejecutar la pantalla a fin de comprobar el grado de efectividad que ha tenido la misma. Para ello se ha empleado el programa de elementos finitos RS², con el que se ha analizado el flujo en dos perfiles secantes a la pantalla ejecutada.

Una vez analizado el comportamiento del flujo antes y después de realizar la actuación se puede observar como la problemática de las salidas de caudal al exterior se ha eliminado al realizar la pantalla de inyecciones a la profundidad de 60 metros y con una inclinación de 60° que obliga a la incidencia cuasi perpendicular de gran parte de las líneas de corriente existentes.

Por otra parte, la infiltración a través del vaso del embalse se ha eliminado prácticamente en su totalidad en la zona de la margen izquierda, mientras que en la margen derecha el volumen de pérdidas se ha reducido a más de la mitad. Llevando a cabo una pantalla de mayor profundidad y con una mayor inclinación se hubiese disminuido todavía más este valor de pérdidas, aunque en una proporción más baja, puesto que el óptimo en cuanto a profundidad-efectividad se encontraba alrededor de los 60 metros tras ejecutar varias disposiciones con el modelo. Además, el hecho de situar la pantalla lo más cerca posible de la línea del embalse provoca una caída de gradiente hidráulico más rápida y, por tanto, la velocidad del flujo a través del macizo es inferior, reduciendo así la erosión a través de las fisuras y el posible ensanchamiento de las mismas.

En la siguiente tabla aparecen, a modo de resumen, los caudales y volúmenes registrados tanto de forma previa a la actuación como después de realizarla:

		Caudal por el punto de salida al exterior (l/s)	Caudal infiltrado por el vaso del embalse (l/s)	Volumen total de agua perdido en un día (m³)
P-1	Antes de la actuación	12	73	6307,2
	Después de la actuación	Nulo	35	3024
P-2	Antes de la actuación	2	12	1036,8
	Después de la actuación	Nulo	0,2	17,28

Tabla 7. Caudales y volúmenes registrados antes y después de la actuación. Fuente: Propia

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Las fuentes de información o referencias empleadas para la redacción de este anejo son las mencionadas a continuación:

- 1) BIELZA, A. (1999). *Manual de técnicas de mejora del terreno*. Editorial Entorno Gráfico.
- 2) CABEMFORT, H. (1968). *Inyección de suelos*. Editorial Omega.
- 3) UNE-EN 12715 (2001). *Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Inyecciones*. AENOR.
- 4) SECRETARÍA DE ESTADO DE PLANIFICACIÓN E INFRAESTRUCTURAS (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. Ministerio de Fomento.
- 5) SECRETARÍA DE ESTADO DE PLANIFICACIÓN E INFRAESTRUCTURAS (2013). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)*. Ministerio de Fomento.
- 6) GONZÁLEZ, F.; YEPES, V.; MARTÍ, J. V. (2009). *Temas de procedimientos de construcción: Mejora de terrenos*. Universidad Politécnica de Valencia.
- 7) SANZ, J. M. (1981). *Procedimientos generales de construcción: Sondeos y perforaciones, inyecciones, pilotes, pantallas continuas*. Universidad Politécnica de Madrid.
- 8) GIORDANO, P. (2008). *Tratamiento de fundaciones. Inyecciones*. Universidad Nacional de la Plata.
- 9) OWEN, E. P.; (2017). *Engineering and design. Grouting technology*. US Army Corps of Engineers.
- 10) DAVIS, S. N. (1966). *Hidrogeology*. Editorial John Wiley & Sons.
- 11) LÓPEZ, C.; BUSTILLO, M.; REVUELTA, M.; (2001). *Manual de sondeos. Aplicaciones*. Universidad Politécnica de Madrid.
- 12) ORTÍZ, E. (2012). *Procedimiento constructivo para realizar inyecciones en macizos rocosos: Caso de estudio proyecto hidroeléctrico La Yesca*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 13) ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE LA TECNOLOGÍA DEL SUELO Y DEL SUBSUELO (2004). *Mejora del terreno mediante inyecciones y jet-grouting*. Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS, Madrid (España).

14) ROCSCIENCE INC. (2011). *RS². Groundwater verification manual*.

15) ROCSCIENCE INC. (2011). *RS². Finite element groundwater seepage*.

16) Web de la Confederación Hidrográfica del Ebro (1º consulta en abril de 2018). Disponible en:
<http://www.chebro.es>