

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIDAD DE POSGRADO**



**INYECCIÓN E INFILTRACIÓN EN PRESAS DE RELAVE.  
APLICACIÓN DE LA PRESA LAS GORDAS**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS  
CON MENCIÓN EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

ELABORADO POR

**CÉSAR AUGUSTO COLLADO MEDINA**

ASESOR

**Dr. JORGE LUIS CÁRDENAS GUILLÉN**

LIMA-PERÚ

2015

INYECCIÓN E INFILTRACIÓN EN PRESAS DE RELAVE. APLICACIÓN  
DE LA PRESA LAS GORDAS

CÉSAR AUGUSTO COLLADO MEDINA

Presentado a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil en cumplimiento  
parcial de los requerimientos para el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA DE TRANSPORTES

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

2015

Autor : Ing. César Augusto Collado Medina

Recomendado : Dr. Jorge Luis Cárdenas Guillén  
Asesor de la Tesis

Aceptado por : Dr. Jorge Elías Alva Hurtado  
Jefe de la Sección de Posgrado

Es propiedad intelectual del autor.

El autor autoriza a la UNI-FIC a reproducir la tesis en su totalidad o en partes.

## RESUMEN

La Tesis: “INYECCIÓN E INFILTRACIÓN EN PRESAS DE RELAVE. APLICACIÓN de la PRESA LAS GORDAS” describe la técnica de inyección de mortero aplicado a la fundación de la presa y el cálculo de filtraciones obtenidas en el programa de cómputo SEEP/ W comparados con los registros reales aguas abajo de la presa.

En el Capítulo 1: Introducción, objetivos y generalidades, se realiza una descripción del estado del arte de las inyecciones, criterios a considerar para justificar la presencia de una cortina de mortero, consideraciones geológicas, pruebas de permeabilidad en la fundación, presiones máximas para evitar que la fundación se fracture.

En el Capítulo 2: Características de relaves y presa de relaves, se realiza una descripción del relave producto de la operación minera, así como también, una descripción de las presas respecto de sus formas de crecimiento y algunas consideraciones en su diseño y proceso constructivo.

En el Capítulo 3: Aspectos del método de perforación-inyección, trata del método utilizado para las perforaciones y de cómo se inyecta la lechada de cemento por etapas, es básico cuidar las presiones de inyección, ya que, un sobreesfuerzo no controlado puede originar un fracturamiento que debilitaría la fundación.

En el Capítulo 4: Características de la inyección de mortero de cemento, se describe las características físicas de la lechada de cemento.

En el Capítulo 5: Flujo de agua a través de presas de relave, básicamente se reconoce la bibliografía referente a la teoría de infiltración bajo un régimen permanente y transitorio, redes de flujo, ley de Darcy, condiciones de frontera, teoría de Dupuit.

En el Capítulo 6: Caso aplicativo. Presa Las Gordas, se realiza un desarrollo del diseño de la cortina de mortero, diseño de la inyección y aplicación en el Seep /W, los resultados obtenidos se comparan con filtraciones reales registradas aguas abajo de la presa.

Por último el Capítulo 7: Se presenta conclusiones y recomendaciones.

## **ABSTRACT**

This thesis entitled "INFILTRATION IN INJECTION TAILINGS DAMS. APPLICATION LAS GORDAS DAM "describes the grouting technique applied to the foundation of the dam as well as the calculation of leaks that have downstream basically the objective is a comparison of the leaks obtained in the SEEP / W and actual leaks.

Chapter 1: Introduction, Objectives and Overview, a description of the state of the art of injections, description of criteria to consider is performed to justify the presence of a curtain of mortar in the foundation of the dam, geological considerations, permeability tests on rocky foundation, maximum pressure to prevent fracture foundation.

Chapter 2: Characteristics of tailings dams, a description of the product itself tailings of the mining operation, as well as a description of the tailings dams with respect to their growth forms and some design considerations is performed and construction process.

Chapter 3: Overview of drilling-injections, is the method used for drilling holes and how the grout in stages is injected, is basic care injection pressures because, overexertion uncontrolled can result in a fracturing would weaken the foundation of the dam, hidro fracturing this method is generally used for the exploitation of oil wells.

Chapter 4: Characteristics of injection grout, the physical characteristics of the cement slurry is described, along with a description of the type Lugeon permeability test.

Chapter 5: Flow through tailings dams basically literature on the theory of infiltration under an Impermanent and transitory regime, flow nets, Darcy's law, boundary conditions, Dupuit theory recognized.

Chapter 6: Case application Las Gordas Dam, development from design curtain itself mortar injection design and application in the Seep for calculating filtration according to the height of the dam is made, then a comparison with the actual recorded hits water leaks below the dam.

Finally Chapter 7: Present conclusions and recommendations.

## **Agradecimientos**

Quiero de una manera sostenida mostrar mi gratitud a mi familia por todo el tiempo que estuve fuera de casa, en especial a mi mamá Marcy, mi papá Julio y mi hermano Carlos, a mi tío Víctor por su apoyo y consejo ante las dificultades durante el camino. La memoria de mi abuelo Vicente siempre está conmigo en los momentos críticos, el tiempo apremia, adelante. De esta manera, expresarle mi afecto y recuerdo a las personas que estuvieron a mi lado hasta antes de mi partida, y compañeros de trabajo, y a mi tío Orlando y Charo, con los cuales compartimos buenos momentos durante mi estadía en la ciudad de Lima (2009-2011), momentos que no olvidaré. A partir de este momento, luego de concluir un grado académico más en mi carrera profesional, decirle a Karla que siempre me acompañe en cada grandiosa idea que tenga, casi todo el tiempo la tengo en mis pensamientos, haciéndola linda solo para traerle la victoria, soy un luchador. Para la culminación de este trabajo, he recibido el apoyo incondicional de mis compañeros de trabajo en MWH. Asimismo, mi agradecimiento al Dr. Jorge Cárdenas por el asesoramiento y conducción hasta la culminación de esta mi tesis.

Gracias.

César.

## RELACION DE CONTENIDO

CARATULA .....	i
RESUMEN .....	ii
ABSTRACT .....	iii
CONTENIDO .....	vi
RELACION DE FIGURAS .....	x
RELACION DE TABLAS .....	xiii

## CONTENIDO

### CAPÍTULO I

<b>INTRODUCCIÓN, CRITERIOS Y CONSIDERACIONES EN LAS INYECCIONES DE MORTERO .....</b>	<b>14</b>
1.1 ESTADO DEL ARTE .....	14
1.2 GENERALIDADES .....	16
1.3 INYECCIÓN DE CEMENTO PARA PRESAS .....	16
1.4 CRITERIOS PARA EVALUAR LA INYECCIÓN EN FUNDACIONES .....	17
1.5 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD .....	19
1.6 CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS.....	20
1.6.1 Evaluación del RQD de la fundación.....	24
1.7 TÉRMINOS ASOCIADOS A LA INYECCIÓN DE MORTERO.....	25
1.8 ESTRUCTURA DE LA CORTINA DE MORTERO.....	26
1.8.1 Presiones manométricas usadas para los taladros de investigación.....	26
1.9 CRITERIOS DE CIERRE .....	26
1.10 MONITOREO DE GROUT.....	27

### CAPÍTULO II

<b>CARACTERÍSTICAS DEL RELAVE Y PRESA.....</b>	<b>28</b>
2.1 GENERALIDADES .....	28
2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RELAVES.....	29
2.3 TIPOS DE CRECIMIENTO DE PRESAS DE RELAVE .....	29
2.4 TIPO DE FALLAS DE PRESAS .....	31

2.5 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS EN LA PRESA PARA RELAVE. ....	32
--	----

### **CAPÍTULO III**

<b>ASPECTOS DEL MÉTODO DE PERFORACIÓN-INYECCIÓN.....</b>	<b>35</b>
3.1 GENERALIDADES .....	35
3.2 ETAPAS PARA PERFORACIÓN E INYECCIÓN DEL LECHO ROCOSO ...	35
3.2.1 Perforación.....	35
3.2.2 Presiones para la inyección .....	37
3.2.3 Monitoreo de grout .....	39
3.2.4 Diagrama de flujo.....	40
3.3 MOVIMIENTOS DE LA SUPERFICIE .....	41
3.4 CONTROL DE CALIDAD .....	42

### **CAPÍTULO IV**

<b>CARACTERÍSTICAS DE LA INYECCIÓN DE MORTERO DE CEMENTO.....</b>	<b>44</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	44
4.2 DIFERENTES CLASES DE MATERIALES INYECTABLES .....	45
4.2.1 Materiales en la lechada.....	46
4.3 PROPIEDADES DE LA LECHADA DE CEMENTO .....	49
4.3.1 Exudación .....	49
4.3.2 Configuración .....	50
4.3.3 Contracción.....	52
4.3.4 Contracción.....	54
4.3.5 Porosidad .....	55
4.3.6 Durabilidad .....	56
4.4 EQUIPO DE INYECCIÓN .....	58
4.5 COMPORTAMIENTO DE LA INYECCIÓN .....	60
4.6 ENSAYO DE PERMEABILIDAD LUGEON .....	63

4.6.1 Determinación de presiones específicas para Lugeon .....	67
4.6.2 Lectura de presión e inyección de agua.....	71
4.6.3 Determinación de la permeabilidad y número Lugeon .....	72
4.6.3.1 Ensayo de permeabilidad .....	72
4.6.3.2 Cálculo de permeabilidad .....	73

## **CAPÍTULO V**

<b>FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE PRESA DE TIERRA .....</b>	<b>76</b>
5.1 INTRODUCCIÓN.....	76
5.2 TEORIA DE INFILTRACIÓN.....	77
5.3 ECUACIÓN DE FLUJO PARA UN RÉGIMEN IMPERMANENTE .....	78
5.4 MÉTODO DE SOLUCIÓN PARA UN RÉGIMEN PERMANENTE DE LA ECUACIÓN DE LAPLACE .....	82
5.4.1 Redes de flujo .....	82
5.4.1.1 Trazo de la red de flujo. Cálculo del gasto .....	82
5.4.2 Métodos numéricos y computacionales.....	85
5.4.2.1 Método de diferencias finitas.....	85
5.4.2.2 Método de elementos finitos.....	86
5.5 LEY DE DARCY. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD .....	87
5.6 CONDICIONES DE FRONTERA.....	88
5.7 CONDICIONES GENERALES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA LINEA SUPERIOR.....	88
5.8 TEORIA DE DUPUIT.....	90

## **CAPÍTULO VI**

<b>CASO APLICATIVO.PRESA LAS GORDAS.....</b>	<b>94</b>
6.1 DESCRIPCIÓN.....	94
6.2 CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS .....	94



6.2.1 GEOMORFOLOGIA.....	94
6.2.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL.....	95
6.2.3 RIESGO GEOLOGICO .....	95
6.2.4 PARÁMETROS DE RESISTENCIA, DEFORMACIÓN Y PERMEABILIDAD .....	95
6.2.5 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD GEOTÉCNICA UG-DS-III.....	95
6.3 CRITERIO PARA EVALUAR LA CORTINA DE MORTERO EN LA FUNDACIÓN.....	96
6.4 INYECCIÓN DE LA CORTINA DE MORTERO.....	97
6.4.1 INTRODUCCIÓN .....	97
6.4.2 TALADROS DE INVESTIGACIÓN .....	98
6.4.3 CRITERIOS DE LA PRUEBA.....	98
6.4.4 DISEÑO DE MEZCLAS DE GROUT .....	99
6.4.4.1 Equipos de ensayo de mezcla para inyecciones.....	99
6.4.4.2 Ensayos de mezclas para lechadas de cemento .....	100
6.4.4.3 Selección de la mezcla de diseño .....	106
6.4.4.4 Tabla de mezcla de diseño escogidas .....	107
6.4.4.5 Mezclas aprobadas para la inyección de mortero .....	108
6.4.5 PRUEBAS DE GROUT .....	109
6.4.5.1 Pruebas de inyección IN-SITU .....	109
6.4.5.2 Ploteo de absorciones .....	111
6.4.6 ESTRUCTURA DE LA CORTINA DE MORTERO .....	112
6.4.6.1 Presiones manométricas usadas para los taladros de investigación .....	112
6.4.6.2 Presiones manométricas recomendadas .....	112
6.4.6.3 Volumen máximo .....	113
6.4.7 CRITERIOS DE CIERRE .....	113
6.4.8 MONITOREO DE GROUT .....	114

6.5 ANÁLISIS DE FILTRACIONES EN LA PRESA DE RELAVES .....	114
6.5.1 METODOLOGIA .....	114
6.5.2 GEOMETRIA.....	115
6.5.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	118
6.5.4 CONDICIONES DE CONTORNO.....	119
6.5.5 ANCHO EFECTIVO Y FILTRACIONES ESTIMADAS EN EL SEEP/W.....	120
6.5.6 RESULTADO DE FILTRACIONES ESTIMADAS A PIE DE PRESA ....	129
6.5.7 COMPARATIVO DE FILTRACIONES REALES Y ESTIMADAS EN EL SEEP/W .....	129
6.5.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS-MEJORAMIENTO DE LA IDEALIZACIÓN.....	131

## **CAPÍTULO VII**

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>138</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>140</b>

## **RELACION DE FIGURAS**

Figura 1.1 Ubicación de cortinas de mortero debajo del núcleo arcilloso. Fuente Ischy, E. Inyección de suelos (1968). .....	16
Figura 1.2 Se muestra distribución de perforaciones primarias, secundarias, terciarias, cuaternarias. Fuente Ischy, E. Inyección de suelos (1968) .....	17
Figura 1.3 Guía para determinar si la inyección es necesario. Fuente: Inyección de Suelos Ischy (1968) .....	18
Figura 1.4. Características geológicas a considerar en la inyección. Fuente: Inyección de suelos Ischy (1968). .....	22
Figura 1.5 Características geológicas a considerar en la inyección. Fuente: Inyección de suelos Ischy (1968).....	23

Figura 1.6 Presiones de inyección de lechada recomendado para la presa Las Gordas. Fuente: MWH, 2013 .....	27
Figura 2.1 Disposición del material relave (arenas, lamas) y agua recuperada sostenido por la presa hecha con materiales de préstamo (material rocoso y arcilloso).....	29
Figura 2.2 Crecimiento de presa según línea central.....	30
Figura 2.3 Crecimiento de presa según aguas arriba.....	30
Figura 2.4 Crecimiento hacia aguas abajo .....	31
Figura 2.5 Estadística de colapsos de presas de tierra. Fuente: Miguel De la Torre, UNI, 2002.....	32
Figura 2.6 Crecimiento del embalse de la Presa Las Gordas. Fuente: MWH 2013.....	34
Figura 3.1 Etapas de perforación e inyección. Perforación descendente. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	36
Figura 3.2 Etapas de perforación e inyección. Perforación ascendente y circuito de inyección descendente. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	37
<b>Figura 3.3</b> Presiones para inyección según el tipo de roca y profundidad. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	38
<b>Figura 4. 1</b> Efecto del contenido de agua sobre las propiedades de la lechada. Fuente: Inyección de suelos Ischy,1968 .....	45
<b>Tabla 4. 1</b> Porcentaje de componentes de cemento. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	47
<b>Figura 4. 2</b> Dimensión de partícula de cemento. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	47
<b>Figura 4. 3</b> Velocidad de exudación (Tipo I) .Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	49
<b>Figura 4. 4</b> Efecto del agua sobre capacidad de sangrado. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	50
<b>Figura 4. 5</b> Incremento de la resistencia al corte según el tiempo. Fuente: Inyección se suelos-Ischy, 1968 .....	51
<b>Figura 4. 6</b> Se muestra la relación entre tiempo de fraguado y la proporción de cemento Tipo I. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	52
<b>Figura 4. 7</b> Expansión de lechada Tipo I. Fuente: Inyección de suelos-Ischy,1968 .....	53
<b>Figura 4. 8</b> Incremento del esfuerzo de la lechada. Fuente: Inyección de suelos-Ischy,1968 .....	55
<b>Figura 4. 9</b> Efecto del % de vacíos sobre la resistencia. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968 .....	56
<b>Figura 4. 10</b> Permeabilidad a los 28 días de lechada de cemento. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968 .....	57

