



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS DE REDES DE FLUJO EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Autor

Roberto Grado Lucena

Director

Pedro Luis López Julián

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia
2015



**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

ANÁLISIS DE REDES DE FLUJO EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Autor: Roberto Grado Lucena

Director: Pedro Luis López Julián

Fecha: Julio 2015

AGRADECIMIENTOS

A todo el equipo de la Confederación Hidrográfica del Ebro, y, en especial, a René Gómez López de Muniain, por darme la oportunidad de conocer todo cuanto rodea al mundo de las presas.

A mi Director de TFG, Pedro Luis López Julián por su proximidad y apoyo en la supervisión de este trabajo.

Y finalmente, a mi familia, porque sin ellos todo esto nunca hubiese sido posible.

A todos ellos, muchas gracias.

INDICE DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	1
2.	ABSTRACT	2
3.	INTRODUCCIÓN	3
4.	OBJETIVOS DEL TFG	6
5.	PRESAS DE MATERIALES SUELTOS	7
5.1.	PRESAS DE MATERIALES SUELTOS HOMOGÉNEAS	11
5.2.	PRESAS DE MATERIALES SUELTOS DE NÚCLEO	14
5.3.	PRESAS DE MATERIALES SUELTOS DE PANTALLA	17
6.	FILTRACIONES EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS	19
6.1.	CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROGEOLOGÍA	19
6.1.1.	<i>Permeabilidad</i>	19
6.1.2.	<i>Ley de Darcy</i>	26
6.1.3.	<i>Ecuación de Laplace</i>	28
6.2.	MÉTODOS DE RESOLUCIÓN	29
6.2.1.	<i>Modelos físicos</i>	29
6.2.2.	<i>Métodos gráficos</i>	29
6.2.3.	<i>Métodos numéricos</i>	36
6.3.	PROBLEMÁTICA DE LA FILTRACIÓN	38
6.3.1.	<i>Filtración en el vaso del embalse</i>	38
6.3.2.	<i>Filtración en la cerrada</i>	39
6.4.	MEDIDAS DE AUSCULTACIÓN EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS PARA EL CONTROL DE FILTRACIONES	42
6.5.	MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACIÓN EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS PARA LA REDUCCIÓN DE FILTRACIONES	46
6.5.1.	<i>Pantallas de impermeabilización</i>	46
6.5.2.	<i>Zampeados de impermeabilización</i>	49
7.	SEEP/W	51
7.1.	FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA	53
7.1.1.	<i>Vista DEFINE</i>	53

INDICES

7.1.2.	<i>Análisis SOLVE</i>	57
7.1.3.	<i>Vista CONTOUR</i>	58
7.2.	ECUACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL INFILTRADO	60
7.2.1.	<i>Caudal infiltrado en presas de materiales sueltos homogéneas con dren horizontal</i>	61
7.2.2.	<i>Caudal infiltrado en presas de materiales sueltos homogéneas con dren chimenea</i>	78
7.3.	MODELIZACIÓN DE PRESAS DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO	97
7.3.1.	<i>Presa de materiales sueltos homogénea con dren chimenea. Presa Nº1</i>	97
7.3.2.	<i>Presa de materiales sueltos heterogénea con núcleo central. Presa Nº2</i>	102
7.3.3.	<i>Presa de materiales sueltos heterogénea con núcleo inclinado. Presa Nº3</i>	107
8.	CONCLUSIONES	111
8.1.	CONSECUCCIÓN DE LOS OBJETIVOS	111
8.2.	CONCLUSIONES GENERALES	112
8.3.	TRABAJOS FUTUROS	114
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 5.1. Clasificación de las presas de materiales sueltos (10)</i>	7
<i>Figura 5.2. Clasificación de las presas de materiales sueltos según naturaleza materiales: tierra (izquierda) y escollera (derecha).</i>	8
<i>Figura 5.3. Clasificación de las presas de materiales sueltos según elemento impermeabilizador (10)</i>	8
<i>Figura 5.4. Aliviadero</i>	9
<i>Figura 5.5. Desagüe de fondo</i>	9
<i>Figura 5.6. Toma de agua (izquierda) y cierre de desagües (derecha)</i>	10
<i>Figura 5.7. Drenaje insuficiente para presa de materiales sueltos homogénea (10)</i>	11
<i>Figura 5.8. Distintos elementos drenantes en presas de materiales sueltos homogéneas (6)</i>	13
<i>Figura 5.9. Sección tipo de presa de materiales suelos de núcleo (10)</i>	14
<i>Figura 5.10. Presa de materiales sueltos de núcleo central (a) e inclinado (b)</i>	15
<i>Figura 5.11 Disposición de los diferentes materiales empleados durante la construcción de presa de materiales sueltos de núcleo (9)</i>	16
<i>Figura 5.12. Paramentos aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha) de presa de materiales sueltos de pantalla</i>	17
<i>Figura 5.13. Distintos tipos de plinto (10)</i>	18
<i>Figura 6.1. Ensayo Lugeon (6)</i>	21
<i>Figura 6.2. Ensayo Lefranc (6)</i>	23
<i>Figura 6.3. Ley de Darcy (6)</i>	26
<i>Figura 6.4. Determinación de la línea de saturación según método de Casagrande $\alpha < 60^\circ$ (14)</i>	30
<i>Figura 6.5. Determinación de la línea de saturación según método de Casagrande $\alpha > 60^\circ$ (14)</i>	31
<i>Figura 6.6. Construcción de red de flujo</i>	33
<i>Figura 6.7. Red de flujo en presa de materiales sueltos (14)</i>	34
<i>Figura 6.8. Red de flujo a través de cuerpo de presa y cimentación en presa de materiales sueltos (14)</i>	35
<i>Figura 6.9. Sifonamiento (10)</i>	40
<i>Figura 6.10. Erosión interna (10)</i>	41
<i>Figura 6.11. Sufusión (10)</i>	41
<i>Figura 6.12. Piezómetro</i>	43
<i>Figura 6.13. Línea de saturación y línea piezométrica (14)</i>	43
<i>Figura 6.14. Medición manual en aforador</i>	45
<i>Figura 6.15. Medición automática en aforador</i>	45
<i>Figura 6.16. Influencia de una pantalla incompleta (14)</i>	48
<i>Figura 6.17. Influencia de un zampeado en la línea de saturación (18)</i>	49
<i>Figura 6.18. Reducción de filtraciones mediante pantalla de impermeabilización y zampeado (14)</i>	50
<i>Figura 7.1. Paquete de Geo-Slope</i>	51
<i>Figura 7.2. Geometría de presa de materiales sueltos con dren horizontal mediante puntos, líneas y regiones</i>	53

INDICES

<i>Figura 7.3. Funciones de conductividad hidráulica – succión (2)</i>	54
<i>Figura 7.4. Asignación de materiales en presa de materiales sueltos con dren horizontal</i>	55
<i>Figura 7.5. Pestaña de asignación de condiciones de contorno en SEEP/W</i>	55
<i>Figura 7.6. Condiciones de contorno en presa de materiales sueltos con dren horizontal</i>	56
<i>Figura 7.7. Malla generada en presa de materiales sueltos con dren horizontal</i>	57
<i>Figura 7.8. Secciones de control en presa de materiales sueltos con dren horizontal</i>	57
<i>Figura 7.9. Vista CONTOUR de presa de materiales sueltos con dren horizontal</i>	58
<i>Figura 7.10. Tabla de resultados de modelización en SEEP/W</i>	59
<i>Figura 7.11. Esquema para el dimensionamiento de la longitud del dren horizontal</i>	63
<i>Figura 7.12. Presa de materiales sueltos con dren horizontal modelizada en SEEP/W. Vista DEFINE</i>	67
<i>Figura 7.13. Presa de materiales sueltos con dren horizontal modelizada en SEEP/W. Vista CONTOUR</i>	68
<i>Figura 7.14. Mallado de 1 metro en presa de altura 10 metros y de altura 150 metros</i>	72
<i>Figura 7.15. Diseño del dren chimenea</i>	79
<i>Figura 7.16 Corrección de modelización de dren chimenea mediante boundary conditions</i>	80
<i>Figura 7.17. Presa de materiales sueltos con dren chimenea modelizada en SEEP/W. Vista DEFINE</i>	81
<i>Figura 7.18. Presa de materiales sueltos con dren chimenea modelizada en SEEP/W. Vista CONTOUR</i>	82
<i>Figura 7.19. Sección tipo Presa Nº1</i>	98
<i>Figura 7.20. Planta general Presa Nº1 y aforadores automatizados</i>	100
<i>Figura 7.21. Presa Nº1. Vista DEFINE en SEEP/W</i>	100
<i>Figura 7.22. Presa Nº1. Vista CONTOUR en SEEP/W</i>	101
<i>Figura 7.23. Sección tipo Presa Nº2</i>	102
<i>Figura 7.24. Corte geológico de la cerrada de la Presa Nº2</i>	103
<i>Figura 7.25. Planta general Presa Nº2 y aforadores automatizados</i>	104
<i>Figura 7.26. Presa Nº2. Vista DEFINE en SEEP/W</i>	105
<i>Figura 7.27. Presa Nº2. Vista CONTOUR en SEEP/W</i>	106
<i>Figura 7.28. Sección tipo Presa Nº3</i>	107
<i>Figura 7.29. Planta general Presa Nº3 y aforador</i>	109
<i>Figura 7.30 Presa Nº3. Vista DEFINE en SEEP/W</i>	109
<i>Figura 7.31 Presa Nº3. Vista CONTOUR en SEEP/W</i>	110

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Tipologías de presas de materiales sueltos en España (10)	3
Tabla 6.1. Permeabilidad para diferentes tipologías de suelos y rocas (14)	24
Tabla 6.2. Permeabilidad de los diferentes elementos de presas de materiales sueltos (14)	25
Tabla 7.1. Filtraciones esperables en presas de materiales sueltos.	60
Tabla 7.2. Valor de la permeabilidad (k) empleado en SEEP/W para reproducir la ecuación de caudal (Q)	62
Tabla 7.3. Valor de la altura de agua (h) empleado en SEEP/W para reproducir la ecuación de caudal (Q)	62
Tabla 7.4. Valor del talud (z) empleado en SEEP/W para reproducir la ecuación de caudal (Q)	62
Tabla 7.5. Anchura de coronación para distintas alturas de presa según recomendaciones de diseño	63
Tabla 7.6. Caudal infiltrado para distintas longitudes de dren horizontal presa tipo A	64
Tabla 7.7. Caudal infiltrado para distintas longitudes de dren horizontal presa tipo B	65
Tabla 7.8. Valor de caudal infiltrado obtenido de las modelizaciones de presas de materiales sueltos con dren horizontal.	69
Tabla 7.9. Valor de Q/k obtenido de las modelizaciones en SEEP/W de presas de materiales sueltos con dren horizontal	71
Tabla 7.10. Término A de la ecuación Q/k(h,z)	74
Tabla 7.11. Término B de la ecuación Q/k(h,z)	75
Tabla 7.12. Comprobación de la validez de la ecuación Q/k(h,z)	77
Tabla 7.13. Valor de caudal infiltrado obtenido de las modelizaciones de presas de materiales sueltos con dren chimenea.	83
Tabla 7.14. Parámetros A y B para la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-8}$ m/s con dren chimenea	86
Tabla 7.15. Validez de la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-8}$ m/s con dren chimenea	88
Tabla 7.16. Parámetros A y B para la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-7}$ m/s con dren chimenea	89
Tabla 7.17. Validez de la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-7}$ m/s con dren chimenea	91
Tabla 7.18 Parámetros A, B y C para la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-6}$ m/s con dren chimenea	92
Tabla 7.19. Validez de la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-6}$ m/s con dren chimenea	96
Tabla 7.20. Ficha técnica Presa N°1	98
Tabla 7.21. Permeabilidad de materiales Presa N°1	99
Tabla 7.22. Ficha técnica Presa N°2	103
Tabla 7.23. Permeabilidad de materiales Presa N°2	104
Tabla 7.24. Características de los aforadores de la Presa N°2	105
Tabla 7.25. Ficha técnica Presa N°3	108
Tabla 7.26. Permeabilidad de la cerrada Presa N°3	108
Tabla 7.27. Permeabilidad de materiales Presa N°3	108

1. RESUMEN

La escasez de recursos hídricos es una de las mayores necesidades a nivel mundial. Por ello, las presas son, sin duda, una de las obras de ingeniería de mayor importancia en el desarrollo de un país. Durante los últimos años, la seguridad de las presas se ha posicionado como uno de los factores determinantes en este ámbito, consiguiendo aumentar la fiabilidad de estas infraestructuras gracias a los importantes avances y la experiencia que éstos han proporcionado.

Las presas de materiales sueltos están constituidas por materiales naturales próximos a su ubicación y son, en general, más vulnerables que las de fábrica. Admiten diversas clasificaciones, una de las más extendidas (y utilizada en el presente estudio) distingue entre presas homogéneas, de núcleo o de pantalla.

El control de las filtraciones en presas de materiales sueltos es una de las variables que se analizan para garantizar la seguridad de las presas. La filtración puede dar lugar a problemas de sifonamiento, erosión interna o sufusión, que, en el peor de los casos, podrá acabar en la ruina de la infraestructura y la consiguiente pérdida de vidas humanas. Así pues, un correcto análisis resulta clave para garantizar la seguridad.

Existen diversos métodos para analizar las filtraciones en presas. Los más utilizados en la actualidad son los métodos numéricos, que permiten abordar problemas de régimen permanente y transitorio, con parámetros hidrogeológicos variables en el espacio y con diversas condiciones de contorno. Se trata del método más completo y el único capaz de abordar sistemas complejos gracias a las actuales herramientas informáticas, como el software SEEP/W.

Mediante SEEP/W se puede estudiar el comportamiento de las filtraciones variando los diferentes parámetros que intervengan en el proceso, pudiendo estimar finalmente la ecuación que simule su comportamiento. Dicho análisis se ha realizado con éxito en presas de materiales sueltos homogéneas con dren horizontal y con dren chimenea. También se ha realizado el análisis de presas de materiales sueltos ya existentes, pertenecientes a la Confederación Hidrográfica del Ebro. En este caso, la buena calibración del modelo resulta clave para obtener unos resultados satisfactorios.

Palabras clave: *seguridad de presas – filtración – permeabilidad – drenaje – análisis numérico*

2. ABSTRACT

Shortage of water resources is one of the most important needs in the world. Therefore, dams are one of the most essential engineering works in the development of a country. Last years, dam safety has become a determining factor in this field, increasing the reliability of these infrastructures thanks to the significant progress and experience they have provided.

Embankment dams consist of natural materials next to its location and are, in general, more vulnerable than the concrete dams. They admit different classifications; one of the most common (and used in the present study) distinguishes between homogeneous dams, core dams or asphalt/concrete facing dams.

Seepage control in embankment dams is one of the variables analyzed to ensure the dam safety. Seepage may result problems such as bottom heave, piping or suffusion, which in the worst case, it may end in the collapse of the infrastructure and the consequent loss of life. Therefore, a proper analysis is the key to ensure safety.

There are some methods to analyze seepage in dams. Today, the most commonly used are numerical methods, that allow to solve steady-state and transient problems, with varying hydrogeological parameters in space and with different boundary conditions. This is the most complete method and the only one capable to solve complex systems through computer tools, such as the SEEP/W software.

Through SEEP/W, users can study the behavior of seepage, varying the different parameters involved in the process, and then, they can estimate an equation which simulates their behavior. This analysis has been performed successfully in homogeneous embankment dams with horizontal drain and chimney drain. There have also been analyzing existing embankment dams belonging to the Confederación Hidrográfica del Ebro. In this case, good calibration of the model is the key to obtain satisfactory results.

Key words: *dam safety – seepage – permeability – drainage – numerical analysis*

3. INTRODUCCIÓN

Una presa es una estructura que tiene por objeto contener el agua en un cauce natural con dos fines principales (18):

- Elevar su nivel para que pueda derivarse por una conducción.
- Formar un depósito que retenga los excedentes para suministrar un suplemento en periodos de escasez o para amortiguar las puntas de las crecidas.

Las presas constituyen una de las obras de ingeniería de mayor importancia para la gestión del agua y el desarrollo de un país, en sus distintas finalidades: regadío, abastecimiento, control de avenidas, producción de energía eléctrica, etc. El crecimiento económico está directamente relacionado con la construcción de presas, jugando un papel muy importante en el grado de desarrollo de los países situados en zonas áridas (10). España sufre una irregularidad de precipitaciones tanto espacial como temporal que hace de estas infraestructuras un elemento vital para su desarrollo.

Denominamos presas de materiales sueltos aquellas que están constituidas por materiales naturales. Cuatro de cada cinco presas en el mundo son de esta tipología. Del conjunto de grandes presas españolas (aquellas cuya altura supera los 15 metros o está comprendida entre 10 y 15 metros y a su vez almacena grandes cantidades de agua), que en el año 2014 asciende a unas 1.250, las de materiales sueltos representan cerca de un 37% del total (10).

Tipo	Número	% sobre PMS	% sobre total
Homogéneas	259	58	22
Núcleo de arcilla	102	23,1	8,7
Pantalla asfáltica	20	4,5	1,7
Pantalla de hormigón	20	4,5	1,7
Geomembrana	20	4,5	1,7
Homogénea-Mampostería (Mixta)	4	0,9	0,3
Materiales sueltos-Gravedad (Mixta)	16	3,6	1,5
TOTAL	441	100	37,6

Tabla 3.1. Tipologías de presas de materiales sueltos en España (10)

Queda reflejada la importancia de las presas de materiales sueltos tanto en el panorama mundial como en el nacional.

La seguridad de presas es un aspecto clave que ha adquirido protagonismo a lo largo de los últimos años. Las principales variables de control que se estudian en las presas de materiales sueltos son:

- Control del nivel del embalse
- Control meteorológico
- Control piezométrico
- Control de filtraciones
- Control tensional de la presa
- Control de asientos en el cuerpo de presa
- Control topográfico de movimientos horizontales
- Control topográfico de movimientos verticales
- Control de movimiento relativo de fisuras y juntas

Un aspecto de gran relevancia en la seguridad y el diseño de presas es el control de las filtraciones. Al estar la presa en inmediato contacto con el agua del embalse, ésta se filtra a través de sus huecos, grietas y poros, produciéndose como consecuencia la circulación del agua filtrada y el arrastre de material fino que lleve consigo.

Estos efectos son más marcados en las presas de materiales sueltos, aunque también se dan en las de hormigón pero con otras modalidades.

El fenómeno de filtración debe ser correctamente estudiado previamente para evitar efectos como la erosión interna. Se deben evaluar los caudales de filtración y valorar adecuadamente los resultados. Para ello existen diversos métodos de resolución, de los cuales, los métodos numéricos son los más extendidos en la actualidad.

Los métodos numéricos, con soluciones aproximadas, son los más completos, permitiendo abordar problemas de régimen permanente y transitorio en dos y tres dimensiones con parámetros hidrogeológicos variables en el espacio e incluso en el tiempo y con condiciones de borde diversas. Son en realidad el único método disponible para el análisis de sistemas complejos.

Aunque los métodos numéricos requieren un cierto grado de especialización matemática e informática, actualmente la disponibilidad de aplicaciones de modelos de flujo orientados al usuario que no requieren gran especialización en materias ajenas a la hidrogeología, hace que estas técnicas sean hoy en día las más utilizadas. A lo largo del presente documento se emplearán los métodos numéricos a través del software SEEP/W para evaluar las filtraciones en presas de materiales sueltos.

4. OBJETIVOS DEL TFG

El objetivo del presente Trabajo Final de Grado titulado "Análisis de Redes de Flujo en Presas de Materiales Suelos" es ampliar el conocimiento sobre las filtraciones producidas en presas de esta tipología, proporcionando un estudio teórico sobre las filtraciones esperadas en presas genéricas para finalmente llegar a abordar casos reales.

Su desarrollo ha sido llevado a cabo desde el Área de Seguridad de Infraestructuras y Geotecnología de la Confederación Hidrográfica del Ebro (Zaragoza), gracias a un convenio de colaboración entre la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia y dicho organismo para la realización de prácticas en empresas.

El documento está estructurado según un proceso lógico de aprendizaje, de manera que tras la introducción se hará un recorrido por las presas de materiales sueltos, sus tipologías y características fundamentales. A continuación se analizará el flujo a través de medios porosos (en adelante, filtraciones) enunciando las leyes que rigen su comportamiento. Más tarde, se mostrarán las características y posibilidades que ofrece el software SEEP/W a la hora de analizar las filtraciones en presas de este tipo, y se trabajará con modelos teóricos de presas para hallar una ecuación que estime el caudal que se infiltra a través de ellas. Por último, se realizarán modelizaciones de casos reales con presas de la Confederación Hidrográfica del Ebro, y se extraerán las conclusiones que se deriven de todo el estudio.

No es objeto del presente estudio las presas de fábrica por tener características totalmente diferentes, ni la valoración o el dimensionamiento de las soluciones a problemas de filtraciones que se puedan proponer.

El objetivo académico que se persigue es demostrar los conocimientos, capacidades y aptitudes adquiridos a lo largo del Grado para acceder al título de Ingeniero Civil.

5. PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Llamamos "presas de materiales sueltos" a aquellas cuyos elementos no están ligados entre sí por conglomerantes hidráulicos (8). Están constituidas por materiales naturales muy variados (tierras gravas, arena, escollera, etc.) con nula o limitada cohesión, procedentes de préstamos locales próximos a su ubicación.

La principal característica de estas presas es el tipo de material utilizado para su construcción. La gran mayoría de materiales geológicos son aceptables, excepto los que se pueden alterar, disolver o evolucionar modificando sus propiedades (6).

El sistema de construcción consiste en la compactación de materiales dispuestos por tongadas. Esta simplicidad de sistema junto con la actual disponibilidad de potentes medios de transporte y compactación hacen que resulten en principio más económicas que las de fábrica (18).

La naturalidad, que es la gran ventaja de estas presas, tiene el contrapeso de la grave limitación en su cometido hidráulico: el vertido de agua sobre ellas llevaría a la erosión y arrastre de los materiales, indefensos por su falta de cohesión.

Existen dos maneras diferentes de clasificar las presas de materiales sueltos:

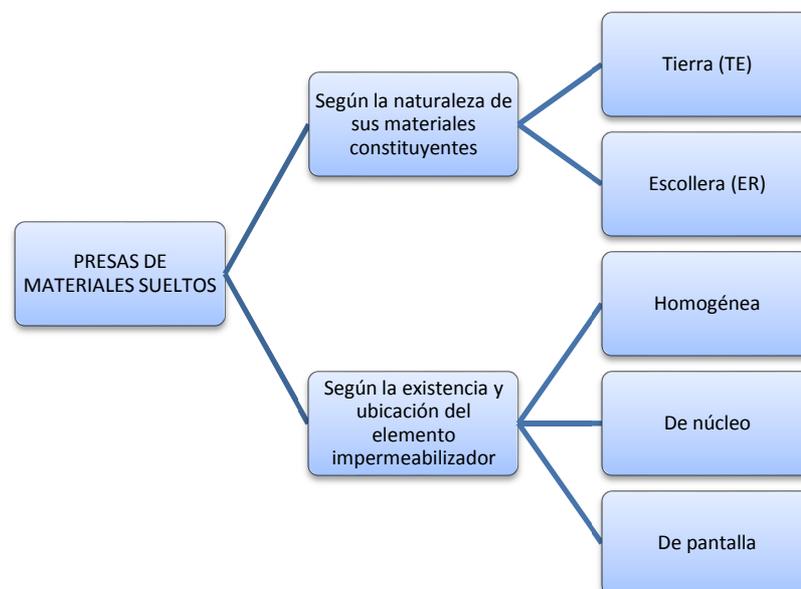


Figura 5.1. Clasificación de las presas de materiales sueltos (10)

Presas de materiales sueltos

- Según la naturaleza de sus materiales constituyentes (Figura 5.2). Esta es la terminología usada en ICOLD.



Figura 5.2. Clasificación de las presas de materiales sueltos según naturaleza materiales: tierra (izquierda) y escollera (derecha).

- Según la existencia y ubicación del elemento impermeabilizador (Figura 5.3). Esta es la clasificación que se usará en el presente estudio.

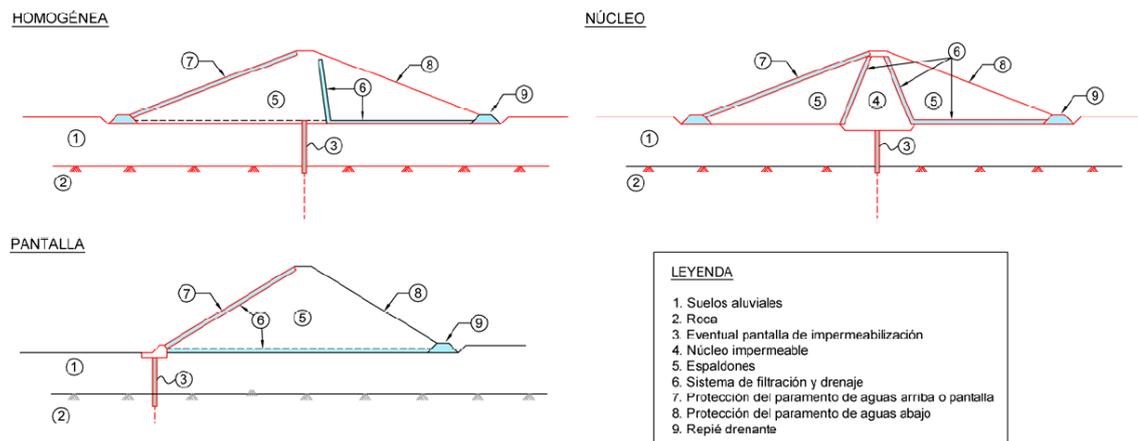


Figura 5.3. Clasificación de las presas de materiales sueltos según elemento impermeabilizador (10)

Las presas de materiales sueltos cuentan con una serie de estructuras auxiliares imprescindibles para su funcionamiento (6):

- Aliviaderos: Son las estructuras que permiten el vaciado del embalse. Se diseñan para caudales máximos estimados en base al estudio de las series históricas de precipitación en la cuenca de recepción afectada por la cerrada. La localización y configuración del aliviadero depende del tipo de presa y de las condiciones topográficas o geológico-geotécnicas de la cerrada y su entorno. En las presas de materiales sueltos el aliviadero se construye con independencia al cuerpo de presa.



Figura 5.4. Aliviadero

- Desagües de fondo: Se utilizan para vaciar el embalse desde los niveles que no alcanzan las tomas, con el fin de eliminar parte de los sedimentos que hayan podido producirse, reforzar la capacidad de desagüe o realizar inspecciones y corregir filtraciones.



Figura 5.5. Desagüe de fondo

- Tomas de agua: Consisten en estructuras que permiten desaguar el embalse a distintas alturas. Su número y capacidad dependen del volumen embalsado, de los servicios que haya que abastecer y de la profundidad del agua.
- Cierres de desagües: Son los sistemas que permiten regular el funcionamiento de tomas y desagües de fondo.

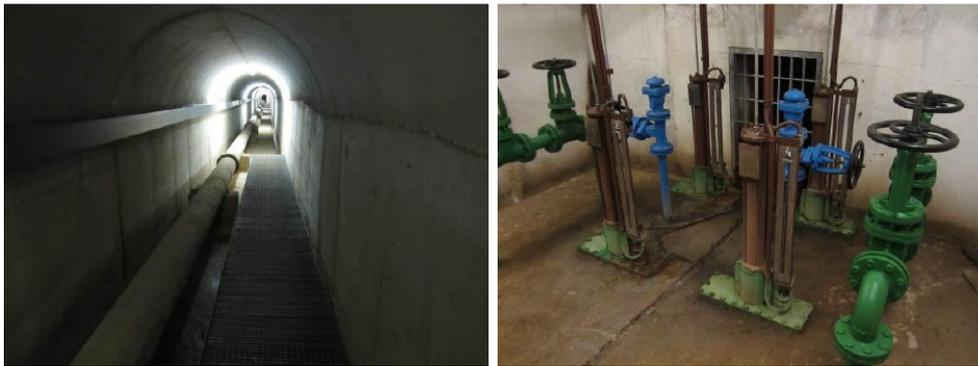


Figura 5.6. Toma de agua (izquierda) y cierre de desagües (derecha)

Las presas de materiales sueltos, por su gran versatilidad ante dificultades en la geología de la cerrada y en las características de los materiales con que se construyen, se han convertido en una alternativa muy económica y ventajosa frente a otras tipologías.

La experiencia demuestra que, frente a esas dificultades, la solución puede adaptarse al emplazamiento perfectamente. Esa capacidad de adaptación ha sido consecuencia de los importantes avances que se han producido en el proyecto y en la construcción de este tipo de presas a medida que se iba profundizando en el conocimiento: la experiencia y el juicio ingenieril han jugado y seguirán jugando en el futuro un importante papel en este sentido (10).

5.1. PRESAS DE MATERIALES SUELTOS HOMOGÉNEAS

El presente apartado muestra las características principales de las presas de materiales sueltos homogéneas apoyándose en el manual de SPANCOLD "Guía Técnica N^o 2. Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas. Presas de Materiales Suelos" (10).

Son presas homogéneas aquellas que se encuentran construidas por un único material relativamente impermeable, disponible en préstamos locales próximos, que cumple simultáneamente las exigencias de estanqueidad y resistencia. Este tipo de presas necesitan tener algún elemento drenante en su interior y alguna protección externa. Se exceptúan por tanto, las restantes tipologías de presas de tierras en las que existe un elemento impermeable claramente diferenciado.

Es muy frecuente que ese único material con el que se construye la presa no presente una total homogeneidad, siendo habitual que exista ya en el propio préstamo una cierta variación en sus características geotécnicas.

En ocasiones se realiza una cierta zonación consistente en colocar la porción más impermeable de ese material en la zona central a modo de núcleo o, incluso, en toda la zona de aguas abajo y el resto del material más permeable y, generalmente, más resistente en el espaldón de aguas arriba. Este tipo de presas cuasi-homogéneas son las que se suelen definir como presas "zonadas".

En una hipotética sección completamente homogénea es inevitable que, en condiciones estacionarias de largo plazo con nivel de embalse elevado, la línea de saturación emerja en el talud de aguas abajo, cualquiera que sea la inclinación de éste y la impermeabilidad del material de cuerpo de presa, ya que la permeabilidad es en la realidad claramente anisótropa (Figura 5.7.)

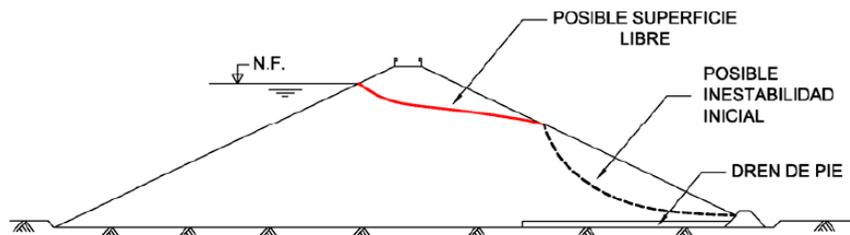


Figura 5.7. Drenaje insuficiente para presa de materiales sueltos homogénea (10)

Para evitar este problema, se realizan filtros y drenes dentro del cuerpo de presa. A continuación se explican sus funciones y características.

Filtros

La misión principal de los filtros consiste en retener partículas de suelo que pudieran ser arrastradas por una eventual vía de filtración de agua.

Su granulometría debe ser tanto más fina cuanto más pequeños sean los diámetros equivalentes de las partículas de suelo que puedan ser arrastradas por el agua que se quiere filtrar. En la práctica habitual se suele establecer como parámetro clave del tamaño del filtro el diámetro D15, que es la apertura del tamiz que deja pasar el 15% del material del filtro, después de puesto en obra.

Además deben cumplir las siguientes misiones:

- a) Impedir el arrastre de las partículas arcillosas fuera del cuerpo de la presa.
- b) Reducir la presión del agua intersticial en el espaldón de aguas abajo y en su cimentación.
- c) Posibilitar que los drenes sean capaces de evacuar las eventuales filtraciones con presiones intersticiales moderadas, esto es, con gradientes hidráulicos bajos.
- d) Evitar una intrusión de los elementos gruesos de la protección del paramento de aguas arriba en zonas de partículas más pequeñas y menos resistentes del cuerpo de presa.

Drenes

La finalidad de los drenes es reducir las presiones intersticiales en los filtros.

Ante una hipotética vía de filtración, el caudal de agua a desaguar después de filtrado puede ser de entidad suficiente para saturar el filtro y ponerlo en carga. Este eventual problema se puede evitar colocando un dren mucho más permeable que el filtro y ubicándolo inmediatamente aguas abajo de él (Figura 5.8).

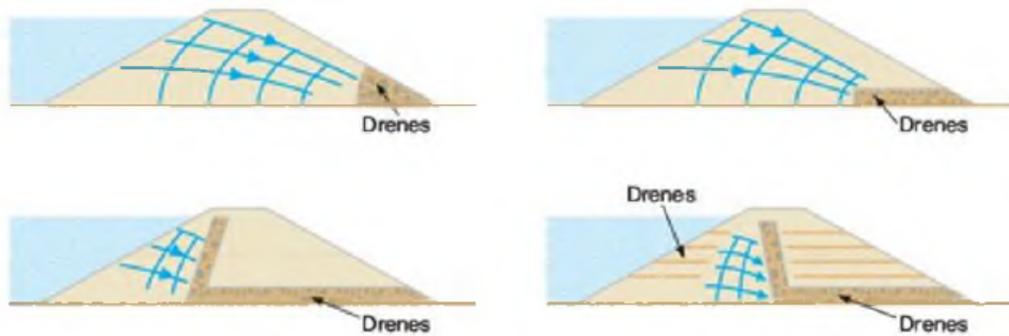


Figura 5.8. Distintos elementos drenantes en presas de materiales sueltos homogéneas (6)

En presas homogéneas la utilización de solo un repié drenante y un filtro horizontal en la zona de cimentación de aguas abajo ha sido frecuente en tiempos pasados. Sin embargo, la existencia de zonas o bandas horizontales de mayor permeabilidad que puedan hacer aflorar el agua en zonas del paramento de aguas abajo hacen obligados por razones de mayor seguridad los drenes chimenea, que cortan la filtración en el interior de la presa.

Los drenes chimenea suelen proyectarse con una altura que alcance o se eleve ligeramente sobre el nivel del embalse. Sobre su situación en el interior de la presa, no hay duda que bajo el punto de vista de un mayor ahorro de materiales, cuanto más cerca se sitúe del paramento de aguas arriba, más se mejora la estabilidad del espaldón de aguas abajo. Sin embargo, frente a esta idea se contraponen la necesidad de que debe tener suficiente espesor por las razones siguientes:

a) Para que el caudal de filtración esté dentro de límites tolerables.

b) Para que parte de esta zona de estanqueidad esté situada en el centro de la sección o en sus cercanías, donde el régimen de compresión es más elevado y se aminoran los riesgos de fisuración.

Los drenes constituidos por capas horizontales a diversas alturas se usan para:

a) Los situados en la zona de aguas abajo para reducir las presiones intersticiales durante la construcción.

b) Los situados en la zona de aguas arriba para facilitar la disipación de presiones intersticiales durante la construcción y, sobre todo, en situaciones de desembalse.

5.2. PRESAS DE MATERIALES SUELTOS DE NÚCLEO

El presente apartado muestra las características principales de las presas de materiales sueltos de núcleo apoyándose en el manual de SPANCOLD "Guía Técnica N° 2. Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas. Presas de Materiales Suelos" (10).

Las presas de núcleo abrigado por espaldones de materiales de otras características son habituales cuando la presa tiene ya una cierta entidad (por encima de los 40-50 m) y los materiales impermeables no abundan y coexisten con otros más permeables.

Esa tipología es la más frecuente y tiene la ventaja de emplear óptimamente los materiales próximos disponibles, distribuyéndolos en el interior de la sección tipo en función de sus características geotécnicas. Así, es frecuente situar los más impermeables en la zona central, constituyendo el núcleo, mientras que los más permeables y resistentes se ubican a ambos lados del mismo, formando los espaldones, cuya misión es la de servir de contención del núcleo como elementos estabilizadores. Normalmente se procura que, de todos los materiales permeables disponibles, los más drenantes se sitúen en el espaldón de aguas arriba para garantizar su estabilidad en el caso de un desembalse.

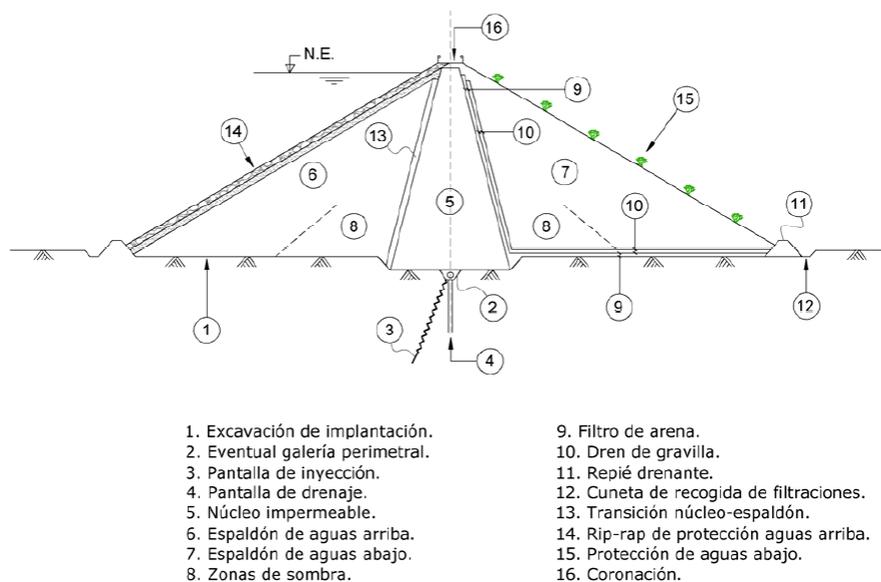


Figura 5.9. Sección tipo de presa de materiales sueltos de núcleo (10)

En general, las presas con núcleo central tienen ambos taludes iguales o similares, algo más tendidos que los de equilibrio natural. Cuando el núcleo está aguas arriba, el talud aguas arriba suele ser más tendido, obligado por las superficies de inestabilidad que afectan al núcleo.

El núcleo puede ser central o inclinado. Suele ser preferible el primero al segundo, ya que no sólo ejerce una mayor presión de contacto sobre la cimentación, lo que a su vez reduce el desarrollo de filtraciones a través de ésta, sino que también proporciona una mayor estabilidad estática y dinámica, así como una mayor facilidad de llevar a cabo ciertas reparaciones en caso de que sea necesario.

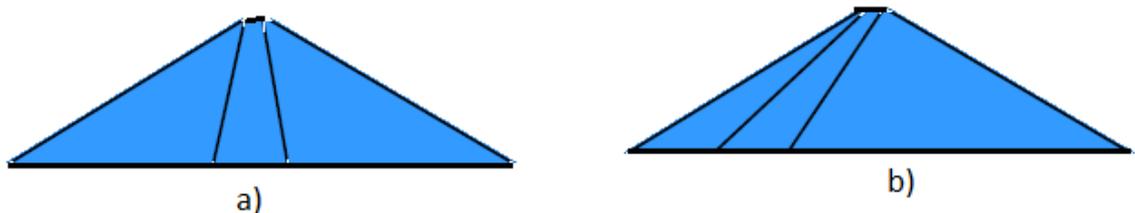


Figura 5.10. Presa de materiales sueltos de núcleo central (a) e inclinado (b)

El núcleo inclinado tiene la ventaja de que permite la construcción de casi todo el espaldón de aguas abajo con carácter previo. A su vez, con él se evita la posibilidad de que se produzca su fracturación hidráulica por cuelgue de los espaldones. Está especialmente indicado en zonas muy lluviosas y cuando lo que se desea es alcanzar una rápida protección aguas abajo reteniendo agua en el embalse. Otra ventaja del núcleo inclinado es el de que permite una mejor adaptación, en ciertos casos, a la cerrada geológica, o cuando se precisa extender hacia aguas arriba la impermeabilización del vaso mediante tapices.

En cualquier caso, sea el núcleo vertical o inclinado, se completa esta tipología con la ineludible ejecución de filtros y drenes, tanto aguas abajo del núcleo como aguas arriba del mismo. Este último caso se diseña para evitar fenómenos de migración de finos cuando se producen desembalses, si bien los requerimientos de los materiales a emplear, o los espesores, suelen ser menos restrictivos que los utilizados aguas abajo.

Al igual que las presas homogéneas, si los espaldones de aguas arriba se ejecutan con materiales poco permeables puede ser conveniente disponer drenes horizontales en el interior de la sección tipo. Este tipo de solución podría ser también interesante en los espaldones de aguas abajo si, por alguna circunstancia, se esperase que durante la construcción se pudieran generar presiones intersticiales elevadas que pusieran en peligro la estabilidad durante la propia construcción de la presa.



Figura 5.11 Disposición de los diferentes materiales empleados durante la construcción de presa de materiales sueltos de núcleo (9)

5.3. PRESAS DE MATERIALES SUELTOS DE PANTALLA

En este apartado se muestran las características principales de las presas de materiales sueltos de pantalla, tomando como referencia el manual de SPANCOLD "Guía Técnica N° 2. Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas. Presas de Materiales Suelos" (10).

Cuando en las inmediaciones del emplazamiento no hay suficiente material impermeable o su permeabilidad no es adecuada para efectuar con él un núcleo (por ejemplo si el coeficiente de permeabilidad resulta mayor de 10^{-5} cm/s), pero sin embargo por su cuantía y buenas características resistentes es válido para acometer con él los espaldones, suele ser normal confiar la impermeabilidad de la sección tipo a una barrera exterior situada sobre el paramento de aguas arriba o interior, a modo de núcleo artificial



Figura 5.12. Paramentos aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha) de presa de materiales sueltos de pantalla

Se consideran presas de materiales sueltos de pantalla a todas aquellas presas en las que el elemento impermeable se dispone sobre el paramento de aguas arriba, y que puede ser una losa discontinua de hormigón o una losa continua formada por la combinación de distintos materiales de naturaleza asfáltica, o por materiales sintéticos o geomembranas.

Los plintos o zócalos de unión pantalla-terreno son elementos delicados que sirven de unión entre la pantalla y el terreno. Algunos de ellos se han construido muy esbeltos para alojar en su interior galerías de inspección y drenaje.

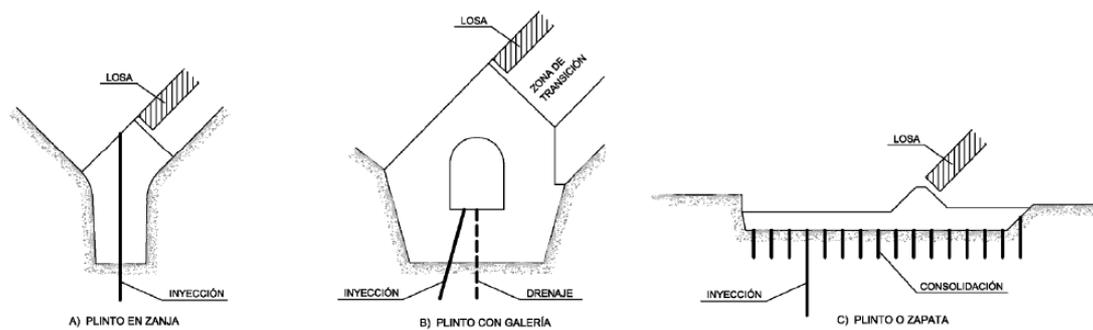


Figura 5.13. Distintos tipos de plinto (10)

España cuenta con, aproximadamente, 40 presas de esta tipología, con casi igual número de pantallas de hormigón y asfálticas. La utilización de geomembranas es más propia del campo de las balsas.

6. FILTRACIONES EN PRESAS DE MATERIALES

SUELTOS

En el ámbito de las presas, se denomina filtración a todo movimiento de agua que se produce desde el embalse hacia el exterior (14). Este capítulo aborda en profundidad toda la problemática que implica la filtración en presas y cómo se puede evaluar y controlar, con el objeto de garantizar la seguridad de la infraestructura.

6.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROGEOLOGÍA

Para conocer el comportamiento del agua infiltrada en la presa, es necesario introducir unos conceptos previos sobre hidrogeología. Para más información, puede consultarse el manual de González de Vallejo L.I. (2002) *Ingeniería Geológica*.

6.1.1. Permeabilidad

La permeabilidad es el parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación geológica en función de la textura de la misma. Depende principalmente de:

- La *granulometría*: la distribución de tamaños de los granos del suelo (y por lo tanto de sus poros), hará disminuir la permeabilidad cuanto más pequeñas sean las partículas del suelo.
- La *densidad del suelo*: para una misma granulometría, cuanto más denso sea el terreno menor será su volumen de huecos, y menor será también su permeabilidad.
- La *forma y orientación de las partículas*: si las condiciones de sedimentación dan lugar a orientaciones preferenciales, la permeabilidad podrá variar sustancialmente en función de la dirección de flujo.

Dentro de este concepto pueden definirse además:

- La *permeabilidad efectiva* o conductividad hidráulica “ k ” ligada tanto a las características texturales del medio físico como del fluido que transmite. Sus unidades más habituales son m/día en hidrogeología y cm/s en ingeniería.
- La *permeabilidad intrínseca* “ K ” que es solo dependiente de las características internas del medio permeable. Se expresa en m^2 .

La permeabilidad intrínseca y la permeabilidad efectiva se relacionan únicamente por los parámetros capaces de definir las características del fluido:

$$k = K \cdot \frac{\gamma_w}{\mu}$$

k = permeabilidad efectiva

K = permeabilidad intrínseca

γ_w = peso específico del agua

μ = viscosidad dinámica del fluido

A pesar de los esfuerzos de diversos investigadores, no ha sido posible encontrar una relación capaz de definir con carácter generalista la permeabilidad intrínseca en función del medio. En cualquier caso, no influye solamente el tamaño de las partículas que conforma el medio, sino también su forma y superficie, no admitiendo generalización estas dos últimas características. Diversos autores de esta temática han establecido las siguientes relaciones (6):

Hazen: $K = c \cdot d_e^2$

Slichter: $K = c \cdot m^n \cdot d_e^2$

Terzaghi: $K = \lambda \cdot \left(\frac{m-0,13}{(1-m)^{\frac{1}{3}}} \right)^2 \cdot d_e^2$

La variable d_e es el denominado *diámetro eficaz*, que para el caso más general es el d_{10} de la curva granulométrica de la muestra, es decir, el tamaño de abertura de tamiz que permite el paso del 10% en peso de la muestra de material granular. Los coeficientes c , m , n y λ dependen de las características geométricas y de fricción de los granos.

Ensayos de permeabilidad en macizos rocosos. Ensayo Lugeon (6)

En los estudios de presas de materiales sueltos es habitual utilizar el *ensayo Lugeon* para determinar el valor de la permeabilidad tanto de la cimentación como de los estribos de la presa.

Este ensayo se realiza en el interior de sondeos y permite calcular semicuantitativamente la permeabilidad de los macizos rocosos, en cualquier tipo de litología y estado de fracturación.

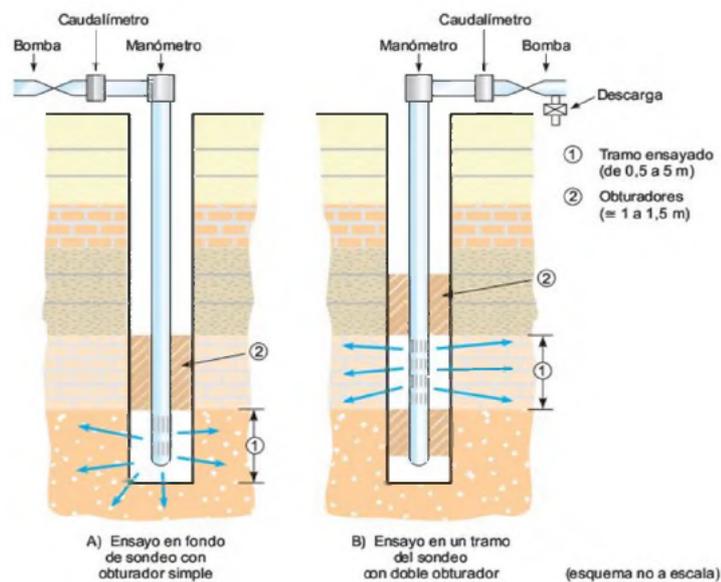


Figura 6.1. Ensayo Lugeon (6)

Se considera que el macizo es estanco cuando la absorción de agua es inferior o igual a 1 l/min/ml a una presión de 10 kp/cm² (10 bares) durante 10 minutos, en un tramo de 5 m sondeo, es decir 1 unidad Lugeon (UL). Sin embargo, la utilización del ensayo Lugeon para calcular la permeabilidad no es adecuada, ya que es muy poco probable que se den las condiciones de la ley de Darcy durante la realización del ensayo en macizos fracturados, siendo probable que a la presión de 10 bares se llegue a la fracturación hidráulica, o que se produzcan erosiones internas en el macizo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, es posible utilizar el ensayo Lugeon limitando la presión hasta el umbral de la fracturación hidráulica, o presión crítica de ensayo. Con este criterio se han propuesto algunas relaciones entre el ensayo Lugeon y la permeabilidad (Shibata, 1981; en Foyo y otros, 1998):

- Para sondeos de 6,5 cm de diámetro: $1 \text{ UL} = 1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$
- Para sondeos de 4,5 cm de diámetro: $1 \text{ UL} = 1.4 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

De forma semejante, Shimizu, 1985 (en Foyo y otros, 1998), propone la siguiente expresión:

$$k = \frac{UL}{12 \cdot 10^4} \cdot \ln \frac{L}{r}$$

k = coeficiente de permeabilidad en cm/s

UL = unidad Lugeon

L = longitud del tramo de ensayo

r = radio del sondeo

A fin de evitar el fenómeno de fracturación hidráulica y la pérdida o absorción de todo el caudal de inyección, con la consiguiente imposibilidad de utilizar el ensayo Lugeon convencional para estimar la permeabilidad del macizo, Foyo y otros (1998) proponen efectuar el ensayo Lugeon con la siguiente modificación. Se denomina *ensayo Lugeon modificado*:

- Escalones de carga (bares): 0-2-3-5-7-10-7-5-3-2
- Tramo de ensayo = 3,0 m
- Tiempo de ensayo = 5 minutos

La relación entre el ensayo Lugeon convencional y el modificado es:

$$1,0 \text{ UL convencional} = \frac{1,0 \text{ UL modificado}}{3,5}$$

Ensayos de permeabilidad en suelos. Ensayo Lefranc (6)

El *ensayo Lefranc* se utiliza para medir el coeficiente de permeabilidad en suelos permeables o semipermeables de tipo granular, situados por debajo del nivel freático, y en rocas muy fracturadas. El ensayo se efectúa en el interior de sondeos y puede realizarse durante la ejecución de la perforación o una vez finalizada ésta.

Este ensayo tiene especial interés para conocer si el material disponible próximo a la localización de la presa es apto para su construcción. La permeabilidad del material disponible es el factor clave a la hora de tomar una decisión sobre la localización de una presa de materiales sueltos.

El procedimiento consiste en rellenar de agua el sondeo y medir el caudal necesario para mantener el nivel constante (régimen permanente) o bien medir la velocidad de descenso del nivel de agua (régimen variable). La medida del caudal de admisión debe realizarse cada 5 minutos, manteniendo el nivel constante en la boca del sondeo durante 45 minutos. Si la admisión es muy alta, debe medirse cada minuto durante los 20 primeros y después cada 5 minutos hasta llegar a los 45 minutos.

La realización del ensayo requiere que, antes de medir tiempos y caudales, se llene el sondeo de agua, observando que el aire es expulsado y que se estabiliza el nivel y la velocidad de descenso, lo que indica que se ha alcanzado el régimen permanente. Para los cálculos posteriores es necesario determinar la cota del nivel freático.

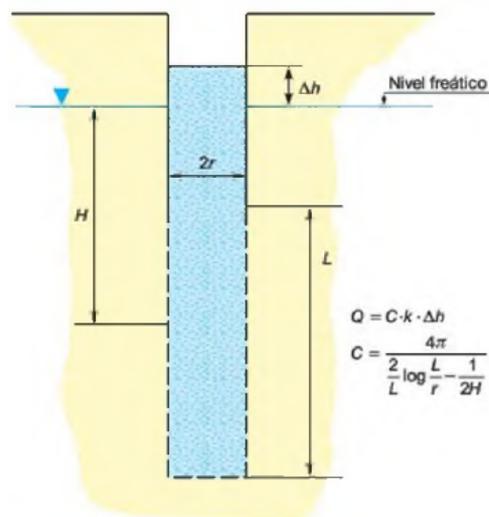


Figura 6.2. Ensayo Lefranc (6)

El coeficiente de permeabilidad viene definido por la expresión:

$$k = \frac{Q}{c \cdot \Delta h} \quad \text{siendo} \quad c = \frac{4 \cdot \pi}{\frac{L}{r} \cdot \log\left(\frac{L}{r}\right) - \frac{1}{2 \cdot H}}$$

Q: caudal admitido

Δh: altura del agua sobre el nivel piezométrico inicial

c: coeficiente de forma del sondeo

L: longitud del tramo ensayado, definido entre el final de la tubería de revestimiento del sondeo y el fondo del mismo

r: radio del sondeo

H: distancia del punto medio de la zona ensayada al nivel freático

A continuación se muestran una serie de tablas con valores orientativos de permeabilidad de distintos materiales.

Permeability k_H of Unconsolidated Natural Soils (k_H inversely related to % finer grains)		Permeability k_H of Unfractured Rock (k_H increases with pore size)	
Soil	k_H Range (ft/yr or 10^{-6} cm/s)	Rock	k_H Range (ft/yr or 10^{-6} cm/s)
Gravel, open-work	>2,000,000	Sandstone, medium	100 to 200,000
Gravel (GP)	200,000 to 2,000,000	Sandstone, silty	~0 to 5,000
Gravel (GW)	10,000 to 1,000,000	Limestone	~0 to 15,000
Sand, coarse (SP)	10,000 to 500,000	Granite, weathered	200 to 10,000
Sand, medium (SP)	1,000 to 100,000	Schist	~0 to 2,000
Sand, fine (SP)	500 to 50,000	Tuff	~0 to 1,000
Sand (SW)	100 to 50,000	Gabbro, weathered	50 to 500
Sand, silty (SM)	100 to 10,000	Basalt	~0 to 50
Sand, clayey (SC)	1 to 1,000	Dolomite	~0 to 5
Silt (ML)	1 to 1,000	Gneiss	~0 to 2
Clay (CL)	~0 to 3		

Tabla 6.1. Permeabilidad para diferentes tipologías de suelos y rocas (14)

Permeability (k_v) of Embankment Core Materials (k_v inversely related to % fines)

Unified Soil Classification	k_v Range (ft/yr or $\times 10^{-6}$ cm/s)*
GM-SM	0.0 to 10.0
GM or GC	0.0 to 10.0
SP-SM	0.0 to 10.0
SM	0.0 to 10.0
SM-SC	0.0 to 3.0
SM-ML	0.0 to 10.0
SC	0.0 to 3.0
ML	0.0 to 10.0
ML-CL	0.0 to 1.0
CL	0.0 to 1.0
MH	0.0 to 0.1

References: [31-32], [34], [44-45]

* Based primarily on Reclamation laboratory test data

Permeability (k_v) of Embankment Shell Materials (k_v inversely related to % fines)

Unified Soil Classification	k_v Range (ft/yr or $\times 10^{-6}$ cm/s)
GP	2,000 to 1,000,000
GW	1,000 to 100,000
GP-SP	1,000 to 50,000
GW-SW	500 to 5,000
GM	10 to 500
SP (medium to coarse)	10,000 to 20,000
SP (fine to medium)	5,000 to 10,000
SP (very fine to fine)	500 to 5,000
SW	300 to 5,000
SP-SM	10 to 1,000
SM	10 to 500

References: [18], [26], [33], [36], [44-45]

Permeability (k_v) of Washed Embankment Drain Materials (k_v increases with grain size)

Material	k_v Range (ft/yr or $\times 10^{-6}$ cm/s)
Coarse sand and gravel	150,000 to 500,000
Medium to coarse sand	50,000 to 150,000
Fine to medium sand	10,000 to 50,000

Anisotropy (k_H/k_v) of embankment materials (k_H/k_v increases with placement water content)

Material	k_H/k_v Range
<u>Embankment core</u>	
Reclamation standard placement	4 to 9
Nonstandard placement	9 to 36
Hydraulic fill	64 to 225
<u>Embankment shell</u>	
Reclamation standard	4 to 9
<u>Embankment drains</u>	
Reclamation standard	1 to 4

Tabla 6.2. Permeabilidad de los diferentes elementos de presas de materiales sueltos (14)

6.1.2. Ley de Darcy

En 1856, en la ciudad francesa de Dijon, se le encargó a Henry Darcy el estudio de la red de abastecimiento de la ciudad. Parte de su trabajo era diseñar filtros de arena para purificar el agua, así que se interesó por los factores que controlaban el flujo de agua a través de medios porosos y presentó el resultado de sus trabajos como un apéndice de su informe sobre la red de distribución de la ciudad. Ese pequeño apéndice fue la base de todos los estudios matemáticos posteriores sobre el flujo de agua subterránea en medios porosos.

La ley de Darcy establece que el caudal Q que es capaz de atravesar un medio permeable, es proporcional al área de paso del medio permeable A , normal al flujo, y al gradiente de niveles piezométricos entre la entrada y la salida del flujo en el medio permeable, i . La constante de proporcionalidad es la permeabilidad del medio, k , en la que quedan incluidas las características del fluido, es decir, es la permeabilidad efectiva o conductividad hidráulica.

$$Q = -k \cdot A \cdot i$$

Al moverse el flujo de zonas de mayor a menor nivel piezométrico, que es en este caso la función escalar, el flujo y el gradiente tienen direcciones distintas, lo que justifica el signo negativo en el segundo término de la ecuación de Darcy.

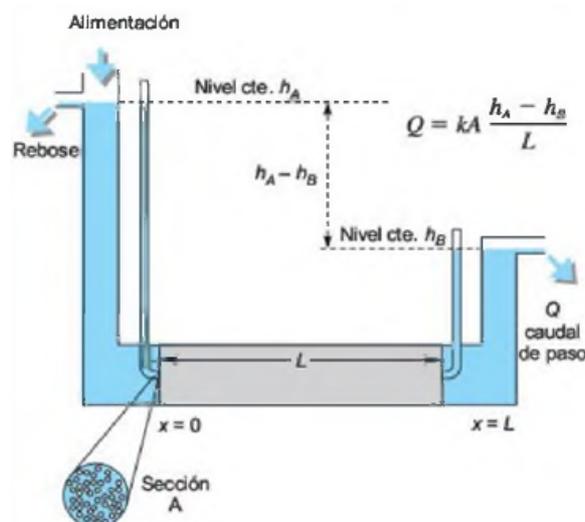


Figura 6.3. Ley de Darcy (6)

Llamando h al nivel piezométrico y x al espacio en el sentido del flujo, la ecuación puede expresarse en forma diferencial, considerando la variación de niveles piezométricos a lo largo del recorrido del flujo por el medio poroso:

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dh}{dx}$$

La ley de Darcy es únicamente válida en el caso en que el régimen sea laminar. Para evaluar si el régimen es laminar hay que acudir al denominado número de Reynolds, que representa la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas en el seno de un fluido. Un valor del número de Reynolds comprendido entre 1 y 10 denota un régimen laminar en el que puede considerarse aplicable la ley de Darcy, aunque es particularmente fiable para valores inferiores a 4.

La velocidad con la que el flujo atraviesa el medio permeable puede ser fácilmente deducida a partir de la ley de Darcy:

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dh}{dx} \rightarrow Q = v \cdot A \rightarrow v = -k \cdot \frac{dh}{dx}$$

Esta velocidad es la denominada *velocidad de Darcy* y se refiere a la velocidad del fluido si el paso del mismo se realizara a través de una sección abierta. El fluido al atravesar la sección se encuentra con que está ocupada en una buena parte por las partículas del suelo y que, a efectos reales, dispone de una sección mucho menor. La sección real que se dispone viene dada por la porosidad eficaz n_e . Para hallar la *velocidad real* se utilizará la siguiente expresión:

$$v_{real} = \frac{v_{Darcy}}{n_e}$$

La velocidad real es de gran interés en el ámbito de las filtraciones debido a que el agua arrastra partículas sólidas que erosionan el cuerpo de presa. La velocidad real de circulación del agua resulta clave para saber si se está produciendo dicha erosión.

6.1.3. Ecuación de Laplace

El coeficiente de permeabilidad “ k ” puede depender de la dirección de flujo, por lo que, con toda generalidad, puede considerarse como un tensor en un espacio de tres dimensiones, de forma que *la ley de Darcy generalizada* puede expresarse:

$$v_x = -k_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_y = -k_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \quad v_z = -k_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z}$$

Si se asume que:

- El agua es incompresible
- La velocidad y la presión del agua son función exclusiva de la posición (x, y, z)
- El suelo tiene densidad constante y está saturado

Entonces se puede establecer de forma matemática la *ecuación de la continuidad* (conservación de la masa), que expresa que en un régimen de flujo estacionario, el agua que entra en un elemento de suelo por unidad de tiempo es igual a la que sale:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Combinando la ley de Darcy generalizada y la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

Si se considera el medio homogéneo (la permeabilidad es la misma en cualquier punto del espacio) e isótropo (la permeabilidad es la misma en cualquier dirección del espacio), se tiene que:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Esta es la llamada *ecuación de Laplace*, que se aplica en muchos problemas de flujo, tales como la transmisión de calor, de electricidad o, en este caso particular, de agua a través de un medio poroso.

La resolución de la ecuación solo es posible por métodos analíticos en sistemas físicos sencillos. Para casos reales más complejos debe acudir a métodos aproximados de resolución numérica o a métodos gráficos de resolución, como las redes de flujo. Estos casos se abordarán en siguiente apartado.

6.2. MÉTODOS DE RESOLUCIÓN

Las leyes que controlan el flujo de agua en medios permeables han sido estudiadas en el anterior apartado, donde se ha hecho hincapié en la dificultad que puede implicar la resolución de las ecuaciones diferenciales características de cada fenómeno. La posibilidad de resolverlas satisfactoriamente depende de la complejidad del problema real y, muy especialmente, de las condiciones de contorno. A continuación se muestran los métodos más habituales de resolución.

6.2.1. Modelos físicos

Antes de la llegada de programas informáticos de análisis numérico, los modelos físicos se utilizaron para evaluar la filtración simulando el flujo de agua a través de medios permeables. Estos modelos pueden ser de diversas tipologías (14):

- Modelos físicos de analogía eléctrica
- Modelos físicos de arena
- Modelos de flujo viscoso

De todos ellos, los métodos de analogía eléctrica son los más eficaces y por tanto, los más utilizados, debido a la analogía entre la ley de Ohm y la ley de Darcy, y porque la ecuación de Laplace describe de forma similar tanto el potencial eléctrico como el flujo en medios permeables.

Actualmente, debido al auge de los modelos numéricos, este método está en desuso, por lo que no se le dedicará un mayor desarrollo.

6.2.2. Métodos gráficos

Se trata de métodos simplificados cuyas condiciones suelen estar bastante idealizadas, y que pueden ser útiles en análisis preliminares. Los dentro de ellos encontramos el método de Casagrande y las redes de flujo.

Método de Casagrande

Se trata de un método gráfico para localizar la línea de saturación, es decir, el lugar geométrico de los puntos de la presa con presión de agua igual a cero. En las figuras 6.4 y 6.5 se muestra el proceso a seguir según Casagrande.

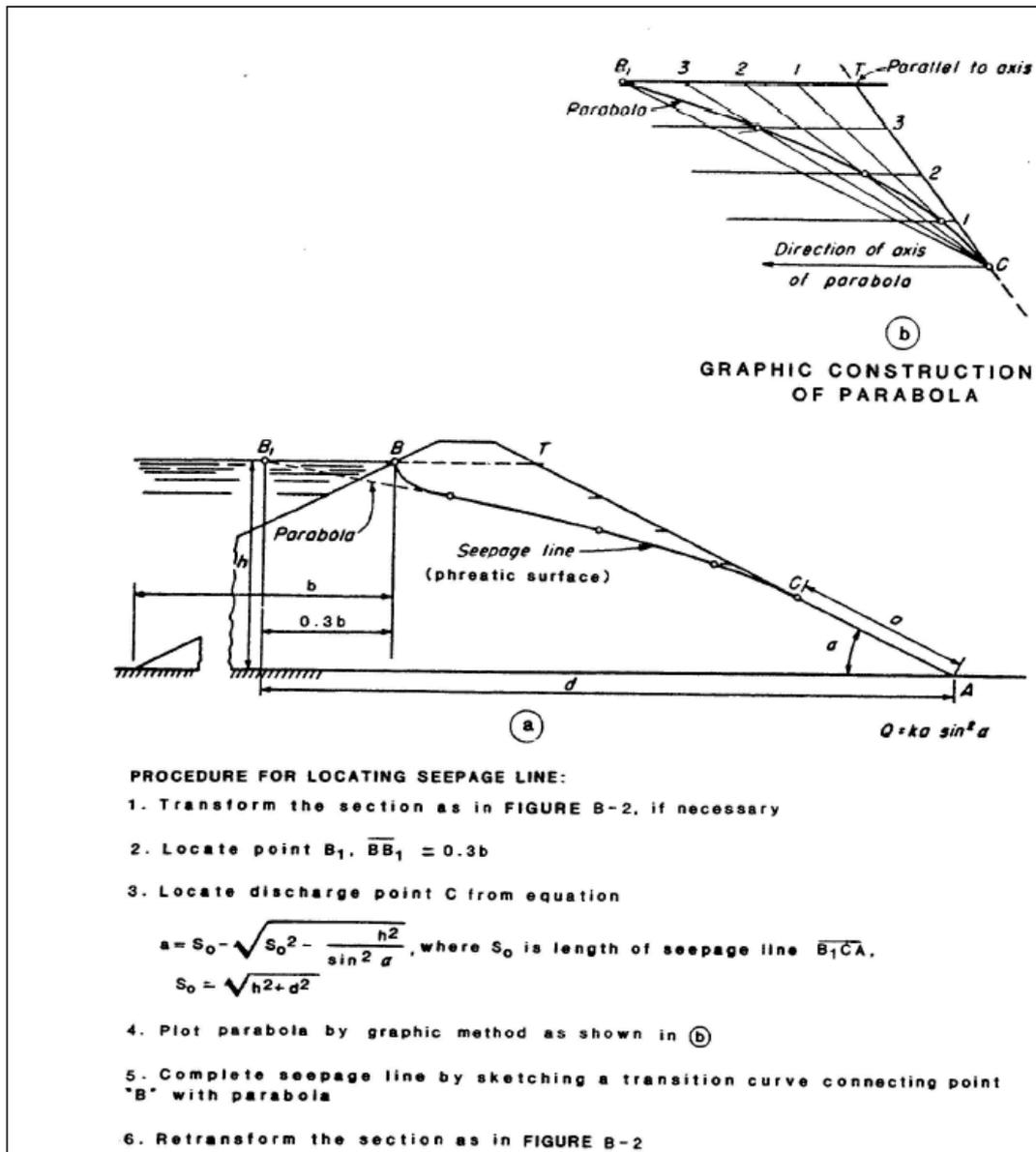


Figura 6.4. Determinación de la línea de saturación según método de Casagrande $\alpha < 60^\circ$ (14)

Redes de flujo (6)

Una red de flujo es un gráfico bidimensional compuesto por dos familias de curvas de índole especial:

- *Líneas de flujo o líneas de corriente*: indican la trayectoria del movimiento del agua
- *Líneas equipotenciales*: unen los puntos de igual potencial.

El empleo de las redes de flujo está limitado a la investigación de secciones bidimensionales que sean representativas del movimiento en el medio poroso y al análisis de problemas tridimensionales que presenten simetría axial o radial.