<b>Figura 4. 11</b> Bomba tipo Moyno. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968 .....	59
<b>Figura 4. 12</b> Equipo de inyección, generalmente todo el sistema de control es automatizado con lecturas de volumen inyectado, caudal, variación de presiones, velocidad de circulación, temperatura del mortero. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968 .....	60
<b>Figura 4. 13</b> Montaje de Lugeon. Fuente: Inyección de suelos-Ischy,1968 .....	65
<b>Figura 4. 14</b> Diferentes diagramas de ensayos Lugeon. Fuente: Inyección de suelos Ischy (1968).....	66
<b>Figura 4. 15</b> Representación esquemática para Lugeon. Fuente: MWH 2013 .....	68
<b>Figura 4. 16</b> Gráfico según la variación del caudal según la presión (Hp) (Fuente: MWH, 2013) .....	75
<b>Figura 5. 1</b> Condiciones de frontera para determinar la red de flujo. Fuente: Marsal, Resendiz Nuñez, 1975 .....	76
<b>Figura 5. 2</b> Rectángulo formado a partir de la red de flujo resultante, (Casagrande, 1925-1940).....	84
<b>Figura 5. 3</b> Permeámetro de carga constante. Ley de Darcy. Fuente: Experiencia de Darcy,J. Sánchez,2011) .....	87
<b>Figura 5. 4</b> Condiciones de entrada de la línea de corriente superior en la presa de tierra (Casagrande 1925-1940).....	89
<b>Figura 5. 5</b> Estudio de la condición de salida de la línea de corriente superior para $\alpha \leq 90^\circ$ (Casagrande 1925-1940) .....	90
<b>Figura 5. 6</b> Aplicación de la teoría de Dupuit a un flujo bidimensional. Charny (1951).....	91
<b>Figura 5. 7</b> Parábola de Dupuit y cálculo de caudal según la Teoría de Dupuit (Marsal y Resendiz, 1975 85 .....	93
<b>Figura 6.1</b> Guía para determinar si la inyección es necesaria. Fuente: Inyección de suelos Ischy 1968. ....	97
<b>Figura 6. 2</b> Cohesión de mezcla. Fuente: MWH, 2013 .....	104
<b>Figura 6. 3</b> Viscosidad de mezcla. Fuente: MWH, 2013.....	104
<b>Figura 6. 4</b> Sedimentación de mezcla .Fuente: MWH, 2013 .....	105
<b>Figura 6. 5</b> Inyectabilidad de la mezcla seleccionada. Fuente: MWH, 2013 .....	105
<b>Figura 6. 6</b> Perfil de absorciones de cemento en los taladros de prueba. Fuente MWH, 2013 .....	111
<b>Figura 6. 7</b> Absorciones de cemento en taladros de investigación .Fuente MWH, 2013. ....	111
<b>Figura 6. 8</b> Presiones de inyección de lechada recomendado para la presa. Fuente: MWH, 2013 .....	113
<b>Figura 6. 9</b> Presa Las Gordas (Progresiva 0+198). Vista en Planta y Corte. Fuente: MWH, 2013 .....	116
<b>Figura 6. 10</b> Distribución de zonas presa Las Gordas. Progresiva 0+198. Fuente MWH, 2013 .....	118
<b>Figura 6.11</b> Funciones de conductividad hidráulica usado para el análisis de filtraciones.(Fuente: MWH, 2013) .....	119
<b>Figura 6. 12</b> Cuadro comparativo de filtraciones, en línea roja se grafica las estimaciones del Seep/w, y en azul se grafican las filtraciones reales registradas a pie de presa .....	130

**Figura 6.13.** Según las filtraciones reales se idealizaron 04 modelos en el Seep/w con la intención de acercarse a las filtraciones reales..... 136

## RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación del macizo rocoso según su RQD. Fuente: Deere ( 1963-1967).....	24
Tabla 1.2 Presiones manométricas recomendada para la inyección de lechada en los taladros de investigación en la presa Las Gordas. Fuente MWH, 2013 .....	26
Tabla 4. 2 Porcentaje de componentes de cemento. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	48
Tabla 4.3 Aditivos para variar las propiedades de la lechada. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	51
Tabla 4. 4 se muestra como inicial al conjunto Vicat, equivalente a una resistencia al corte de 170.000 dinas/ , que se acelera por la finura de cemento. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	53
Tabla 4.5 Se muestra la relación entre tiempo de fraguado y porcentaje de contracción. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	58
Tabla 4. 5 Coeficiente de permeabilidad para la lechada de cemento Tipo I (w=0.7). Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.....	52
Tabla 4. 6 Lecturas de absorciones de agua luego de obtener un caudal constante . Fuente: MWH, 2013 .....	71
Tabla 4. 7 Permeabilidad y número Lugeon para los pasos o presiones predeterminados para un tramo de ensayo (Fuente: MWH, 2013).....	75
Tabla 5. 1 Grado de permeabilidad .....	80
Tabla 6. 1 Ensayo de mezclas para lechadas de cemento. Fuente MWH, 2013 .....	94
Tabla 6.2 Diseños de mezcla seleccionados. Fuente MWH, 2013 .....	107
Tabla 6.3 Diseños de mezclas aprobados. Fuente: MWH, 2013 .....	108
Tabla 6.4 Registro de pruebas de inyección in situ . Fuente: MWH, 2013 .....	110
Tabla 6. 5 Presiones manométricas para inyección de lechada en los taladros de investigación .Fuente: MWH, 2013 .....	112
Tabla 6. 6 Consideraciones en las etapas constructivas, cotas de embalse SEEP/w, información histórica disponible. Fuente: MWH, 2013 .....	112
Tabla 6. 7 Propiedades hidráulicas para el análisis de filtraciones. Fuente: MWH, 2013.....	118
Tabla 6. 8 Resultado de filtraciones SEEP/W para Las Gordas (Prog 0+198).....	129
Tabla 6.9 Resultado de filtraciones estimadas en el SEEP/W para Las Gordas (Prog 0+198).....	136

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN, CRITERIOS Y CONSIDERACIONES EN LAS INYECCIONES DE MORTERO

#### 1.1 ESTADO DEL ARTE

Según, el libro Inyección de Suelos (Ischy, 1968) y otras tesis de postgrado FIC UNI, la inyección de suelos en el presente es un procedimiento de construcción reconocido por todos los ingenieros. Los métodos de inyección y morteros utilizados logran un gran impulso en los años 1920-1930, época en que la construcción de ferrocarriles dio paso a las obras hidráulicas.

Este procedimiento se convirtió en esencial en la construcción de presas para evitar que la circulación de agua contorneara sus bases, resultando ser actualmente un método económico. Esta técnica tiene su origen en base a los conocimientos alcanzados en la mejora de macizos rocosos por parte del profesor Lugeon y los numerosos estudios realizados por técnicos petroleros para la fracturación hidráulica de los pozos.

Durante muchos años no hubo más procedimiento que el Joosten, consistente en inyectar las arenas y gravas primeramente con silicato de sodio y después un reactivo muy fuerte que lo transformaba en gel, esta inyección impermeabiliza al mismo tiempo que consolida. El método Joosten resulta tener un costo alto, además de que resulta ser ineficaz en arenas finas. Los geles de silicato de fraguado retardado, más penetrantes y algo menos costosos, se desarrollaron algo y, después, con mucho menos éxito, las inyecciones de emulsiones de betún. Resultando finalmente el precio ser un obstáculo. Fue precisa la aparición en 1938 de los morteros de arcilla tratada, preconizados por A. Mayer<sup>1</sup>, muy superiores a los

---

<sup>1</sup> Armand Mayer, 1938, inyección de arcilla tratada.

---

morteros de arcilla de Berigny <sup>(2)</sup> y fundamentalmente, algunos años más tarde, los morteros de arcilla-cemento, para que la inyección de aluviones llegara a considerarse relativamente barata.

Es recién después de 20 años como realmente se conoce la forma conveniente de dirigir estos trabajos. Actualmente, el uso de resinas orgánicas resultan ser más costosas que el silicato de sodio, que al ser tan fluidas como el agua durante la inyección, luego de la polimerización transforman el suelo en un hormigón de una resistencia considerable. Sin embargo, resulta ser adecuado el hecho de inyectar resinas a un alto costo considerando lo fácil de su aplicación y resultados excelentes. La inyección de macizos rocosos fisurados con una simple suspensión de cemento, es una operación relativamente fácil para cualquiera que tenga un mínimo de experiencia en la materia. La técnica de inyecciones se manifiesta en el tipo de mortero a utilizar según como se propagan las lechadas de inyección en el terreno. Las excavaciones practicadas en los macizos inyectados no nos muestran más que el resultado. En cuanto a los ensayos de laboratorio, no pueden reflejar la realidad porque es imposible confeccionar un modelo que posea todas las propiedades reales del suelo.

Para esclarecer el problema hay que asociar:

- La estructura de los suelos, siempre más o menos heterogéneos.
- Las propiedades de los morteros que pueden ser totalmente diferentes según sea uno u otro.
- Las leyes de circulación de los fluidos o suspensiones por conducciones de forma geométrica mal definida y repartidas de cualquier manera en un medio elástico.

---

<sup>2</sup> Charles Berigny 1802, Inyecciones de arcilla y cal hidráulica para reparar una compuerta de una cámara desarenadora en el puerto de Dieppe (Francia).

A mayor abundamiento, señalamos trabajos característicos tratando de hacer comprender que una inyección no se hace simplemente bombeando un mortero, el comportamiento del terreno se hace a veces incomprensible, ni las matemáticas, ni la geología pueden preverlo. Es necesario, casi siempre, ver lo que ocurre al comienzo de la inyección para adoptar el método correspondiente.

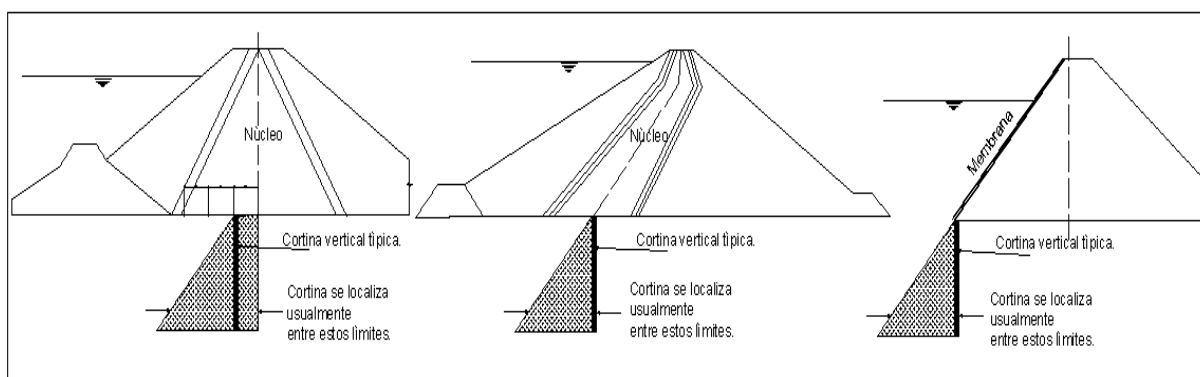
## 1.2 GENERALIDADES

El número, separación, inclinación y profundidad de las perforaciones para las inyecciones, y las presiones de inyección y composición de las mezclas a ser usadas, depende de las características de la roca y el resultado de las operaciones de perforación e inyecciones de mortero.

Se comparte un alcance geológico y características hidráulicas de la fundación de la presa para concluir en diseños de cortinas de inyección o consolidación, así como también, norma, definiciones, materiales propios de la lechada, consideraciones en la disposición de equipos, etc.

## 1.3 INYECCIÓN DE CEMENTO PARA PRESAS

La inyección en la fundación de presas mayormente toma la forma de una cortina y esto influye con la cantidad de filtración.



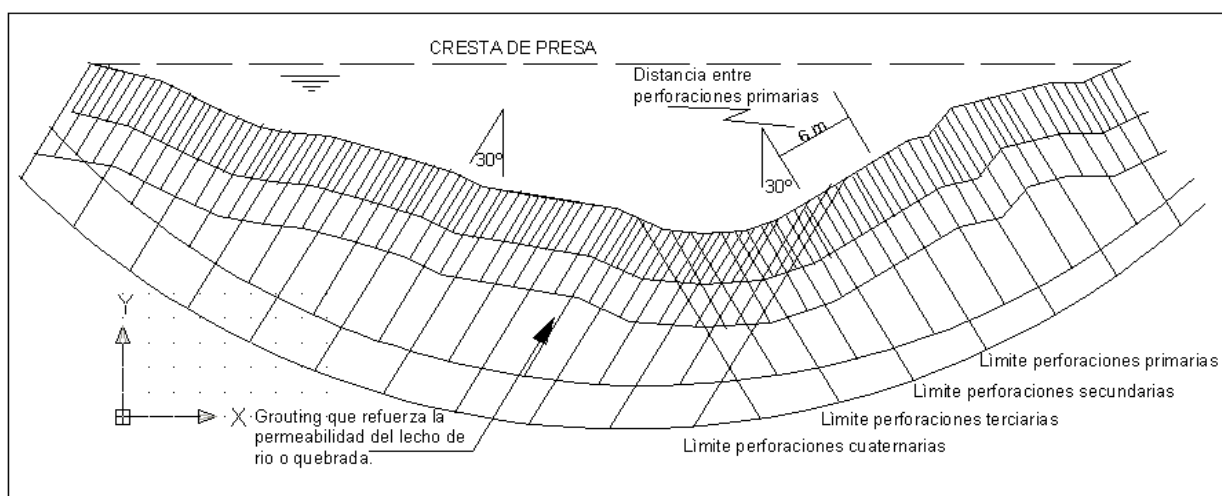
**Figura 1.1** Ubicación de cortinas de mortero debajo del núcleo arcilloso. Fuente Ischy, E. Inyección de suelos (1968).

En una presa conformada por un núcleo de tierra una cortina puede ser colocada aguas arriba del eje del núcleo del relleno impermeable. Las áreas sombreadas indican las



posiciones habituales que van desde una cortina vertical en el eje a una inclinada que inicia a partir del tercio central del eje del núcleo aguas arriba. Las cortinas con relleno de roca inician al pie aguas arriba desde una orientación vertical a una inclinada.

En la figura siguiente, se muestra una visión general de las cortinas de mortero ubicada a lo largo de la cimentación de la presa. Para evaluar el diseño de la cortina de mortero es necesario tener las consideraciones geológicas y pruebas de permeabilidad en la base de la



**Figura 1.2** Se muestra distribución de perforaciones primarias, secundarias, terciarias, cuaternarias. Fuente Ischy, E. Inyección de suelos (1968).

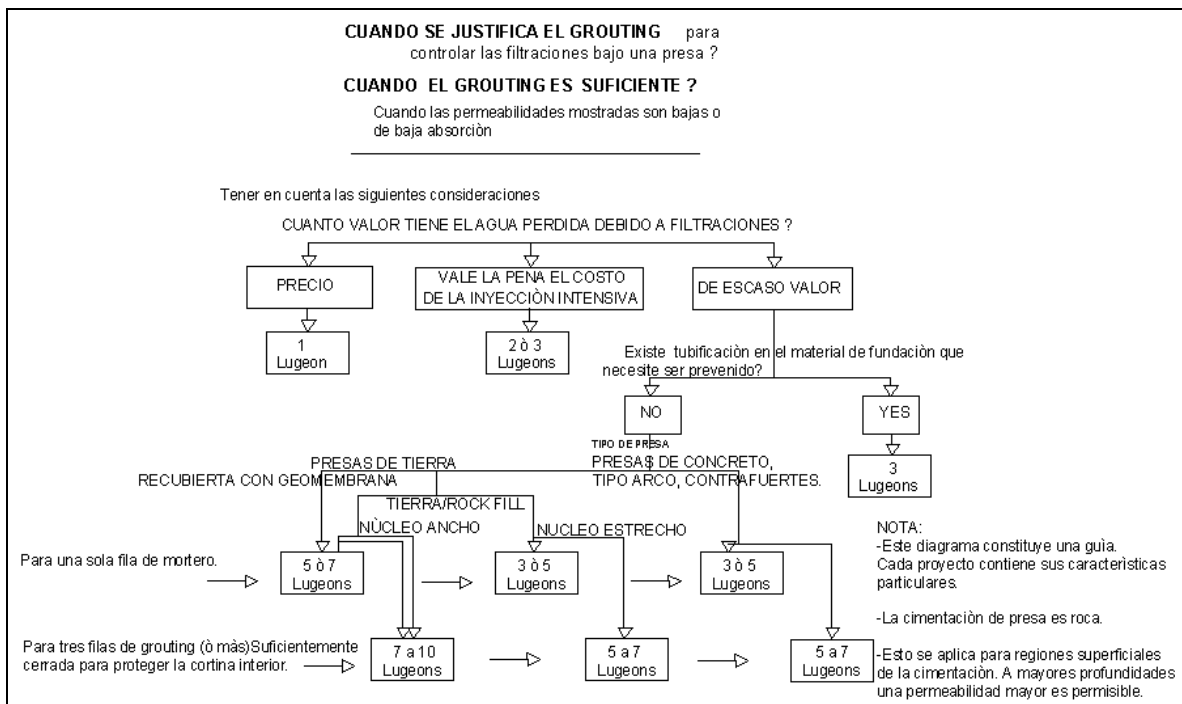
## 1.4 CRITERIOS PARA EVALUAR LA INYECCIÓN EN FUNDACIONES

Las consideraciones geológicas ayudan a determinar qué tipo de inyección es necesario. Sin embargo, hay ocasiones cuando se determina que la inyección no es necesaria. También, existen casos en la que es muy difícil su aplicación.