En un medio homogéneo e isótropo para el que sea válida la ley de Darcy, las líneas de corriente son ortogonales a las líneas equipotenciales. Una red de flujo puede concebirse como un enrejado de dos familias de líneas mutuamente ortogonales dispuestas de tal manera que, como regla, las líneas de corriente acaben en líneas equipotenciales, y viceversa, delineando, en parte, el dominio del movimiento. Para poder elaborar una red de flujo es preciso que el movimiento satisfaga los criterios de independencia del tiempo y de homogeneidad, que tenga lugar paralelamente al plano de la red y que, además, tenga validez la ley de Darcy.

Para construir una red de flujo no existe un camino único, porque siendo continuas las funciones de potencial y flujo, existen muchas posibilidades de elección entre las líneas de corriente y equipotenciales. En la práctica se escogen algunas líneas representativas de cada familia. Sin embargo, la razón entre el número de tubos de corriente y el de saltos de potencial es una constante para cada problema y se deduce a partir de la fórmula del caudal de filtración.

La red de flujo queda determinada al fijar el número de líneas de corriente o de líneas equipotenciales. Es recomendable limitar a cuatro o cinco el número de tubos de corriente, pero, de hecho, puede utilizarse un número fraccionario (de tubos de corriente o de saltos de potencial). En la realidad, sólo en contados casos serán enteros a la vez el número de tubos de corriente y el de potencial.

El cálculo del caudal de paso que tiene lugar en un sistema representable en una sección vertical debajo de una estructura hidráulica, se consigue dibujando la red de flujo y retocándola hasta conseguir su necesario "aspecto cuadrado". Las equipoten-

ciales siempre serán perpendiculares a los bordes impermeables y sensiblemente paralelas a los bordes de nivel constante; al contrario ocurrirá con las líneas de flujo.

Con la red terminada se tendrá una serie de N_C canales o tubos de flujo, estando limitado cada uno de ellos por dos líneas de flujo, y un número N_E de saltos de potencial entre los bordes de potencial constante.

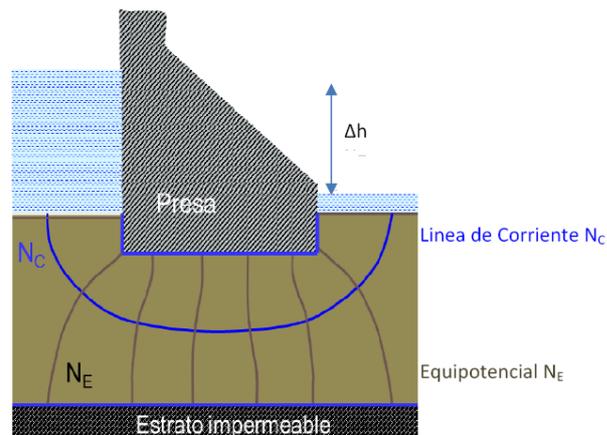


Figura 6.6. Construcción de red de flujo

Para calcular el caudal se aplica Darcy, obteniéndose la siguiente expresión:

$$Q = k \cdot \Delta h \cdot \frac{N_C}{N_E}$$

k : coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica

Δh : diferencia de altura de agua

N_C : número de líneas de corriente

N_E : número de líneas equipotenciales

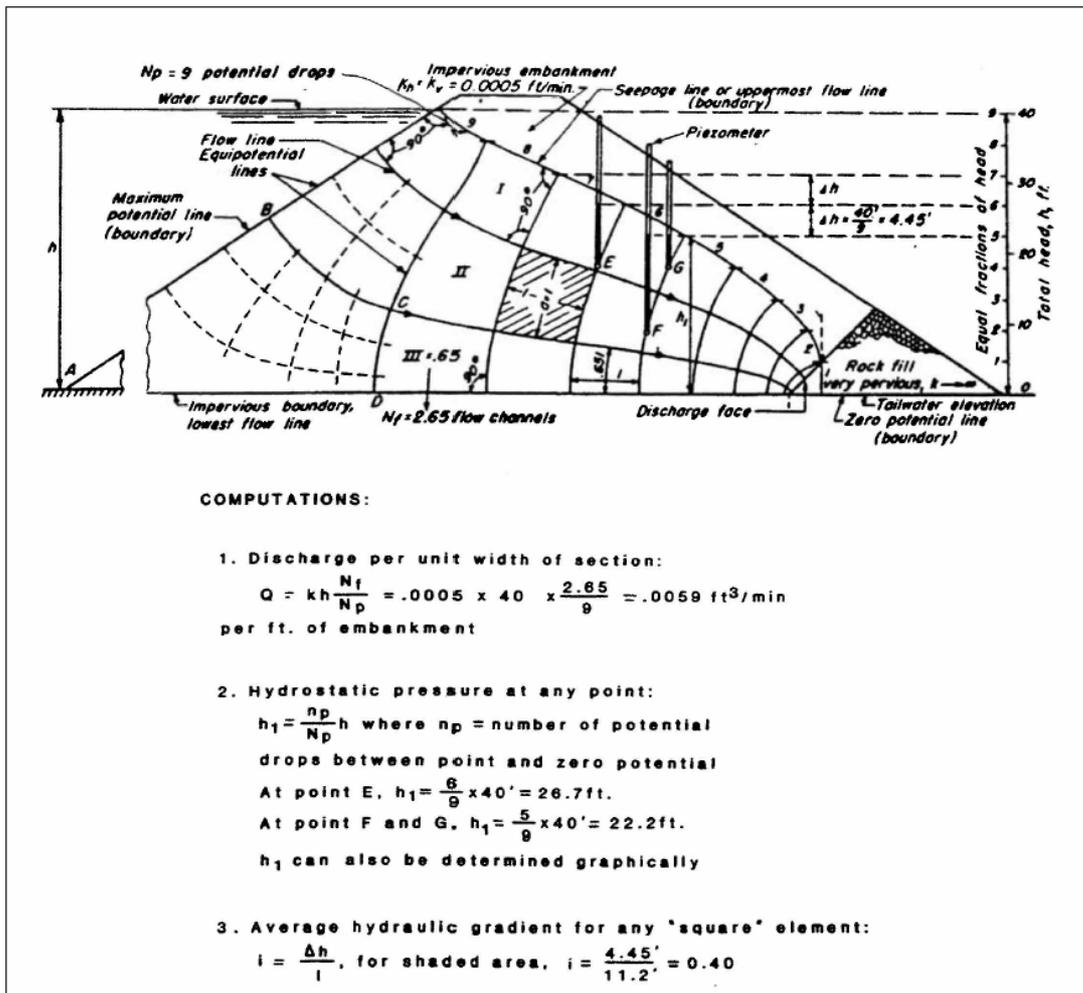


Figura 6.7. Red de flujo en presa de materiales sueltos (14)

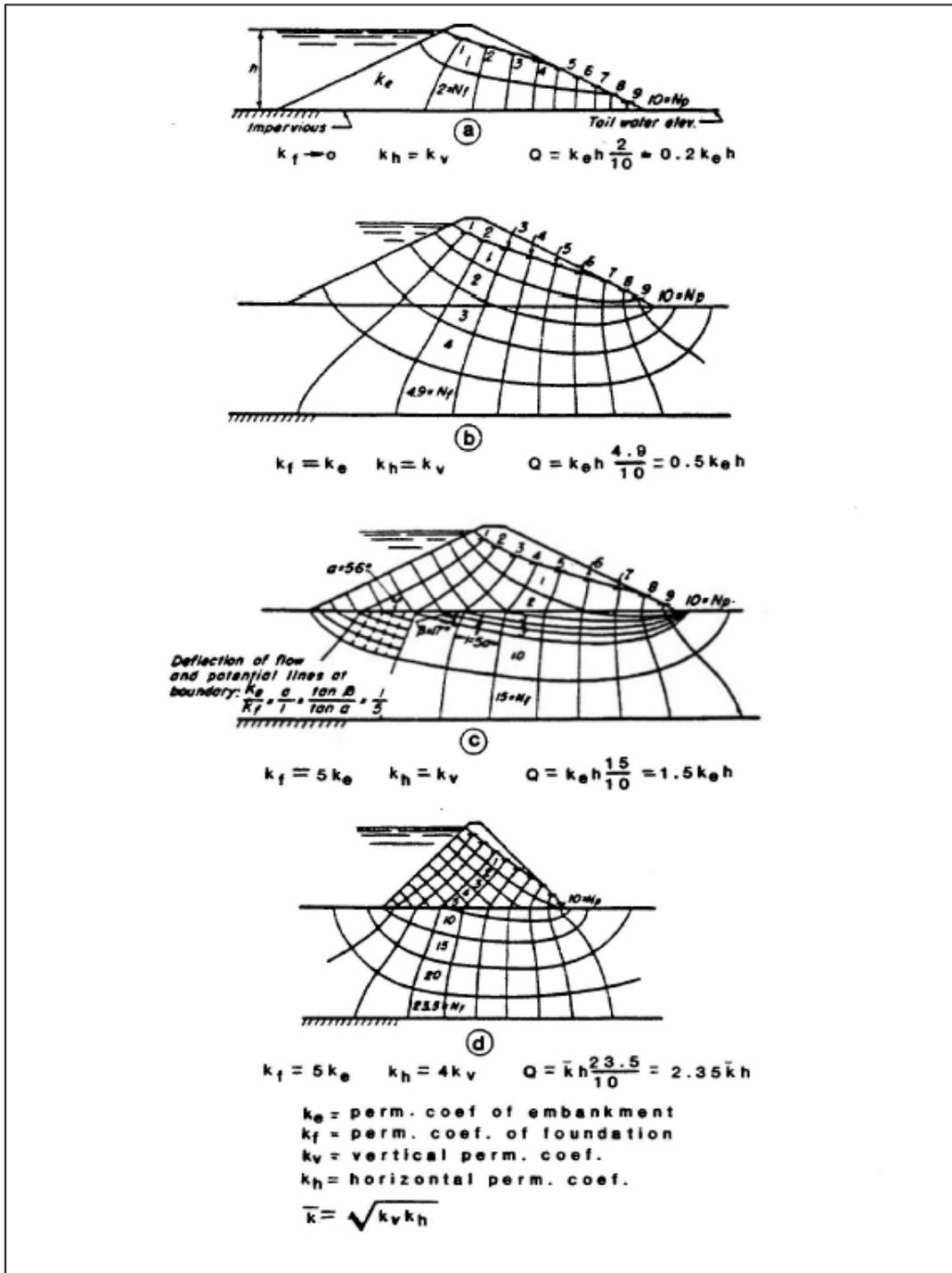


Figura 6.8. Red de flujo a través de cuerpo de presa y cimentación en presa de materiales sueltos

(14)

6.2.3. *Métodos numéricos*

Para el análisis numérico se utiliza el método de elementos finitos, un método numérico que aproxima la solución de ecuaciones diferenciales. Para ello se discretiza el dominio en elementos, que se conectan entre sí mediante los nodos, formando todos ellos la malla. Los cálculos para la resolución del problema se hacen sobre la malla discretizada, y el conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable en los nodos se escribe formando un sistema de ecuaciones, que se puede resolver matricialmente.

Los métodos numéricos se resuelven mediante ordenador a través de programas informáticos disponibles en el mercado, por su rapidez para resolver sistemas matriciales. Se han convertido en una herramienta cada vez más sofisticada y son ampliamente utilizados para modelizar una gran variedad de condiciones de flujo. Se trata del método más utilizado por las siguientes ventajas que aporta (14):

- Se pueden modelizar sistemas complejos con relativa facilidad. Sólo en determinadas ocasiones debe realizarse algún tipo de simplificación.
- No precisa de ninguna transformación para homogeneizar las propiedades de los materiales.
- Como utilizan una malla de elementos finitos, todas las propiedades y valores (flujo, presión, velocidad, etc.) están disponibles para cada nodo dentro del modelo y se pueden consultar.
- Admite la posibilidad de variar cualquier parámetro para estudiar el comportamiento de la presa ante diversos escenarios.
- Los resultados de la modelización pueden exportarse de forma rápida para la elaboración de estudios técnicos.

Se pueden realizar análisis en estado estacionario o transitorio, dependiendo de si se toma el tiempo como parámetro dentro de la modelización. En general, realizar un análisis estacionario resulta una opción un tanto conservadora, ya que los embalses experimentan fluctuaciones anuales significativas. Los piezómetros han demostrado que, en algunas presas de materiales sueltos, no se ha llegado a tener una línea de saturación estable incluso después de décadas de operación de la presa (14). Dada la incertidumbre con la asignación de permeabilidades y del comportamiento de las fil-

traciones, cualquier conservadurismo inherente a la asunción de las condiciones de equilibrio, por lo general, se considera aceptable. Por lo tanto, cuando se analizan filtraciones bajo condiciones normales de funcionamiento, un análisis en estado estacionario es apropiado.

Se enumeran a continuación los principales programas informáticos disponibles en el mercado que permiten al usuario realizar análisis de filtraciones por medio de métodos numéricos:

- SEEP/W
- FLAC
- FRACMAN
- FRACK
- MODFLOW
- BIE

Para finalizar, se transcribe una cita de Harry R. Cedergren (4) donde destaca la labor del ingeniero analista a la hora de validar los resultados del análisis:

"El análisis de filtraciones mediante métodos numéricos debe ser visto como una herramienta para predecir el orden de magnitud de los resultados y establecer una aproximación del comportamiento de las filtraciones. Aun cuando el análisis se realiza con cuidado, los resultados sólo serán aceptables si las condiciones iniciales se asemejan a la realidad. Rara vez se dispone de datos suficientes para modelizar a fondo todas las partes clave de un entorno geotécnico. La experiencia y el sentido común son esenciales en el desarrollo del modelo y la interpretación de los resultados."

6.3. PROBLEMÁTICA DE LA FILTRACIÓN

El agua puede migrar a través de la cuenca afectada por el embalse, teniendo como principal consecuencia la disminución de la reserva de agua, pero la filtración producida en la cerrada puede acarrear problemas de estabilidad y seguridad en la presa, especialmente si ésta es de materiales sueltos.

6.3.1. *Filtración en el vaso del embalse*

La construcción de una presa supone un cambio importante en la hidrología e hidrogeología del vaso del embalse, como consecuencia de la inundación de una parte del valle, la elevación de los niveles freáticos y su oscilación periódica. Estas modificaciones afectan a la hidrodinámica de los acuíferos, pudiendo producirse un flujo de agua desde el embalse hacia el exterior del vaso, o bien una recarga del embalse desde los acuíferos que bordean al vaso.

Sin embargo, dependiendo del uso del mismo, las pérdidas de agua pueden ser más o menos tolerables. Un embalse de regulación de avenidas no requiere la misma estanqueidad que otro destinado a abastecimiento o regadío. Las condiciones de impermeabilidad deben ser analizadas en función de las necesidades del aprovechamiento, determinando la rentabilidad económica de tratamientos de impermeabilización en zonas concretas (6). Los principales problemas de estanqueidad pueden encontrarse en las rocas solubles o muy porosas.

El gradiente hidráulico de la filtración en el vaso del embalse suele ser débil. El recorrido del agua es largo en relación con la altura de agua, por lo que, a menos que el terreno sea muy permeable, la filtración puede ser insignificante (18).

6.3.2. *Filtración en la cerrada*

El flujo de agua a través del suelo puede conducir a un movimiento continuado de las partículas, fenómeno conocido como erosión. Son muchos los factores que favorecen la erosión, entre ellos se encuentran el gradiente hidráulico, la plasticidad del suelo, tamaño de las partículas, la tensión capilar, la cementación, etc.

Echando la vista atrás, históricamente casi la mitad de todas las roturas que se han producido en presas de materiales sueltos han sido el resultado de la erosión interna producida por la filtración (14). Dado que todos los suelos son erosionables en cierta medida, las presas materiales sueltos son potencialmente susceptibles a fallos debidos a este fenómeno.

Actualmente las presas se diseñan teniendo muy en cuenta todos estos factores, incluyendo en su diseño filtros internos de chimeneas, drenajes bien diseñados, ciertas medidas de tratamiento de cimiento y múltiples líneas de defensa.

La filtración a través de la cimentación, estribos y cuerpo de presa, debe ser controlable en todo momento, para garantizar que se encuentra dentro de unos márgenes aceptables. Por ello se estudiará el proceso de filtración de agua a través del cuerpo de presa y cimentación para la determinación de caudales filtrados, presiones intersticiales, gradientes, posibilidades de fracturación hidráulica y de erosión interna. También se contemplarán posibles reducciones de los efectos perjudiciales, como la necesidad de una pantalla de impermeabilización para alargar las líneas de corriente y disminución de gradientes, sistemas de drenaje complementarios, etc.

A veces se producen filtraciones localizadas como consecuencia de la aparición de grietas debidas a asentamientos diferenciales de cierta entidad entre zonas adyacentes o a la creación de zonas en tensión (tracción) debidas a que la presión intersticial excede a la presión total, asociada al peso de la columna de tierras, fenómeno también conocido como *fracturación hidráulica* (10).

Son tres los mecanismos que, en distintos puntos de la sección tipo, pueden provocar la inestabilidad interna de las presas de materiales sueltos. Los tres se manifiestan mediante filtraciones que aparecen en la zona de aguas abajo y los tres pueden conducir a la rotura de la obra (10).

- *Sifonamiento* (también conocido como *heaving*): es el fenómeno por el cual, cuando existe un flujo ascensional importante, como puede ser el que se origina al pie de aguas abajo de cualquier presa, la presión total del terreno y la del agua intersticial se igualan. Entonces, al ser nula la presión efectiva, el terreno se comporta como si de un fluido se tratara. También se le suele denominar a este fenómeno como "*levantamiento de fondo*". En terrenos homogéneos el gradiente vertical crítico que provoca esta situación es igual al cociente entre el peso específico sumergido del terreno y el peso específico del agua. Este valor es, en muchos suelos, próximo a la unidad. Este proceso puede concluir con la pérdida de estabilidad del espaldón de aguas abajo y la consecuente ruina de la obra.

1. LEVANTAMIENTO DE FONDO (SIFONAMIENTO). BOTTOM HEAVE

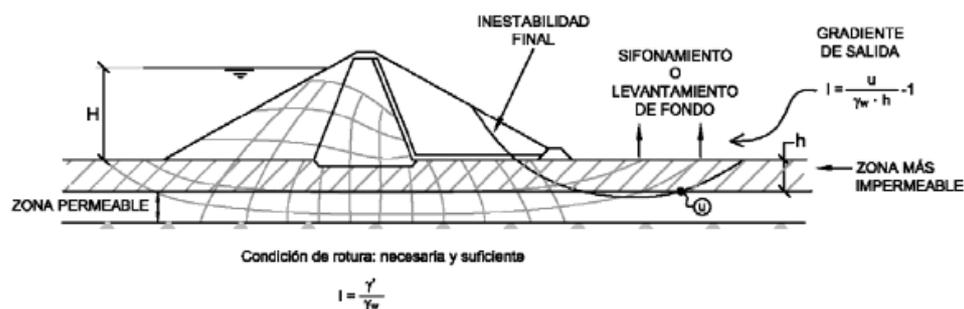


Figura 6.9. Sifonamiento (10)

- *Erosión interna*: la fuerza de arrastre que el agua de filtración produce sobre los suelos que atraviesa puede moverlos, arrastrarlos a favor de la corriente y generar un proceso erosivo. La consecuencia es la formación de conductos o tubos individuales, y por eso también se denomina también *tubificación*. Es habitual que se trate de un proceso remontante que comienza aguas abajo, en el punto de salida del agua al exterior, y que se va desplazando hacia aguas arriba. El gradiente con el que puede comenzar un proceso de erosión interna depende del tipo de terreno en el que se produzca el proceso de filtración. Puede ser muy inferior a la unidad. Casos particulares de lo anterior se presentan en los materiales solubles y en los suelos arcillosos dispersivos. En su fase final, este proceso puede conducir a la formación de un cráter en el propio embalse y degenerar en la ruina completa de la presa.

2. EROSIÓN INTERNA (PIPING)

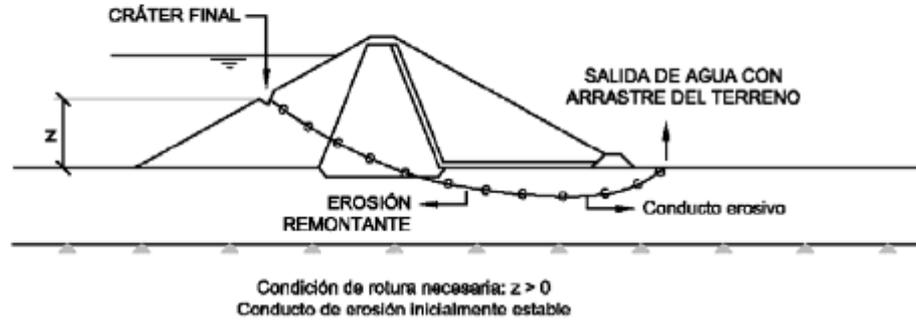


Figura 6.10. Erosión interna (10)

- *Sufusión* (también conocido como *arrastre o migración de finos*): bajo esa denominación se conoce a la falta de estabilidad interna de un suelo sometido a un gradiente hidráulico por no ser capaz, la estructura granulométrica de los tamaños más gruesos, de retener la fracción más fina. El proceso puede concluir con un asiento importante por colapso progresivo de la estructura granular. Puede conducir a la ruina de la obra.

3. SUFUSIÓN (ARRASTRE DE FINOS)

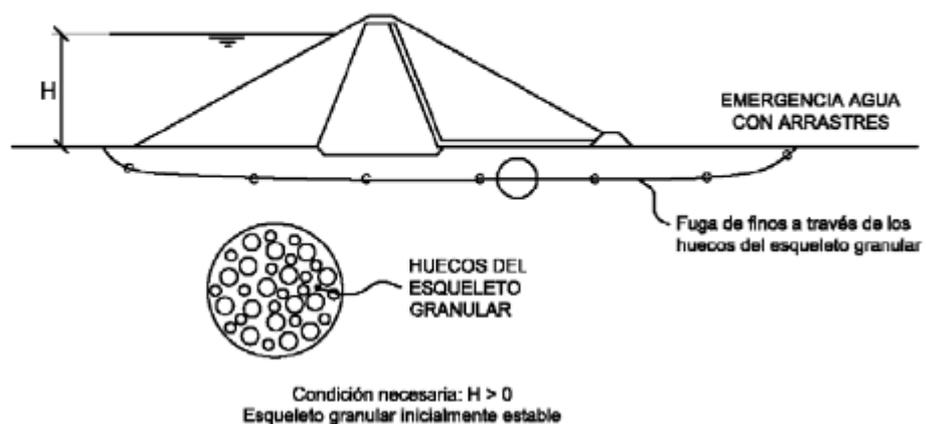


Figura 6.11. Sufusión (10)

6.4. MEDIDAS DE AUSCULTACIÓN EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS PARA EL CONTROL DE FILTRACIONES

Para evitar los fenómenos citados en el anterior capítulo, resulta vital controlar las filtraciones en las presas de materiales sueltos, tanto en la fase de diseño (como se verá en el capítulo 6.5), como en aquellas que se encuentren en su fase de explotación.

La auscultación en presas de materiales sueltos puede servir para diversos propósitos, entre ellos (14):

- Verificar las hipótesis de diseño que se hallan planteado en la fase de cálculo.
- Proporcionar una mejor comprensión del comportamiento de la presa.
- Diagnosticar algún comportamiento anómalo en la presa.
- Predecir el comportamiento futuro en diferentes condiciones de carga.

En lo relacionado con las filtraciones, los piezómetros y los aforadores son los elementos principales de auscultación, aunque hay otros.

Piezómetros

Mide las presiones ejercidas por el agua en el terreno sobre el cuerpo de la presa, es decir, las presiones intersticiales.

Normalmente se utilizarán piezómetros abiertos (6). El procedimiento consiste en instalar un sistema de lectura en un punto previamente aislado, registrándose la presión intersticial del piezómetro que se trasmite a una unidad de lectura.

El sistema de lectura puede ser neumático, de resistencia eléctrica o de cuerda vibrante. Los de cuerda vibrante son los más utilizados, y permiten transmitir la señal a distancias de más de un kilómetro sin pérdida de precisión. Tienen la ventaja de quedar menos afectados por los posibles movimientos del terreno. Su funcionamiento se basa en una bobina que genera un campo magnético, hace vibrar una cuerda y genera frecuencia de oscilación. Las variaciones presión exterior producen un cambio

tensión de la cuerda y por lo tanto, de su frecuencia. Se recomienda una frecuencia de lectura quincenal de los piezómetros.

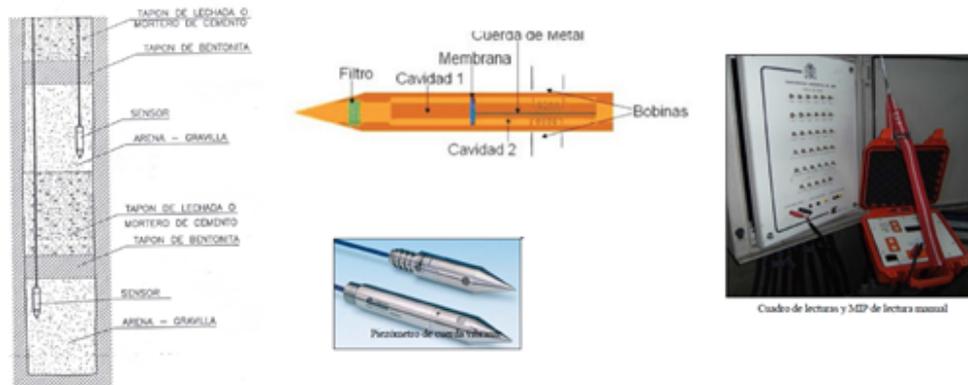


Figura 6.12. Piezómetro

Los piezómetros pueden servir para determinar la línea de saturación en una presa de materiales sueltos. La línea de saturación se define como la superficie dentro de la presa a lo largo de la cual la presión de los poros es igual a la presión atmosférica. En otras palabras, se trata de la línea de contorno con presión igual a cero, y el límite superior de cualquier trayectoria de flujo de la filtración.

Es importante señalar la distinción entre la línea de saturación y la línea piezométrica. La línea de saturación sólo es equivalente a la línea piezométrica bajo condiciones de flujo puramente horizontal o en condiciones hidrostáticas. Las líneas equipotenciales no son verticales, por lo que es importante no confundir ambos conceptos.

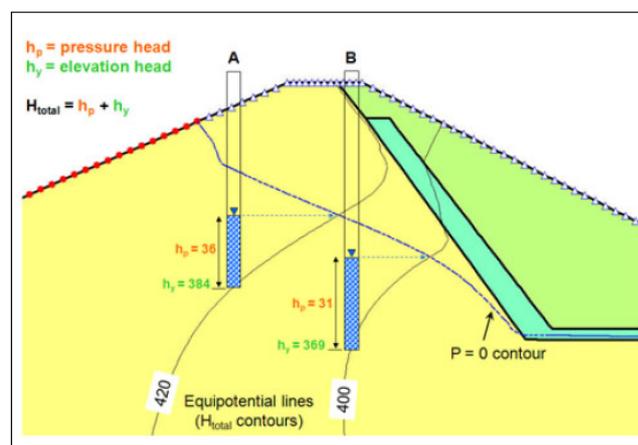


Figura 6.13. Línea de saturación y línea piezométrica (14)

Colocar una serie de piezómetros dentro de una sección de la presa y su cimiento puede proporcionar una idea sobre las vías de infiltración que se estén produciendo. Con varios piezómetros se pueden trazar los contornos de las líneas equipotenciales, lo cual permite identificar zonas de la sección con mayor permeabilidad.

Los cambios en los niveles piezométricos registrados a lo largo de un corto periodo de tiempo son un indicio evidente de que se están produciendo cambios en el comportamiento de las filtraciones dentro de la presa. Aumentos o disminuciones inexplicables de presiones podrían significar un proceso de erosión interna, donde las variaciones serían el resultado de la apertura periódica o intermitente de los poros a lo largo de una vía de erosión interna. Cualquier cambio en los niveles piezométricos respecto a su comportamiento normal merece ser estudiado cuidadosamente.

Los piezómetros también proporcionan datos para realizar la calibración del modelo numérico en la modelización de una presa. El analista deberá recoger todos esos datos y comprobar si resultan aptos para calibrar el modelo.

Aforador

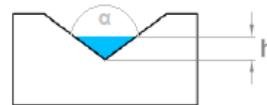
El agua procedente de la filtración se recoge por medio de unos canales hasta llegar a un aforador, que es un elemento con una sección normalizada que permite medir el caudal filtrado y advertir la presencia de sólidos en el agua que evidencien un proceso de erosión. Existen distintas tipologías de aforadores:

- Aforador Thomson: tipo triangular. La abertura de salida puede tener distintos ángulos, y de ello depende la fórmula para calcular el caudal circulante.

- o $\alpha=30^\circ \rightarrow Q = 0,000706 \cdot H^{2,5}$

- o $\alpha=60^\circ \rightarrow Q = 0,0016036 \cdot H^{2,5}$

- o $\alpha=90^\circ \rightarrow Q = 0,0026563 \cdot H^{2,5}$



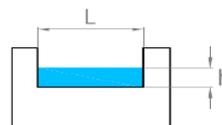
- Aforador rectangular: para grandes caudales.

- o $Q = 0,003949 \cdot L \cdot H^{1,5}$

Q= caudal (l/min)

H= altura lámina (mm)

L=base (mm)



Se recomienda una frecuencia de lectura semanal de los aforadores.

Para medir el caudal se puede realizar de manera manual con una regleta:



Figura 6.14. Medición manual en aforador

O de manera automática, mediante un sensor de ultrasonidos:



Figura 6.15. Medición automática en aforador

Actualmente los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica permiten gestionar todos los datos procedentes de la auscultación de forma automática. El ejemplo más próximo se encuentra en el SAIH Ebro de la Confederación Hidrográfica del Ebro, el cual dispone de una red de medida a distancia que transmite y procesa los datos cada 15 minutos, manteniendo un intensivo control de la auscultación. Estos datos son muy útiles para la visualizar comportamientos y determinar posibles anomalías.

6.5. MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACIÓN EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS PARA LA REDUCCIÓN DE FILTRACIONES

Una presa de materiales sueltos puede asentarse sobre un cauce de acarreo, pero con la consiguiente impermeabilización. Cuando el espesor de los acarreo es reducido, (no mayor de 10 metros, en principio) puede lograrse con una prolongación del núcleo hasta empotrarlo en la zona de suficiente impermeabilidad. Pero si la profundidad sobrepasa ese límite, o la presa no tiene núcleo, hay que acudir a otros tratamientos (18).

Ninguno de los tratamientos consigue una impermeabilización total, pero sí una pérdida de carga en el flujo de filtración localizada en una cierta zona que produce un descenso brusco de las líneas equipotenciales y que, al concentrar el gradiente en esa zona, lo reduce aguas abajo, con la consiguiente disminución de presiones intersticiales, velocidades y caudal filtrante.

Todos estos procedimientos exigen tecnologías especiales, normalmente patentadas, que solo pueden realizar con garantía pocas casas especializadas de ámbito internacional. Los procesos siguen ciertas líneas generales comunes, pero la dificultad consiste en la ejecución eficaz.

En los siguientes apartados se muestran las principales medidas de impermeabilización que se dan en las presas de materiales sueltos (18).

6.5.1. *Pantallas de impermeabilización*

- *Tablestacas*: se trata de una medida de poca eficacia (inicialmente del 10 al 20%, llegando hasta el 30% al cabo de unos años) debido a la retención de finos y corrosión de las juntas. Se pueden usar tablestacas en doble T para mayor rigidez, o una doble fila de tablestacas simples, y en ambos casos se rellena o inyecta el espacio interior para aumentar la estanqueidad. Se ha llegado a profundidades de unos 50 metros, aunque hay otros medios mucho

más efectivos y económicos de impermeabilización. Además, en terrenos con bolos, la hinca resulta difícil, y en ocasiones imposible. En cambio, en obras provisionales, en las que la impermeabilidad y duración exigida son menores, se siguen usando al ser un procedimiento rápido.

- *Pilotes secantes*: Teóricamente cierran por completo el paso del agua, pero las imperfecciones de su perforación y relleno, se traducen en filtraciones. Su eficacia depende mucho del terreno y de la técnica empleada, así como de la experiencia del constructor. El proceso constructivo es el siguiente: se perfora un cilindro vertical de unos 60 centímetros de diámetro con trépano y cuchara, y se va rellenando con lodo bentonítico para contener el terreno; terminada la perforación, se sustituye el lodo de relleno por hormigón, inyectando desde abajo hacia arriba, para ir desplazando los lodos, hasta que queda formado el pilote de hormigón. Cada pilote se perfora de forma que corte a los dos adjuntos para asegurar la barrera estanca. Una vez formada ésta, se completa con inyecciones. Cuando se desea una impermeabilización más completa, pueden realizarse dos pantallas paralelas, inyectando después el espacio entre ellas.
- *Trinchera de lodos (slurry trench)*: Se usa con espesores de acarreo menores de 25 metros. La trinchera, de 1 a 3 metros de ancho, se excava con una draga mecánica, empezando por un extremo de la presa y siguiendo hasta el otro. La contención de las paredes se logra con lodo bentonítico, que luego se sustituye por una mezcla de grava, arena y arcilla o bentonita, colocado con la draga desplazando sucesivamente al lodo. Hay que tener un cuidado particular para evitar la tendencia a la segregación del material de relleno.
- *Cortina inyectada*: puede llegar a profundidades de hasta 150 metros. Los barrenos se disponen en varias filas, con distancias entre 2 y 3 metros, y encamisados para evitar derrumbes. Se aplican presiones altas de inyección para provocar la formación de grietas y la penetración de la lechada por ellas, con el consiguiente aumento de impermeabilidad. El producto inyectado suele ser una mezcla de arcilla, bentonita y cemento, con aditivos para facilitar la fluencia de la pasta. Para rellenar los huecos mayores se añade arena fina, ahorrando así costes. Se suele hacer la inyección con lechadas de finura creciente del exterior al interior de la cortina, de forma que la parte exterior sir-

va de contención y, a su resguardo, vaya aumentando la eficacia de la inyección hacia el interior. Se evita así que la lechada más penetrante pueda expandirse excesivamente, con la consiguiente carestía y pérdida de eficacia.

- *Pantalla continua*: permite alcanzar grandes profundidades perforando una trinchera con elementos metálicos paralelos a una distancia de 0,45 a 0,80 metros, manteniendo las paredes durante la perforación con lodo bentonítico, que luego se va sustituyendo desde abajo hacia arriba por hormigón. En la presa francesa de Serre-Ponçon se alcanzaron los 100 metros de profundidad gracias a lo cual pudo realizarse esta presa, cuya construcción se veía frenada por la imposibilidad de conseguir esa profundidad de tratamiento.

Una mayor impermeabilidad puede conseguirse construyendo dos pantallas paralelas, inyectando después el terreno intermedio o excavándolo al amparo de las pantallas y rellenándolo con una mezcla de baja permeabilidad.

La profundidad de la pantalla dependerá del porcentaje de filtraciones que se quieran reducir. Es habitual que la pantalla no se prolongue hasta el estrato impermeable, conformando así lo que se denomina como una pantalla incompleta, que aunque no reduce el total de las filtraciones, sí que las disminuye considerablemente.

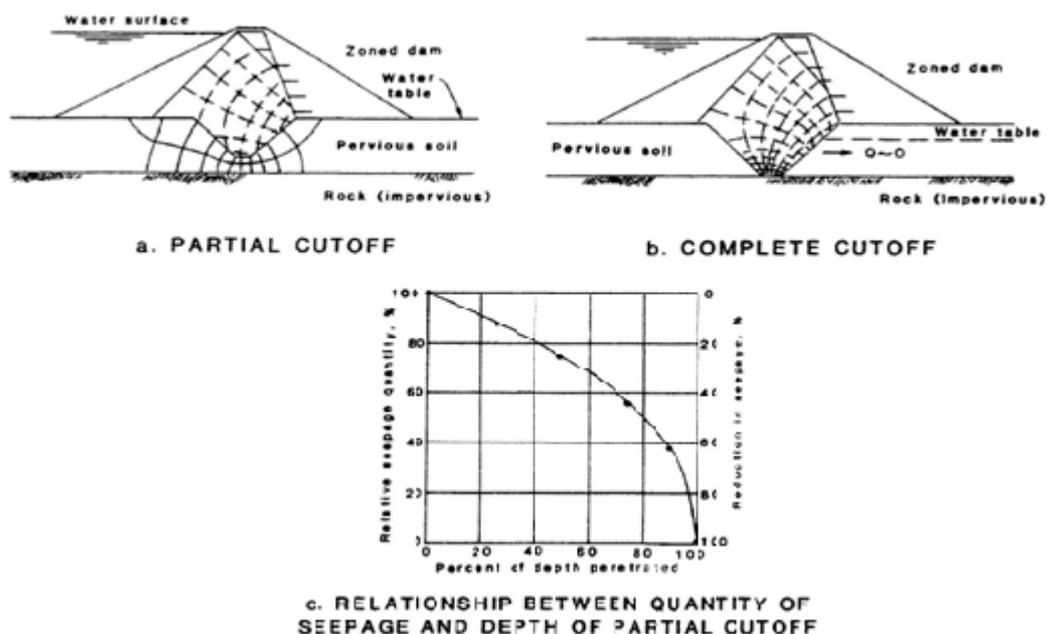


Figura 6.16. Influencia de una pantalla incompleta (14)

6.5.2. Zampeados de impermeabilización

Cuando el terreno impermeable se encuentra a mucha profundidad y no es factible o económico llegar hasta él con una pantalla impermeabilizadora, una solución alternativa es un zampeado desde el núcleo hacia aguas arriba, para conseguir un estiramiento de las líneas de filtración y la consiguiente reducción del gradiente.

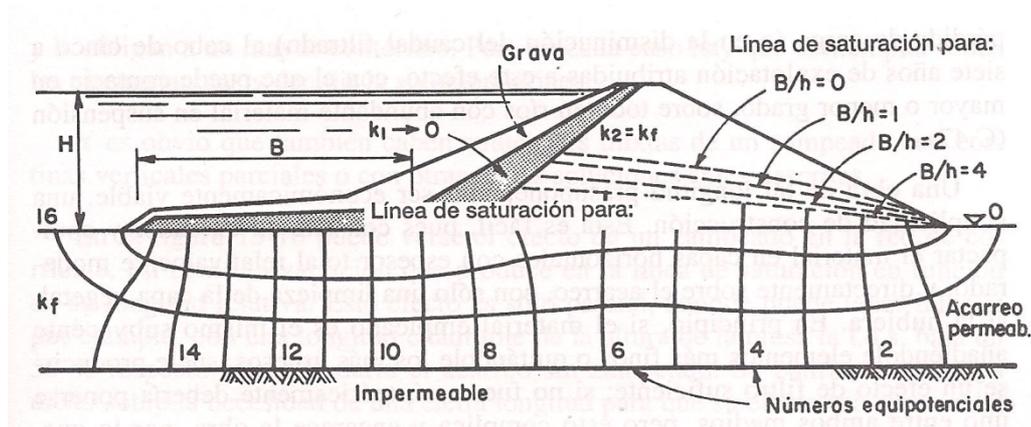


Figura 6.17. Influencia de un zampeado en la línea de saturación (18)

En principio, el zampeado se adapta mejor a un núcleo inclinado, pues a igualdad de longitud, el recorrido bajo la presa es mayor que con uno central. Se comprende que, para ser efectivo, el zampeado debe ser largo, de 3 a 10 veces la altura de la presa. Hay un límite práctico de longitud, pues al alargar el zampeado, aumenta la filtración total a través de él, y a partir de una cierta longitud, el incremento de filtración puede igualar a la disminución de ella conseguida por el alargamiento. A este efecto se añade el incremento de coste que puede no venir compensado por la menor filtración conseguida.

Existen una serie de limitaciones que deben sopesarse antes de decidir la construcción un zampeado:

- Los gradientes suelen ser mayores que los que se dan en los núcleos-
- La ausencia de filtro puede dar lugar al sifonamiento a través del acarreo.
- Si el acarreo bajo el zampeado tiene una densidad relativamente baja, puede sufrir licuefacción por efecto de un seísmo, lo que aumenta las posibilidades de agrietamiento.

- En contraste con los núcleos, que se encuentran sujetos entre los espaldones, el zampeado tiene su cara superior expuesta directamente al agua, que puede ablandarla y disolverla.

Todas estas razones deben sopesarse antes de decidir si el zampeado es la solución idónea. Con frecuencia una pantalla incompleta, resulta más efectiva y con menos riesgos pero en cada caso, hay que contemplar todas las circunstancias y decidir la solución más eficaz.

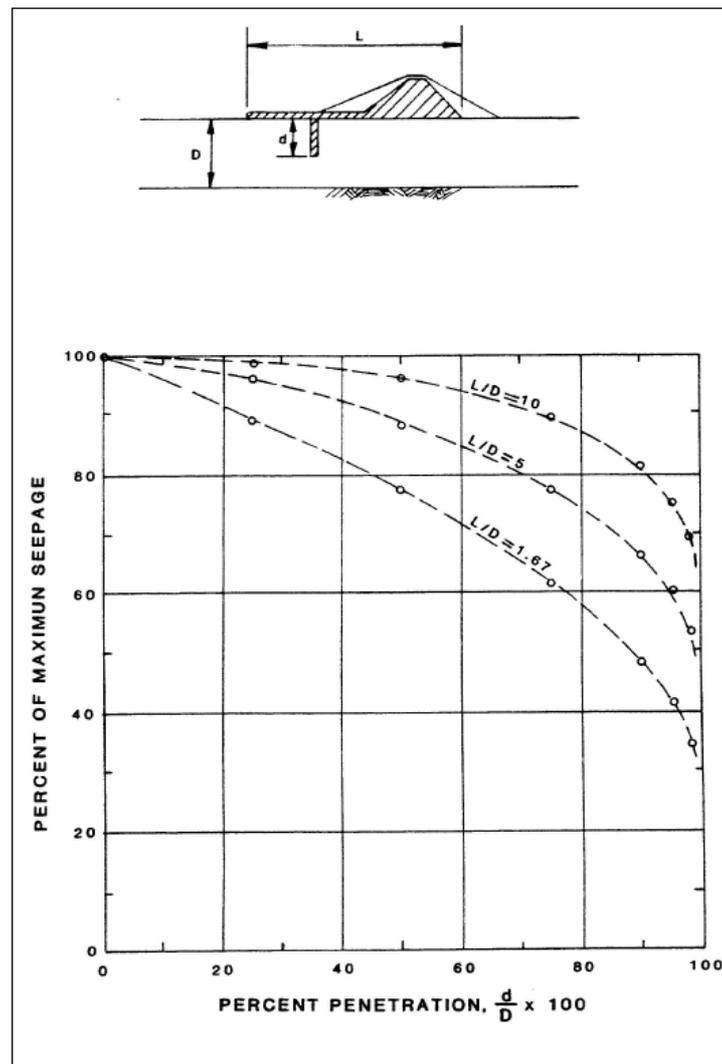


Figura 6.18. Reducción de filtraciones mediante pantalla de impermeabilización y zampeado (14)

7. SEEP/W

SEEP/W es una herramienta informática que permite modelizar redes de flujo a través de medios porosos. El análisis lo realiza mediante métodos numéricos de resolución, concretamente el método de los elementos finitos (MEF).

Forma parte de Geo-Slope International, empresa canadiense cuyo software permite resolver prácticamente cualquier problema relacionado con el ámbito de la geotecnia. El software Geo-Slope incluye:

- SLOPE/W para cálculo de estabilidad de taludes.
- SEEP/W para cálculo de redes de flujo y filtración.
- SIGMA/W orientado al cálculo de tensiones y deformaciones de suelos o rocas sometidos a carga.
- QUAKE/W para cálculo de los efectos de sismos en suelos y estructuras de suelos (presas, terraplenes, etc).
- TEMP/W aplicación de la ecuación del calor sobre estructuras de suelos.
- CTRAN/W aplicado a fenómenos de difusión de contaminantes en suelos
- VADOSE/W usado en la modelización de acuíferos.



Figura 7.1. Paquete de Geo-Slope

Geo-Studio proporciona una "licencia de estudiante" que permite utilizar el software de manera gratuita, aunque con ciertas restricciones.

A diferencia de otros programas comerciales, SEEP/W es capaz de modelizar el flujo en condiciones de "sólo saturado" y en condiciones de "saturado y no saturado", siendo ésta última una herramienta fundamental en el análisis de presas de materiales sueltos.

Hay dos tipos de análisis, según se quiera tener en cuenta o no el tiempo como variable:

- El análisis estacionario (*steady-state analysis*) es independiente del tiempo, en el cual el modelo no cambia y la carga es constante. Es el análisis empleado en las modelizaciones realizadas a lo largo de este trabajo.
- El análisis transitorio (*transient analysis*) es dependiente del tiempo y necesita unas condiciones iniciales a las que se podrán añadir otras variables con el tiempo. Es ideal para condiciones de desembalse rápido o para modelizar episodios de lluvias

Dicho análisis se realiza a través del método de los elementos finitos. Se parte de la ecuación de flujo en un medio poroso no saturado, conocida como la Ecuación de Richards:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

En análisis estacionario, el segundo término de la igualdad es cero. SEEP/W resuelve la ecuación de Richards mediante el método Galerkin de residuos ponderados aplicado a una malla de elementos finitos.

Así pues la ecuación queda simplificada en régimen estacionario:

$$[K] \cdot \{H\} = \{Q\}$$

[K]: matriz conductividad hidráulica

{H}: vector carga hidráulica

{Q}: vector caudal

La incógnita está en el vector carga hidráulica {H}. La matriz conductividad hidráulica [K] es función del vector carga hidráulica {H}, por tanto será necesario un proceso iterativo para resolver el sistema.

7.1. FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA

7.1.1. Vista DEFINE

Para definir el modelo en SEEP/W se emplea la vista **DEFINE** 

En primer lugar es necesario introducir la geometría del problema, las propiedades de los materiales, y las condiciones de contorno.

Geometría



Para definir geoméricamente el problema existen tres elementos: puntos, líneas y regiones. En primer lugar se dibujan los puntos que darán forma a la presa y posteriormente se unirán mediante líneas. Por último, se definen las regiones en base a polígonos cerrados pertenecientes a materiales homogéneos (una región para el dren, otra para el filtro, etc). El funcionamiento es similar al de los programas de CAD, y se puede activar una malla ortogonal mediante el comando GRID como ayuda al dibujo.

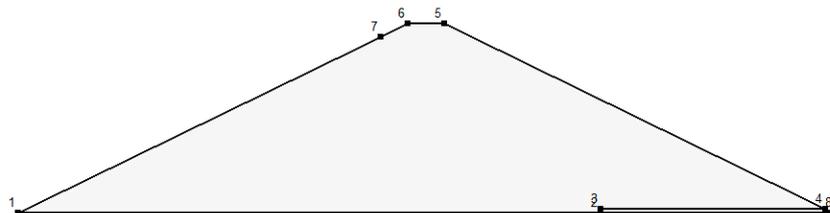


Figura 7.2. Geometría de presa de materiales sueltos con dren horizontal mediante puntos, líneas y regiones

SEEP/W permite importar la geometría de archivos con formato .dxf siendo de gran utilidad en presas en las que se disponga ya su diseño en archivos de CAD.

Materiales

Se definen materiales homogéneos para cada región dibujada. Es importante tener un buen conocimiento de las propiedades del suelo que conformará la presa, ya que los resultados dependerán en buena parte de ello.

Para resolver la ecuación de Richards en régimen estacionario, es necesario conocer la relación funcional entre conductividad hidráulica y succión para cada suelo.

Existen tres posibilidades para definir la función.

- Importar una función desde otro modelo, o bien, de alguna base de datos.
- Ingresar punto a punto los valores de la función. Además debe ingresarse el valor de la conductividad hidráulica en estado saturado (k_s)
- Estimar la función a partir de una curva de humedad característica de un suelo. Se deben especificar el método de estimación a utilizar, la curva de humedad característica, el valor de la conductividad hidráulica saturada, el rango de presiones en el cual se desea definir la función y el número de puntos a utilizar en la estimación

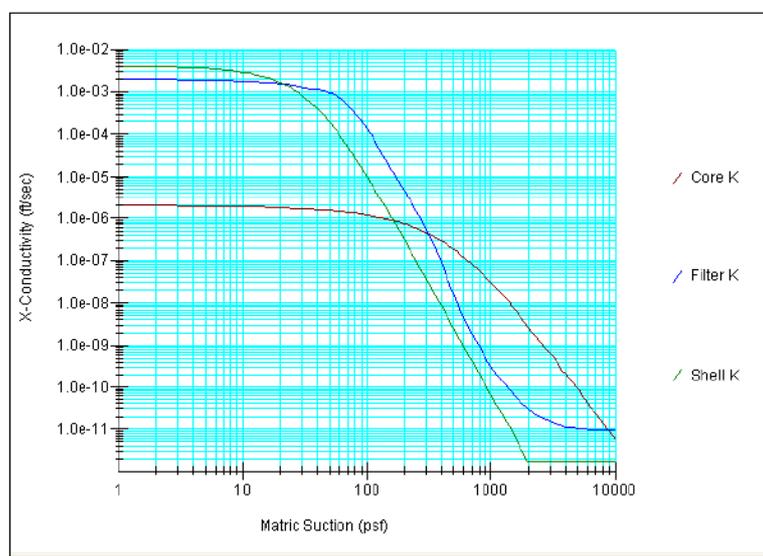


Figura 7.3. Funciones de conductividad hidráulica – succión (2)

Una vez definida dicha función para cada material se asignan los materiales a las regiones creadas anteriormente:

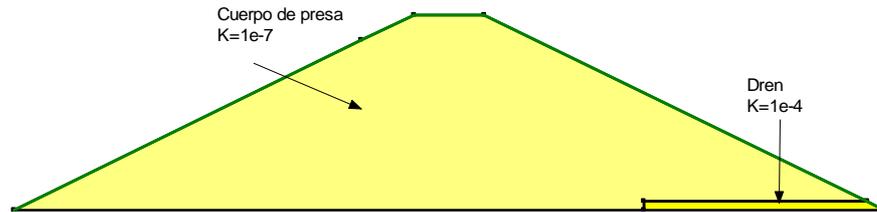


Figura 7.4. Asignación de materiales en presa de materiales sueltos con dren horizontal

Condiciones de contorno



Determinar las condiciones de contorno (*boundary conditions*) de un problema es clave para un análisis numérico, ya que las soluciones dependen del acierto del usuario a la hora de determinarlas. En ocasiones es sencillo establecerlas, pero otras veces puede ser complejo, y se requerirá que un adecuado conocimiento del modelo numérico. Los resultados del análisis proporcionan indicaciones para saber si se están determinando bien estas condiciones de contorno.

Existen dos parámetros para fijar las condiciones de contorno:

- Altura hidráulica (H)
- Caudal (Q)

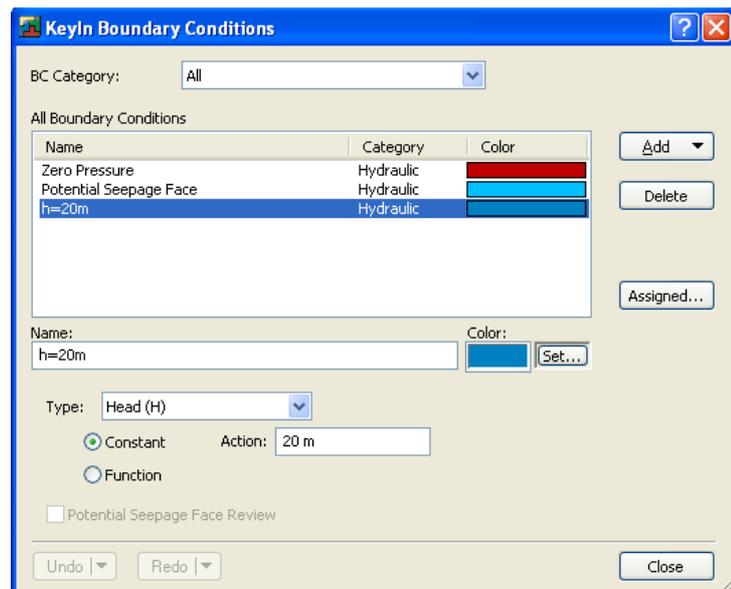


Figura 7.5. Pestaña de asignación de condiciones de contorno en SEEP/W

Las condiciones de contorno se pueden asignar a puntos, líneas o regiones del modelo geométrico que se haya definido. Por ejemplo, se puede asignar un punto con presión igual a cero, pero también una región entera con caudal igual a cero.

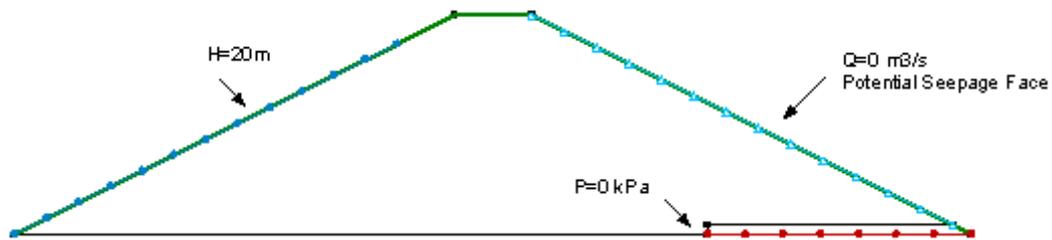


Figura 7.6. Condiciones de contorno en presa de materiales sueltos con dren horizontal

Una vez definidos la geometría, los materiales y las condiciones de contorno, es necesario establecer la malla con la que se va a realizar el análisis y las secciones de control.

Malla



SEEP/W es capaz de generar automáticamente la malla por medio del comando *mesh properties*. El usuario elige la distancia entre los nodos del mallado.

La precisión del análisis aumentará al reducir la distancia entre estos nodos, aunque si se reduce esta distancia en exceso, el tiempo de cálculo aumentará de forma significativa.

Es necesario definir una distancia entre nodos que sea lo más amplia posible pero suficiente para que los resultados sean precisos.

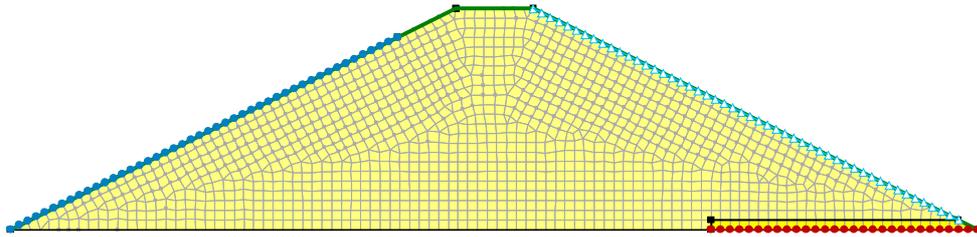


Figura 7.7. Malla generada en presa de materiales sueltos con dren horizontal

Secciones de control



Para saber el caudal que circula por cualquier sección de la presa elegida por el usuario se utiliza el comando *flux section*. Es de gran utilidad una vez se visualicen los resultados para comprobar que el análisis se ha realizado correctamente y los resultados son coherentes.

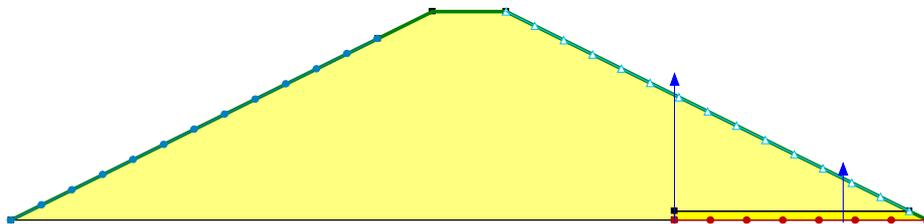


Figura 7.8. Secciones de control en presa de materiales sueltos con dren horizontal

7.1.2. Análisis SOLVE

Una vez definido el modelo correctamente, se procede al análisis mediante el comando **SOLVE** 

El objetivo del cálculo a través de elementos finitos es hallar la altura H en cada nodo, tal y como se explicó al principio del capítulo. Para ello el programa realiza di-

versas iteraciones hasta que converge en un resultado con unos umbrales de error aceptables.

Si el usuario ha olvidado introducir algún dato o existe algún error, el programa le avisará antes del cálculo indicándole dónde se encuentra el error detectado. El tiempo de análisis dependerá de la complejidad del modelo y del número de nodos que se hayan definido.

7.1.3. Vista CONTOUR

Con el modelo ya calculado, se procede a visualizar los resultados a través de la vista CONTOUR .

El objetivo del análisis de filtraciones es, en la mayor parte de los casos, obtener de forma gráfica la línea de saturación, las líneas equipotenciales y el caudal infiltrado.

Para obtener los valores numéricos sobre el resultado de la modelización en la propia vista gráfica se utilizan dos comandos:

- Etiquetas de líneas equipotenciales (*contour labels*) 
- Etiquetas de secciones de control (*flux labels*) 

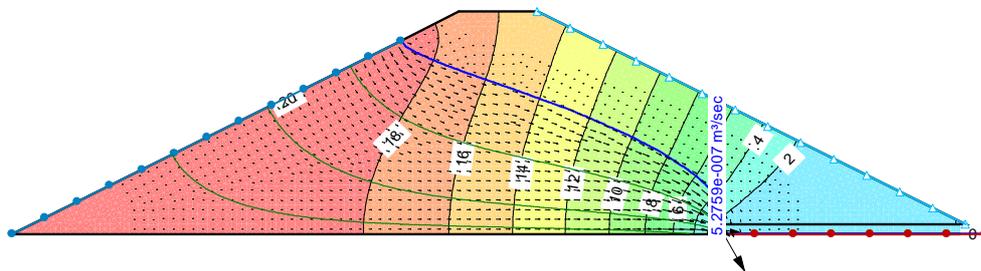
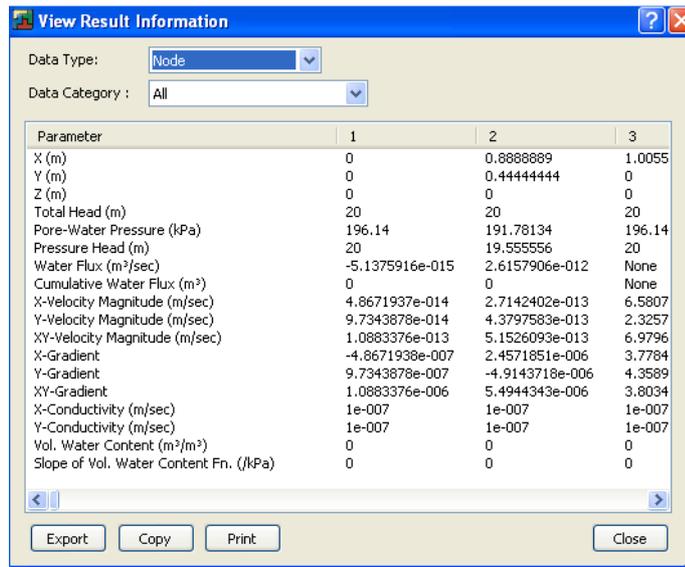


Figura 7.9. Vista CONTOUR de presa de materiales sueltos con dren horizontal

En cambio si se desea exportar los resultados y visualizarlos en una tabla e incluso incluirlos en un anejo de un estudio, se utiliza el comando:

- Información sobre los resultados (*result information*) 



Parameter	1	2	3
X (m)	0	0.8888889	1.0055
Y (m)	0	0.44444444	0
Z (m)	0	0	0
Total Head (m)	20	20	20
Pore-Water Pressure (kPa)	196.14	191.78134	196.14
Pressure Head (m)	20	19.555556	20
Water Flux (m ³ /sec)	-5.1375916e-015	2.6157906e-012	None
Cumulative Water Flux (m ³)	0	0	None
X-Velocity Magnitude (m/sec)	4.8671937e-014	2.7142402e-013	6.5807
Y-Velocity Magnitude (m/sec)	9.7343878e-014	4.3797583e-013	2.3257
XY-Velocity Magnitude (m/sec)	1.0883376e-013	5.1526093e-013	6.9796
X-Gradient	-4.8671938e-007	2.4571851e-006	3.7784
Y-Gradient	9.7343878e-007	-4.9143718e-006	4.3589
XY-Gradient	1.0883376e-006	5.4944343e-006	3.8034
X-Conductivity (m/sec)	1e-007	1e-007	1e-007
Y-Conductivity (m/sec)	1e-007	1e-007	1e-007
Vol. Water Content (m ³ /m ³)	0	0	0
Slope of Vol. Water Content Fn. (kPa)	0	0	0

Figura 7.10. Tabla de resultados de modelización en SEEP/W

Por último, cabe destacar la importancia de una correcta interpretación de los resultados. Es conveniente realizar algún cálculo previo para tener un dato aproximado sobre el resultado al que se debe converger. Los métodos gráficos pueden ser una buena opción para ello.

El modelo tiene que estar correctamente definido, y el usuario realizará las oportunas modificaciones hasta conseguirlo. La capacidad de interpretación es algo que se adquirirá con el tiempo y la experiencia.

7.2. ECUACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL INFILTRADO

Tal y como se ha comentado, SEEP/W permite hallar el valor del caudal infiltrado en una sección de control definida previamente.

Con esta herramienta, se van a elaborar una serie de ecuaciones que reproduzcan el caudal infiltrado en distintas tipologías de presas de materiales sueltos.

La metodología que se va a emplear es la siguiente:

1. Identificar los parámetros que intervienen en el proceso de filtración
2. Realizar las modelizaciones necesarias en SEEP/W variando los parámetros que se han definido previamente
3. Representar gráficamente los resultados y proceder a su análisis
4. Proponer una ecuación que se ajuste a los resultados. Comprobar su validez

No existen muchos estudios acerca de filtraciones esperables en presas de materiales sueltos, pocas son las referencias bibliográficas que hacen alusión a este aspecto. Como dato de partida y para tener una referencia, se expone a continuación los valores de caudal infiltrado que publican Alonso Franco y Gómez Laa (1982) en *The Hydraulic Auscultation as a Monitoring Test of Dam Safety* (1):

Cimentación impermeable	0,02 l/s/m
Cimentación semi-permeable	0,05 l/s/m
Cimentación permeable	0,10 l/s/m

Tabla 7.1. Filtraciones esperables en presas de materiales sueltos.

Fuente: *The Hydraulic Auscultation as a Monitoring Test of Dam Safety* (1)

Los resultados de las modelizaciones en SEEP/W se muestran en el Anexo N°1, evitando perder la continuidad expositiva del documento Memoria.

7.2.1. Caudal infiltrado en presas de materiales sueltos homogéneas con dren horizontal

Se han realizado una serie de modelizaciones para estimar el caudal infiltrado en presas de materiales sueltos homogéneas con dren horizontal y cimiento impermeable.

Parámetros que intervienen en el proceso de filtración

Se parte de la fórmula de Darcy:

$$Q = k \cdot A \cdot i$$

Siendo "Q" el caudal infiltrado, "k" la permeabilidad del medio, "A" el área de paso e "i" el gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico se puede expresar como:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Siendo " Δh " la altura piezométrica y "L" la distancia que separara los dos puntos a lo largo de la línea de corriente.

Sustituyendo en la fórmula de Darcy se obtiene finalmente:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

Por lo que se puede deducir que el caudal infiltrado dependerá de:

- La permeabilidad o conductividad hidráulica "k" del medio que atraviese.
- La altura de agua " Δh ".
- La geometría de la presa A/L que está relacionada con el talud "z", siendo éste el valor de la proyección horizontal del paramento de la presa por unidad de longitud vertical.

El objetivo final, como se ha comentado, es formular una ecuación que reproduzca el caudal infiltrado "Q" en las presas de materiales sueltos a partir de las variables enunciadas.

La metodología empleada se basa en la modelización a través del programa comercial SEEP/W de presas de materiales sueltos con una geometría preestablecida y

con los siguientes valores para las variables k , h y z que, razonablemente, se dan en presas de esta tipología:

Valores de permeabilidad k			
m/s	10^{-6} m/s	10^{-7} m/s	10^{-8} m/s
UL	10	1	0,1
cm/s	10^{-4} m/s	10^{-5} m/s	10^{-6} m/s

Tabla 7.2. Valor de la permeabilidad (k) empleado en SEEP/W para reproducir la ecuación de caudal (Q)

Valores de altura de agua h (m)														
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150

Tabla 7.3. Valor de la altura de agua (h) empleado en SEEP/W para reproducir la ecuación de caudal (Q)

Valores de talud z		
1,5	2	2,5

Tabla 7.4. Valor del talud (z) empleado en SEEP/W para reproducir la ecuación de caudal (Q)

Antes de realizar las modelizaciones se deben establecer dos criterios geométricos, que se desarrollan a continuación.

El primero de ellos es el ancho de coronación de la presa tipo. En la práctica se considera recomendable una anchura de coronación que resulte de la aplicación de la siguiente fórmula, extraída del artículo 55º de la "Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas" (8):

$$C \geq 3 + 1,5 \cdot \sqrt[3]{H - 15}$$

Siendo "C" el ancho de coronación y "H" la altura de la presa, ambos en metros.

Esta fórmula es de aplicación en zonas de bajas sismicidad. Para zonas con sismicidad media o alta se aumentará la anchura resultante en un 25% y en un 50% respectivamente. Se recomienda no dimensionar anchuras de coronación menores a 3 metros para permitir el tránsito de vehículos.

De la aplicación de la fórmula anterior se obtienen los siguientes anchos de coronación:

H (m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
C (m)	3,0	5,6	6,7	7,4	7,9	8,3	8,7	9,0	9,3	9,6	9,8	10,1	10,3	10,5	10,7

Tabla 7.5. Anchura de coronación para distintas alturas de presa según recomendaciones de diseño

A la vista de los resultados y siguiendo la tendencia actual de dimensionamiento de este tipo de presas, se escogerá para las modelizaciones una anchura de coronación constante e igual a 8 metros.

Además de la anchura de coronación, se debe determinar también la longitud del dren horizontal. No existe un criterio fijo para su dimensionamiento, pero en la práctica se recomienda que sea menor de 2/3 de la proyección horizontal del talud aguas abajo:

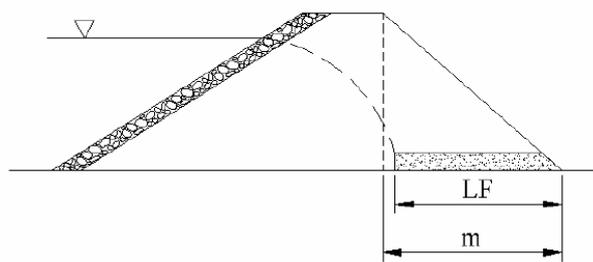


Figura 7.11. Esquema para el dimensionamiento de la longitud del dren horizontal

$$LF \geq \frac{2}{3} \cdot m$$

Siendo "LF" la longitud del dren horizontal y "m" la proyección del talud aguas abajo, tal y como se observa en la figura.