La Figura 1.3, muestra un diagrama de flujo que inicia con la pregunta “¿Cuán valiosa es el agua que se pierde en fugas?” Si el precio del agua es lo suficientemente costosa para justificar el costo de una inyección masiva, es deseable que la inyección sea para una permeabilidad encima de 1,2 o 3 Lugeones.

Si la pérdida de agua es de escaso valor, que es por supuesto, el caso más frecuente, el diagrama de flujo lleva a la siguiente pregunta “¿Existe riesgo de tubificación en la fundación que deba ser prevenida?” “De existir una respuesta positiva esto podría llevar a

una cortina bastante fuerte. Una respuesta negativa, conduce a tener en cuenta el tipo de presa. En presas de tierra, incluyendo las que están protegidas por geomembrana, requieren distintos grados de rigidez dependiendo del tamaño del núcleo y así un número determinado de filas de cortinas para prevenir la erosión en su cimentación por el paso de filtraciones. Cuando el número de cortinas de mortero es decidido, comparado con la permeabilidad natural de la cimentación, nos da una idea si la inyección es necesaria. A veces la inyección de mortero no es necesaria si se verifica que la impermeabilidad es inferior a los límites. El caso más frecuente, es cuando la fundación es muy permeable y es necesaria la inyección para alcanzar la permeabilidad deseada. La permeabilidad se obtiene en base de la perforación in situ para utilizar en el diseño de la lechada.



**Figura 1.3** Guía para determinar si la inyección es necesaria. Fuente: Inyección de suelos Ischy (1968).

---

El cuadro anterior, viene de Maurice Lugeon<sup>3</sup> quien en 1933, propuso que para presas de 30 m de alto y con una absorción superior a 1 Lugeon es necesario la inyección de mortero, y 3 Lugeones para presas de menor altura. Esta regla fue utilizada con presas de gravedad de concreto y para cada presa. Consiguientemente, estos criterios fueron facilitados en base a los resultados obtenidos de la experiencia y han sido extendidos en otros tipos de presa con diferentes fundaciones: Nonveiller, Arhipainen, Acker, Jones, Fergusson, Lancaster.

Jones y otros, discutieron diferentes conceptos sobre la aplicación del diseño en la permeabilidad en un compresivo tratamiento e indicaron usar 2 Lugeons como criterio para la presa de tierra en 1955 a 1960. Pratt, McMordie y Dundas usaron 1 Lugeon para el eje central a mediados de los 60. En base a la experiencia obtenida se propuso el cuadro de la Figura 1.3.

En varias situaciones se requiere inyección para presas, el cemento se utiliza más para este tipo de lechada, alternativas como lechada de arcilla y agentes químicos para realizar aplicaciones ocasionales en fundaciones aluviales.

## **1.5 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD**

La determinación de la permeabilidad del medio rocoso, se establece en base a los ensayos Lugeon que consiste en anotar los caudales absorbidos a presiones crecientes y decrecientes, manteniendo cada caudal durante 10 minutos. El resultado viene expresado por la medida del agua absorbida en litros por minuto y metro, para una presión de inyección de 10 kg/cm<sup>2</sup> siendo cada tramo de sondeo ensayado de unos 5 m de longitud. Actualmente todas esas condiciones se conocen con el nombre de unidad Lugeon. Con cantidades inferiores a una unidad Lugeon podemos considerar que la inyección resulta innecesaria.

---

<sup>3</sup> Maurice Lugeon, ( Poissy, próximo de París, 10 de julio de 1870 — Lausana, 23 de octubre de 1953) fue un geólogo suizo).<sup>1</sup>La unidad de medida de la permeabilidad a través de macizos rocosos se le denomina "lugeon" (Lu) en su homenaje.

---

“Se han empleado frecuentemente pruebas de presión de agua (Lugeon) en cada intervalo de inyectado para ayudar a seleccionar la prueba de inyectado. Sin embargo, la experiencia y la teoría han indicado una correlación muy pobre de los valores Lugeon con las absorciones de lechada. Sin embargo, todavía se podrán emplear las pruebas de Lugeon o similares en las perforaciones exploratorias primarias, para obtener una imagen general de la permeabilidad a través del empotramiento y el área de la cimentación de la cortina principal. Luego se podrán realizar comparaciones con pruebas Lugeon llevadas a cabo como comprobación o barrenos de control después del inyectado, para ver si se ha realizado una reducción considerable de la permeabilidad” (Lombardi y Deere, 1993).

## 1.6 CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS

Los aspectos geológicos influyen directamente en la inyección de mortero, a continuación se muestran factores que describen los casos que pueden presentarse:

**Factor 1:** El espaciamiento de las juntas que se pueda presentar en un estrato rocoso, pudiendo estas estar separadas o por el contrario muy juntas. En general, las juntas separadas hacen que la inyección sea más fácil. Las juntas que están muy cercanas generalmente producen fugas en la superficie, la inyección irregular y las dificultades que se pueden presentar pueden ser solucionadas con técnicas apropiadas.

**Factor 2:** Las aberturas de junta mayores a 0.080” (2 mm) ayudan la penetración de la lechada hasta un ancho mayor a un cuarto de pulgada (6 mm) en donde la lechada puede ingresar muy fácilmente llegando una presión de rechazo en un tiempo de recorrido prolongado, sin embargo, por medio de aplicaciones a intervalos suficientemente espaciados se puede llegar a la presión de rechazo convenientemente. Por otro lado, fisuras menores a 0.020” (0.5 mm) puede que la inyección sea relativamente difícil.

**Factor 3:** La dirección de las juntas en el estrato rocoso tiene influencia sobre la orientación de las perforaciones y la posibilidad de prever el movimiento del estrato durante la inyección. Las juntas que se sumergen de 30° a 60° son fácilmente interceptadas por perforaciones verticales y son menos propensas al movimiento de rocas que los de inmersión casi horizontal o casi vertical, estos últimos requieren perforaciones inclinadas, siendo un poco más complicado que las verticales.

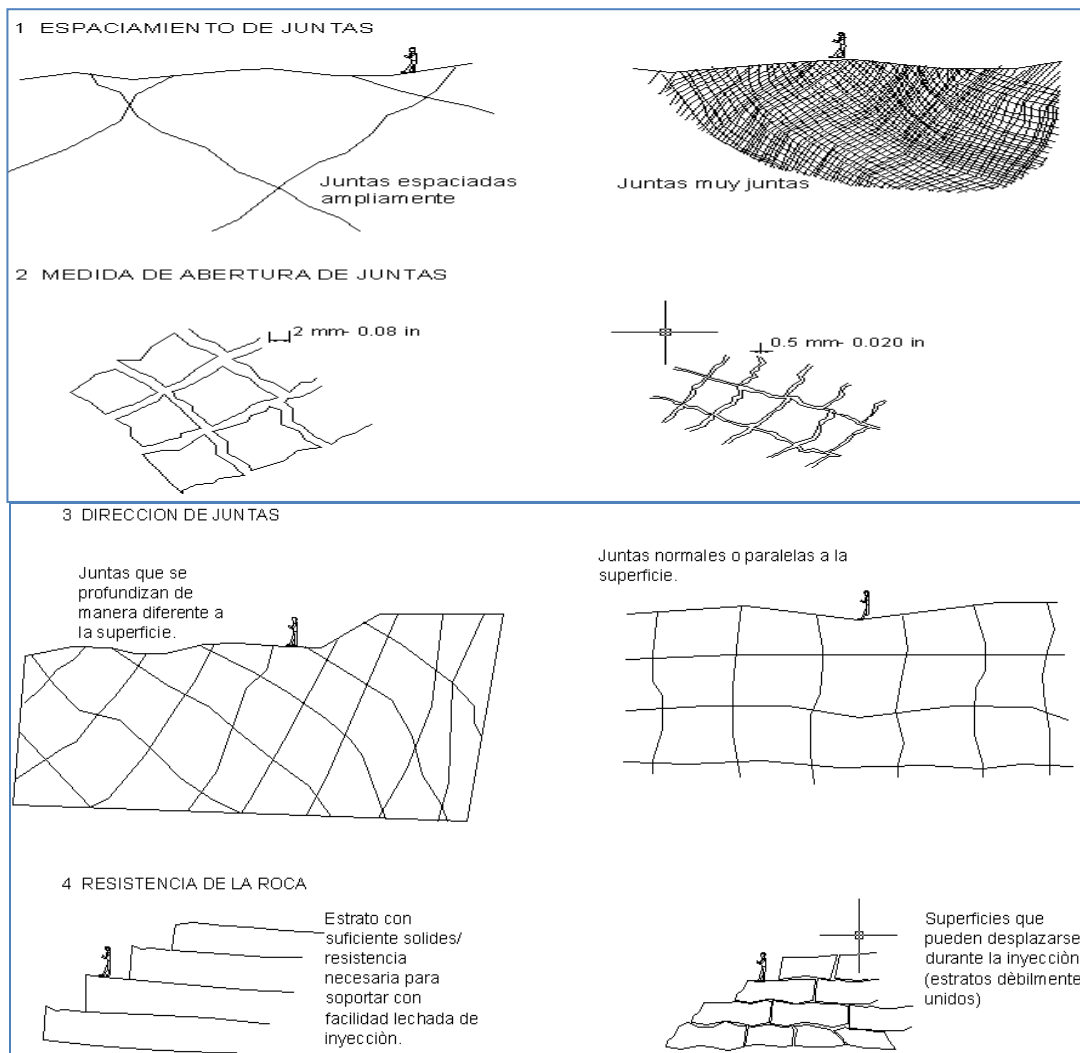
**Factor 4:** La resistencia de la roca puede ayudar a la inyección, pero si la roca es débil, con superficies sueltas, éstas se mueven bajo la presión de la inyección.

**Factor 5:** La solidez de una roca es un factor que puede ser útil, cuando la roca es lo suficientemente sólida las perforaciones no colapsan, es problemático si las perforaciones colapsan.

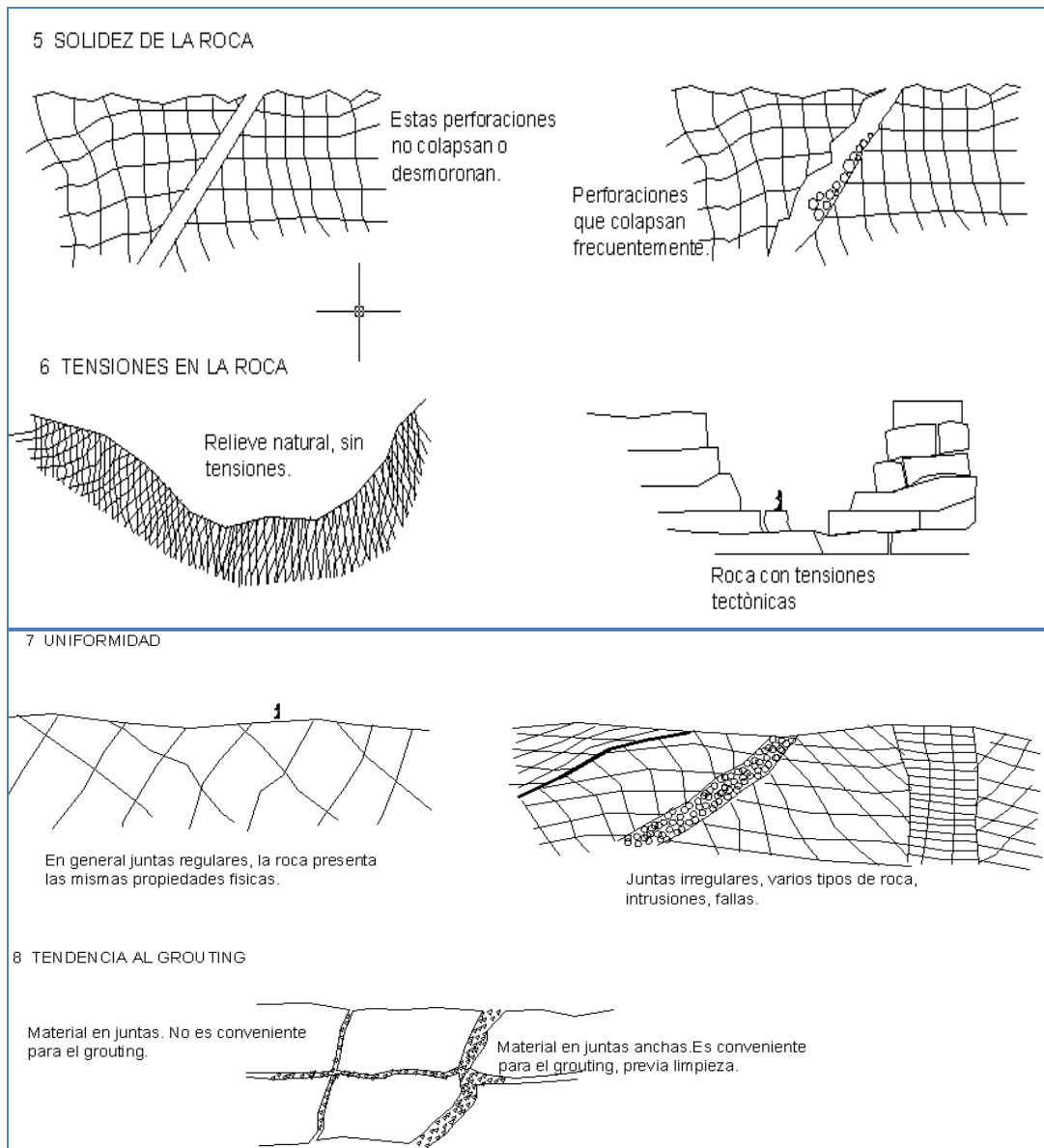
**Factor 6:** El esfuerzo en roca suele ser de origen tectónico y puede ser severo en la roca dura masiva. La presencia del esfuerzo puede ser detectado visualmente, esto es si la cara del acantilado o afloramientos se muestra un rebote vertical o un valle abultado en la unión de juntas. Estos esfuerzos originan en el macizo la aparición de bloques de roca como el resultado de la aparición gradual de estas grietas originan una tensión que supera la resistencia de la roca originando la repentina fractura. La liberación de la energía luego de la fractura puede originar la aparición de fisuras en los rebotes verticales. El profesional de inyección debe ser capaz de reconocer el estado de tensión de la roca, debido a que este es un factor dominante en los propósitos de inyección. Por otro lado, la roca de alta resistencia que ha sufrido fisuramiento no presenta mayor dificultad en la inyección.

**Factor 7:** Si la fundación es uniforme puede ser de gran ayuda en el diseño de las perforaciones, ya que estas podrían ser uniformes y en un solo sentido. En fundaciones irregulares se puede requerir fundaciones en varias direcciones y en zonas débiles mayor concentración de inyección.

**Factor 8:** Si el material de las juntas puede ser removido por las filtraciones, entonces puede que la inyección de mortero sea más intensa en juntas de menor ancho. Es necesario identificar estas características de tubificación antes de iniciar la inyección correspondiente a fin de tener un diseño de mezcla inteligente y apropiada.



**Figura 1.4** Características geológicas a considerar en la inyección. Fuente: Inyección de suelos Ischy (1968). (...continúa).



**Figura 1.5** Características geológicas a considerar en la inyección. Fuente: Inyección de suelos Ischy (1968).

---

### 1.6.1 Evaluación del RQD de la fundación

El índice RQD (Rock Quality Designation) desarrollado por Deere<sup>4</sup> entre 1963 y 1967, se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo.