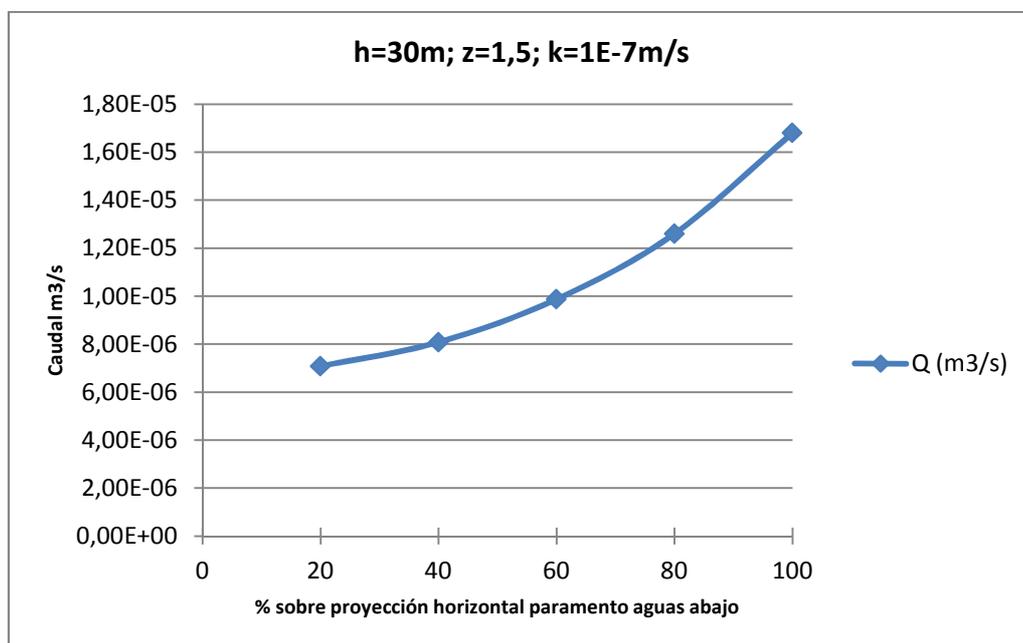
Para establecer un criterio fiable, se realiza la modelización de varias alturas de presas con la misma geometría, pero variando la longitud del dren horizontal y determinando el caudal que se infiltra. A continuación se exponen los resultados:

- a) Presa de materiales sueltos homogénea con dren horizontal, $h=30\text{m}$, $z=1,5$, $k=10^{-7}\text{ m/s}$

L dren (m)	% sobre proyección horizontal paramento aguas abajo	Q (m ³ /s)
10	20	7,08E-06
20	40	8,08E-06
30	60	9,87E-06
40	80	1,26E-05
50	100	1,68E-05

Tabla 7.6. Caudal infiltrado para distintas longitudes de dren horizontal presa tipo A

A continuación se muestran gráficamente los resultados obtenidos

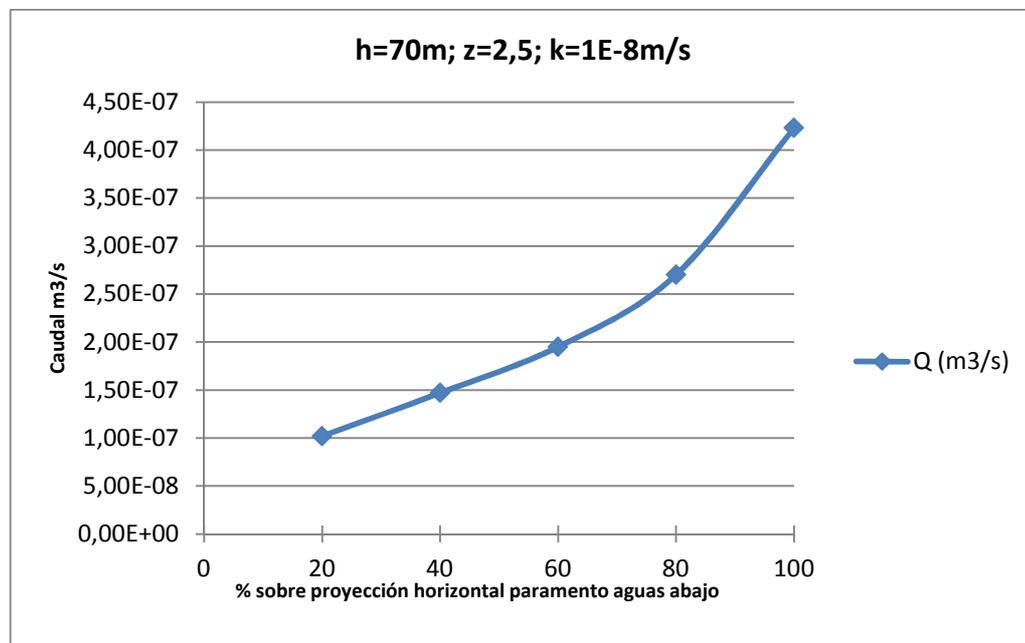


- b) Presa de materiales sueltos homogénea, dren horizontal, $h=70\text{m}$, $z=2,5$, $k=10^{-8}\text{ m/s}$

L dren (m)	% sobre proyección horizontal paramento aguas abajo	Q (m ³ /s)
36,5	20	1,02E-07
73	40	1,47E-07
109,5	60	1,95E-07
146	80	2,70E-07
182,5	100	4,23E-07

Tabla 7.7. Caudal infiltrado para distintas longitudes de dren horizontal presa tipo B

De nuevo se representan los resultados gráficamente:



De los resultados obtenidos se observa un cambio brusco en la pendiente del caudal de filtraciones a partir del 60%. Con el objetivo de mejorar la estabilidad del talud aguas abajo pero a la vez no aumentar el caudal infiltrado de forma innecesaria y ahorrar costes, se toma un valor de $LF = 0,60 \cdot m$

Modelización mediante SEEP/W

Para obtener unos resultados precisos, se van a realizar 135 modelizaciones, teniendo en cuenta todos los parámetros anteriormente citados.

El primer paso es definir la geometría de la presa mediante regiones. Se dibujarán dos regiones con el comando REGION, la región correspondiente al cuerpo de presa y la correspondiente al dren horizontal.

Para mejorar el aspecto gráfico se realizarán unos ejes mediante el comando AXES y un mallado con el comando GRID. Además se dibujarán la línea de la lámina de agua, la definición del talud y la acotación de la coronación mediante el comando SKETCH. La forma de realizarlo es prácticamente la misma que en los programas de CAD.

Para definir las características de los materiales se usará el comando KEYIN MATERIALS, y se crearán dos materiales diferentes:

- "Cuerpo de presa" con una conductividad hidráulica (o permeabilidad) según la Tabla 7.2.
- "Dren" con una conductividad hidráulica en todo caso de $k=10^{-4}$ m/s.

Se asignará posteriormente a cada región dibujada el material que le corresponda mediante el comando DRAW MATERIALS.

A continuación se definirán las condiciones de contorno mediante KEYIN BOUNDARY CONDITIONS. Se crearán 3 condiciones de contorno distintas:

- *Zero Pressure*: lugares donde la presión será igual a cero. Será el caso del dren horizontal
- *Potential Seepage Face*: lugares donde el caudal de paso será igual a cero. Será el caso del paramento aguas abajo de la presa.

- *Altura piezométrica*: donde se introducirá un valor de altura h según la Tabla 7.3. Se asignará a la zona en contacto con el agua en el paramento aguas arriba.

Una vez definidas, se dibujarán mediante el comando DRAW BOUNDARY CONDITIONS.

La malla que se va a emplear se genera con el comando MESH PROPERTIES, y tendrá un espaciado en todo caso de 1 metro.

La sección de control se localizará al inicio del dren horizontal, al ser la sección por la que circulará el mayor volumen de caudal. Se dibujará mediante el comando DRAW FLUX SECTIONS

En la siguiente figura se muestra el aspecto final que presenta una modelización de este tipo tras introducir todos los datos necesarios.

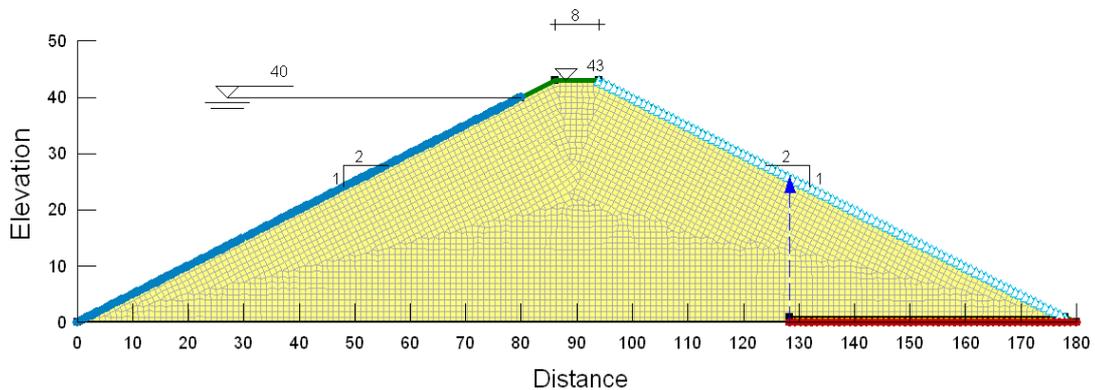


Figura 7.12. Presa de materiales sueltos con dren horizontal modelizada en SEEP/W. Vista DEFINE

Una vez definida la presa, se iniciará el análisis de los resultados mediante el comando SOLVE ANALYSES. SEEP/W procederá a resolverlo mediante el método de los elementos finitos.

Los resultados aparecerán una vez termine el análisis mediante el comando CONTOUR. Aparecerán representadas las líneas equipotenciales, las líneas de flujo y la línea correspondiente al nivel freático. El valor del caudal que circula por la sección de control se obtiene mediante el comando DRAW FLUX LABELS.

El aspecto una vez obtenidos los resultados se muestra en el siguiente figura.

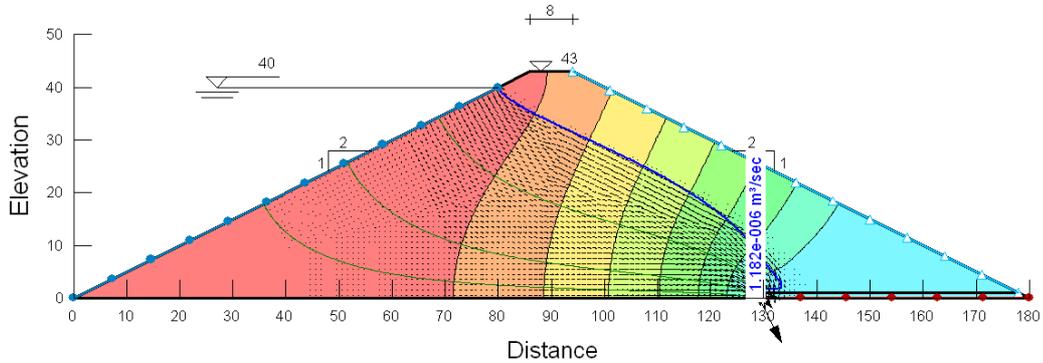


Figura 7.13. Presa de materiales sueltos con dren horizontal modelizada en SEEP/W. Vista CONTOUR

Análisis de resultados

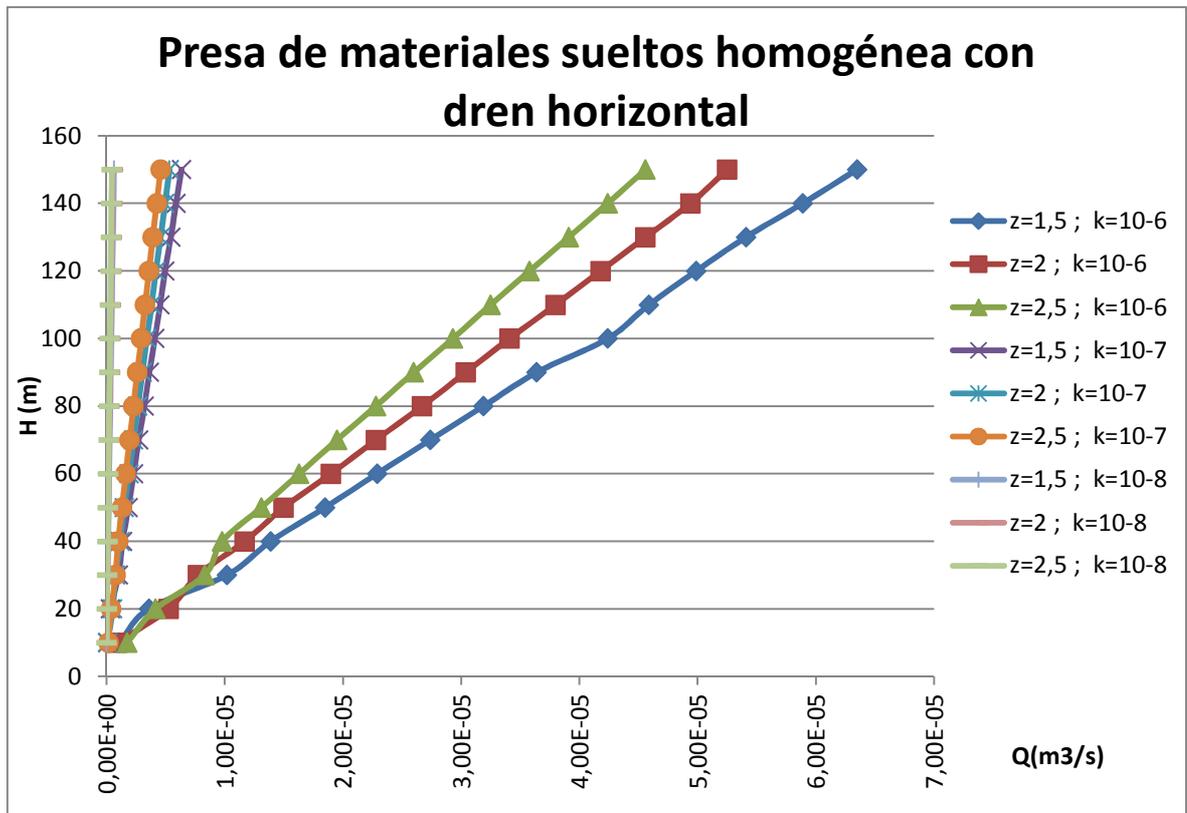
Con los datos de flujo de todas las modelizaciones se ha elaborado la tabla 7.8, donde se muestra el caudal en l/min/ml de cada modelo realizado en SEEP/W.

CAUDAL (Q) l/min/ml				
H (m)	PERMEABILIDAD k (m/s)			z
	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	
10	0,0660	0,0067	0,0007	1,5
20	0,2160	0,0213	0,0023	
30	0,6120	0,0612	0,0061	
40	0,8340	0,0822	0,0083	
50	1,1100	0,1110	0,0111	
60	1,3740	0,1380	0,0138	
70	1,6440	0,1644	0,0164	
80	1,9140	0,1920	0,0192	
90	2,1840	0,2184	0,0218	
100	2,5440	0,2460	0,0245	
110	2,7540	0,2724	0,0272	
120	2,9940	0,2970	0,0297	
130	3,2460	0,3270	0,0327	
140	3,5340	0,3534	0,0353	
150	3,8100	0,3810	0,0381	

10	0,0546	0,0055	0,0006	2
20	0,3156	0,0317	0,0032	
30	0,4644	0,0466	0,0049	
40	0,7020	0,0708	0,0071	
50	0,9000	0,0906	0,0091	
60	1,1400	0,1146	0,0115	
70	1,3680	0,1374	0,0137	
80	1,6020	0,1602	0,0160	
90	1,8240	0,1824	0,0182	
100	2,0460	0,2052	0,0205	
110	2,2800	0,2286	0,0229	
120	2,5080	0,2508	0,0251	
130	2,7360	0,2742	0,0274	
140	2,9640	0,2970	0,0297	
150	3,1500	0,3198	0,0320	
10	0,1050	0,0107	0,0011	2,5
20	0,2496	0,0245	0,0024	
30	0,4986	0,0460	0,0046	
40	0,5868	0,0593	0,0059	
50	0,7860	0,0786	0,0079	
60	0,9780	0,0978	0,0097	
70	1,1700	0,1176	0,0118	
80	1,3680	0,1368	0,0137	
90	1,5600	0,1560	0,0157	
100	1,7580	0,1764	0,0176	
110	1,9500	0,1956	0,0196	
120	2,1480	0,2154	0,0215	
130	2,3460	0,2352	0,0235	
140	2,5440	0,2550	0,0254	
150	2,7360	0,2748	0,0275	

Tabla 7.8. Valor de caudal infiltrado obtenido de las modelizaciones de presas de materiales sueltos con dren horizontal.

Se observa que la permeabilidad (k) es directamente proporcional al caudal infiltrado (Q) con desviaciones muy pequeñas, cumpliendo así la ley de Darcy. Por ello, a partir de ahora se trabajará con el valor Q/k , que proporciona valores más manejables. Gráficamente, la tabla anterior:



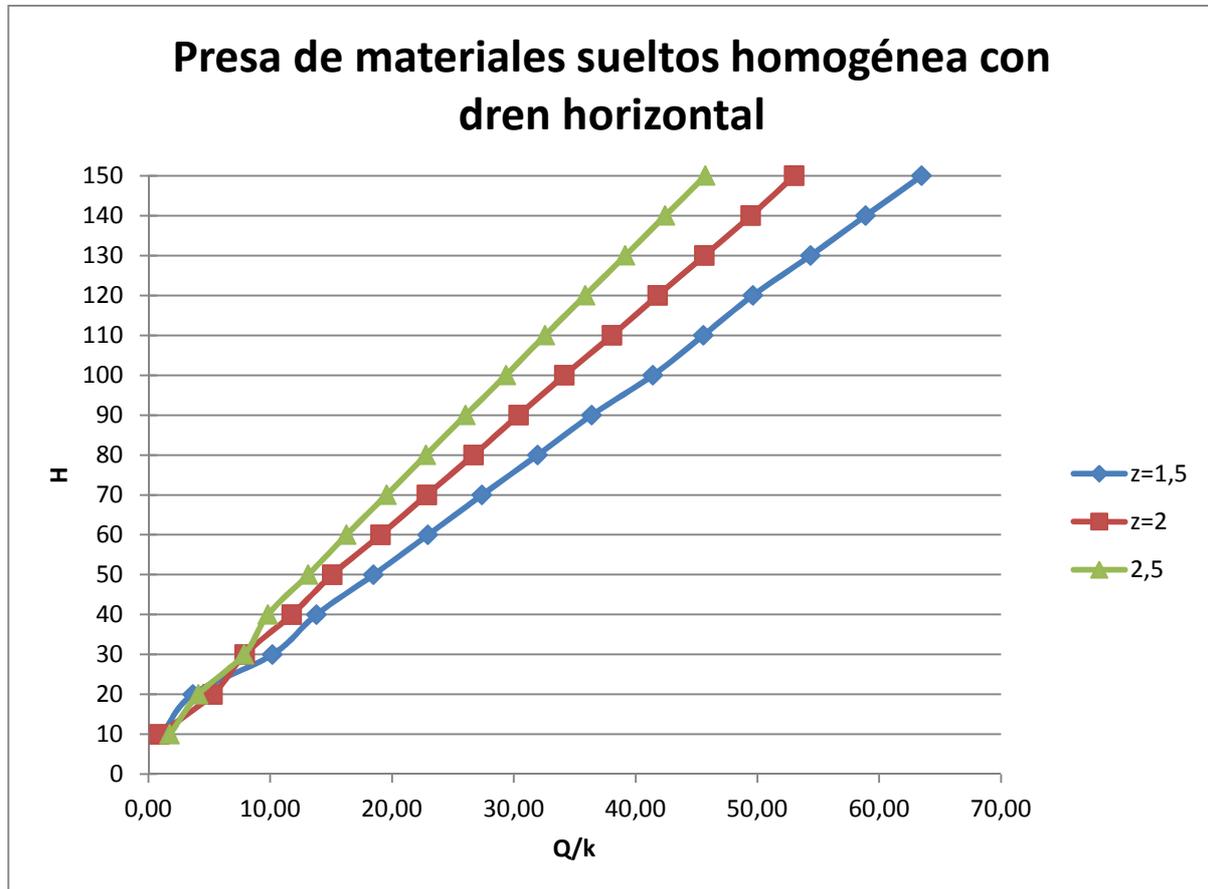
Se muestra a continuación una tabla similar a la anterior pero sustituyendo el valor de Q por el de Q/k , estando el caudal expresado en m^3/s y la permeabilidad en m/s .

CAUDAL / PERMEABILIDAD (Q/k)					
H (m)	PERMEABILIDAD k (m/s)			Q/k medio	z
	10^{-6} m/s	10^{-7} m/s	10^{-8} m/s		
10	1,10	1,11	1,11	1,11	z=1,5
20	3,60	3,55	3,84	3,66	
30	10,20	10,20	10,20	10,20	
40	13,90	13,70	13,80	13,80	
50	18,50	18,50	18,50	18,50	
60	22,90	23,00	23,00	22,97	
70	27,40	27,40	27,40	27,40	
80	31,90	32,00	32,00	31,97	
90	36,40	36,40	36,40	36,40	
100	42,40	41,00	40,90	41,43	
110	45,90	45,40	45,40	45,57	

120	49,90	49,50	49,50	49,63	
130	54,10	54,50	54,50	54,37	
140	58,90	58,90	58,90	58,90	
150	63,50	63,50	63,50	63,50	
10	0,91	0,92	0,92	0,91	
20	5,26	5,28	5,29	5,28	z=2
30	7,74	7,77	8,24	7,91	
40	11,70	11,80	11,80	11,77	
50	15,00	15,10	15,20	15,10	
60	19,00	19,10	19,10	19,07	
70	22,80	22,90	22,90	22,87	
80	26,70	26,70	26,70	26,70	
90	30,40	30,40	30,40	30,40	
100	34,10	34,20	34,20	34,17	
110	38,00	38,10	38,10	38,07	
120	41,80	41,80	41,90	41,83	
130	45,60	45,70	45,70	45,67	
140	49,40	49,50	49,50	49,47	
150	52,50	53,30	53,30	53,03	
10	1,75	1,78	1,78	1,77	
20	4,16	4,08	4,07	4,10	
30	8,31	7,67	7,62	7,86	
40	9,78	9,88	9,80	9,82	
50	13,10	13,10	13,20	13,13	
60	16,30	16,30	16,20	16,27	
70	19,50	19,60	19,60	19,57	
80	22,80	22,80	22,80	22,80	
90	26,00	26,00	26,10	26,03	
100	29,30	29,40	29,40	29,37	
110	32,50	32,60	32,60	32,57	
120	35,80	35,90	35,90	35,87	
130	39,10	39,20	39,20	39,17	
140	42,40	42,50	42,40	42,43	
150	45,60	45,80	45,80	45,73	

Tabla 7.9. Valor de Q/k obtenido de las modelizaciones en SEEP/W de presas de materiales sueltos con dren horizontal

Se procede a representar gráficamente la tabla anterior con los datos de Q/k medio



Se observan ciertas distorsiones para $h < 40\text{m}$, y una relación prácticamente lineal para el resto de casos. Estas distorsiones se deben a que el mallado de 1 metro es demasiado grande en presas de tan poco tamaño, obteniéndose un resultado con poca precisión (Figura 7.14).

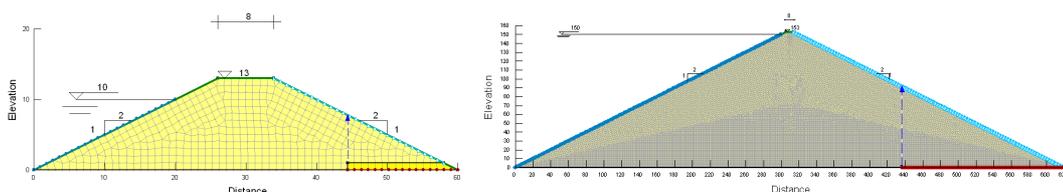
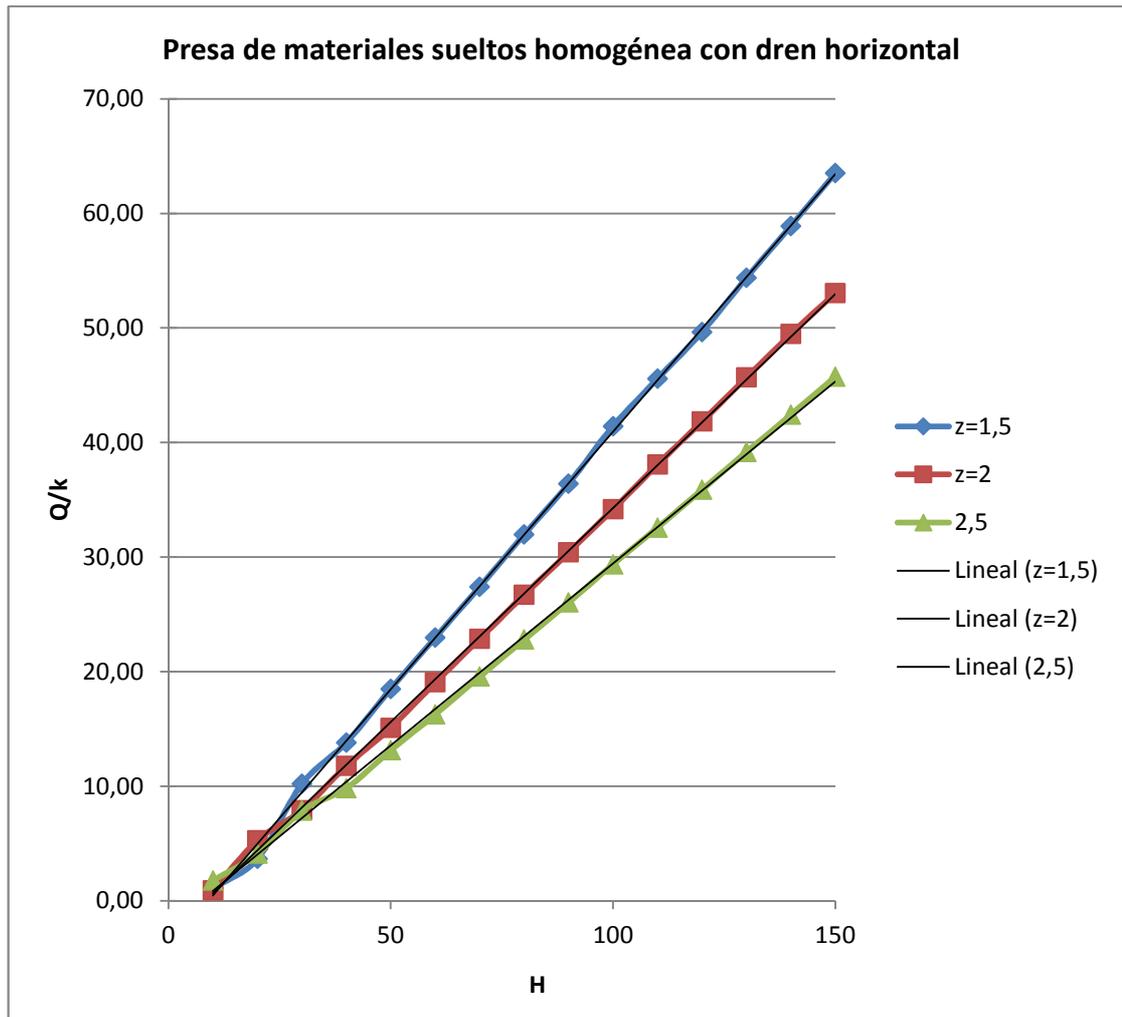


Figura 7.14. Mallado de 1 metro en presa de altura 10 metros y de altura 150 metros

Ecuación

Por último, se obtendrá una expresión que relacione el caudal (Q) con la permeabilidad (k) la altura de agua (h) y el talud (z).

De la Tabla 7.9 se obtiene el siguiente gráfico, donde se han representado la ecuación de la interpolación lineal de cada recta:



Las ecuaciones de las rectas interpoladas tienen la forma $Q/k = A \cdot h + B$

$$z=1,5 \quad Q/k = 0,44981117 \cdot h - 4,02529826$$

$$z=2 \quad Q/k = 0,37343789 \cdot h - 3,05926593$$

$$z=2,5 \quad Q/k = 0,31764591 \cdot h - 2,31258524$$

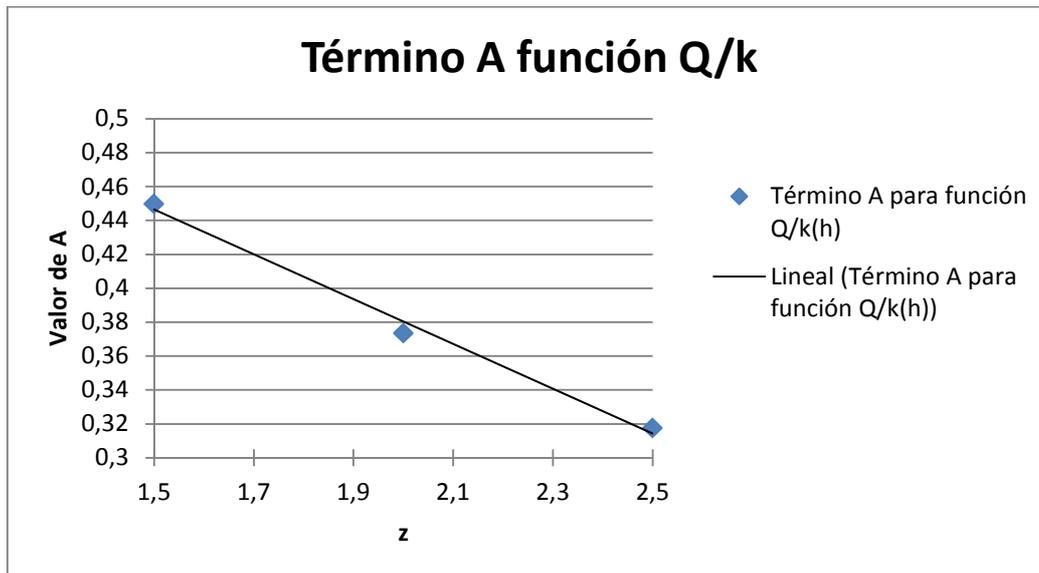
Es necesario hallar el valor de A y de B que integre la variable z en la ecuación Q/k. Es decir, hay que transformar Q/k(h) en Q/k(h,z).

En primer lugar, el término "A":

Término A para función Q/k(h)	
z	A
1,5	0,44981117
2	0,37343789
2,5	0,31764591

Tabla 7.10. Término A de la ecuación Q/k(h,z)

Se representan gráficamente a continuación:



La ecuación de la recta será:

$$A = -0,1322 \cdot z + 0,6446$$

Sustituyendo en Q/k=A·h+B:

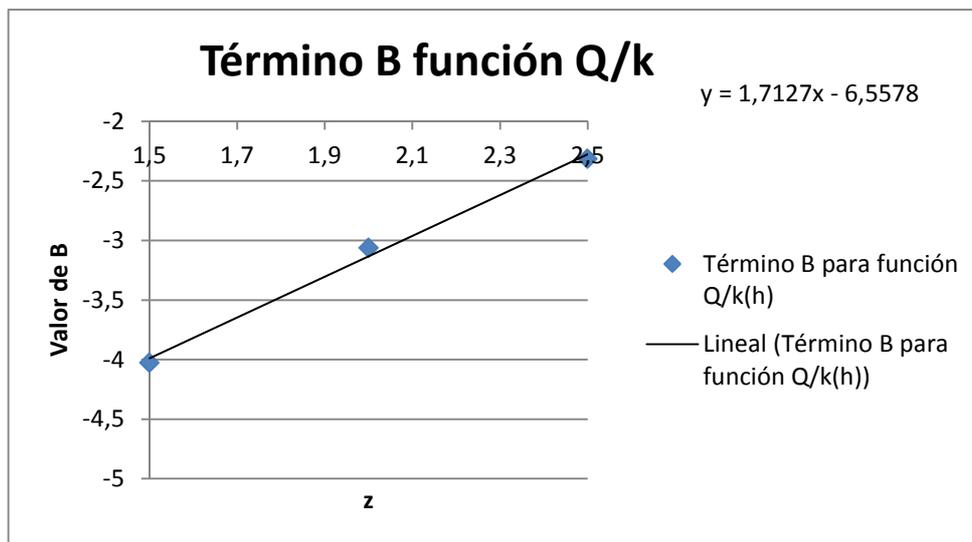
$$Q/k = -0,1322 \cdot z \cdot h + 0,6446 \cdot z + B$$

El término "B" se hallará de la misma forma:

Término B para función Q/k(h)	
z	B
1,5	-4,02529826
2	-3,05926593
2,5	-2,31258524

Tabla 7.11. Término B de la ecuación Q/k(h,z)

Al representarlo gráficamente:



La ecuación de la recta representada es:

$$B = 1,7127 \cdot z - 6,5578$$

Sustituyendo en la ecuación $Q/k = -0,1322 \cdot z \cdot h + 0,6446 \cdot z + B$:

$$Q/k = -0,1322 \cdot z \cdot h + 0,6446 \cdot z + 1,7127 \cdot z - 6,5578$$

Es la ecuación que relaciona Q/k con z y h

Se comprueba la validez de la ecuación en la Tabla 7.12, comparando el valor de Q/k obtenido en SEEP/W con el que resulta de la ecuación. Se observa también el error que se produce en la ecuación respecto de la modelización:

Q/k = -0,1322·z·h + 0,6446·h + 1,7127·z - 6,5578							
Nº	h	z	Q/k SEEP	Q/k formula	%error	% error abs orden	Nº
1	10	1,5	1,11	0,47	57,15%	0,13%	12
2	20	1,5	3,66	4,94	-34,85%	0,15%	39
3	30	1,5	10,20	9,40	7,84%	0,23%	38
4	40	1,5	13,80	13,86	-0,46%	0,46%	4
5	50	1,5	18,50	18,33	0,94%	0,54%	7
6	60	1,5	22,97	22,79	0,77%	0,61%	9
7	70	1,5	27,40	27,25	0,54%	0,62%	13
8	80	1,5	31,97	31,72	0,79%	0,69%	14
9	90	1,5	36,40	36,18	0,61%	0,74%	37
10	100	1,5	41,43	40,64	1,90%	0,77%	6
11	110	1,5	45,57	45,10	1,01%	0,79%	8
12	120	1,5	49,63	49,57	0,13%	0,79%	40
13	130	1,5	54,37	54,03	0,62%	0,86%	15
14	140	1,5	58,90	58,49	0,69%	0,90%	41
15	150	1,5	63,50	62,96	0,86%	0,94%	5
16	10	2	0,91	0,67	26,82%	1,01%	11
17	20	2	5,28	4,47	15,26%	1,26%	42
18	30	2	7,91	8,27	-4,55%	1,27%	29
19	40	2	11,77	12,08	-2,63%	1,37%	28
20	50	2	15,10	15,88	-5,15%	1,56%	43
21	60	2	19,07	19,68	-3,22%	1,57%	27
22	70	2	22,87	23,48	-2,69%	1,63%	30
23	80	2	26,70	27,28	-2,19%	1,64%	26
24	90	2	30,40	31,09	-2,26%	1,73%	44
25	100	2	34,17	34,89	-2,11%	1,86%	36
26	110	2	38,07	38,69	-1,64%	1,90%	10
27	120	2	41,83	42,49	-1,57%	1,96%	45
28	130	2	45,67	46,29	-1,37%	2,11%	25
29	140	2	49,47	50,10	-1,27%	2,19%	23
30	150	2	53,03	53,90	-1,63%	2,25%	35
31	10	2,5	1,77	0,86	51,13%	2,26%	24
32	20	2,5	4,10	4,01	2,37%	2,37%	32
33	30	2,5	7,86	7,15	9,08%	2,63%	19
34	40	2,5	9,82	10,29	-4,77%	2,69%	22
35	50	2,5	13,13	13,43	-2,25%	3,22%	21
36	60	2,5	16,27	16,57	-1,86%	4,55%	18

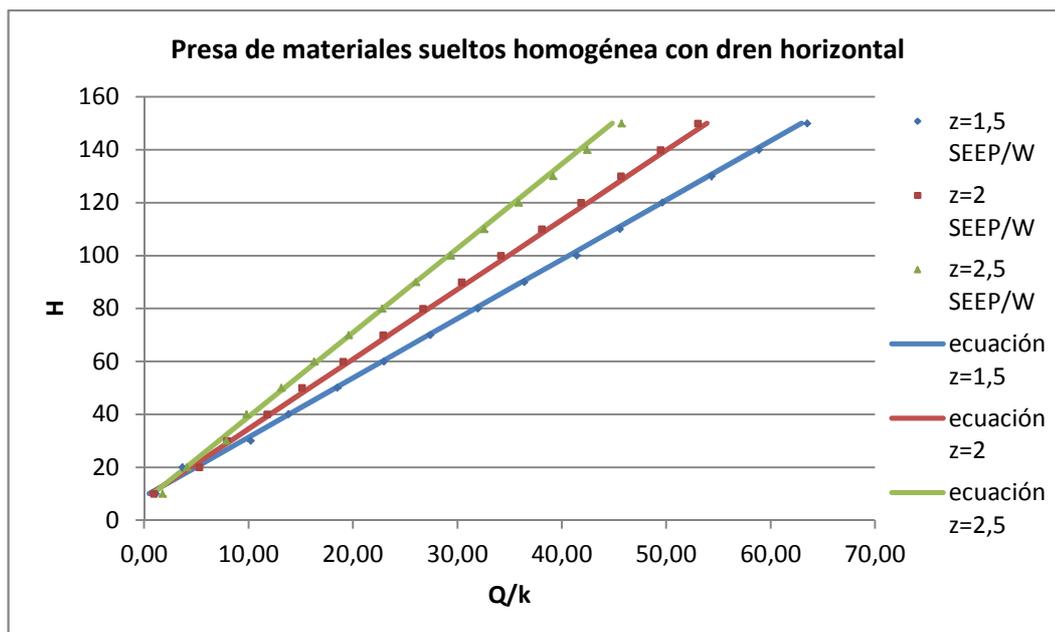
37	70	2,5	19,57	19,71	-0,74%	4,77%	34
38	80	2,5	22,80	22,85	-0,23%	5,15%	20
39	90	2,5	26,03	25,99	0,15%	7,84%	3
40	100	2,5	29,37	29,13	0,79%	9,08%	33
41	110	2,5	32,57	32,27	0,90%	15,26%	17
42	120	2,5	35,87	35,42	1,26%	26,82%	16
43	130	2,5	39,17	38,56	1,56%	34,85%	2
44	140	2,5	42,43	41,70	1,73%	51,13%	31
45	150	2,5	45,73	44,84	1,96%	57,15%	1

 Tabla 7.12. Comprobación de la validez de la ecuación $Q/k(h,z)$

El error máximo que se obtiene corresponde a la presa de altura $h=10$ metros con talud $z=1,5$ y su valor es del 57,15%. El error medio se sitúa en torno al 5,87%. El 91,11% de los valores de la ecuación tienen un error menor del 10% respecto de las modelizaciones, y el 84,44% lo tienen menor del 5%.