Se calcula midiendo y sumando el largo de todos los trozos de testigo mayores que 10 cm en el intervalo de testigo de 1.5 m. Se deben incluir los discos del núcleo ocasionados por rotura mecánica de la roca como parte del RQD.

$$RQD: \frac{\text{Suma de 10}}{\text{Longitud total}} * 100\%$$

En base al % obtenido se establece:

RQD	Calidad del macizo rocoso
<25%	Muy pobre
25-50%	Pobre
50-75%	Normal
75-90%	Bueno
90-100%	Muy Bueno

**Tabla 1.1** Clasificación del macizo rocoso según su RQD. Fuente: Deere (1963-1967) .

---

<sup>4</sup> Deere, Ingeniero geotécnico, USA.



## 1.7 TÉRMINOS ASOCIADOS A LA INYECCIÓN DE MORTERO

- Inyección de mortero de cemento, es una mezcla de agua y cemento que se inyecta para mejorar la resistencia y reducir la permeabilidad de la roca cercana a la superficie debajo de la estructura.
- Coeficiente de permeabilidad, es una característica de los suelos, específicamente está ligado a la Ley de Darcy que se refiere al flujo de fluidos a través de los suelos. El coeficiente de permeabilidad, generalmente representado por la letra  $k$ , es extremadamente variable, según el tipo de suelo.
- Ensayo de Lugeon, el método se lleva a cabo en perforaciones con niveles de agua estáticos debajo de la superficie del terreno. El agua se inyecta a presiones específicas previa evaluación del RQD. Los pasos, se usan para subir y bajar a través del rango de presión estimada. El comportamiento del sistema durante el aumento y recuperación de la inyección puede dar información útil sobre el comportamiento de la roca y de las fracturas, y de la inyección. Cabe resaltar que el índice RQD (Rock Quality Designation) desarrollado por Deere entre 1963 y 1967, se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo.
- Cortina de mortero, se asume que la inyección de mortero toma la forma de una cortina que se introduce por las fallas o fisuras alrededor de la perforación dentro del macizo rocoso.
- Fundación rocosa, o lecho rocoso constituye la cimentación de una presa que mediante un mapeo geológico, perforaciones geotécnicas y trincheras se determina la calidad de la fundación rocosa.
- Perforaciones, mediante el uso de taladros se realizan perforaciones que sirven para evaluar el macizo rocoso a fin de determinar el tipo de roca presente. También son utilizados para realizar pruebas de inyección de agua a determinadas profundidades a fin de establecer el grado de permeabilidad de la cimentación.

- Presión manométrica, Se llama presión manométrica a la diferencia entre la presión absoluta o real y la presión atmosférica. Se aplica tan solo en aquellos casos en los que la presión es superior a la presión atmosférica, pues cuando esta cantidad es negativa

se llama presión de vacío. Algunas equivalencias de presión 1 atmósfera = 10 m.c.a. (metros de columna de agua),  
1 atmósfera = 14,695943 PSI.

## 1.8 ESTRUCTURA DE LA CORTINA DE MORTERO

Cada etapa de inyección se completa cuando la presión máxima (P máx) y/o volumen máximo hayan alcanzado el límite superior. Se establecieron presiones manométricas en función de las investigaciones geológicas (Logeos, RQD) y las investigaciones geotécnicas (ensayos de Lugeon).

### 1.8.1 Presiones manométricas usadas para los taladros de investigación

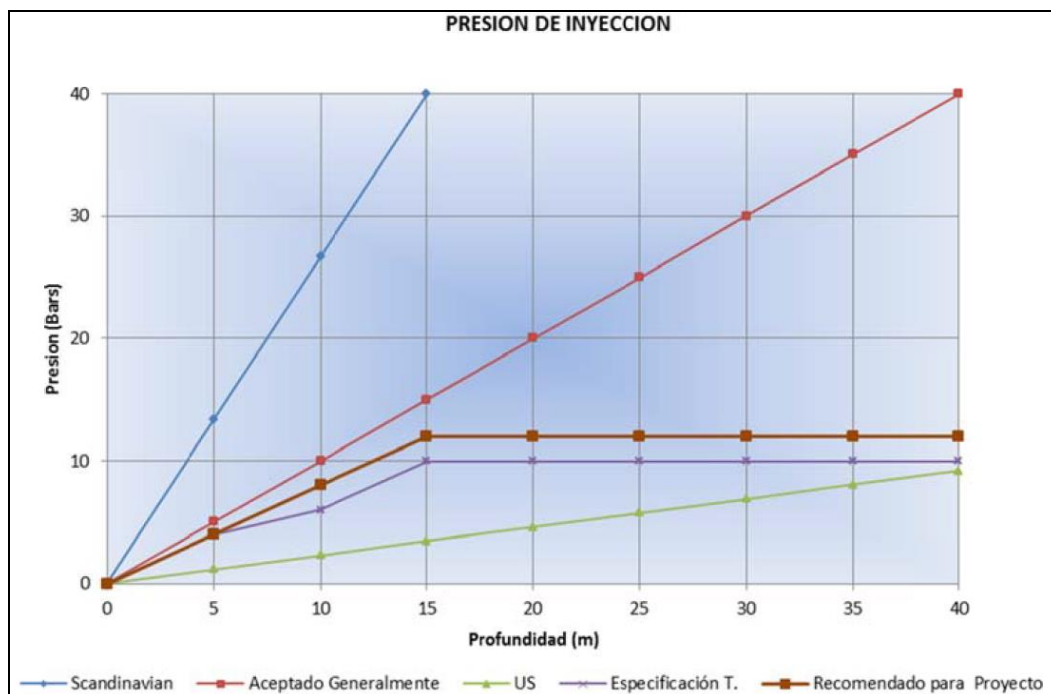
Profundidad (m)	Presión manométrica (Bar)
0 – 5	3
5 – 10	5
10 – 15	10
Mayor a 15	15

**Tabla 1.2** Presiones manométricas recomendada para la inyección de lechada en los taladros de investigación en la presa Las Gordas. Fuente MWH, 2013.

## 1.9 CRITERIOS DE CIERRE

La presión máxima (PM) y el volumen máximo (V máx) son parámetros que definen la permeabilidad y la consolidación de la roca. Con presiones de inyección más bajas la permeabilidad y consolidación de la roca no se considera posible. De exceder los límites de presión, es posible ocasionar un hidrofracturamiento (se produce cuando la resistencia a la tracción y las tensiones de confinamiento del manto rocoso fueron superadas).

Generalmente, la inyección se inicia con presiones bajas, verificando la existencia de fracturas y conexiones hasta alcanzar la totalidad de la presión máxima.



**Figura 1.6** Presiones de inyección de lechada recomendado para la presa Las Gordas. Fuente: MWH, 2013.

## 1.10 MONITOREO DE GROUT

El control y seguimiento de los parámetros de la inyección de mortero en tiempo real es esencial, debido a que se durante la inyección los parámetros presión, caudal, y tiempo son visualizados y es posible realizar ajustes en la válvulas de presión y caudal a fin de lograr una inyección óptima. Si la presión aumenta y el caudal disminuye la inyección debe continuar hasta alcanzar la presión de rechazo. Si la presión se mantiene constante y el caudal constante o se incrementa y se llega al volumen máximo establecido, entonces cambiar la mezcla. Se considera taladro inyectado cuando se alcanza la presión de rechazo y se mantiene constante durante 5 minutos con un caudal menor a 1 litro/minuto. La presión de inyección se incrementará de manera uniforme hasta la presión máxima admisible, sólo cuando el caudal es significativo disminuir la presión o mantenerlo constante. La inyección de un tramo o etapa deberá durar mínimo 15 minutos. El aumento brusco de presión no esta permitido.

## CAPÍTULO 2

### CARACTERÍSTICAS DEL RELAVE Y PRESA DE RELAVE

#### 2.1 GENERALIDADES

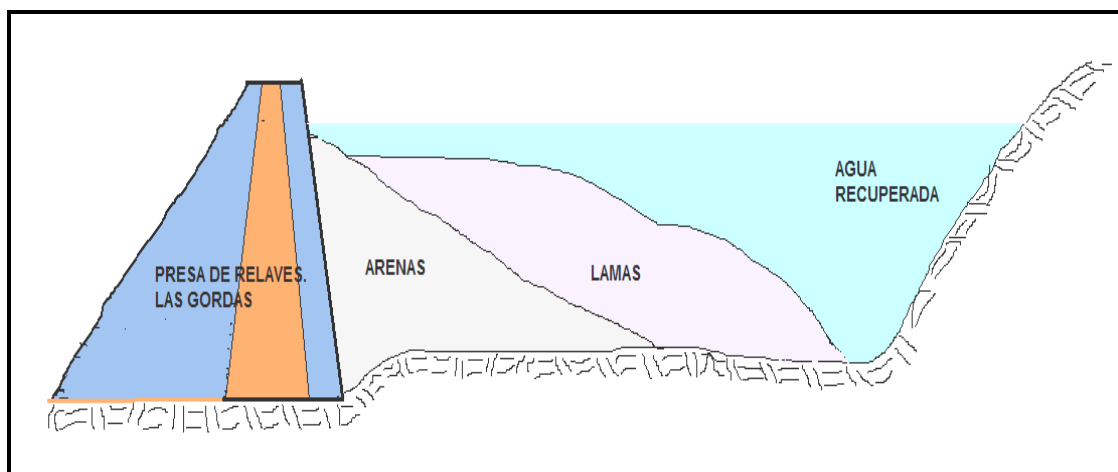
Los relaves son desechos producto de los subprocesos mineros, que usualmente son una mezcla de minerales, arena y agua. El material obtenido de los tajos de explotación sufre un proceso de reducción de tamaños mediante el uso de zarandas, moliendas y remoliendas que luego ingresan a las plantas concentradoras donde se dá origen al producto a comercializar y los relaves que son transportados y almacenados en presas.

Los relaves son una suspensión acuosa de sólidos de tamaño entre arena y limo (lodos o pulpas), que se generan como residuo del procesamiento de minerales, por concentración o lixiviación en tanques, una vez que es extraído el producto de interés.

Los relaves contienen concentraciones de material fino (arena, lamas, etc.) que son almacenados en presas de relave, para luego de un tiempo, los finos por efecto de la gravedad decantan en el fondo y el agua es recuperada y/o evaporada.

La mezcla de arenas y limos provenientes de la obtención del concentrado representan casi el 50% de peso del relave, el tamaño de la arena es mayor a 0.074 mm, las lamas tienden más al tamaño del limo y su tamaño es menor a 0.074 mm.

El objetivo de la presa es el almacenamiento de los relaves utilizando una alternativa tecnológica universalmente aceptada, económicamente viable y que asegure niveles aceptables de riesgos e impactos ambientales. Existen diferentes tipos de presas para contener el relave. Siendo el más común el de un muro de contención hecho con materiales de préstamo o con el mismo relave.



**Figura 2.1** Disposición del material relave (arenas, lamas) y agua recuperada sostenido por la presa hecha con materiales de préstamo (material rocoso y arcilloso).

## 2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RELAVES

Permeabilidad.-Los relaves arenosos poseen una permeabilidad que varían de  $10^{-03}$  a  $10^{-04}$  cm/s, mientras que las lamas fluctúan de  $10^{-04}$  a  $10^{-06}$  cm/s.

Densidad.- 20 kN/m<sup>3</sup>

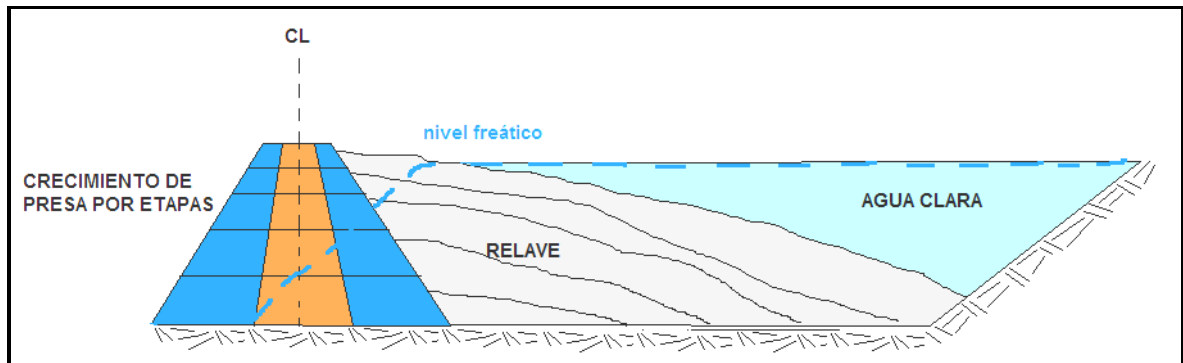
Cohesión.- 0 KPa.

Ángulo de fricción interna.- 34 °.

## 2.3 TIPOS DE CRECIMIENTO DE PRESAS DE RELAVE

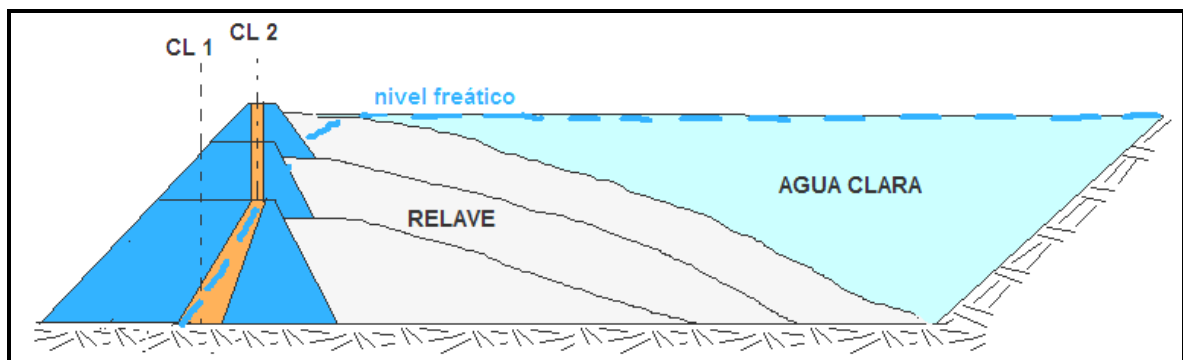
Las presas de relaves pueden clasificarse según el tipo de crecimiento, siendo:

- Crecimiento línea central.-El muro es construido manteniendo un solo eje. La operación se inicia con la construcción del muro con material de préstamo. La laguna de agua clara debe mantenerse alejada del muro para abatir el nivel freático. El relave proviene directamente de la operación minera



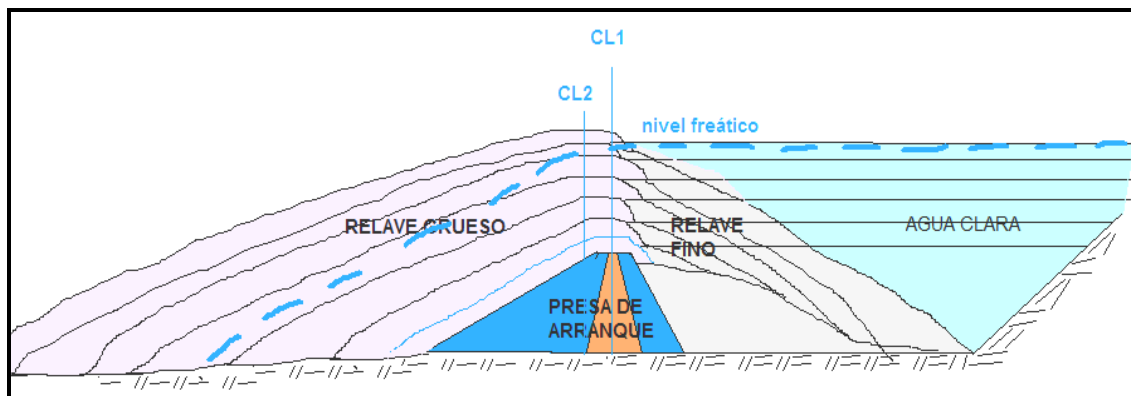
**Figura 2.2** Crecimiento de presa según línea central.

- Crecimiento hacia aguas arriba.-El eje de la corona se traslada hacia aguas arriba conforme se crece por etapas.



**Figura 2.3** Crecimiento de presa según aguas arriba.

- Crecimiento hacia aguas abajo.- Consiste en mover progresivamente según gane altura el eje de la corona hacia aguas abajo. Los relaves arenosos deben ser dispuestos a lo largo del muro hasta formar una playa arenosa adyacente al muro. El relave es segregado en un proceso de cicloneo, lugar donde el relave se segrega en grueso y fino.



**Figura 2.4** Crecimiento hacia aguas abajo.

## 2.4 TIPO DE FALLAS DE PRESAS

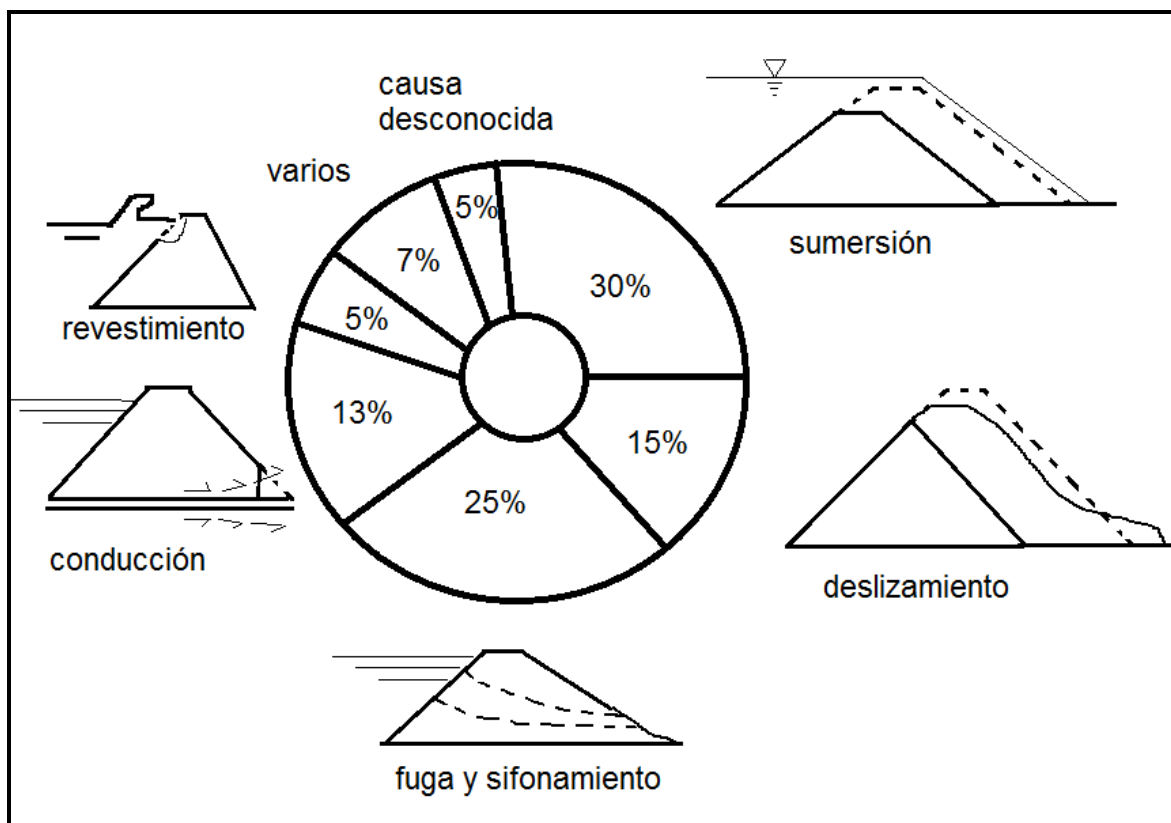
Según Arnaldo Carrillo<sup>1</sup>, “las presas son generalmente las más peligrosas estructuras de la ingeniería, más aún las presas de relaves. Casi todas las fallas pueden ser prevenidas con un buen diseño, una construcción controlada y un mantenimiento constante que son pasos requeridos en todos los trabajos exitosos de la ingeniería”.

Según M. De la Torre<sup>2</sup>, se tiene la siguiente estadística de colapso de presas de tierra.

---

<sup>1</sup> Master en ciencias de la ingeniería (UNAM-México).

<sup>2</sup> Ing. Miguel De la Torre Sobrevilla (UNI-Perú).



**Figura 2.5** Estadística de colapsos de presas de tierra. Fuente: Miguel De la Torre, UNI, 2002.

## 2.5 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS EN LA PRESA PARA RELAVE

La construcción de una presa para almacenar relaves constituye uno de los proyectos de mayor envergadura en la ingeniería civil debido a sus dimensiones, la cantidad en la obtención de materiales de los alrededores, el control y aseguramiento de calidad en el proceso constructivo, el tiempo de ejecución (años), además de un presupuesto alto.

Los materiales empleados constituyen uno de los mayores retos debido a la cantidad de metros cúbicos necesarios, básicamente la obtención de material rocoso para la construcción del cuerpo de la presa que constituye la estructura propiamente dicha, luego material arcilloso para el núcleo impermeable y el procesamiento de gravas y arenas para conformar filtros y drenes.



---

Otro aspecto es la preparación de la fundación de la presa, la cual debe realizarse sobre lecho rocoso, limpio de impurezas o material suelto. El lecho rocoso debe ser inyectado con mortero de cemento a fin de mejorar la impermeabilización sellando fisuras o agrietamientos logrando que las filtraciones realicen un recorrido hacia cotas menores.

La inyección de mortero en la fundación constituye una técnica en la que los ingenieros civiles y geólogos aplican su experiencia y conocimientos a fin de identificar donde se registrará mayores absorciones sin fracturar el lecho rocoso y lograr que el mortero de cemento llegue a llenar la mayor cantidad de vacíos.

Luego, de tener la fundación lista y materiales acopiados, se inician la conformación de capas siguiendo con los buenos procesos constructivos.

Inicialmente, el área de planeamiento del proyecto establece los costos, tiempo y recursos esto es, zona para la conformación del lecho rocoso o espaldón, núcleo impermeable, filtros y drenes.

El material arcilloso, se conforma con una motoniveladora la cual mezcla y bate el material convenientemente en capas de 20 ó 30 centímetros dependiendo del rodillo compactador (19 ó 26 toneladas), generalmente el rodillo es del tipo pata de cabra. La humedad de la arcilla debe estar es su punto óptimo para que luego de 8 a 10 ciclos pasadas de rodillo se logre la mayor densidad y alcance un porcentaje de compactación mayor al 95% respecto del Proctor estándar. Las capas van conformándose una sobre otra hasta lograr pasar la prueba de permeabilidad, esta última prueba constituye la de mayor importancia ya que es la que define propiamente la impermeabilidad de la presa ( $k < 10^{-07} \text{ cm/s}$ ). El material arcilloso debe cumplir las características plásticas y granulométricas, generalmente con un Índice de plasticidad mayor a 10% y un pasante de la malla #200 mayor al 15 ó 20%.

El material rocoso debe cumplir con algunas características granulométricas como un tamaño máximo de 90 centímetros, un D50 mínimo de 7.5 cm y es básico de que el material fino pasante de la malla #4 sea del tipo arenoso evitando la presencia de un fino plástico ya que, el material rocoso también debe cumplir una permeabilidad mínima ( $k > 10^{-2} \text{ cm/s}$ ). Las canteras de material rocoso producen cantidades adecuadas siempre que

los procesos de voladura vayan de acuerdo a los requerimientos establecidos. El material rocoso debe ser proveniente de roca de origen intrusivo, esto es, de una roca dura, fuerte, del tipo I, II ó III, no es recomendable la roca sedimentaria. Las capas de material rocoso son de 1 metro de altura compactados con rodillos lisos de 19 toneladas, es recomendable que antes de la compactación la capa reciba agua para lubricar la roca y lograr una mayor densidad.

Los filtros y drenes poseen una granulometría más exigente, esto es un tamaño máximo de 3/4", 1" ó 1/2", un pasante de la malla #100 de 3 ó 4% , libre de material plástico y limpio. Generalmente este tipo de material se obtiene mediando el uso de zarandeo a gran escala, es probable que grandes volúmenes de producción sean rechazados antes de que se lleven a la presa. Las capas de filtros y drenes pueden ser conformadas en capas de hasta 50 cm de altura, generalmente estas capas con compactadas controlando una densidad relativa de 75% como mínimo.

El relave vertido en el embalse sedimentará y al cabo de unos meses consolidará formando una playa sobre la que la presa crecerá mediante el método aguas arriba.



**Figura 2.6** Crecimiento del embalse de la Presa Las Gordas. Fuente: MWH 2013.

---

## CAPÍTULO III

### ASPECTOS DEL MÉTODO DE PERFORACIÓN-INYECCIÓN

#### 3.1 GENERALIDADES

En el mercado actual existen diferentes tipos de perforaciones de pozos así como también técnicas reconocidas en la inyección. Básicamente, las perforaciones constituyen su mayor experiencia en los taladros de prospección geológica, perforaciones petroleras y geotécnicas, cada una de las cuales tienen una amplia gama de maquinaria disponible específica.

Actualmente, las técnicas de inyección reconocidas la constituyen el jet grouting y la Inyección tradicional. La diferencia radica en que el jet grouting es utilizado para la inyección en suelos granulares mejorando su capacidad portante, mientras que la inyección tradicional básicamente busca llenar los vacíos en fisuras o fallas existentes en el lecho rocoso para lograr una mayor impermeabilización y/o solidificación. Las perforaciones geotécnicas para la inyección de mortero generalmente poseen un diámetro de 10 cm con profundidades que varían de 10 hasta los 50 metros según como se haya considerado la cortina de inyección.

#### 3.2 ETAPAS PARA PERFORACIÓN E INYECCIÓN DEL LECHO ROCOSO

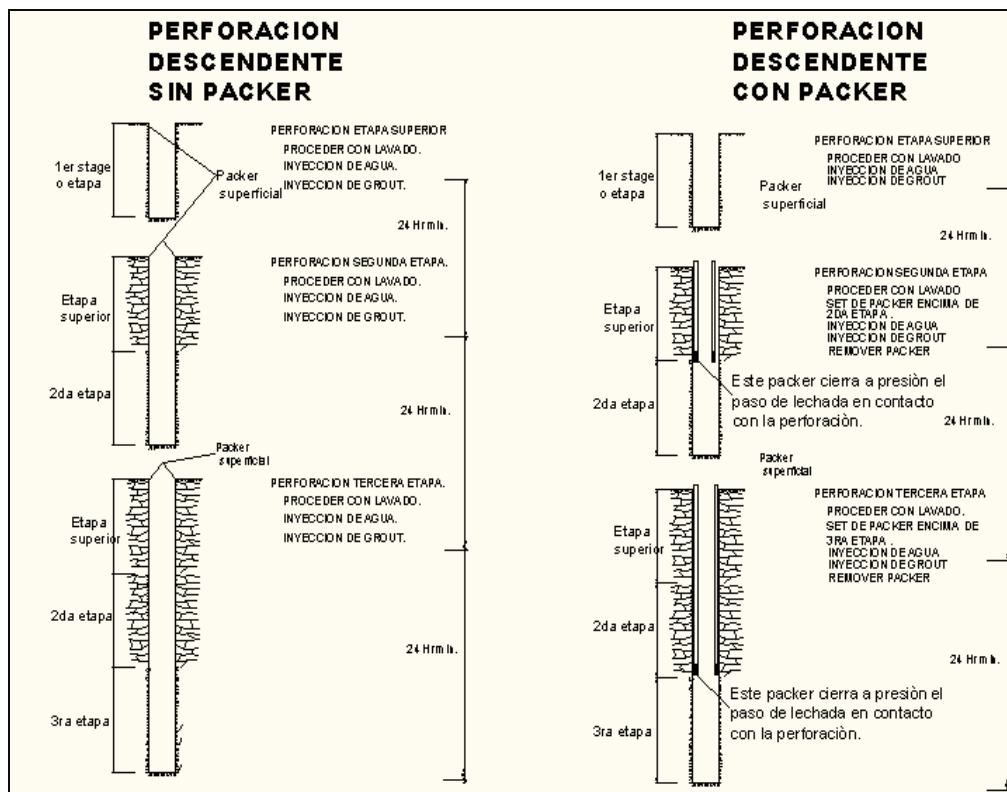
##### 3.2.1 Perforación

La controversia sobre el método adecuado de perforación se ha mantenido durante varios años. La cuestión fundamental es la selección del método económico de perforación. Se tiene perforación por percusión, perforación rotatoria, y perforación con diamante rotatorio. La perforación por percusión puede ser un tercio del costo de perforación con diamantes, motivo por el cual la mayoría de proyectos utiliza la perforación por percusión. Sin embargo, es necesario tener precaución- En primer lugar, la perforación de percusión de los agujeros de lechada debe utilizar siempre perforación húmeda, y el corte debe estar bien lavado finalizado la perforación-en segundo lugar, los sitios deben ser probados para determinar que los lavados sean de manera efectiva. Justamente las perforadoras track drill vienen equipadas para disminuir este inconveniente utilizando agua a presión que elimina los detritos o sedimento producto de la perforación.

Estos pueden ser:

- Downstage con packer.
- Downstage sin packer.
- Upstage.
- Circuito de grouting downstage.

Estos problemas del uso del packer se aplican también al método downstage. Sin duda es más barato. En lugares propensos a movimiento de rocas, la lechada es capaz de desplazarse por cotas superiores al packer. Tan pronto como la inyección de una etapa ha culminado en la medida que se disipa la presión, el packer se levanta a la siguiente etapa y comienza otra vez la inyección. Circuito de inyección es difícil, propenso a los bloqueos y muy caro, sólo justifica su uso en forma consistente según la espeleología existente.

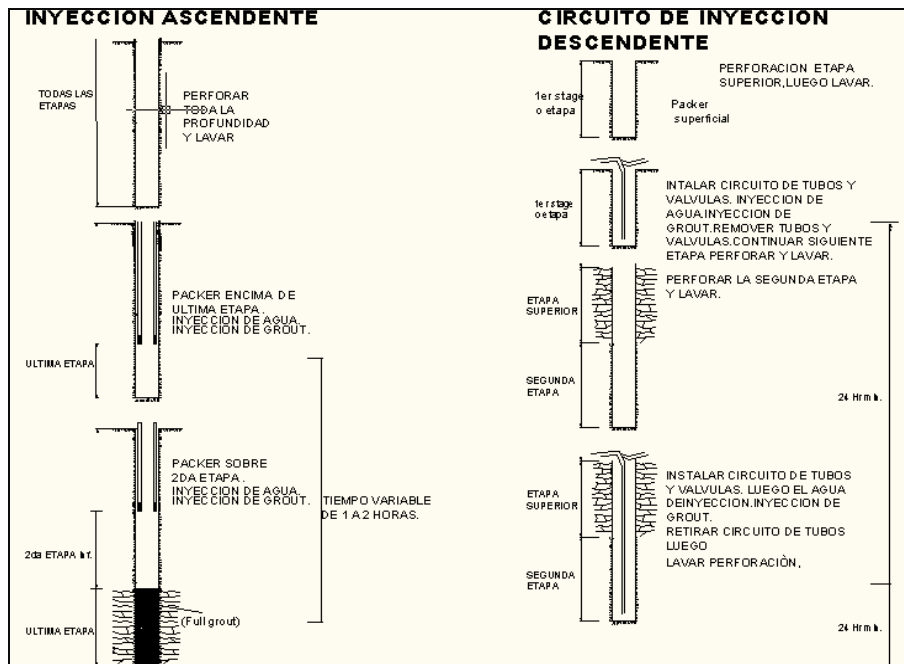


**Figura 3.1** Etapas de perforación e inyección. Perforación descendente. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

En la figura 3.1, se aprecia los métodos de perforación descendente con o sin packer, en el primer caso se inicia con la perforación por tramos o etapas, se lava la perforación y luego se procede con la inyección, se espera a que la inyección de lechada fragüe durante 24 horas, luego se reinicia la perforación del taladro hasta la siguiente etapa para su inyección. El uso de packer es común para sellar la abertura correspondiente.