Como se comentó anteriormente, las modelizaciones con $h < 40$ metros no siguen la relación lineal en la gráfica $Q/k(h)$ debido a un mallado insuficiente en la modelización (Figura 7.14). Si omitimos estos valores en la nueva ecuación, el valor medio del error que se obtiene es del 1,53%. Por tanto, se considerará válida la ecuación para presas con altura $h > 40$ metros.

A continuación se muestran gráficamente los valores de SEEP/W y de la ecuación calculada, comprobándose así el ajuste de la ecuación:



7.2.2. *Caudal infiltrado en presas de materiales sueltos homogéneas con dren chimenea*

Los drenes chimenea son una alternativa muy efectiva cuando se quiere asegurar la estanqueidad del paramento aguas abajo, ya que cortan la línea de corriente a su paso por el dren vertical.

Se han realizado una serie de modelizaciones para estimar el caudal infiltrado en presas de materiales sueltos homogéneas con dren chimenea y cimientado impermeable.

Parámetros que intervienen en el proceso de filtración

El proceso de filtración en este tipo de presas también se rige por la Ley de Darcy, por lo que los parámetros que pueden variar son los mismos que en el caso anterior:

- La permeabilidad o conductividad hidráulica " k " de los distintos materiales (tabla 7.2).
- La altura de agua " Δh " (tabla 7.3).
- El talud " z " de los paramentos (tabla 7.4).

Se va a mantener un ancho de coronación constante e igual a 8 metros, al igual que en el caso anterior, siguiendo la tendencia actual de diseño de presas.

Para el diseño del dren chimenea se han seguido las recomendaciones de la *Guía Técnica nº2 sobre criterios para proyectos de presas y sus obras anejas* (10). Se dispone en primer lugar el filtro para evitar migraciones de finos fuera del cuerpo de presa. A continuación se dispone el dren con la misión de evacuar las posibles filtraciones de agua sin comprometer la estabilidad del espaldón aguas abajo.

Ambos elementos suelen proyectarse con una altura que alcance o se eleve ligeramente sobre el nivel del embalse. Si tuviesen menos altura podrían también teóricamente cumplir su misión, pero se aconseja asegurar que en ninguna circunstancia el filtro sea sobrepasado por las filtraciones. Se ha optado por proyectar todos los drenes verticales a una altura igual al nivel del embalse.

Sobre su situación en el interior de la presa, cuanto más cerca se sitúe del paramento de aguas arriba, más se mejora la estabilidad del espaldón de aguas abajo, aunque debe tener que guardar suficiente distancia con la zona del espaldón de aguas arriba para que las filtraciones sean tolerables y la presa funcione como elemento estanco. Por tanto, los drenes se han diseñado desde el inicio del espaldón aguas abajo hasta el pie de presa, tal y como se indica en la figura 7.15.

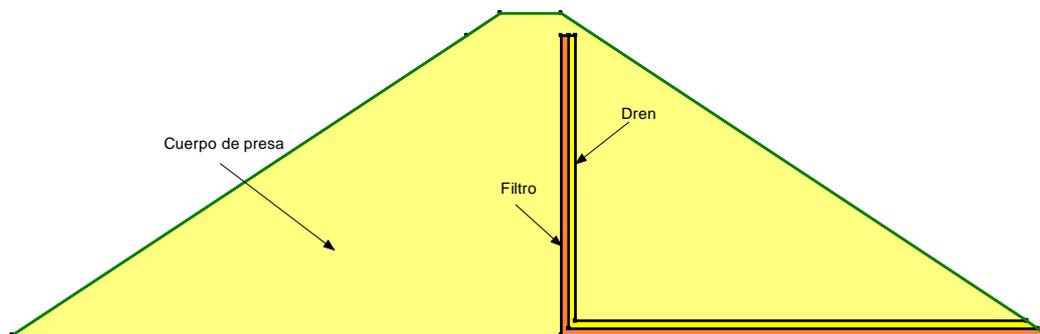


Figura 7.15. Diseño del dren chimenea

Modelización mediante SEEP/W

De nuevo se van a modelizar 135 presas de materiales sueltos usando todas las combinaciones de los parámetros anteriormente enunciados.

En esta ocasión se crearán tres regiones: una para el cuerpo de presa, otra para el filtro y otra para el dren, tal y como se muestra en la figura 7.15.

Se definirán las características de los materiales a través del comando KEYIN MATERIALS:

- "Cuerpo de presa", con una conductividad hidráulica variable, según la tabla 7.2.
- "Dren", con una conductividad hidráulica en todo caso de $k=10^{-4}$ m/s.
- "Filtro", con una conductividad hidráulica en todo caso de $k=10^{-5}$ m/s.

Se asignará posteriormente a cada región dibujada el material que le corresponda mediante el comando DRAW MATERIALS.

A continuación se definirán las condiciones de contorno mediante el comando KEYIN BOUNDARY CONDITIONS. Este es el paso más complejo de la modelización, y requerirá un proceso iterativo y una reflexión de cada resultado hasta que se logre una solución válida. El programa es extremadamente sensible a cualquier cambio en las condiciones de contorno que se establezcan.

Como premisa, se intentará imponer el menor número posible de condiciones de contorno para permitir que el agua circule con mayor libertad. Si el resultado no es válido (valores anómalos de caudal o línea de saturación incorrecta), entonces se impondrá alguna condición, como por ejemplo, un punto con presión igual a cero en la salida del dren. En la figura 7.16 se observa una modelización corregida con este método.

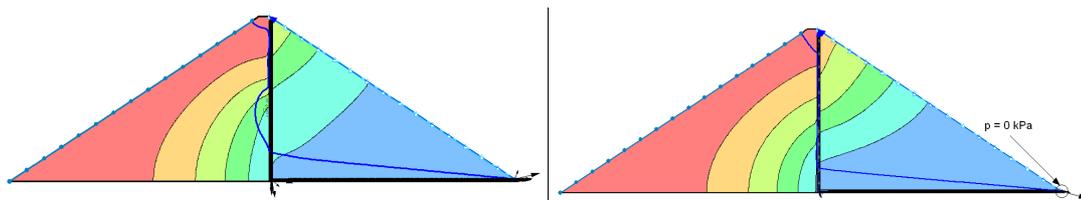


Figura 7.16 Corrección de modelización de dren chimenea mediante boundary conditions

Se han utilizado 3 condiciones de contorno distintas:

- *Zero Pressure*: lugares donde la presión será igual a cero. Utilizado a la salida del dren en los casos en los que el resultado no sea válido
- *Potential Seepage Face*: lugares donde el caudal de paso será igual a cero. Será el caso del paramento aguas abajo de la presa.
- *Altura piezométrica*: donde se introducirá un valor de altura h según la Tabla 7.3. Se asignará a la zona en contacto con el agua en el paramento aguas arriba.

Una vez definidas, se dibujarán mediante el comando DRAW BOUNDARY CONDITIONS.

La malla que se va a emplear se genera con el comando MESH PROPERTIES, y tendrá un espaciado en todo caso de 1 metro.

Se establecerán varias secciones de control mediante el comando DRAW FLUX SECTIONS para comprobar la validez de los resultados.

En este caso, la sección situada al inicio de dren no es válida para interpretar los resultados, debido a que se encuentra en una zona de frontera entre la zona saturada y la no saturada. Este problema puede observarse en las primeras modelizaciones de dren chimenea incluidas en el Anexo nº1. Aguas abajo de dicha sección, los resultados sí que son aceptables, y deben tener valores constantes en todas las secciones que definamos, por tanto, serán los que se utilizarán.

En la figura 7.17 se muestra el aspecto (vista DEFINE) que presenta una modelización de este tipo tras introducir todos los datos necesarios.

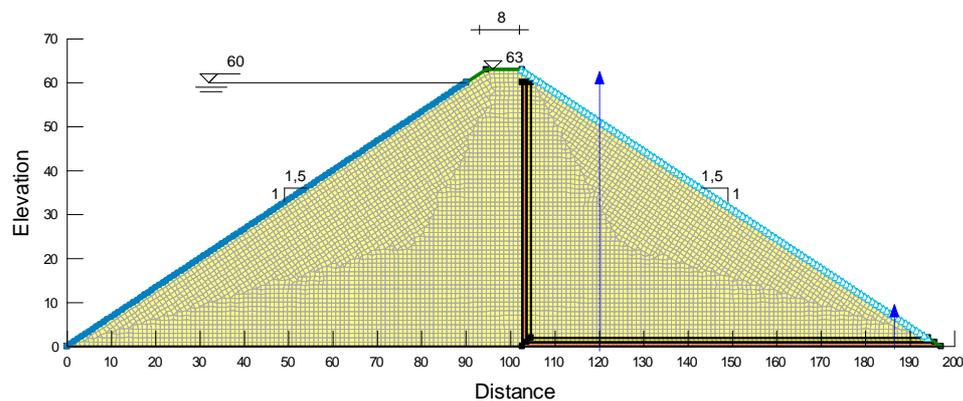


Figura 7.17. Presa de materiales sueltos con dren chimenea modelizada en SEEP/W. Vista DEFINE

Una vez definida la presa, se iniciará el análisis de los resultados mediante el comando SOLVE ANALYSES. SEEP/W procederá a resolverlo mediante el método de los elementos finitos.

Los resultados aparecerán una vez termine el análisis mediante la vista CONTOUR. Aparecerán representadas las líneas equipotenciales, las líneas de flujo y la línea correspondiente al nivel freático. El valor del caudal que circula por la sección de control se obtiene mediante el comando DRAW FLUX LABELS.

El aspecto una vez obtenidos los resultados se muestra en la figura 7.18.

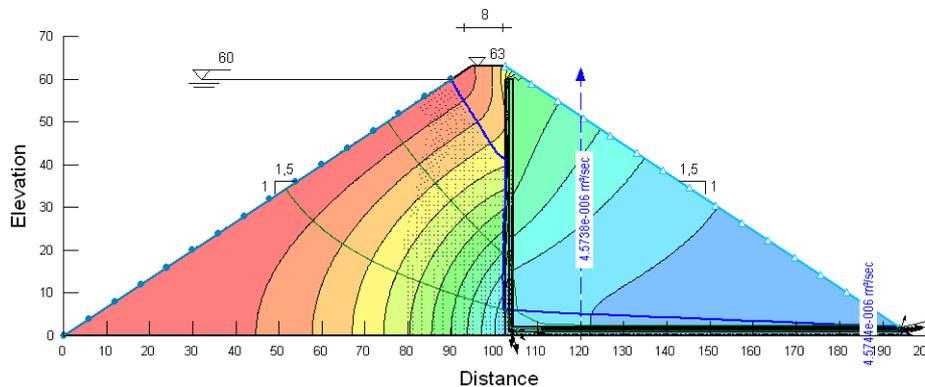


Figura 7.18. Presa de materiales sueltos con dren chimenea modelizada en SEEP/W. Vista CONTOUR

Análisis de los resultados

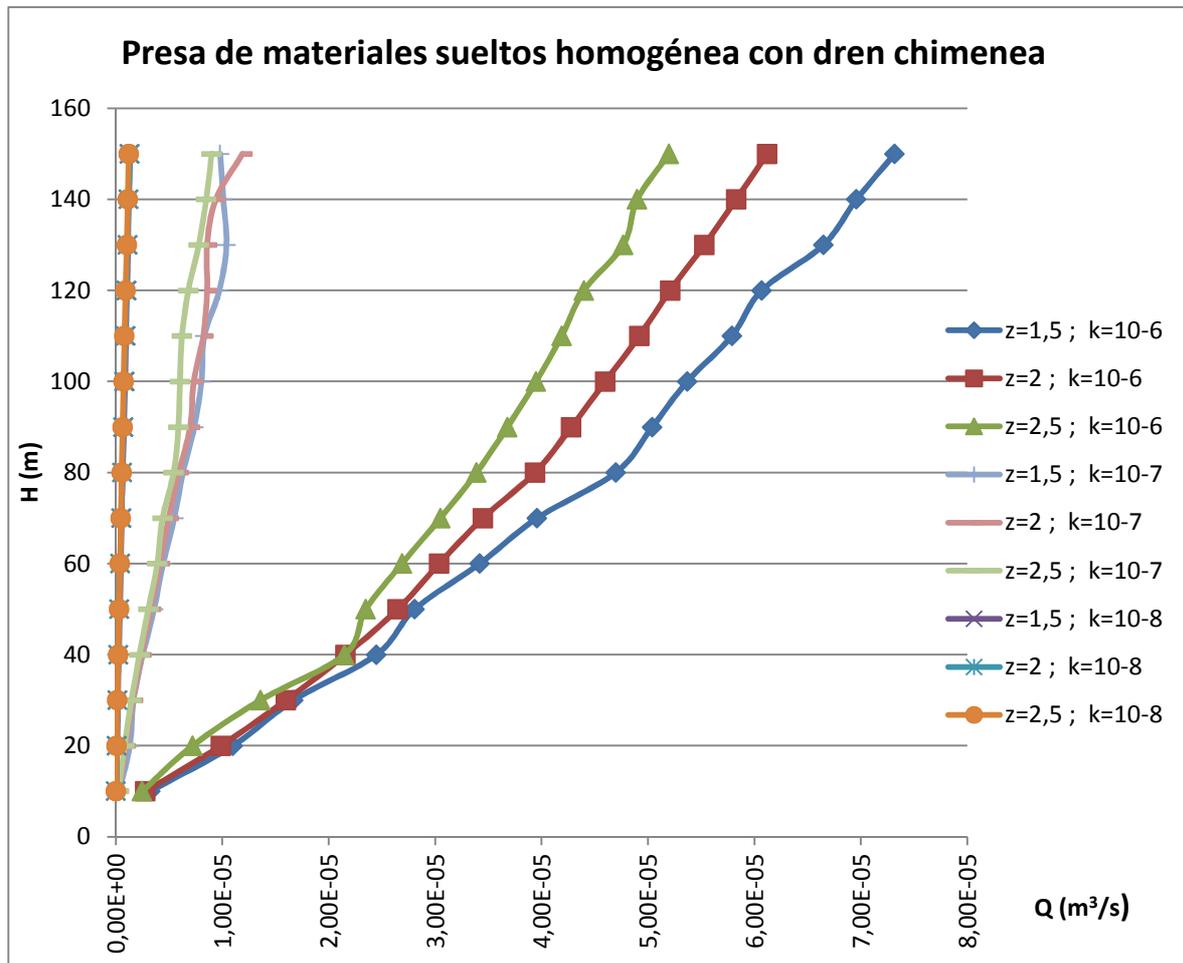
Con los datos de flujo que muestran las secciones de control de todas las modelizaciones, se ha elaborado la tabla 7.13, donde se muestra el caudal en l/min/ml de cada modelo realizado en SEEP/W.

CAUDAL (Q) l/min/ml				
H (m)	PERMEABILIDAD k (m/s)			z
	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	
10	0,19500	0,01932	0,00195	1,5
20	0,66000	0,07860	0,00726	
30	1,00200	0,10020	0,01080	
40	1,47000	0,15240	0,01650	
50	1,68600	0,21540	0,02208	
60	2,05200	0,26700	0,02790	
70	2,37600	0,33000	0,03378	
80	2,82000	0,37920	0,03804	
90	3,02400	0,44280	0,04566	
100	3,22200	0,48300	0,05160	
110	3,47400	0,49980	0,05694	
120	3,64200	0,58440	0,06240	
130	3,99000	0,62400	0,06900	

140	4,17600	0,60600	0,07200	2
150	4,39200	0,58860	0,07800	
10	0,16740	0,01746	0,00176	
20	0,59280	0,05622	0,00595	
30	0,96000	0,09780	0,00984	
40	1,29600	0,14580	0,01500	
50	1,59000	0,19860	0,01914	
60	1,82400	0,24960	0,02544	
70	2,07000	0,29880	0,03048	
80	2,36400	0,35580	0,03630	
90	2,56800	0,41880	0,04164	
100	2,76000	0,43980	0,04740	
110	2,95200	0,49320	0,05250	
120	3,12600	0,51480	0,05862	
130	3,31800	0,51480	0,06660	
140	3,49800	0,56400	0,07380	
150	3,67200	0,71400	0,08160	
10	0,14880	0,01602	0,00161	2,5
20	0,43380	0,04968	0,00435	
30	0,81600	0,08820	0,00942	
40	1,29000	0,13380	0,01404	
50	1,41000	0,18420	0,01902	
60	1,61400	0,23400	0,02382	
70	1,83000	0,26400	0,02910	
80	2,03400	0,32640	0,03402	
90	2,20800	0,35340	0,03924	
100	2,37000	0,36180	0,04446	
110	2,51400	0,37320	0,04932	
120	2,64000	0,40920	0,05520	
130	2,86200	0,46800	0,06240	
140	2,94000	0,51000	0,06840	
150	3,12000	0,54060	0,07380	

Tabla 7.13. Valor de caudal infiltrado obtenido de las modelizaciones de presas de materiales sueltos con dren chimenea.

Se procede a representar gráficamente la tabla 7.13 con los valores de caudal (m^3/s) en el eje de abscisas y los valores de la altura (m) en el eje de ordenadas.



Los resultados correspondientes a una permeabilidad $k=10^{-8}$ m/s representan de forma inequívoca una recta, y puede afirmarse que las diferencias de caudal al variar el talud son despreciables.

Los resultados obtenidos para una permeabilidad $k=10^{-7}$ m/s son los que peor se comportan. Para alturas mayores de 130 metros el programa arroja unos resultados de dudosa fiabilidad, quizá debido a que se está trabajando en un rango de valores extremadamente reducido. Dichos valores, en principio, deberían comportarse de manera similar al resto de permeabilidades. La diferencia de caudal que se produce al variar el talud vuelve a ser muy pequeña.

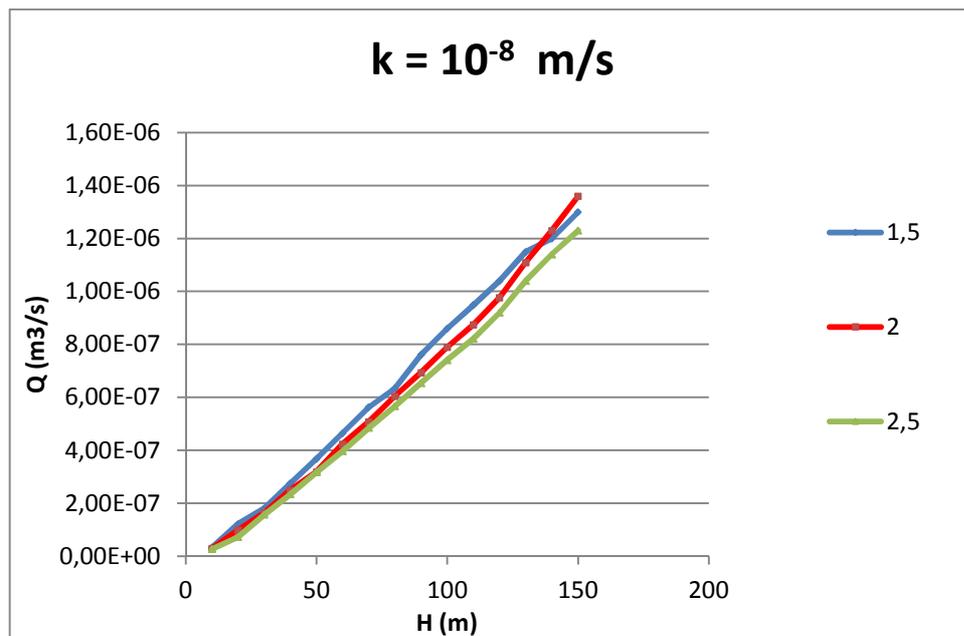
Por último, los valores de permeabilidad $k=10^{-6}$ m/s modifican de forma sustancial el valor del caudal infiltrado al modificar el talud. Se puede observar que no se comportan de forma lineal, siguiendo una ecuación polinómica.

Ecuación

Como se ha observado en el análisis de los resultados, el comportamiento de las filtraciones es diferente en función de la permeabilidad; en ocasiones se comporta de manera lineal y en otras, describe una curva. Por tanto, ante la imposibilidad de recoger todos esos comportamientos en una sola ecuación sin cometer grandes errores, se plantearán diferentes ecuaciones, una para cada permeabilidad.

a) Permeabilidad $k=10^{-8}$ m/s

Los resultados obtenidos de las modelizaciones para esta permeabilidad se muestran en la siguiente gráfica:



Se interpola linealmente para hallar las ecuaciones de cada recta, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$z=1,5 \rightarrow Q = 9,28 \cdot 10^{-9} \cdot h - 8,26 \cdot 10^{-8}$$

$$z=2 \rightarrow Q = 9,40 \cdot 10^{-9} \cdot h - 1,23 \cdot 10^{-7}$$

$$z=2,5 \rightarrow Q = 8,70 \cdot 10^{-9} \cdot h - 1,09 \cdot 10^{-7}$$

Todas estas expresiones tienen la forma $Q=A \cdot h+B$. Como se explicó en el apartado anterior, al variar el talud la diferencia de caudal es despreciable, por lo que la ecuación que se va a formular no tendrá en cuenta este parámetro, siendo una simple interpolación media de las tres rectas:

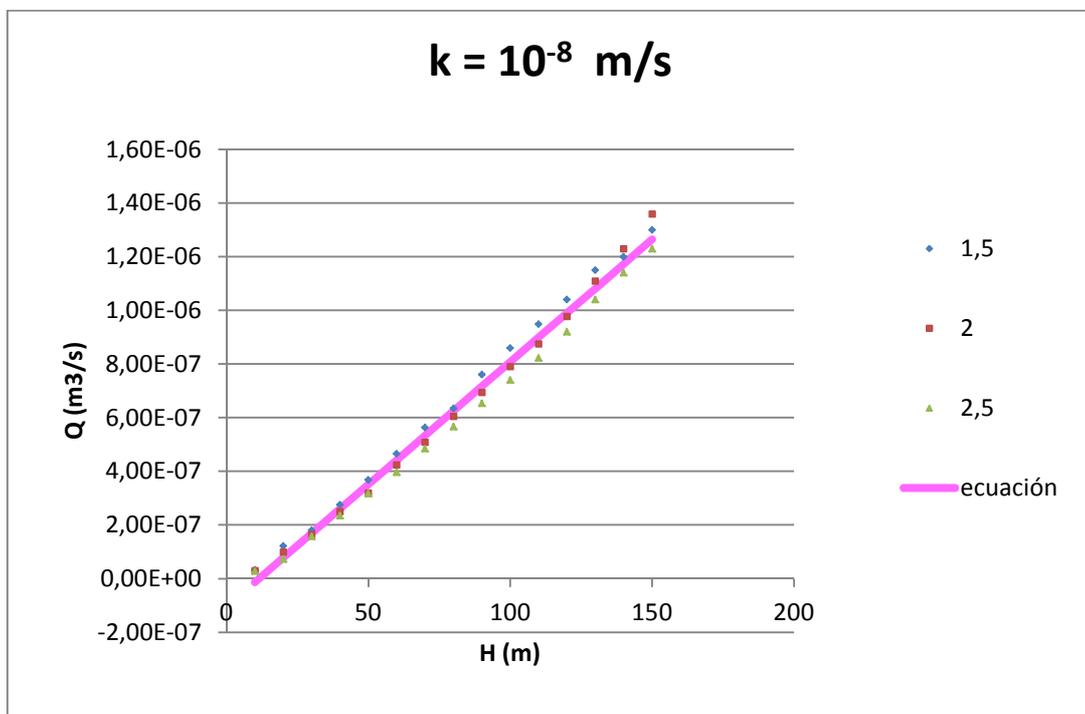
k=10 ⁻⁸ m/s		
z	A	B
1,5	9,28E-09	8,26E-08
2	9,40E-09	1,23E-07
2,5	8,70E-09	1,09E-07
media	9,13E-09	1,05E-07

Tabla 7.14. Parámetros A y B para la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-8}$ m/s con dren chimenea

La ecuación resultante:

$$Q = 9,13 \cdot 10^{-7} \cdot h - 1,05 \cdot 10^{-7}$$

Se observa a continuación que se ajusta a los resultados de las modelizaciones:



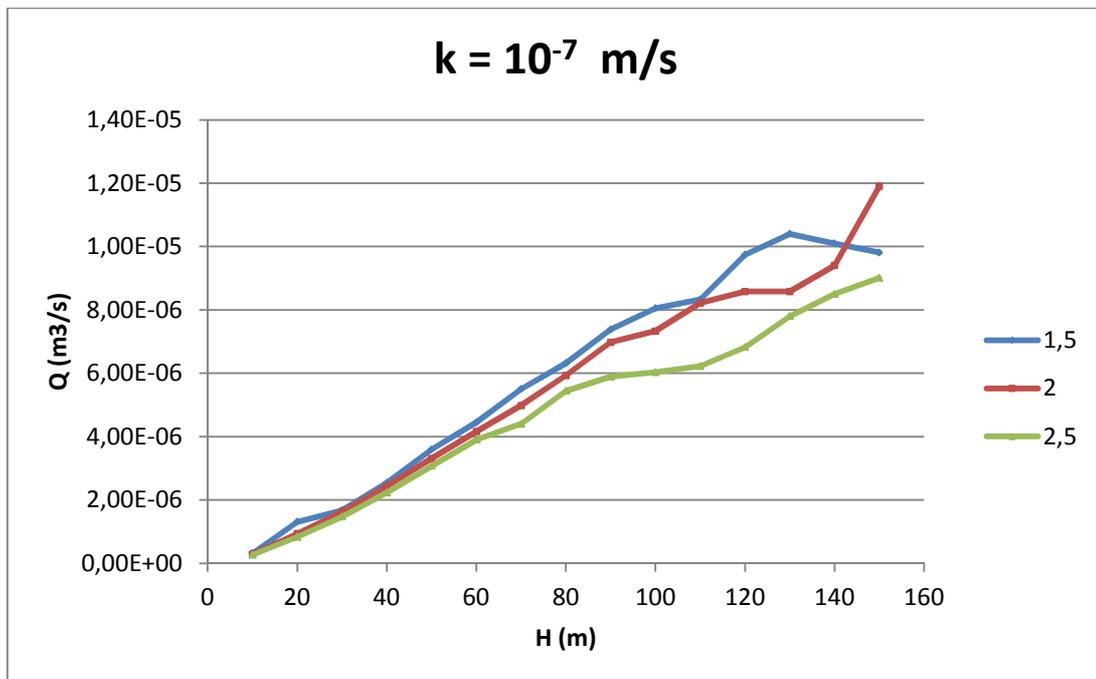
k=1E-8				
Q = 9,13·10 ⁻⁷ ·h - 1,05·10 ⁻⁷				
h	z	Q SEEP/W	Q fórmula	% error relativo
10	1,5	3,25E-08	-1,37E-08	337,23%
20		1,21E-07	7,76E-08	-55,93%
30		1,80E-07	1,69E-07	-6,57%
40		2,75E-07	2,60E-07	-5,69%
50		3,68E-07	3,52E-07	-4,69%
60		4,65E-07	4,43E-07	-5,01%
70		5,63E-07	5,34E-07	-5,41%
80		6,34E-07	6,25E-07	-1,38%
90		7,61E-07	7,17E-07	-6,18%
100		8,60E-07	8,08E-07	-6,44%
110		9,49E-07	8,99E-07	-5,53%
120		1,04E-06	9,91E-07	-4,99%
130		1,15E-06	1,08E-06	-6,29%
140		1,20E-06	1,17E-06	-2,28%
150		1,30E-06	1,26E-06	-2,81%
10	2	2,94E-08	-1,37E-08	314,60%
20		9,91E-08	7,76E-08	-27,71%
30		1,64E-07	1,69E-07	2,90%
40		2,50E-07	2,60E-07	3,92%
50		3,19E-07	3,52E-07	9,25%
60		4,24E-07	4,43E-07	4,25%
70		5,08E-07	5,34E-07	4,89%
80		6,05E-07	6,25E-07	3,26%
90		6,94E-07	7,17E-07	3,17%
100		7,90E-07	8,08E-07	2,23%
110		8,75E-07	8,99E-07	2,70%
120		9,77E-07	9,91E-07	1,37%
130		1,11E-06	1,08E-06	-2,60%
140		1,23E-06	1,17E-06	-4,84%
150		1,36E-06	1,26E-06	-7,55%
10	2,5	2,68E-08	-1,37E-08	295,62%
20		7,25E-08	7,76E-08	6,57%
30		1,57E-07	1,69E-07	7,05%
40		2,34E-07	2,60E-07	10,07%
50		3,17E-07	3,52E-07	9,82%
60		3,97E-07	4,43E-07	10,34%
70		4,85E-07	5,34E-07	9,19%

80	5,67E-07	6,25E-07	9,34%
90	6,54E-07	7,17E-07	8,75%
100	7,41E-07	8,08E-07	8,29%
110	8,22E-07	8,99E-07	8,60%
120	9,20E-07	9,91E-07	7,13%
130	1,04E-06	1,08E-06	3,87%
140	1,14E-06	1,17E-06	2,83%
150	1,23E-06	1,26E-06	2,73%

Tabla 7.15. Validez de la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-8}$ m/s con dren chimenea

b) Permeabilidad $k=10^{-7}$ m/s

Los resultados obtenidos en la modelización se muestran en la gráfica siguiente:



Se interpola linealmente para hallar las ecuaciones de cada recta, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$z=1,5 \rightarrow Q = 7,68 \cdot 10^{-8} \cdot h - 1,73 \cdot 10^{-7}$$

$$z=2 \rightarrow Q = 7,66 \cdot 10^{-8} \cdot h - 4,84 \cdot 10^{-7}$$

$$z=2,5 \rightarrow Q = 6,16 \cdot 10^{-9} \cdot h - 1,35 \cdot 10^{-7}$$

De nuevo, las expresiones resultantes tienen la forma $Q=A \cdot h+B$. En esta ocasión tampoco se tendrá en cuenta el parámetro del talud debido a la poca influencia que tiene, por lo que se interpolarán las tres rectas.