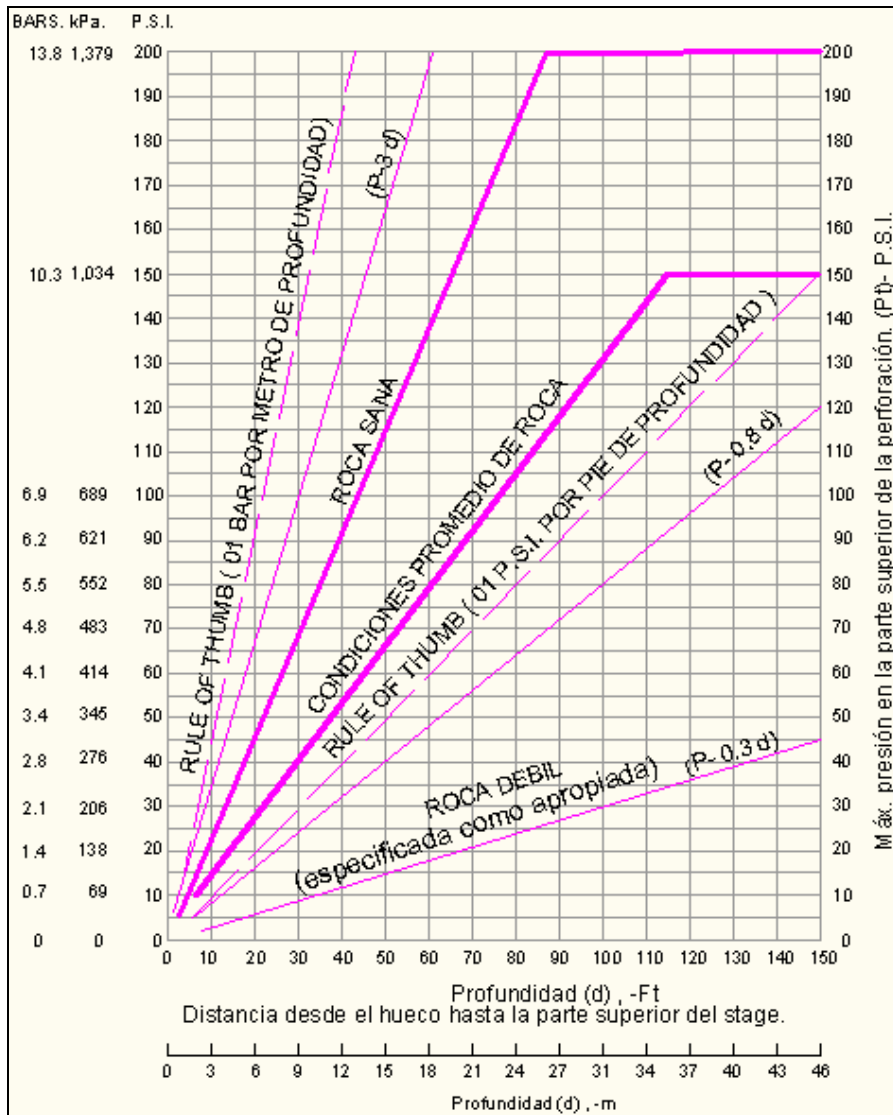


**Figura 3. 2** Etapas de perforación e inyección. Perforación ascendente y circuito de inyección descendente. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

En la Figura 3.2, el método de inyección ascendente consiste en perforar toda la profundidad del taladro, e inyectar desde la última etapa, luego del fraguado (de 1 a 2 horas) se continúa la inyección de etapas superiores.

### 3.2.2 Presiones para la inyección

Las presiones de rechazo se incrementan conforme se profundizan las cotas de las etapas de inyección. Durante la penetración de la inyección, los incrementos están condicionados a la resistencia que ofrece la roca en razón del peso inherente.



**Figura 3. 3** Presiones para inyección según el tipo de roca y profundidad. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

“Rule of thumb”, en español significa “Regla de oro”, consiste en un criterio o principio de amplia aplicación que no es necesariamente preciso ni fiable en toda situación. En la Figura 3.3 se muestran distintos criterios a utilizar según unidades inglesas o americanas.

La Figura 3.3 muestra los gráficos para determinar la presión que se debe tener según el tipo de roca y profundidad referente hasta un límite máximo de 150 psi (10 bar) que se

---

aplica en condiciones normales debido a la necesidad única de superar la presión en la cimentación.

Una buena práctica durante la inyección es conseguir las presiones de rechazo lentamente, es decir, en el uso de una presión baja provisional durante los primeros 15 minutos y observar que no haya fugas, conexiones, movimiento de las rocas, etc. es fácil tomar las medidas correctivas a que si la presión total se usa directamente donde se puede crear una situación fuera de control. El principio es conseguir la lechada más gruesa posible alcanzando los límites de penetración, mientras el mortero todavía es capaz de desplazarse libremente y transmitir la presión efectiva. El tiempo disponible para esta parte de las inyecciones varía entre media hora (en una inyección sin problemas en grietas finas) a tres horas (en grietas gruesas). Esto se amplía cuando se trata de fugas, conexiones o movimientos de rocas, alcanzando la presión de rechazo a unas 4 horas de su comienzo.

### **3.2.3 Monitoreo de grout**

El control y seguimiento de los parámetros del grouting en tiempo real es esencial, debido a que durante la inyección los parámetros presión, caudal, y tiempo son visualizados y es posible realizar ajustes en la válvulas de presión y caudal a fin de lograr una inyección óptima.

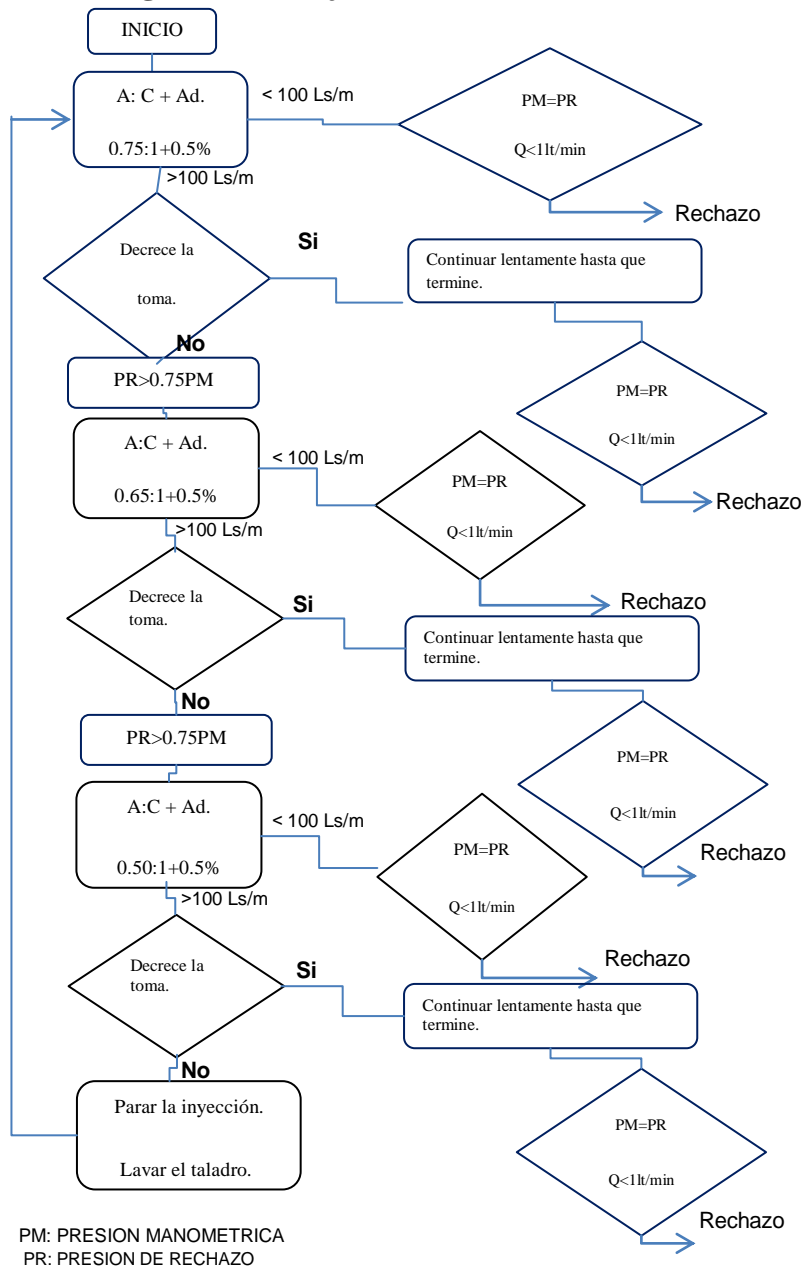
Si la presión aumenta y el caudal disminuye la inyección debe continuar hasta alcanzar la presión de rechazo.

Si la presión se mantiene constante y el caudal constante o se incrementa y se llega al volumen máximo establecido, entonces cambiar la mezcla.

Se considera taladro inyectado cuando se alcanza la presión de rechazo y se mantiene constante durante 5 minutos con un caudal menor a 1 litro/minuto.

La presión de inyección se incrementará de manera uniforme hasta la presión máxima admisible, sólo cuando el caudal es significativo disminuir la presión o mantenerlo constante. El aumento brusco de presión no está permitido. La inyección de un tramo o etapa deberá durar mínimo 15 minutos.

### 3.2.4 Diagrama de flujo



Según E. Ampuero (2013), se resume las etapas durante la inyección de lechada.



---

Asimismo, E. Ampuero<sup>1</sup> (2014) refiere: "En inyecciones para la consolidación del lecho rocoso, el uso de la bentonita no ayuda a mejorar las propiedades mecánicas de la roca, motivo por el cual, el uso de cemento es más generalizado por razones de estabilidad. En caso de utilizarse para inyecciones de impermeabilización, la bentonita se mezcla entre 1 a 4% del peso de cemento y se usa en presiones intermedias que no ocasionen deformaciones en la roca. Generalmente, en el mix con cemento forman mezclas inestables que superan el 10% de decantación o asentamiento, lo cual no es conveniente, lo recomendable es hasta 5% en 02 horas. "

La aguja de Vicat, El tiempo de fraguado de los cementos y morteros es determinado por medio de penetraciones continuas de una aguja en la muestra hidratada; debido a que conforme crece la consistencia se reduce la profundidad.

### **3.3 MOVIMIENTOS DE LA SUPERFICIE**

Un problema en las inyecciones son los desplazamientos debido a la lechada bajo presión. Estos movimientos en su mayoría son en forma de tablas individuales desviando un poco lejos la roca adyacente por donde la lechada escapa con bastante libertad. El tamaño de las placas en movimiento puede variar desde decenas de centímetros a cuestión de milímetros, dependiendo de la geología y el grado de anclaje natural de las losas.

Es complicado cuando la roca está tectónicamente esforzada. Cuando esto sucede, las tensiones residuales en la roca que se encuentran temporalmente en equilibrio, desequilibrado por la presión de la lechada, ésta tiende a desplazarse. De producirse esto, los procedimientos de inyección debieran ser modificados a partir de los normalmente utilizados, esto es, producir un trabajo efectivo de inyección sin generar movimientos

---

<sup>1</sup> Ingeniero de inyecciones MWH.

---

persistentes en la roca y sin necesidad de utilizar cantidades excesivas de cemento. Un principio básico es determinar la cantidad de energía necesaria transmitida a través de las grietas en la lechada. Esta energía es ligera en función de la velocidad de inyección y la presión. Lo mejor es limitar el volumen de lechada que se inyecta, es decir, llenar los vacíos inicialmente abiertos, evitando pérdidas por fugas.

### **3.4 CONTROL DE CALIDAD**

Las variaciones en las propiedades de la lechada se derivan de tres causas principales: a) Insuficiencia de las variaciones de la mezcla, b) en materiales de lechada cantidad y calidad, y c) las variaciones aparentes derivados del procedimiento de prueba. Con el fin de obtener una base satisfactoria para el diseño de mezcla de lechada es esencial que los métodos de almacenamiento, dosificación, mezclado y ensayo de materiales deban ser rígidamente especificados.

La mezcla de lechada de cemento lleva a una secuencia de reacciones exotérmicas en cuatro etapas distintas: a) iniciales de reacción altamente exotérmicas de 5 a 10 minutos de duración, b) un período de latencia de hasta 2 horas con baja tasa de desprendimiento de calor, c) un aumento de velocidad de reacción que conduce a la serie final después de 6 horas o más, y d) una tasa de continuar la disminución de la reacción después del fraguado. La precisión de la medición de las propiedades de la lechada es también un factor importante para determinar la variabilidad de las propiedades de la lechada en el campo.

Esto corresponde a ensayos de sedimentación mediante el uso de probetas graduadas obteniendo mediciones luego de un tiempo determinado. Fluidez de lechada en términos de viscosidad plástica.

Los controles complementarios de a:c se puede hacer en el sitio mediante la medición gravedad específica de la lechada, utilizando una balanza de lodo Baroid. En la mayoría de las lechadas la concentración de iones hidrógeno puede reflejar la contaminación química, por lo tanto el pH es otro parámetro útil para monitorizar. Para ajustar el aparato de Vicat es necesario para determinar la densidad de la mezcla y para el desarrollo de resistencia a la compresión es característico el uso de cubos de 150 mm o 75 mm, el primero siempre da una mayor resistencia inicial (1-7 días).

### **Consideraciones finales**

Los diseños finales deben ser confirmados, y adaptarse cuando sea necesario a través de la prueba. Variaciones en los materiales y las condiciones de prueba pueden aceptarse dentro de un coeficiente de variación del 10%. Es recomendable:

- a) Obtención de cemento y aditivos de una fuente confiable.
- b) Almacenamiento de cemento bajo condiciones secas.
- c) Control preciso del contenido de humedad de materiales de relleno.
- d) El uso de cemento fresco.
- e) Pesar la dosificación de los materiales.
- f) Control de relación agua / cemento.
- g) Tasa adecuada y el tiempo de la mezcla.

---

## CAPÍTULO IV

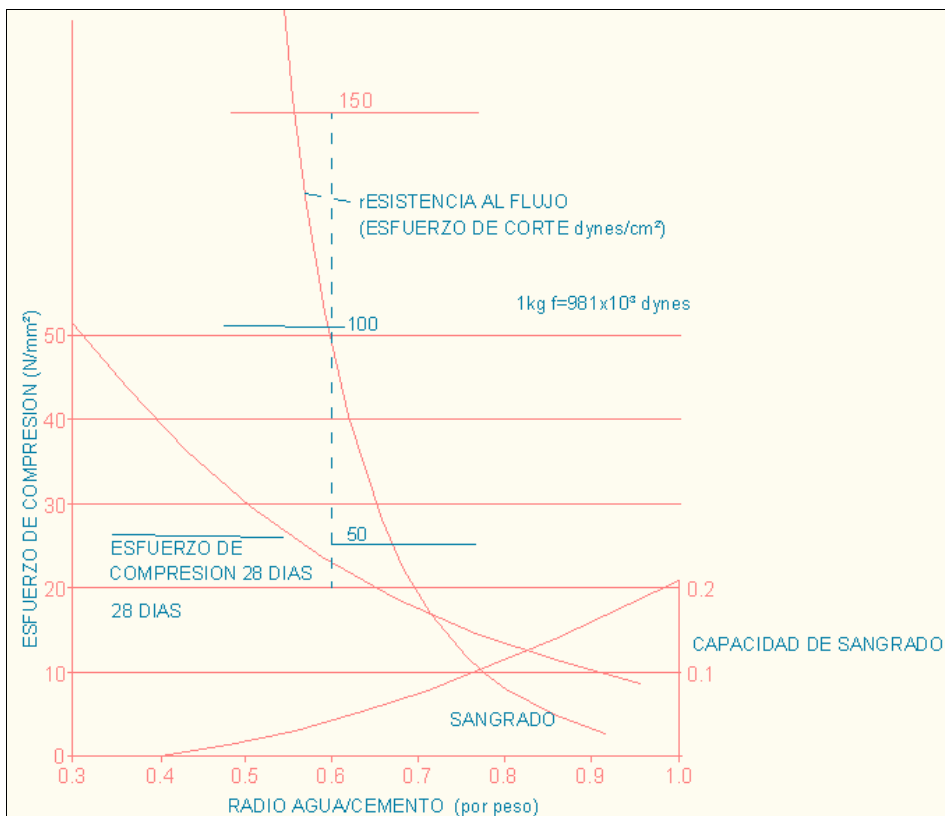
### CARACTERÍSTICAS DE LA INYECCIÓN DE MORTERO DE CEMENTO

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

El mortero de inyección se constituye a partir de una mezcla de cemento, agua y aditivo, la cual es inyectada a una determinada presión por las fisuras del lecho rocoso. Inicialmente, el mortero de cemento atraviesa un proceso de agitación mostrándose como una suspensión inestable, luego de que la inyección llena los vacíos se inicia la sedimentación logrando la consolidación y/o impermeabilización de la fundación de presa.

El mortero de cemento debe ser lo suficientemente fluida para permitir una eficiente inyección, y estable para resistir el desplazamiento y la erosión después de la inyección. Cuando el mortero de cemento se utiliza para impermeabilizar zonas de roca fracturada o fisurada, la fluidez, tamaño de partícula y la exudación son importantes, en tanto que para la consolidación con mortero, la contracción, el calor de hidratación y la fuerza pueden ser los parámetros más dominantes en el diseño. El mortero o lechada de cemento se forman básicamente de cemento Portland (Tipo I) y agua, ocasionalmente otros cementos se utilizan para obtener alta resistencia temprana (Tipo III), bajo calor de reacción (Tipo IV) o la resistencia al ataque químico (Tipo V). Otros materiales sólidos tales como arena fina, cenizas o arcilla se añaden para la economía o para obtener características especiales de lechada. Adicionalmente, el uso de aditivos como agentes fluidificantes, anti exudación, aceleradores, retardadores y agentes de expansión, también pueden ser incorporados.

La variable principal que afecta a las propiedades de las lechadas de cemento es la relación agua/cemento, la cantidad de agua para determinar la tasa de exudación, la plasticidad y la posterior resistencia a la rotura de la lechada. La fluidez, depende también de la relación a/c. El exceso de agua provoca exudación, baja resistencia, contracción y una mayor duración en la inyección. Ver Figura 4.1



**Figura 4. 1** Efecto del contenido de agua sobre las propiedades de la lechada. Fuente: Inyección de suelos Ischy, 1968.

## 4.2 DIFERENTES CLASES DE MATERIALES INYECTABLES

Las mezclas utilizadas en inyecciones, tanto para impermeabilización como para consolidación, se clasifican en tres categorías:

- Líquidas.
- Suspensiones inestables.
- Suspensiones estables.

Las líquidas son constituidas por productos químicos, pueden ser silicato de sodio, mezclado con reactivo, resinas sintéticas o productos hidrocarbonados puros.

---

Las suspensiones inestables son simples suspensiones en el agua, de cemento o arena. No son homogéneas más en el caso que se les agite. Cuando cesa la agitación, comienza la sedimentación.

Las suspensiones estables son obtenidas, por ejemplo, diluyendo arcilla en el agua o una combinación cualquiera de arcilla-cemento y arena. La estabilidad de esta mezcla es relativa, se considera suficientemente satisfactoria si no presenta ninguna sedimentación en el transcurso de la inyección.

Las distintas clases de mezclas pueden ser utilizadas tanto para una impermeabilización como para una consolidación.

Tengamos presente que las inyecciones líquidas y las suspensiones inestables son conocidas y utilizadas desde hace mucho tiempo, las suspensiones estables aparecieron en el año 1935, fueron puestas a punto para inyectar aluviones a menos costo que con las líquidas.

#### 4.2.1 Materiales en la lechada

AGUA, como una regla general el agua que es adecuada para beber, es adecuado para la elaboración de lechada de cemento. El agua por otra parte que contiene sulfato (0,1%), cloruro (0,5%), azúcares, materia en suspensión, tales como algas, o de contenido alcalino alto es técnicamente peligrosa, particularmente para aplicaciones de alta resistencia.

CEMENTO, la forma más común de cemento hidráulico se compone de los siguientes compuestos:

Silicato tricálcico ( $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) -  $\text{C}_3\text{S}$

Silicato dicálcico ( $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) -  $\text{C}_2\text{S}$

Aluminato tricálcico ( $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) -  $\text{C}_3\text{A}$

Aluminoferrita tricálcica ( $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) -  $\text{C}_4\text{AF}$

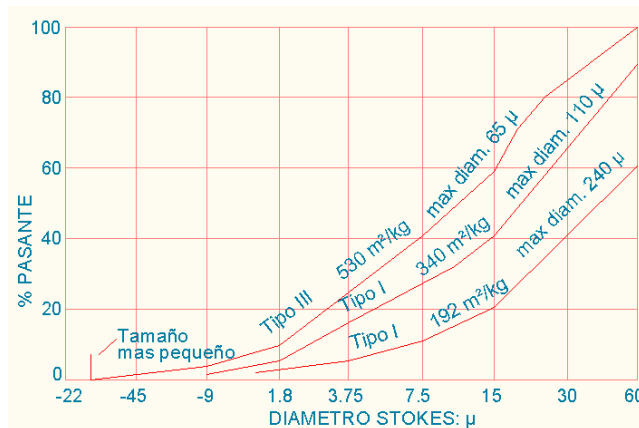
El yeso también se incluye para ralentizar (hacer más lento un actividad o proceso) el conjunto. Oxido de Magnesio, Silicio están presentes en cantidades menores.

Los principales compuestos se comportan de manera muy diferente y sus proporciones relativas dictan sus propiedades (Tabla 4.1).  $\text{C}_3\text{A}$  proporciona calor de hidratación y desarrolla algo de fuerza en un día, pero no hay aumento después.  $\text{C}_4\text{AF}$  establece en

cuestión de minutos un poco de desarrollo de la fuerza, con menos calor de hidratación.  $C_3S$  establece en unas pocas horas y alcanza una fuerza casi completa en 7 días. Por el contrario,  $C_2S$  establece muy lentamente bajo calor de hidratación, pero en última instancia, alcanza la fuerza de  $C_3S$ .

	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	Otros
Normal (ASTM-I)	45	27	11	10	7
Alta resistencia temprana (ASTM-III)	55	17	11	9	8
Baja temperatura (ASTM-IV)	30	46	5	3	6
Resistencia a sulfatos (ASTM-V)	45	35	4	10	6

**Tabla 4. 1** Porcentaje de componentes de cemento. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.



**Figura 4. 2** Dimensión de partícula de cemento. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

Para la mayoría de los cementos el tamaño máximo oscila entre 44-100  $\mu$  (Figura 4.2) y estos tamaños de partícula de penetración limitan las lechadas de cemento para suelos con una permeabilidad menor de  $5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ , ó fisuras en roca de una anchura inferior a 160 $\mu$ .

ARCILLAS, con su capacidad para absorber agua y capacidad de formar estructuras de gel incluso a bajas concentraciones, así como su tamaño de partícula pequeño se utiliza para estabilizar el cemento. No realiza ninguna función importante en el conjunto químico final resultante de la hidratación del cemento, pero el desarrollo de la fuerza es lento y no hay tiempo de fraguado bien definido.

ARENAS FINAS, se pueden añadir a la dosificación de cemento / agua para formar suspensiones de una lechada económica en particular con un alto contenido de sólidos. La arena es elegida según su durabilidad, contracción, y la reacción álcali, y en general roca dura triturada. Se prefieren arenas uniformemente gradadas (5 mm hacia abajo a 75 $\mu$ ), pero para largas distancias de bombeo en exceso de 300 metros, el tamaño máximo ideal debe ser reducido a 0,5 mm y la máxima relación arena / cemento se limita a 3 para mantener las partículas en suspensión y evitar segregación.

Los aditivos se pueden añadir en cantidades relativamente pequeñas para modificar las propiedades de la lechada (Tabla 4.2). La mayoría de las mezclas comerciales son compatibles con cemento portland tipo I y III. En general, su idoneidad deberá ser verificada por mezclas de prueba.

Aditivo	Componente	"Óptimo dosaje (% peso cemento)"	Comentarios
Acelerante	Cloruro de Calcio	1-2	"Acelera fraguado y endurecimiento"
	Silicato de Sodio	0.5-3	Acelera fraguado
	Aluminato sódico		
Retardante	Lignosulfonato de calcio	0.2-0.5	"También funciona como fluidificante"
	Acido tartárico	0.1-0.5	
	Azucar	0.1-0.5	
Fluidificante	Lignosulfonato de calcio	0.2-0.3	
	Detergente	0.05	
Incorporador	Resina Vinsol	0.1-0.2	Sube a 10% aire contenido
Expansivo	Polvo de aluminio	0.005-0.02	Incrementa a 15% pre set expansion
	Brine	30-60	Incrementa a 1% post-set expansion
Anti-sangrado	Celulosa de éter	0.2-0.3 (for w<0.7)	Equivalente para 0.5% de mezcla de agua
	Sulfato de aluminio	Up to 20% (for w<5)	Aire arrastrado

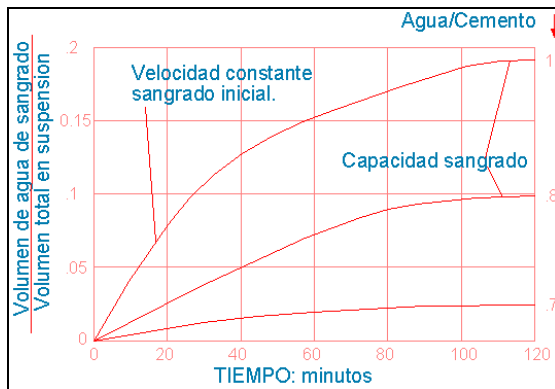
**Tabla 4. 2** Aditivos para variar las propiedades de la lechada. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.



## 4.3 PROPIEDADES DE LA LECHADA DE CEMENTO

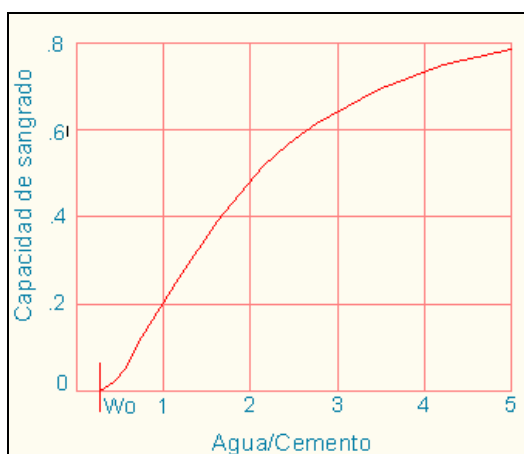
### 4.3.1 Exudación

Durante el mezclado las partículas de cemento se dispersan y se suspenden en agua. Excepto en el caso de una pasta muy densa, la suspensión resultante es inicialmente inestable y las partículas de cemento se asientan por gravedad. Esta liberación de agua es importante en el diseño de la lechada en particular la incidencia y el volumen final de agua. La tasa inicial de la exudación se establece en la Figura 4.3.



**Figura 4. 3** Velocidad de exudación (Tipo I).Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

En las suspensiones menos densas, las partículas se asientan rápidamente.



**Figura 4. 4** Efecto del agua sobre capacidad de sangrado. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

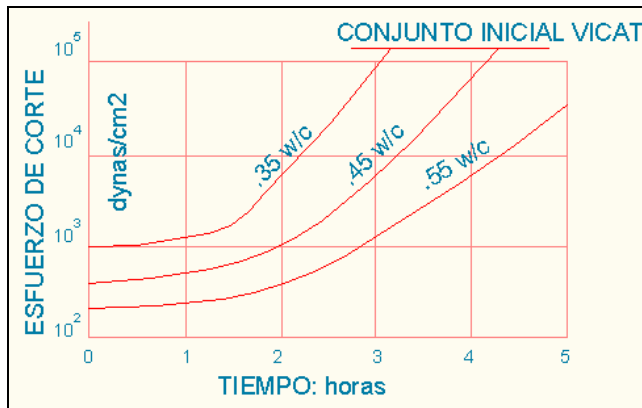
#### 4.3.2 Configuración

El proceso de ajuste tiene dos etapas, una etapa inicial en torno a la fluidez de la disminución de la lechada a un nivel en el que ya no es bombeable y una segunda etapa en la cual se endurece la lechada en su conjunto y aumenta la resistencia. En términos generales las tasas de fraguado y endurecimiento no están relacionadas.

Ish Shalom y Greenburg<sup>1</sup> han indicado un aumento exponencial en cerca de la resistencia al corte y la viscosidad con el tiempo lo cual significa que durante el siguiente período inicial estos aumentos son pequeños y no afectan el bombeo e inyección. Para a/c: 0,35 el período inicial es de 1 hora, para a/c: 0,45 y 0,55 se extiende a 2 y 3 horas. Estos pueden extenderse por agitación continua. El desarrollo de resistencia al corte también se ve afectada por la edad y el tamaño de partícula del cemento, lo que determina la tasa de hidratación.

---

<sup>1</sup>Ish Shalom y Greenburg (1960), científicos en el estudio de la reología e hidratación de cemento.

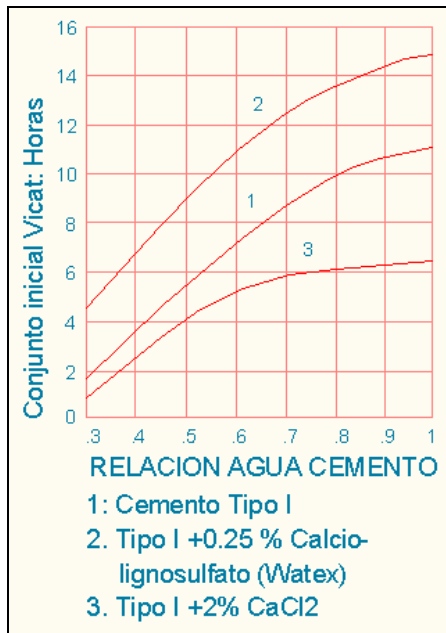


**Figura 4. 5** Incremento de la resistencia al corte según el tiempo. Fuente: Inyección se suelos-Ischy, 1968.

Area de superficie específica (m <sup>2</sup> /Kg)	Vicat inicial (min)
1320	36
797	63
359.4	180
270	315

**Tabla 4. 3** Se muestra como inicial al conjunto Vicat, equivalente a una resistencia al corte de 170.000 dynas/cm<sup>2</sup>, que se acelera por la finura de cemento. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

La tasa de desarrollo de la fuerza de corte pueden más fácilmente ser cambiado por el uso de retardadores o aceleradores (Figura 4.6). En ausencia de cloruro de calcio, los resultados de la prueba reducen el tiempo de fraguado por una cantidad aproximadamente igual a 90 minutos por 1% añadido en peso de cemento, pero es importante asegurarse de que el CaCl<sub>2</sub> se distribuye uniformemente por disolución en el agua.



**Figura 4. 6** Se muestra la relación entre tiempo de fraguado y la proporción de cemento Tipo I. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

Los retardadores se utilizan normalmente para reducir las tasas de ajuste en condiciones de calor y cuando se bombean a largas distancias. El azúcar o ácido tartárico en cantidades de 0,05% en peso de cemento puede aumentar el tiempo de fragua. Se recomienda ensayos de prueba ya que los resultados son variables.

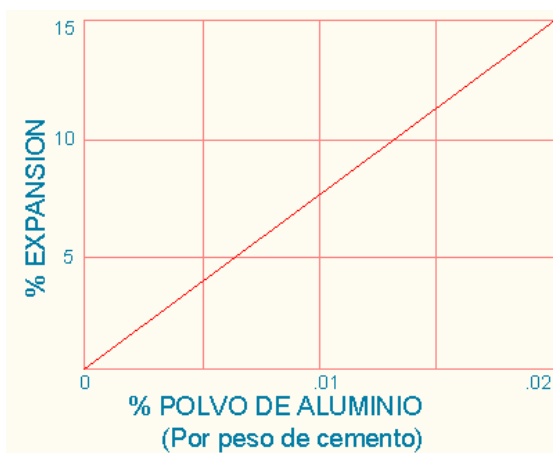
### 4.3.3 Contracción

La contracción de lechada de cemento esta relacionada principalmente con la cantidad de agua eliminada. Así, una lechada húmeda que queda curado a lo largo de su vida, no se encoge y puede de hecho aumentar ligeramente con el tiempo. Por otro lado, una lechada de cemento después de curado húmedo se contraerá (Tabla 4.4). Para lechadas de gran volumen su contracción es conocida.

Tiempo (días)	Contracción (-%)
1	+0.08
2	+0.11
3	+0.11
7	-0.72
8	-0.94
10	-1.30
14	-2.37
17	-3.24
21	-4.19
28	-5.14

**Tabla 4.4** Se muestra la relación entre tiempo de fraguado y porcentaje de contracción.  
 Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

La contracción no es normalmente un problema grave en la ingeniería de suelos en donde el ambiente es a menudo húmedo o sumergido. No obstante, cuando la contracción que conduce a la formación de micro fisuras es probable que afecte la permeabilidad de una lechada de impermeabilización, pasos positivos se puede tomar para contrarrestar la contracción, mediante la introducción de agentes de expansión en la lechada . En la Figura 4.7 se muestra el efecto del polvo de aluminio como agente expansivo.