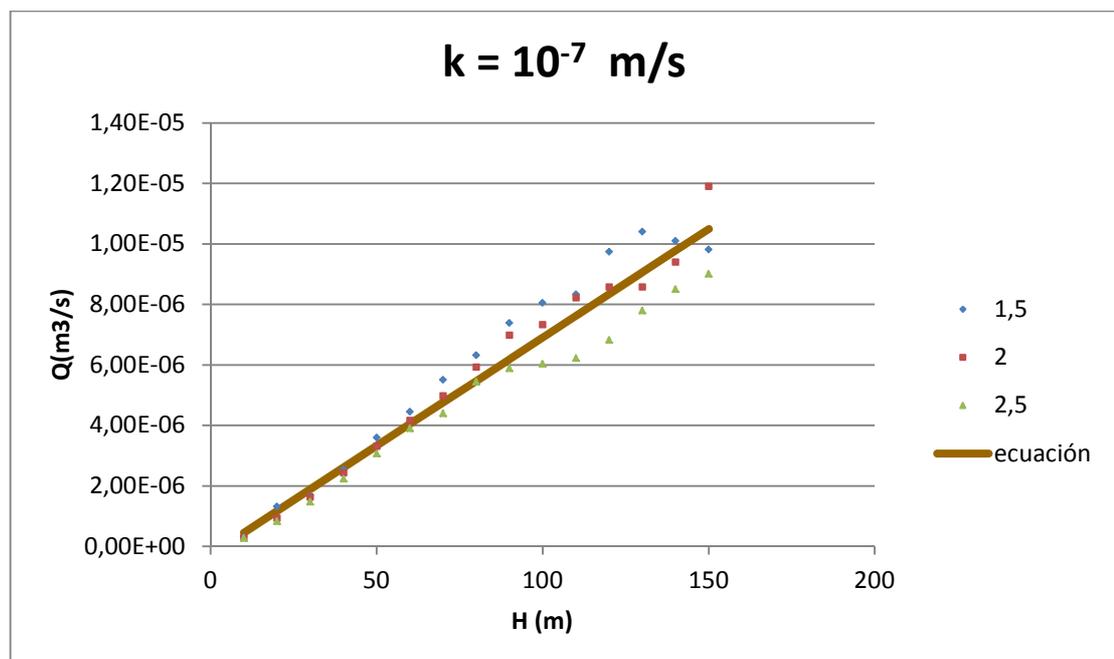
k=10 ⁻⁷ m/s		
z	A	B
1,5	7,68E-08	1,73E-07
2	7,66E-08	4,84E-07
2,5	6,16E-08	1,35E-07
media	7,17E-08	2,64E-07

Tabla 7.16. Parámetros A y B para la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-7}$ m/s con dren chimenea

La ecuación resultante:

$$Q = 7,17 \cdot 10^{-8} \cdot h - 2,64 \cdot 10^{-7}$$

Se observa a continuación que se ajusta a los resultados de las modelizaciones:



SEEP/W

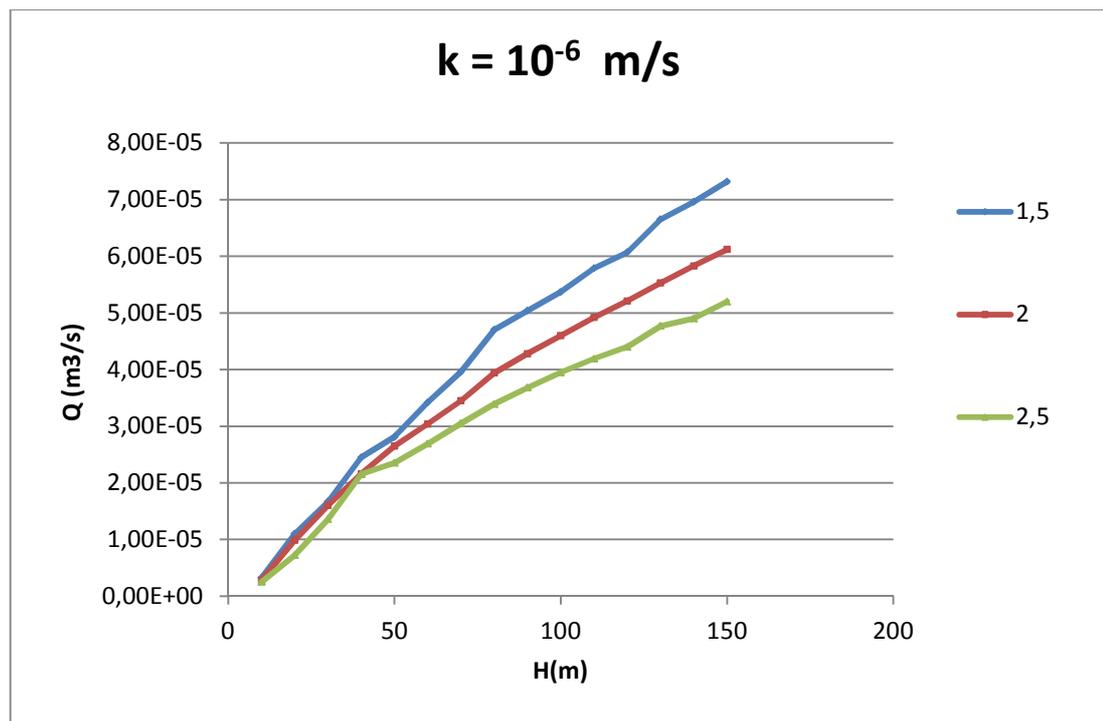
k=10 ⁻⁷ m/s				
Q = 7,17·10 ⁻⁸ ·h - 2,64·10 ⁻⁷				
h	z	Q SEEP/W	Q fórmula	% error relativo
10	1,5	3,22E-07	4,53E-07	28,92%
20		1,31E-06	1,17E-06	-11,97%
30		1,67E-06	1,89E-06	11,50%
40		2,54E-06	2,60E-06	2,46%
50		3,59E-06	3,32E-06	-8,10%
60		4,45E-06	4,04E-06	-10,20%
70		5,50E-06	4,76E-06	-15,67%
80		6,32E-06	5,47E-06	-15,50%
90		7,38E-06	6,19E-06	-19,24%
100		8,05E-06	6,91E-06	-16,57%
110		8,33E-06	7,62E-06	-9,27%
120		9,74E-06	8,34E-06	-16,79%
130		1,04E-05	9,06E-06	-14,83%
140		1,01E-05	9,77E-06	-3,34%
150		9,81E-06	1,05E-05	6,49%
10	2	2,91E-07	4,53E-07	35,76%
20		9,37E-07	1,17E-06	19,91%
30		1,63E-06	1,89E-06	13,62%
40		2,43E-06	2,60E-06	6,68%
50		3,31E-06	3,32E-06	0,33%
60		4,16E-06	4,04E-06	-3,02%
70		4,98E-06	4,76E-06	-4,73%
80		5,93E-06	5,47E-06	-8,37%
90		6,98E-06	6,19E-06	-12,78%
100		7,33E-06	6,91E-06	-6,14%
110		8,22E-06	7,62E-06	-7,83%
120		8,58E-06	8,34E-06	-2,88%
130		8,58E-06	9,06E-06	5,27%
140		9,40E-06	9,77E-06	3,83%
150		1,19E-05	1,05E-05	-13,43%
10	2,5	2,67E-07	4,53E-07	41,06%
20		8,28E-07	1,17E-06	29,23%
30		1,47E-06	1,89E-06	22,10%
40		2,23E-06	2,60E-06	14,36%
50		3,07E-06	3,32E-06	7,56%
60		3,90E-06	4,04E-06	3,42%
70		4,40E-06	4,76E-06	7,47%

80	5,44E-06	5,47E-06	0,58%
90	5,89E-06	6,19E-06	4,83%
100	6,03E-06	6,91E-06	12,68%
110	6,22E-06	7,62E-06	18,40%
120	6,82E-06	8,34E-06	18,23%
130	7,80E-06	9,06E-06	13,88%
140	8,50E-06	9,77E-06	13,03%
150	9,01E-06	1,05E-05	14,12%

Tabla 7.17. Validez de la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-7}$ m/s con dren chimenea

c) Permeabilidad $k=10^{-6}$ m/s

Los resultados obtenidos en la modelización se muestran en la gráfica siguiente:



En este caso, la regresión que mejor se adapta a la gráfica es una curva polinómica de grado 2. Las ecuaciones resultantes para cada talud se muestran a continuación:

$$z=1,5 \rightarrow Q = -1,39 \cdot 10^{-9} \cdot h^2 + 7,13 \cdot 10^{-7} \cdot h - 3,13 \cdot 10^{-6}$$

$$z=2 \rightarrow Q = -1,40 \cdot 10^{-9} \cdot h^2 + 6,25 \cdot 10^{-7} \cdot h - 2,08 \cdot 10^{-6}$$

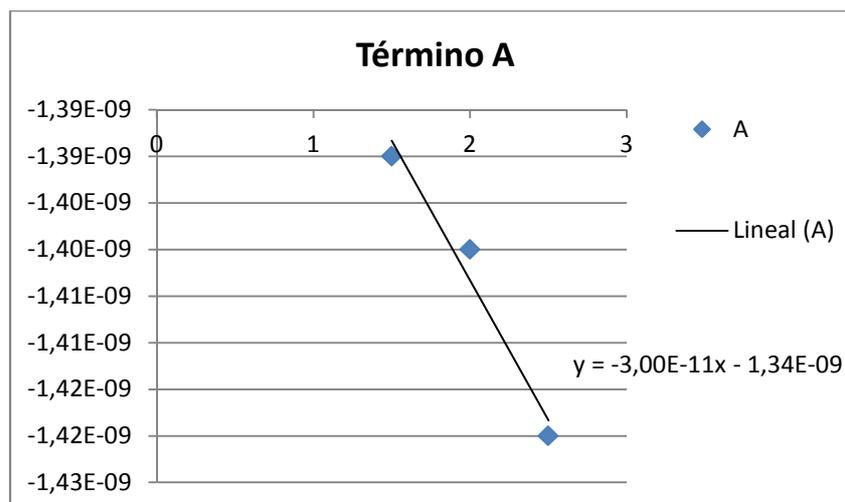
$$z=2,5 \rightarrow Q = -1,42 \cdot 10^{-9} \cdot h^2 + 5,65 \cdot 10^{-7} \cdot h - 2,07 \cdot 10^{-6}$$

Todas estas expresiones tienen la forma $Q=A \cdot h^2+B \cdot h+C$. En esta ocasión el talud sí que influye de forma significativa en los valores de caudal obtenidos, por lo que se integrará este parámetro en la ecuación. La forma de calcularlo es similar a la que se empleó en las presas de materiales sueltos con dren horizontal.

K=10 ⁻⁶ m/s			
z	A	B	C
1,5	-1,39E-09	7,13E-07	-3,13E-06
2	-1,40E-09	6,25E-07	-2,08E-06
2,5	-1,42E-09	5,65E-07	-2,07E-06

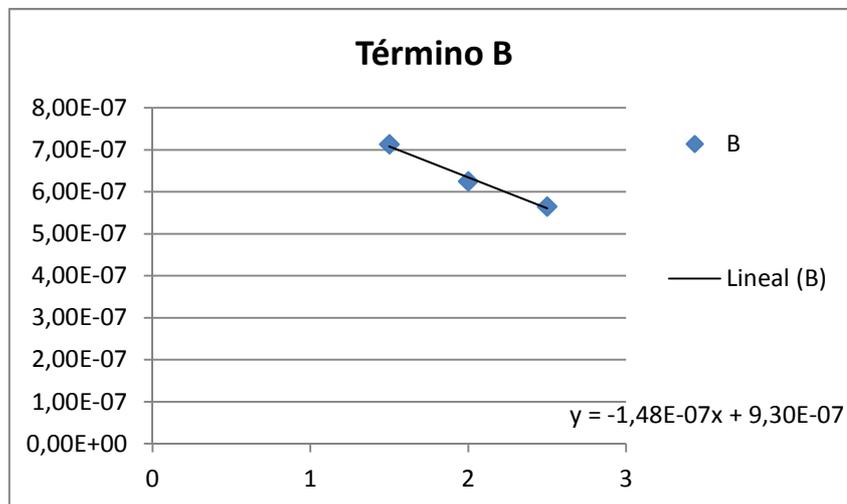
Tabla 7.18 Parámetros A, B y C para la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-6}$ m/s con dren chimenea

En primer lugar, el término A:



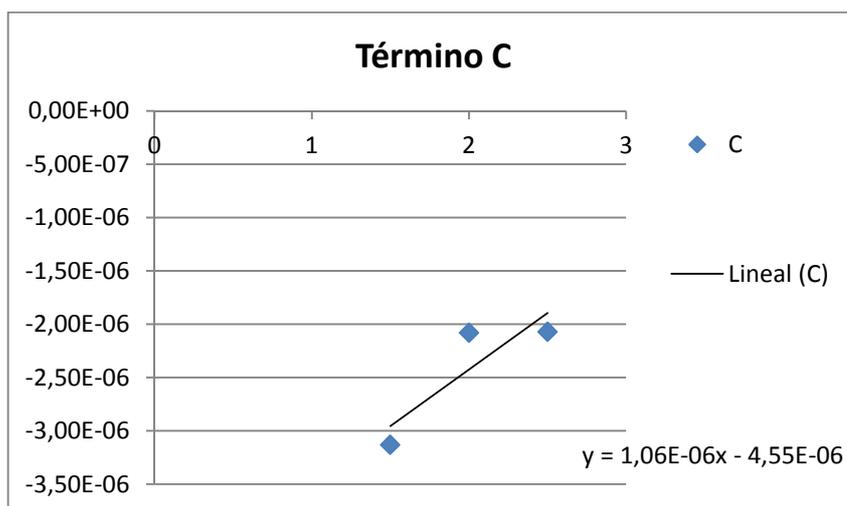
$$A = -3,00 \cdot 10^{-11} \cdot z - 1,34 \cdot 10^{-9}$$

El término B :



$$B = -1,48 \cdot 10^{-7} \cdot z + 9,30 \cdot 10^{-7}$$

Por último, el término C :



$$C = 1,06 \cdot 10^{-6} \cdot z - 4,55 \cdot 10^{-6}$$

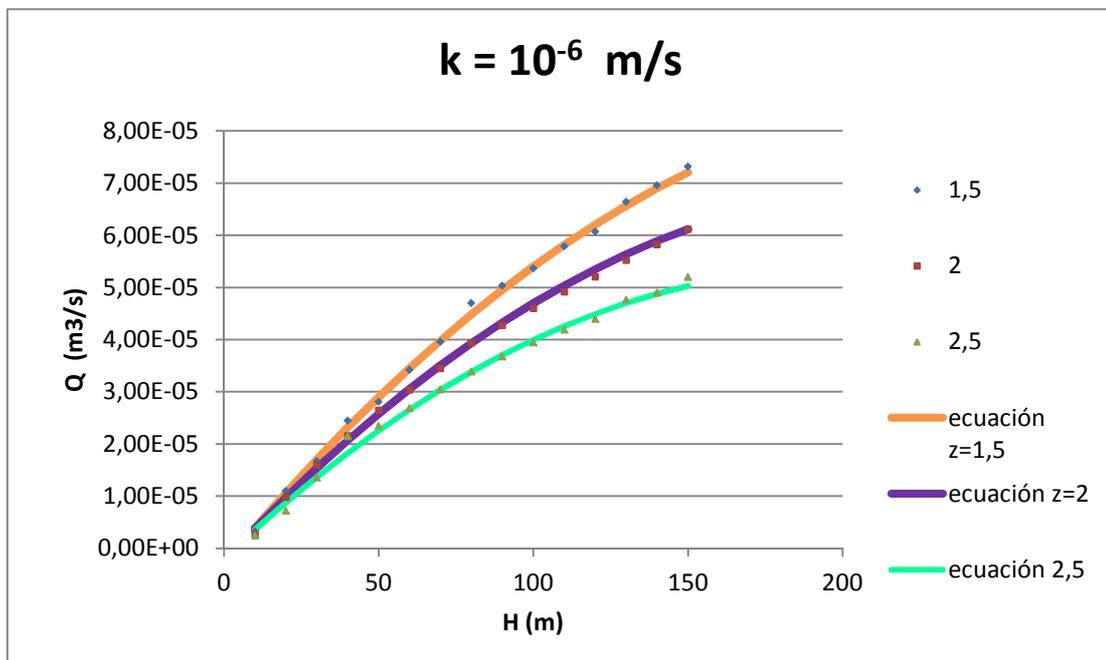
Sustituyendo en la expresión los valores de los términos A, B y C hallados:

$$Q = A \cdot h^2 + B \cdot h + C \quad \left\{ \begin{array}{l} A = -3,00 \cdot 10^{-11} \cdot z - 1,34 \cdot 10^{-9} \\ B = -1,48 \cdot 10^{-7} \cdot z + 9,30 \cdot 10^{-7} \\ C = 1,06 \cdot 10^{-6} \cdot z - 4,55 \cdot 10^{-6} \end{array} \right.$$

La expresión resultante es la ecuación de estimación de caudal "Q" en drenes chimenea que integra la variable de talud "z" para una permeabilidad $k=10^{-6}$ m/s:

$$Q = -3,00 \cdot 10^{-11} \cdot z \cdot h^2 - 1,34 \cdot 10^{-9} \cdot h^2 - 1,48 \cdot 10^{-7} \cdot z \cdot h + 9,30 \cdot 10^{-7} \cdot h + 1,06 \cdot 10^{-6} \cdot z - 4,55 \cdot 10^{-6}$$

Se observa a continuación que se ajusta a los resultados de las modelizaciones:

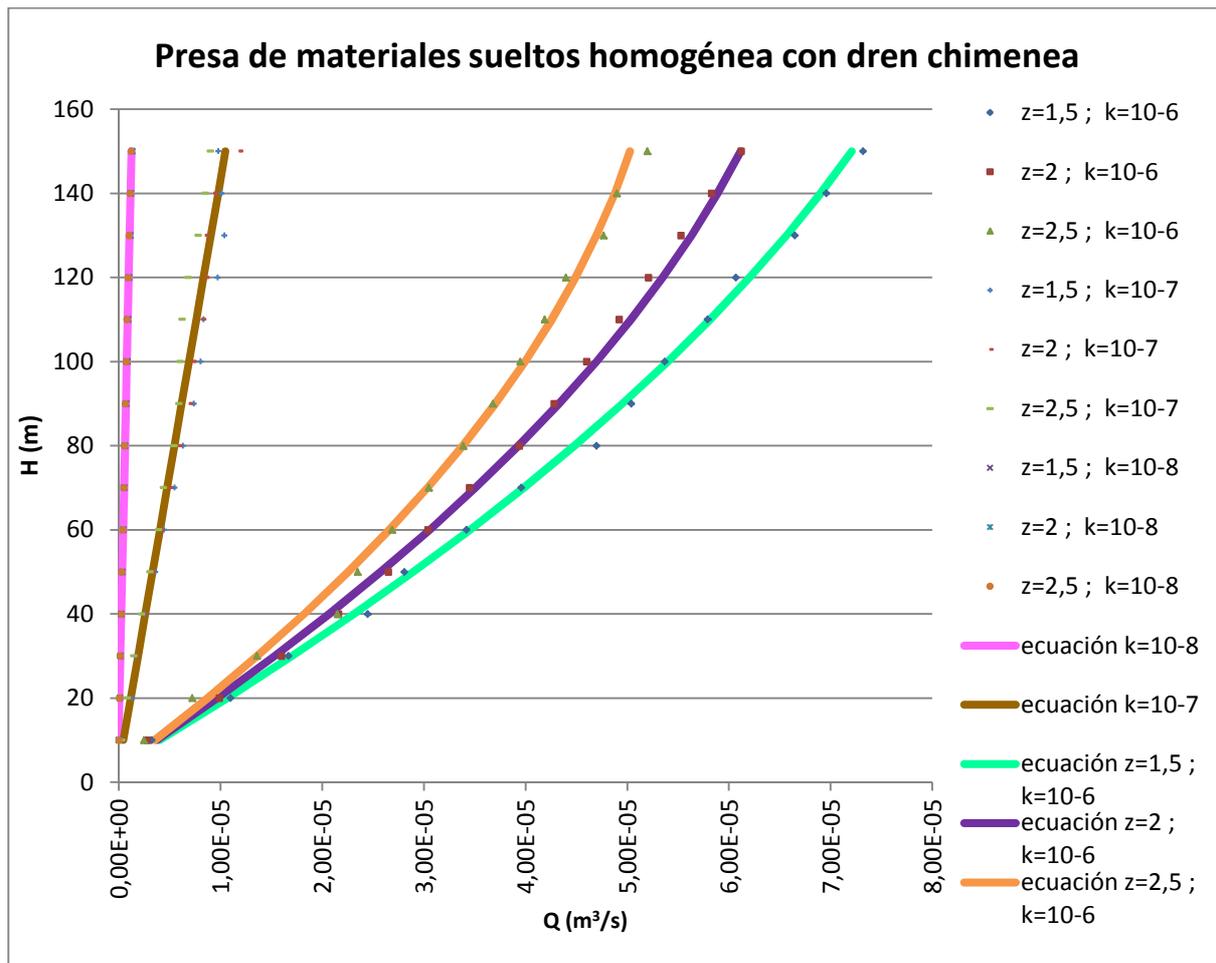


$k=10^{-6}$ m/s				
$Q=-3,00\cdot 10^{-11}\cdot z\cdot h^2-1,34E\cdot 10^{-9}\cdot h^2-1,48\cdot 10^{-7}\cdot z\cdot h+9,30\cdot 10^{-7}\cdot h+1,06\cdot 10^{-6}\cdot z-4,55\cdot 10^{-6}$				
h	z	Q SEEP/W	Q fórmula	% error relativo
10	1,5	3,25E-06	3,98E-06	18,37%
20		1,10E-05	1,35E-05	18,60%
30		1,67E-05	2,21E-05	24,58%
40		2,45E-05	3,05E-05	19,69%
50		2,81E-05	3,86E-05	27,20%
60		3,42E-05	4,64E-05	26,33%
70		3,96E-05	5,40E-05	26,64%
80		4,70E-05	6,13E-05	23,30%
90		5,04E-05	6,83E-05	26,20%
100		5,37E-05	7,51E-05	28,45%
110		5,79E-05	8,15E-05	28,99%
120		6,07E-05	8,78E-05	30,83%
130		6,65E-05	9,37E-05	29,03%
140		6,96E-05	9,94E-05	29,97%
150		7,32E-05	1,05E-04	30,15%
10	2	2,79E-06	3,77E-06	25,99%
20		9,88E-06	1,35E-05	26,89%
30		1,60E-05	2,21E-05	27,75%
40		2,16E-05	3,05E-05	29,19%
50		2,65E-05	3,86E-05	31,35%
60		3,04E-05	4,64E-05	34,52%
70		3,45E-05	5,40E-05	36,09%
80		3,94E-05	6,13E-05	35,70%
90		4,28E-05	6,83E-05	37,33%
100		4,60E-05	7,51E-05	38,71%
110		4,92E-05	8,15E-05	39,66%
120		5,21E-05	8,78E-05	40,63%
130		5,53E-05	9,37E-05	40,98%
140		5,83E-05	9,94E-05	41,34%
150		6,12E-05	1,05E-04	41,60%
10	2,5	2,48E-06	3,56E-06	30,31%
20		7,23E-06	1,35E-05	46,50%
30		1,36E-05	2,21E-05	38,58%
40		2,15E-05	3,05E-05	29,52%
50		2,35E-05	3,86E-05	39,12%
60		2,69E-05	4,64E-05	42,06%

70	3,05E-05	5,40E-05	43,50%
80	3,39E-05	6,13E-05	44,67%
90	3,68E-05	6,83E-05	46,12%
100	3,95E-05	7,51E-05	47,37%
110	4,19E-05	8,15E-05	48,61%
120	4,40E-05	8,78E-05	49,86%
130	4,77E-05	9,37E-05	49,10%
140	4,90E-05	9,94E-05	50,70%
150	5,20E-05	1,05E-04	50,38%

Tabla 7.19. Validez de la ecuación de estimación de caudal de $k=10^{-6}$ m/s con dren chimenea

Finalmente y a modo resumen, se representa en una gráfica todos los resultados obtenidos:



7.3. MODELIZACIÓN DE PRESAS DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO

La aplicación de los métodos numéricos para analizar las filtraciones de presas es una labor presente en multitud de despachos de ingeniería, donde se trabaja tanto con presas en fase de proyecto como con presas en explotación. Estos modelos pueden alcanzar cierto grado de complejidad, ya que los datos a introducir en él deben aproximarse fielmente a la realidad.

Se han realizado tres casos con diferentes tipologías de presas de materiales sueltos, todas ellas gestionadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro. Por motivos de confidencialidad, no aparecerán más datos que los imprescindibles para su análisis, siendo este aspecto trivial debido a la índole académica del estudio.

7.3.1. Presa de materiales sueltos homogénea con dren chimenea. Presa N^o1

La Presa N^o1 está constituida por materiales sueltos, con un perfil trapezoidal simétrico de forma que los espaldones, tanto el de aguas arriba como el de aguas abajo, forman taludes de 2,5H:1V. La coronación de la presa se sitúa a la cota 347 msnm, siendo de planta recta y con una longitud de 254,25 m. Sobre ella discurre el camino de coronación, con una anchura de 5 m.

El talud de aguas arriba está protegido por una capa de escollera de 60 cm que protege de la erosión y estabiliza a todo el conjunto del cuerpo del dique. En contacto con la capa de escollera se dispone una capa de material drenante de 0,30 m de espesor en sentido perpendicular al talud. Este material estabiliza y protege al resto de material que constituye el dique.

El contacto con el fondo de valle se ha llevado a cabo excavando todas las capas de material poco competente hasta alcanzar el sustrato rocoso a la cota 317,5 msnm, en donde se ha apoyado la cimentación de la presa, por lo que la altura máxima sobre cimientos es de 29,5 m.

Como elemento de drenaje se dispone un dren chimenea vertical de 1,00 m de espesor, situado a 2,50 m del eje longitudinal para interceptar las posibles filtraciones del dique y mejorar su estabilidad. Va conectado a una capa drenante, de 0,75 m de espesor y anchura variable en función de la altura de cada una de las secciones, que se dispone a nivel de la cimentación. Acaba en el pie de aguas abajo recogiendo en una tubería drenante con la que se aforarán y controlarán los caudales.

El nivel máximo normal se sitúa a la cota 346,00 m.s.n.m.

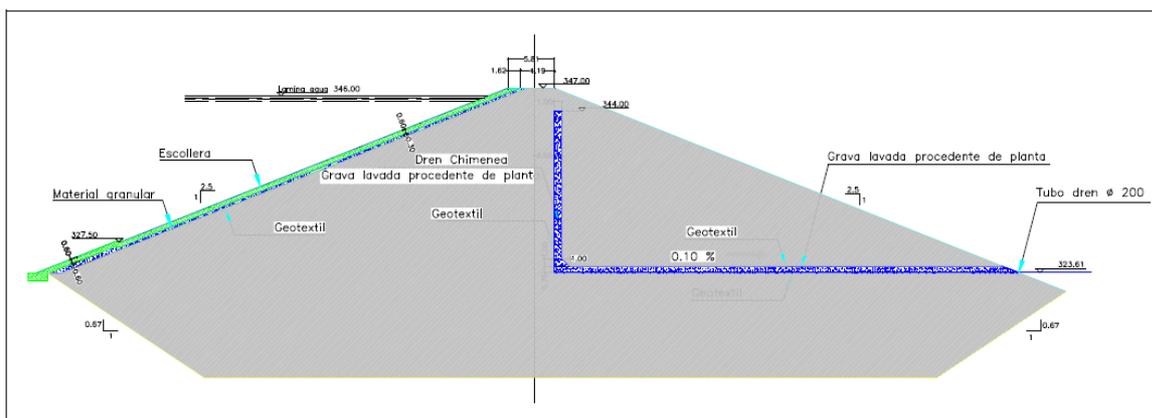


Figura 7.19. Sección tipo Presa N°1

Tipo	Materiales sueltos zonada dren chimenea
Planta	Recta
Longitud de coronación	254,25 metros
Cota de coronación presa	347 m.s.n.m.
Cota de cimientos	317,5 m.s.n.m.
Cota del cauce	325 m.s.n.m.
Altura de la presa sobre cimientos	29,5 metros
Ancho coronación	5 metros
Talud aguas arriba	2,5H : 1V
Talud aguas abajo	2,5H:1V

Tabla 7.20. Ficha técnica Presa N°1

Durante la fase de proyecto de esta presa se concluyó que los depósitos aluviales que existen en el fondo del valle podían ser utilizados en el cuerpo de presa, si bien, sería razonable realizar una zonificación de los mismos, colocando las arcillas y limos en el cuerpo central del dique, y arrojárselo con materiales procedentes de las graveras o de la excavación del saneo de las laderas (areniscas y argilitas).

A continuación se muestran los valores de permeabilidad de los distintos materiales que conforman el cuerpo de presa y su cimentación utilizados para la modelización.

Espaldones	$4 \cdot 10^{-6}$ cm/s en cuerpo central 10^{-4} cm/s el resto
Escollera	0.01 cm/s
Dren	0.01 cm/s
Cimiento	10^{-6} cm/s

Tabla 7.21. Permeabilidad de materiales Presa N°1

Existen varios puntos para el control de las filtraciones en la Presa N°1:

- En el pie de presa, en la cuneta de recogida de aguas, a unos 25 m del estribo izquierdo mana una filtración que se controla volumétricamente y se denomina AFO-1.
- Junto a la caseta de acceso a los desagües de fondo existen dos arquetas denominadas AD y AI en las que se recogen las filtraciones del contacto de la obra de fábrica de la galería con el cuerpo de presa y el cimiento.
- En esa zona se encuentra también un aforador THOMSON automatizado que recoge las filtraciones de todo el pie de presa que se canalizan por la canaletta situada en el pie del espaldón.
- Finalmente, los puntos de aforo AFO-2 y AFO-3 recogen las filtraciones que afloran por debajo de la cota de la canaleta del pie de presa y que manan por algunas perforaciones realizadas en la solera de acceso a la caseta de los desagües. El AFO-2 recoge parte de estas filtraciones, junto con las aforadas en el aforador THOMSON, mientras que el AFO-3 solamente recoge las filtraciones de la solera.

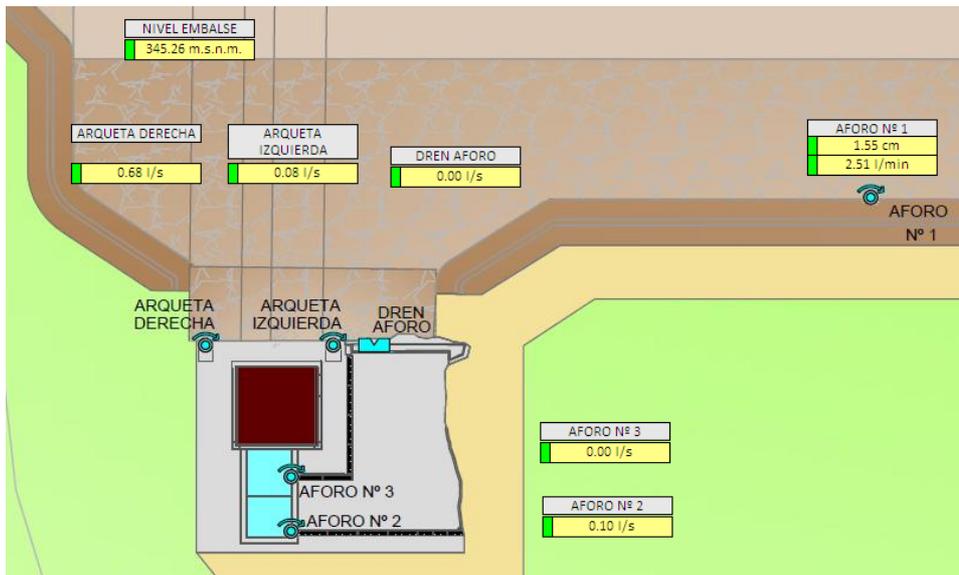


Figura 7.20. Planta general Presa N°1 y aforadores automatizados

Con todos estos datos se va a realizar una modelización en SEEP/W de la sección tipo de la presa para obtener el valor del caudal filtrado y compararlo con el caudal de los aforadores.

Se define geoméricamente la presa y se asignan los materiales con las permeabilidades de la tabla 7.21.

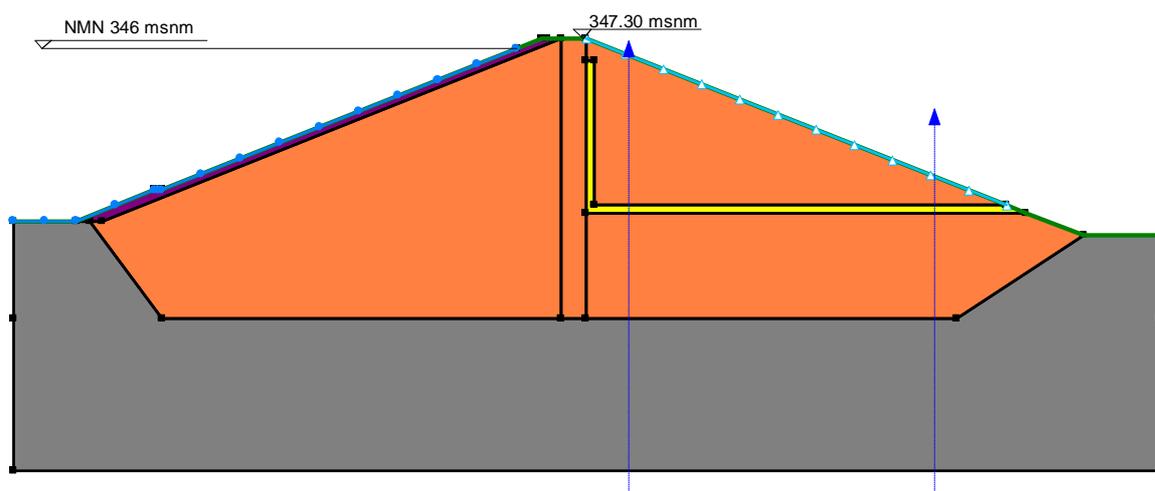


Figura 7.21. Presa N°1. Vista DEFINE en SEEP/W

Se muestra a continuación el resultado de la modelización.

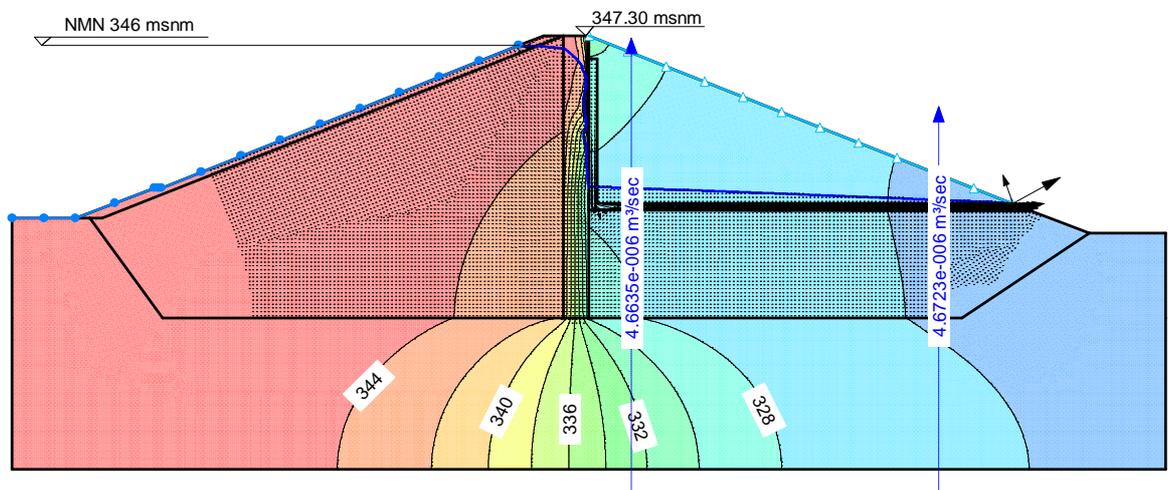


Figura 7.22. Presa Nº1. Vista CONTOUR en SEEP/W

El valor de caudal filtrado que circula por el dren es de $4,672 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{ml}$ o lo que es lo mismo, 0,28 l/min/ml.

El dren se extiende a lo largo de toda la longitud de coronación, aunque no se dispone de la misma sección en todos los puntos. Para el cálculo del caudal total filtrado se tomará la misma sección a lo largo de toda la longitud de coronación, siendo esto una simplificación obligada debido a no disponer datos de más secciones. Por tanto, el caudal total que se filtra por el dren será de:

$$0,28 \text{ l/min/ml} \cdot 254,25 \text{ ml} = \underline{71,24 \text{ l/min}}$$

El valor total del caudal infiltrado registrado por los aforadores es de 68,40 l/min con valores próximos al N.M.N. Por tanto, a la vista de los resultados, el modelo se ha podido ajustar de forma correcta.

7.3.2. Presa de materiales sueltos heterogénea con núcleo central. Presa N°2

Se trata de una presa de materiales sueltos, con una altura sobre el cimiento de 56 metros y una coronación de 404,50 metros de longitud y 8 metros de ancho. La coronación se encuentra a la cota 234 m.s.n.m., siendo el Nivel Máximo Normal de embalse 230 m.s.n.m.

La presa tiene un núcleo de arcilla fina vertical, de 6 metros de anchura en la cota 233,4 m.s.n.m. y con talud vertical aguas abajo y 0,4H:1V aguas arriba, empotrado en el terreno hasta arraigarse en terreno sano. Entre los espaldones y el núcleo se disponen 2 filtros de arena fina de 2 metros de espesor. Dispone de un dren chimenea vertical de 3 metros de espesor constante desde la cota 226 m.s.n.m. y un manto filtrante de grava y gravilla, colocados sobre una cama de zahorra no procesada, que actúa como filtro de retención de la emigración de finos del cimiento. Los espaldones son de zahorra natural bien graduada y con alto contenido de finos, compactada con taludes 2,7H:1V aguas arriba y 1,7H:1V aguas abajo.

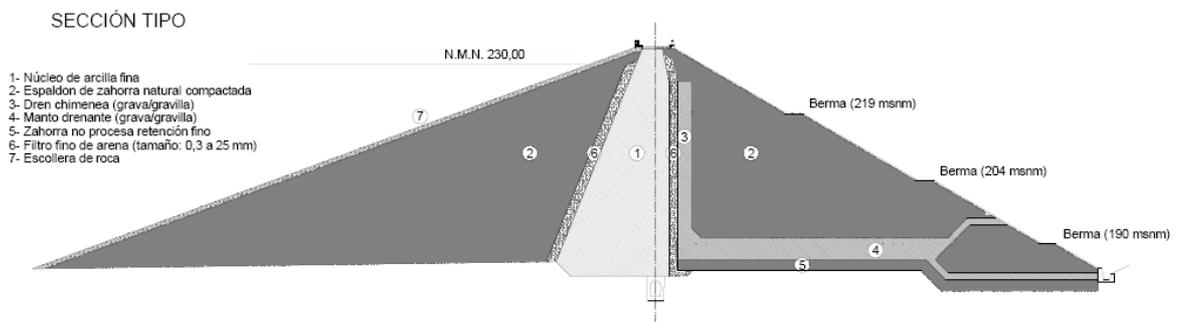


Figura 7.23. Sección tipo Presa N°2

Tipo	Materiales sueltos núcleo vertical de arcilla
Planta	Recta
Longitud de coronación	404,50 metros
Cota de coronación presa	234 m.s.n.m.
Cota de cimientos	178 m.s.n.m.

Cota del cauce	184 m.s.n.m.
Altura de la presa sobre cimientos	56 metros
Ancho coronación	8 metros
Talud aguas arriba	2,7H : 1V
Talud aguas abajo	1,7H:1V
Volumen de materiales presa	1.612.593 m ³

Tabla 7.22. Ficha técnica Presa N°2

La geología de la cerrada presenta una estratificación muy discontinua, por lo que sólo podría hablarse con propiedad de paquetes predominantemente areniscosos o predominantemente margosos, existiendo intercalado entre estos paquetes generales casi siempre un pequeño interestrato de yeso, rodeado de dos estratos de marga limosa, siendo los espesores de estos paquetes de pocos centímetros. El valor de permeabilidad del cemento es de $k=10^{-5}$ cm/s.

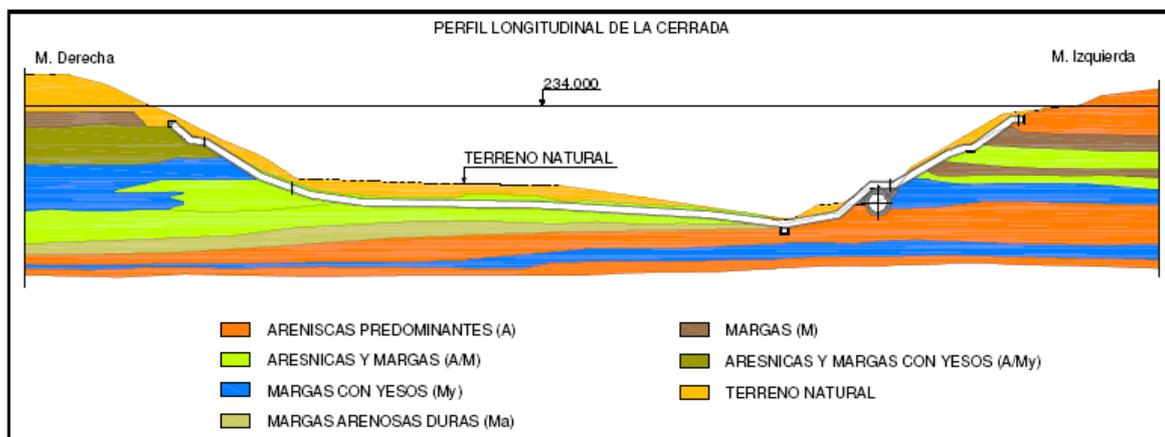


Figura 7.24. Corte geológico de la cerrada de la Presa N°2

A continuación se muestran los valores de permeabilidad de los distintos materiales que conforman el cuerpo de presa obtenidos a través de ensayos de laboratorio.

Espaldones	$5 \cdot 10^{-4}$ cm/s
Núcleo de Arcilla	$5 \cdot 10^{-6}$ cm/s
Filtro	10^{-3} cm/s
Dren	0.01 cm/s
Material granular seleccionado	$5 \cdot 10^{-4}$ cm/s
Cimiento	10^{-5} cm/s

Tabla 7.23. Permeabilidad de materiales Presa N°2

Para controlar las filtraciones del cuerpo de presa o las laderas, existen un total de 8 aforadores tipo vertedero Thomson de vértice triangular de 90°, todos con lectura manual mediante escala graduada y 4 de ellos (AF-1, AF-2, AF-3 y AF-7) también automatizada. Además, en aquellas zonas en las que las filtraciones no se pueden encauzar hacia los aforadores, o se quiere conocer el caudal de filtración en ese punto en concreto, se disponen tubos o encauzadores del flujo para poder medir manualmente los caudales con recipientes graduados y cronómetro.

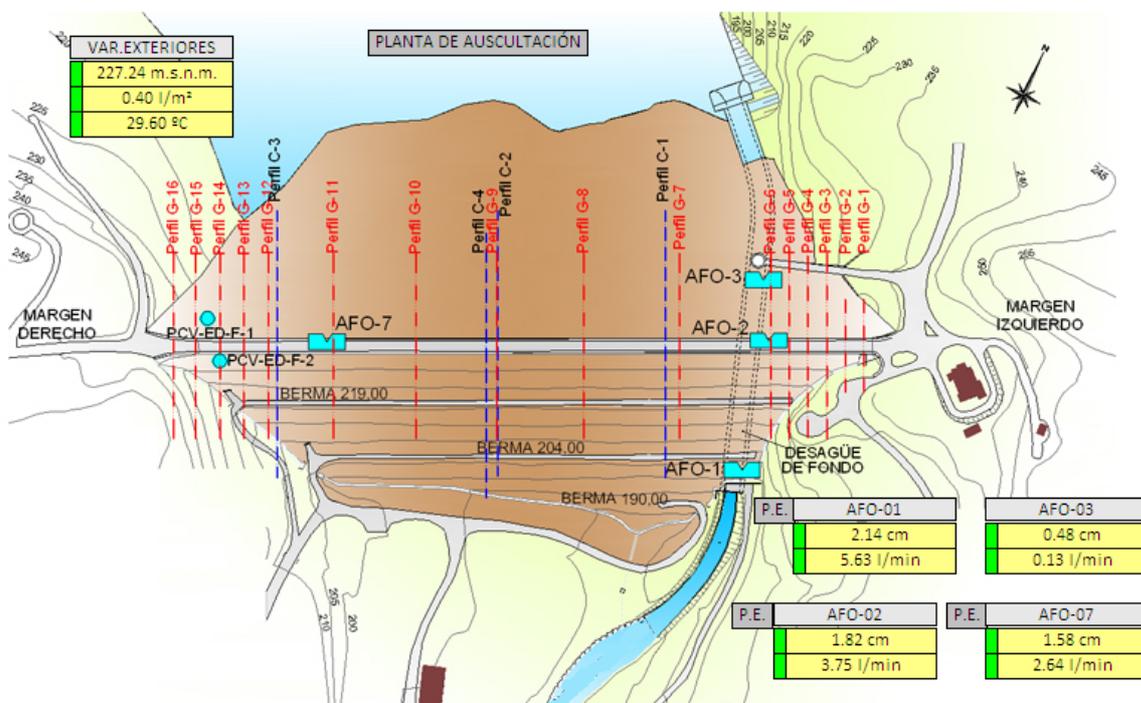


Figura 7.25. Planta general Presa N°2 y aforadores automatizados

AFORADORES EN EL CUERPO DE PRESA				
NOMBRE	TIPO	UBICACIÓN	AUTOMATIZADO	OPERATIVO
AF-1	Thomson 90º	Salida galería desagüe de fondo	SI	SI
AF-2	Thomson 90º	Cruce de galerías de inyecciones sobre conducto desagüe de fondo	SI	SI
AF-2-B	Antigua boca inyección	Sobre el AF-2. Vertido de 3 bocas de inyección en un mismo recipiente aforable	NO	SI
AF-3	Thomson 90º	Galería acceso Torre de toma. Aguas abajo.	SI	SI
AF-3-B	Antigua boca inyección	Clave galería desagüe fondo junto a AF-3	NO	SI
AF-4	Thomson 90º	Galería de inyecciones bomba achique MI	NO	SI
AF-5	Thomson 90º	Galería de inyecciones bomba achique MD	NO	SI
AF-6	Thomson 90º	Galería de inyecciones hacia MD	NO	SI
AF-7	Thomson 90º	Galería de inyecciones hacia MD	SI	SI
AF-8	Thomson 90º	Totalizador chimenea y manto filtrante	NO	SI
AF-19	Tubo	Salida de galería desagüe de fondo en el paramento de aguas arriba MI	NO	SI
AF-19-B	Tubo	Salida de galería desagüe de fondo en el paramento de aguas arriba MD	NO	SI

Tabla 7.24. Características de los aforadores de la Presa N°2

Con todos estos datos se va a realizar una modelización en SEEP/W de la "sección G7" de la presa para obtener el valor del caudal filtrado y compararlo con el caudal de los aforadores.

Se define geoméricamente la presa y se asignan los materiales con las permeabilidades de la tabla 7.23.

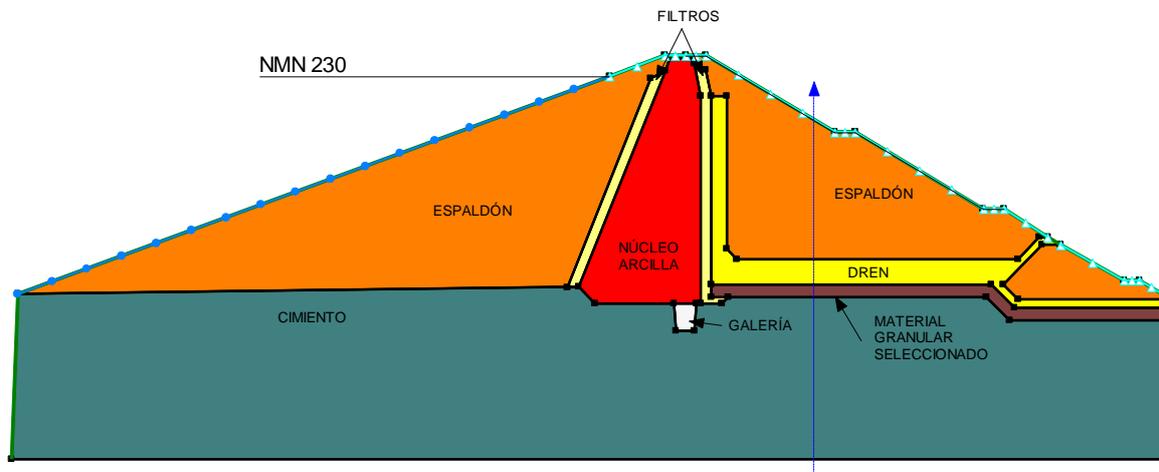


Figura 7.26. Presa N°2. Vista DEFINE en SEEP/W

7.3.3. Presa de materiales sueltos heterogénea con núcleo inclinado. Presa N^o3

Se trata de una presa de materiales sueltos con núcleo inclinado de arcilla. Los espaldones del dique son de escollera, y en las zonas de contacto entre núcleo y espaldones existen filtros de protección del núcleo. La altura máxima de la presa sobre cimientos es de 39,00 metros, siendo la cota de coronación de 653,50 m.s.n.m. La planta de la presa es recta y su longitud de coronación es de 247,00 metros. El ancho de la coronación es de 5,50 metros. La sección tipo de la presa está formada por taludes 2,2 H/1V en el paramento aguas arriba y 1,8 H/1V en el paramento aguas abajo.

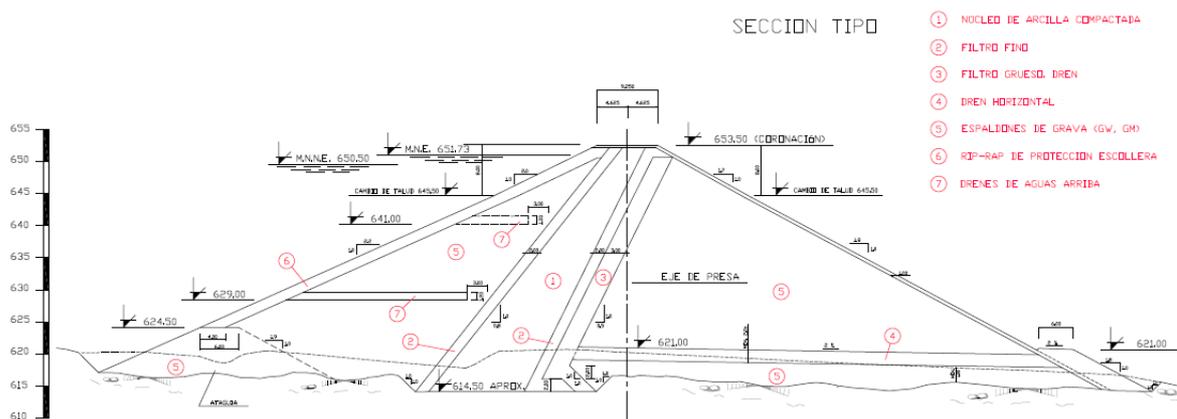


Figura 7.28. Sección tipo Presa N^o3

Tipo	Materiales sueltos núcleo inclinado de arcilla
Planta	Recta
Longitud de coronación	247,00 metros
Cota de coronación presa	653,50 m.s.n.m.
Cota de cimientos	614,50 m.s.n.m.
Cota del cauce	616,50 m.s.n.m.
Altura de la presa sobre cimientos	39 metros
Ancho coronación	5,50 metros
Talud aguas arriba	2,2 : 1 (H:V)

Talud aguas abajo	1,8 : 1 (H:V)
Volumen de materiales presa	343900 m ³

Tabla 7.25. Ficha técnica Presa N°3

La geología de la cerrada se compone de una serie alternante de arcillas y areniscas. La propia naturaleza de los niveles de arcillas y la escasa porosidad eficaz de los niveles de areniscas a causa de su cementación, garantizan la práctica impermeabilidad del macizo rocoso. Únicamente la zona superficial de las areniscas posee una permeabilidad algo más elevada, debido a su estado de fracturación y juntas abiertas. Esta zona alcanza de media unos 5 metros de profundidad, y su permeabilidad obtenida a través de ensayos de permeabilidad oscila entre 6 y 9 Lugeon. En zonas más profundas, la permeabilidad se reduce hasta valores del orden de 1 y 5 Lugeon.

Cimiento superficial	$4 \cdot 10^{-4}$ cm/s
Cimiento profundo	$7 \cdot 10^{-5}$ cm/s

Tabla 7.26. Permeabilidad de la cerrada Presa N°3

Los valores de permeabilidad de los materiales del cuerpo de presa han sido obtenidos del proyecto de construcción de la presa, y se muestran en la siguiente tabla.

Espaldones	10^{-3} cm/s
Núcleo de Arcilla	10^{-6} cm/s
Filtro Fino	10^{-3} cm/s
Filtro Grueso	1 cm/s
Dren Horizontal	1 cm/s
Escollera	0,1 cm/s

Tabla 7.27. Permeabilidad de materiales Presa N°3

El control de las filtraciones en la presa se realiza con un aforador triangular tipo Thompson automatizado, instalado en la salida del túnel de descarga del desagüe de fondo, que recoge la totalidad de las filtraciones de la presa y se denomina AF-1.



Figura 7.29. Planta general Presa N°3 y aforador

Con todos estos datos se va a realizar una modelización en SEEP/W de la "sección A" de la presa para obtener el valor del caudal filtrado y compararlo con el caudal del aforador AF-1.

Se define geoméricamente la presa y se asignan los materiales con las permeabilidades de las tablas 7.25 y 7.26.

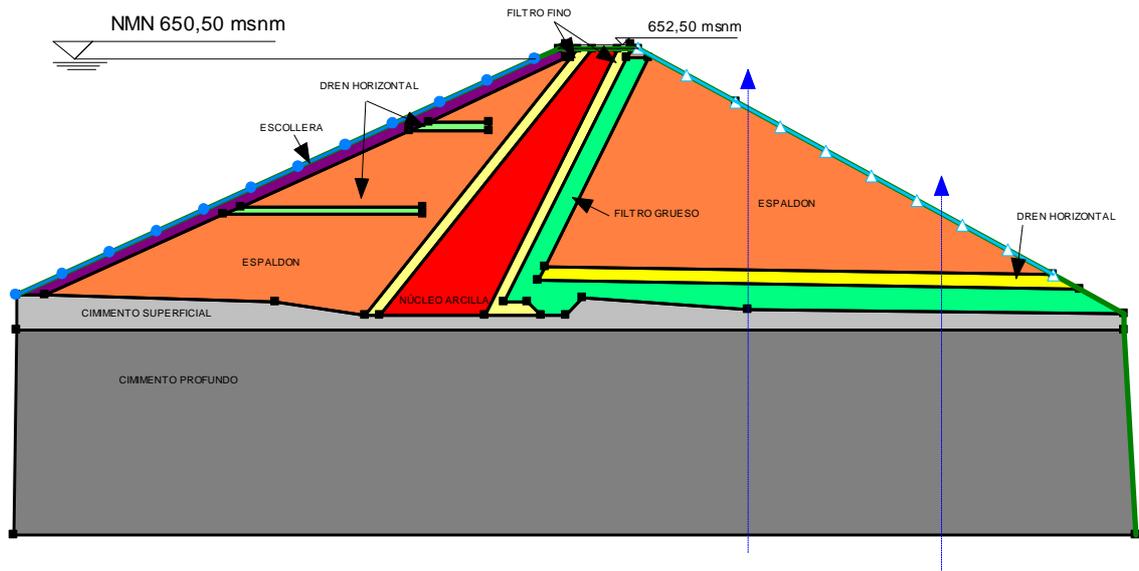


Figura 7.30. Presa N°3. Vista DEFINE en SEEP/W

La malla que se va a emplear para la resolución es de 1 metro, suficiente para obtener un resultado preciso. El resultado del análisis se muestra a continuación.

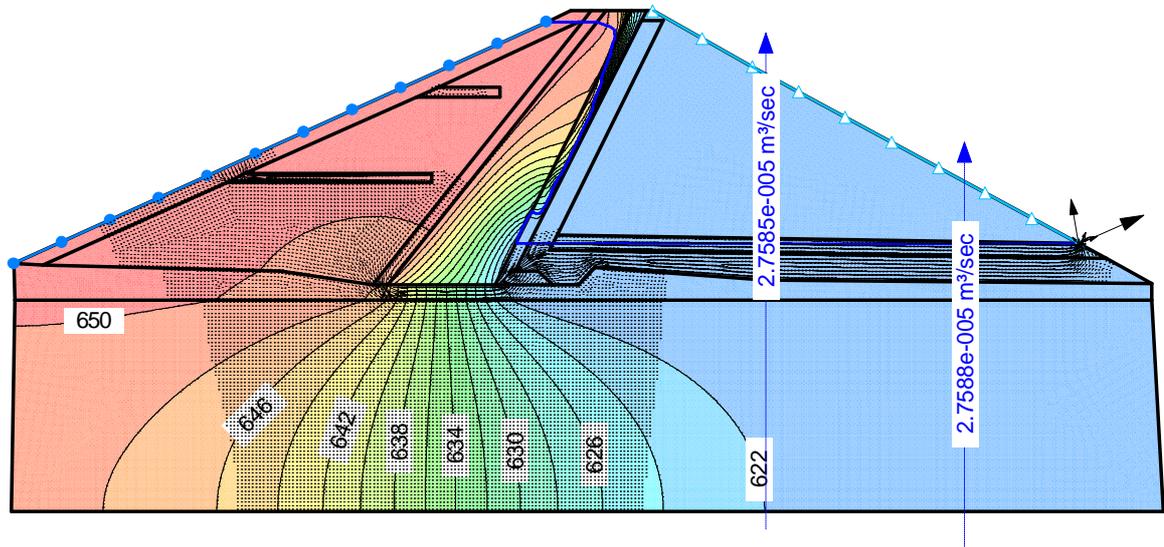


Figura 7.31 Presa N°3. Vista CONTOUR en SEEP/W

El valor de caudal filtrado que circula por el dren es de $2,758 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/ml}$ o lo que es lo mismo, 1,65 l/min/ml.

El dren no se extiende a lo largo de toda la longitud de coronación, sino que tiene un recorrido de 100 metros, como se observa en la figura 7.29. Por tanto, el caudal total que se filtra por el dren será de:

$$1,65 \text{ l/min/ml} \cdot 100 \text{ ml} = \underline{165 \text{ l/min}}$$

Los caudales filtrados según el aforador evolucionan en función del nivel del embalse, y oscilan entre los 100 y los 300 l/min. Las precipitaciones y el agua proveniente de un manantial próximo a uno de los estribos condicionan en ocasiones la lectura del caudal aforado. No se propone ninguna solución de impermeabilización dado que los caudales de filtración están controlados y sus valores son normales.

El caudal registrado por el aforador AFO-1 con un nivel de embalse de 649,64 m.s.n.m. es de 166.71 l/min, por lo que el valor de la modelización se ajusta bastante al caudal real.

8. CONCLUSIONES

8.1. CONSECUCCIÓN DE LOS OBJETIVOS

El objetivo del Trabajo Final de Grado ha sido ampliar el conocimiento sobre las filtraciones producidas en presas de materiales sueltos, proporcionando un estudio teórico sobre las filtraciones esperadas en presas genéricas para finalmente llegar a abordar casos reales.

Se ha introducido una fuerte carga teórica para comprender adecuadamente el comportamiento del flujo en este tipo de presas, resultando satisfactoria la consecución de este objetivo, pese a existir una enorme cantidad de temas que podrían haber sido abordados con más en profundidad pero que, debido al alcance de un trabajo de estas características, no ha sido oportuno. Todos estos temas se expondrán más adelante dentro de un elenco de posibles trabajos futuros. Pese a ello, la exposición teórica ha sido muy detallada, y se espera que el lector pueda comprender en profundidad el fenómeno de la filtración en presas de materiales sueltos.

Respecto al contenido práctico, lo más destacado probablemente haya sido la inclusión del estudio de filtraciones en presas genéricas para la elaboración de una ecuación de estimación de caudal infiltrado. Este apartado, que no fue incluido en la propuesta inicial, ha resultado de gran ayuda para comprender la relación entre el caudal infiltrado y los parámetros que intervienen en el proceso. Los resultados finales han sido satisfactorios, y las ecuaciones obtenidas se ajustan bastante bien al modelo.

La última parte del estudio ha consistido en la modelización de casos reales de presas de la Confederación Hidrográfica del Ebro. La imposibilidad de obtener datos como la permeabilidad de los distintos materiales que conforman la presa ha sido una de las mayores dificultades a la hora de obtener unos buenos resultados. Sin embargo, la disponibilidad de documentos tales como proyectos, informes de auscultación, etc. ha sido vital para calibrar el modelo.

En general, se han cumplido los objetivos del TFG, con un alto grado de conocimiento del fenómeno de la filtración en presas de materiales sueltos.

8.2. CONCLUSIONES GENERALES

- Para analizar el flujo que atraviesa un medio poroso, los métodos numéricos son los más completos y los únicos capaces de abordar sistemas complejos, incluyendo problemas de régimen permanente y transitorio, con parámetros hidrogeológicos variables en el espacio y con diversas condiciones de contorno. Por ello son los más utilizados en la actualidad.
- El caudal filtrado en una presa de materiales sueltos puede estimarse en función de tres parámetros fundamentales: la altura de agua " h ", el coeficiente de permeabilidad " k " y el talud del paramento de la presa " z ".
- La modelización es un proceso en el que el analista debe prestar la máxima atención. Es importante disponer de unos buenos datos de permeabilidad de los materiales que se quieren modelizar. También es importante definir correctamente las condiciones de contorno, intentando imponer sólo las necesarias para que el agua fluya con libertad. Así se podrá lograr un modelo más real.
- Cuando la presa presenta una clara homogeneidad (permeabilidad del material que la conforma constante, ausencia de núcleos o sistemas importantes de drenaje), la permeabilidad " k " es directamente proporcional al caudal infiltrado. En caso contrario, el agua debe atravesar medios diferentes y pierde esa relación de proporcionalidad.
- En presas de materiales sueltos homogéneas con dren horizontal, la relación entre el caudal infiltrado " Q " y la altura de agua " h " es lineal para cualquier valor de talud " z ".
- Únicamente se producen pequeñas distorsiones a dicha linealidad en los casos en los que la altura de agua es menor a 40 metros ($h < 40$ metros). Sin embargo, dichas distorsiones probablemente sean debidas a un mallado insuficiente en el modelo de SEEP/W y al orden de magnitud de los valores con los que se trabaja.
- La ecuación $Q/k = -0,1322 \cdot z \cdot h + 0,6446 \cdot z + 1,7127 \cdot z - 6,5578$ relaciona el caudal infiltrado " Q " en función de la altura de agua " h ", el coeficiente de permeabilidad " k " y el talud del paramento de la presa " z ". Es especialmente

fiable con valores de altura de agua iguales o mayores de 40 metros ($h \geq 40$ metros), con un error medio del 1,5%.

- La estimación del caudal en presas de materiales sueltos homogéneas con dren chimenea es más compleja. La permeabilidad "k" del conjunto de la presa no es constante, ya que el agua tiene que atravesar medios diferentes. Se observa una relación lineal entre el caudal filtrado "Q" y la altura de agua "h" para valores de permeabilidad de $k=10^{-6}$ cm/s y $k=10^{-5}$ cm/s. Sin embargo, para $k=10^{-4}$ cm/s la relación es polinómica.
- Debido al distinto comportamiento de la filtración en función de la permeabilidad en las presas con dren chimenea, se proponen ecuaciones distintas para cada valor de permeabilidad "k":
 - o Para $k=10^{-6}$ cm/s $\rightarrow Q = 9,13 \cdot 10^{-7} \cdot h - 1,05 \cdot 10^{-7}$
 - o Para $k=10^{-5}$ cm/s $\rightarrow Q = 7,17 \cdot 10^{-8} \cdot h - 2,64 \cdot 10^{-7}$
 - o Para $k=10^{-4}$ cm/s $\rightarrow Q = -3,00 \cdot 10^{-11} \cdot z \cdot h^2 - 1,34E \cdot 10^{-9} \cdot h^2 - 1,48 \cdot 10^{-7} \cdot z \cdot h + 9,30 \cdot 10^{-7} \cdot h + 1,06 \cdot 10^{-6} \cdot z - 4,55 \cdot 10^{-6}$
- A la hora de abordar casos reales de presas de materiales sueltos, es fundamental disponer de unos buenos datos de permeabilidad de los materiales. No existe una relación generalista entre la permeabilidad intrínseca y el medio físico. Lo más conveniente es realizar los ensayos Lugeon y Lefranc oportunos para determinarla en cada caso. Por ello, se ha tratado de ajustar al máximo posible el modelo, con la incertidumbre de no disponer de datos fiables de la permeabilidad.
- El software SEEP/W trabaja en un espacio de 2 dimensiones, proporcionando valores de caudal "Q" por metro lineal. Debido a que la sección de la presa varía de un punto a otro, no resultaría correcto extrapolar el valor del caudal en la sección tipo a lo largo de toda la longitud de coronación. Este problema podría resolverse introduciendo nuevas secciones en el modelo y resolviéndolas, o mediante un módulo de 3 dimensiones en SEEP/W.
- En ocasiones, los aforadores se ven influenciados por aportes de agua externos (precipitaciones, manantiales próximos, etc.). Es importante tener en cuenta estas aportaciones, que pueden falsear la lectura del caudal aforado.

8.3. TRABAJOS FUTUROS

A lo largo del desarrollo del Trabajo Final de Grado se ha observado cómo muchos aspectos podrían haber sido más ampliamente estudiados, tanto teóricos como prácticos.

A continuación se ofrece un listado con posibles líneas de investigación futura, animando al lector y, más especialmente, a los futuros alumnos de Ingeniería Civil, a profundizar sobre cualquiera de ellas.

- Diseño de filtros y drenes en presas de materiales sueltos. Elaboración de casos prácticos.
- Aliviaderos en presas de materiales sueltos. Características y diseño.
- Estudio de presas de materiales sueltos de pantalla. Tipos de pantallas y características. Diseño de una pantalla.
- Mecanismos de rotura hidráulica en presas de materiales sueltos por fenómenos relacionados con la infiltración de agua.
- Medidas de impermeabilización en presas de materiales sueltos para la reducción de filtraciones. Elaboración de casos prácticos.
- Estudio de filtraciones en presas genéricas para la obtención de una ecuación de estimación del caudal infiltrado en presas heterogéneas y de pantalla.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alonso Franco M., Gómez Laa G. (1982) *The Hydraulic Auscultation as a Monitoring Test of Dam Safety*.
2. Bureau of Reclamation, (1977). *Ground Water Manual*, First Edition.
3. Casagrande, A. (1940). *Seepage Through Dams*, Contributions to Soil Mechanics, Boston Society of Civil Engineers, Boston, Massachusetts.
4. Cedergren, H.R. (1977). *Seepage, Drainage, and Flow Nets*. Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
5. Geo-Slope International (2008). *Seepage Modeling with SEEP/W 2007*
6. González de Vallejo L.I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid.
7. Márquez, J. (2005). *Diseño de presas de materiales sueltos*. Universidad de Sevilla, Aguapedia.
8. Ministerio de Obras Públicas (1967). *Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas*.
9. Pardo de Santayana F. (2010) *Las presas de materiales sueltos y sus patologías. Jornada de erosión interna de presas*.
10. SPANCOLD (2014) *Guía Técnica Nº 2. Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas. Presas de Materiales Suelos*.
11. Terzaghi, Karl, and Ralph B. Peck, (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
12. Toro Flores, M.A. (2009). *Evaluación de filtraciones en presas. Modelación numérica de flujos en medios porosos saturados y no saturados*. Universidad de Chile.
13. U.S. Army Corps of Engineers, (1986). *Engineering and Design, Seepage Analysis and Control for Dams*, Office of the Chief of Engineers
14. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation (2014). *Managing water in the west. Design Standards Nº 13. Embankment Dams Chapter 8: Seepage*.
15. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation (2011). *Managing water in the west. Design Standards Nº 13. Embankment Dams. Chapter 1: General Design Standards*

Referencias bibliográficas

16. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation (2014). *Managing water in the west. Design Standards N° 13. Embankment Dams. Chapter 11: Instrumentation and Monitoring.*
17. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation (2014). *Managing water in the west. Design Standards N° 13. Embankment Dams. Chapter 16: Cutoff Walls*
18. Vallarino E. (2006). *Tratado básico de presas. Tomo I.* Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Madrid.