**Figura 4.7** Expansión de lechada Tipo I. Fuente: Inyección de suelos-Ischy,1968.

---

### 4.3.4 Resistencia

Las variables más importantes que afectan la fuerza de la lechada son relación agua-cemento, porosidad, tiempo de 28 días, el tipo de cemento y la presencia de aditivos.

El parámetro dominante es la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión no confinada puede ser expresada en forma de la Ley de Abrams :

$$UCS = \frac{A}{B^{1.5W}}$$

Donde

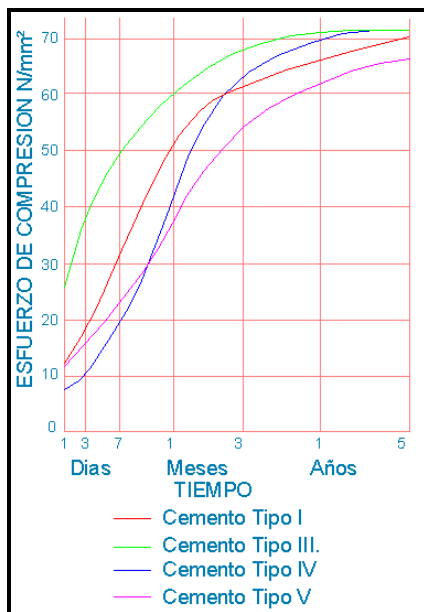
UCS: Resistencia a la compresión no confinada.

A : Esfuerzo cortante de 14000 lb/in<sup>2</sup>.

B : Constante adimensional en función de características del cemento a la edad de la prueba. Para el cemento Tipo I a los 28 días, B: 5.

w : Relación agua/cemento, donde agua y cemento se dan en kilos. Dado que toda su fuerza sólo es generada por la completa hidratación, la Ley de Abrams es mejor limitarse a w > 0,3.

Bajo óptimas condiciones de curado y no sujetos a ataque químico, una lechada continuará su fuerza en aumento durante un período prolongado y, con independencia de su ganancia a corto plazo, la resistencia alcanzará un esfuerzo proporcionado



**Figura 4. 8** Incremento del esfuerzo de la lechada. Fuente: Inyección de suelos-Ischy,1968.

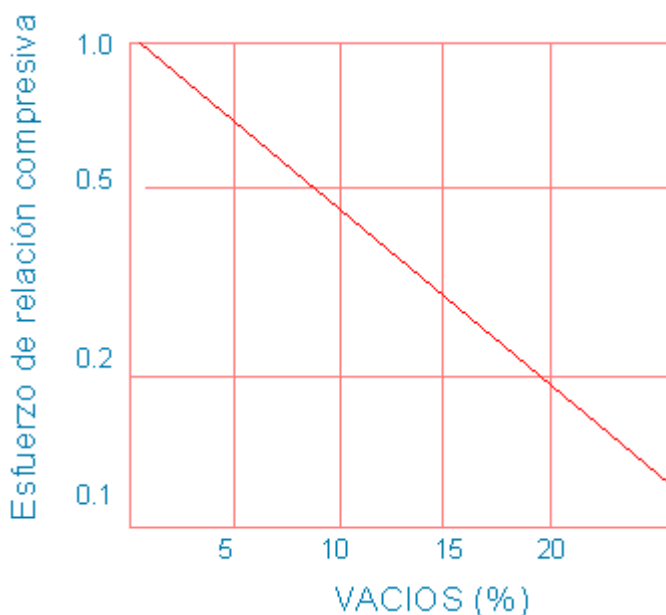
La adición de fluidificantes permite una reducción de  $w$  a una fluidez dada y provoca un aumento proporcional de la fuerza. Para ganancia de resistencia temprana, las pruebas muestran que  $\text{CaCl}_2$  da 30% de aumento de resistencia a las 24 horas cuando se añade un 1% del peso del cemento, aunque la ganancia se reduce a 10% a los 28 días.

### 4.3.5 Porosidad

Una relación entre el volumen de vacíos y la resistencia de los materiales frágiles fué desarrollado originalmente por Feret en la forma:

$$UCS = k \frac{c}{c+e+a}$$

Donde  $k$ : constante y  $c$ ,  $e$ ,  $a$  son los respectivos volúmenes de cemento, agua y aire en la lechada. En una lechada que contiene poco aire, la porosidad se determina por  $w$  (relación agua/cemento), por ejemplo, 6,5% y 3,5% para  $w$  de 0,55 y 0,4 respectivamente. Cuando el aire o el gas se libera en la lechada hay un efecto adicional en la fuerza, por ejemplo, contenido de 10% de aire podría reducir la resistencia hasta un 50%.



**Figura 4. 9** Efecto del % de vacíos sobre la resistencia. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

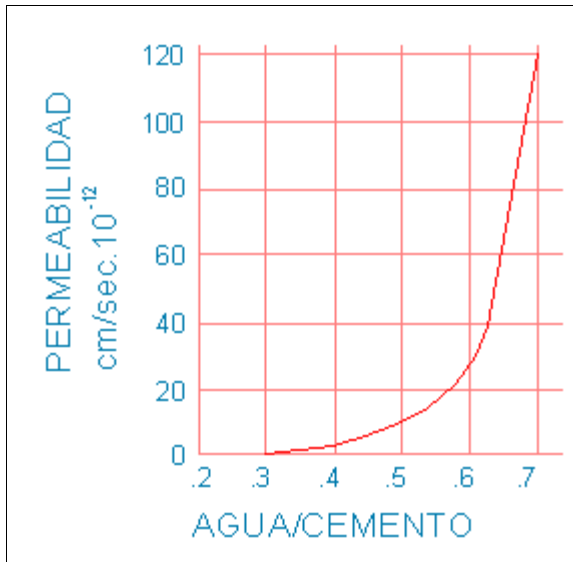
### 4.3.6 Durabilidad

La lechada de cemento son duraderas en las condiciones más normales, pero el deterioro puede ser causado por anomalías en las condiciones ambientales, especialmente cuando hay deficiencias en la calidad de la lechada, baja densidad y alta permeabilidad, por ejemplo. De las condiciones ambientales adversas que conducen a un deterioro de la lechada más comunes son los ataques químicos, especialmente a través de los sulfatos contenidos en el agua subterránea, y las grandes fluctuaciones de temperatura a gran escala.

En una lechada fresca, la permeabilidad está relacionada con la edad de la lechada y el grado de hidratación posterior que determina en última instancia la medida de los poros en la lechada. Si bien no existen directrices sobre el diseño de la lechada para una mayor durabilidad, con un contenido mínimo de cemento, se recomienda proporcionar una



durabilidad aceptable en las condiciones adecuadas de la exposición como en la tecnología del concreto.



**Figura 4. 10** Permeabilidad a los 28 días de lechada de cemento. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

El ataque químico puede ser causado por la presencia de sulfatos disueltos o ácidos en el agua subterránea, o por la exposición prolongada al agua de mar. Dado que los cementos de tipo I tienen una pobre resistencia al ataque químico, esto puede ser aumentado mediante el uso de cementos aluminosos. Cuando las lechadas se someten al ataque de heladas,  $w$  debe ser menor que 0,4 para reducir el espacio de los poros y la permeabilidad capilar de la lechada.

Edad (días)	Coefficiente de Permeabilidad (cm/sec)
Fresco	$2 \times 10^{-4}$
5	$4 \times 10^{-8}$
6	$1 \times 10^{-8}$
8	$4 \times 10^{-9}$
13	$5 \times 10^{-10}$
24	$1 \times 10^{-10}$
Final (estimado)	$6 \times 10^{-11}$

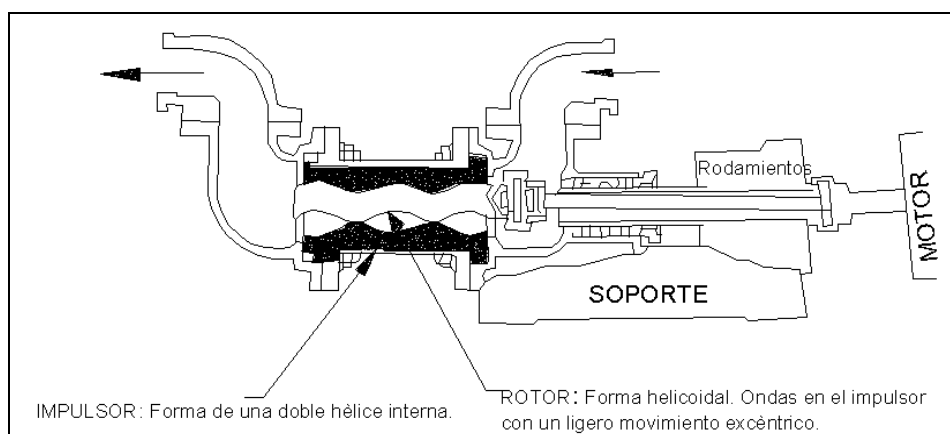
**Tabla 4. 5** Coeficiente de permeabilidad para la lechada de cemento Tipo I ( $w=0.7$ ).  
Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

#### 4.4 EQUIPO DE INYECCIÓN

El desarrollo del equipo de inyección progresa desde equipos de fabricación improvisada hasta altamente desarrollados.

Los equipos básicos son:

- a) Mezcladora, para mezclar los ingredientes del mortero. Un eje simple hace rotar el tambor o tanque. La rotación es vertical y también horizontal. La velocidad de rotación usualmente es más baja que 100 r.p.m.
- b) Agitador, mantiene la lechada agitada lista para que la bomba succione. Después del mezclado, la lechada es usualmente descargado a un tanque de retención o “agitador” a fin de que la mezcladora quede libre para otra tandada o para evitar el sobrecalentamiento de una mezcla prolongada a alta velocidad. El agitador mantiene la mezcla lista para ser bombeada, tiene 3 ft de alto y 2 ft de diámetro, revolviendo a 100 r.p.m. apróx. Posee un par de brazos agitando, uno de los cuales se extiende por el fondo del tambor agitando la mezcla. Deflectores instalados en el interior del tambor rompen cualquier formación de vórtices.

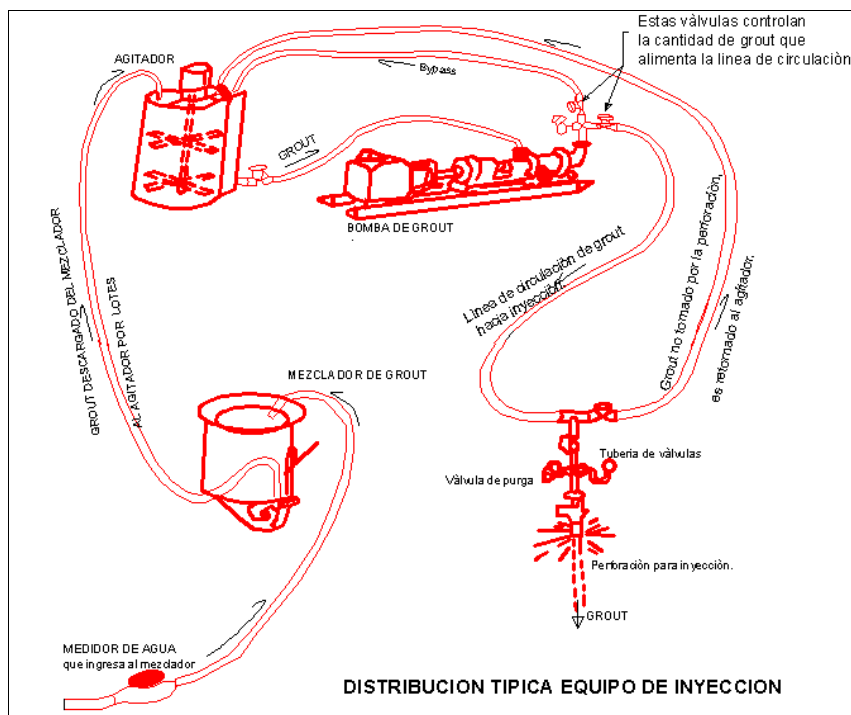


**Figura 4. 11** Bomba tipo Moyno. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

c) Bomba, extrae del agitador y bombea la lechada alrededor de un conducto de circulación. Este equipo ha tenido grandes mejoras desde las bombas de crudo en un principio hecha en base a pistones hasta bombas tipo diafragma. Pero hoy en día, la mayoría de bombas han sido sustituidas por el tipo Moyno, hechas con un rotor helicoidal.

d) Línea de circulación, comienza en la bomba y llega al orificio principal de la perforación. Una línea puente conecta al agitador la lechada que no es utilizada. el desplazamiento de la lechada es relativamente a altas presiones para fisurar rocas o para producir una penetración. Un riesgo permanente es el bloqueo de líneas, esto afecta la calidad de los trabajos y puede causar grandes pérdidas de producción. Una forma de reducir los bloqueos es mantener la lechada moviéndose rápidamente, la no circulación puede ser propenso a bloqueos, para evitar esto es necesario lavar la manguera antes de iniciar el bombeo. Para mantener la presión y velocidad considerable el diámetro interno de la línea no debe ser mayor a 1" (25 mm).

e) Control de ajuste, es un sistema de manómetros y caudalímetro por el cual se controla la velocidad de inyección y presión, controlando además la cantidad de lechada absorbida.



**Figura 4. 12** Equipo de inyección, generalmente todo el sistema de control es automatizado con lecturas de volumen inyectado, caudal, variación de presiones, velocidad de circulación, temperatura del mortero. Fuente: Inyección de suelos-Ischy, 1968.

## 4.5 COMPORTAMIENTO DE LA INYECCIÓN

Una descripción generalizada del comportamiento de la lechada durante la inyección:

1. Al inicio de la inyección, la lechada fresca viaja rápidamente a través de la formación de grietas.
2. Entonces, cuando la mayoría de grietas de fácil acceso han sido rellenados con mortero, la lechada se desacelera y se vuelve lenta. La rigidez y el asentamiento junto con la presión de inyección hacen que la lechada no se transmita hidráulicamente. Aquí la presión, aumenta rápidamente porque la semi-pasta, ofrece una considerable resistencia a la transmisión de la presión. El efecto general es de que la toma se va reduciendo poco a poco, esto porque la aparición de la rigidez se va presentando primero en las fisuras finas seguidamente por las grietas gruesas y así sucesivamente, hasta registrar una absorción

---

nula. Durante el viaje de la lechada en la red de grietas estas van cambiando constantemente de dirección, lo que a veces puede originar explosiones de lechada, que sin embargo, en la perforación de inyección la presión es mantenida constante.

3. Después de esto, el resto de la aplicación se limita a la inyección de cemento fresco en pasajes y vacíos que se han formado con el agua de lechada propia de la inyección.

4. Finalmente, se alcanza la presión de rechazo cuando la lechada ha rellenado todos los vacíos con cemento fresco.

Los límites de la penetración pueden tener forma de espigas conteniendo lechada atrapada en grietas.

La inyección no es apta para rocas superficiales debido a la probabilidad de levantarlas, a menos que la superficie esté cargada de concreto. A una profundidad adecuada, la producción de una superficie de oleaje es mínima por el efecto del buzamiento de grietas en la limitación de la propagación de fracturas horizontales y la ampliación de articulaciones.

La presión de inyección de morteros que se debe tener en cuenta para evitar fracturas indeseadas, es menor a 2 psi por pie, según la profundidad (0.3 bar por metro). A esta presión la lechada saliente escapa por las fisuras en ascenso.

El grado de asentamiento de la lechada de cemento juega un papel importante para que la inyección sea efectiva. Si el cemento asienta rápidamente luego de ingresar al sistema de fisuras, la inyección puede tener problemas. Motivo por el cual, es necesario utilizar aditivos que garanticen un asentamiento prolongado en la lechada (más allá de 2 horas). Estos aditivos deben estar hechos en base proporciones de bentonita y sodio según la cantidad de cemento que ingrese al diseño. Sin embargo, la necesidad de aditivos es controlado con la utilización muy difundida de mezcladores de alta velocidad, en la cual la partícula de cemento es separada y rodeada con una capa de agua. Raramente un aditivo es necesario, pero si se ha pensado en esto, los polímeros son útiles para lubricar la lechada y lograr la absorción en fisuras con aberturas mínimas de 0.3mm.

---

La tixotropía de la perforación juega un rol importante respecto del comportamiento de la lechada, luego de terminar las diferentes etapas de inyección el diluyente tiene un tiempo de asentamiento que se van acumulando en los niveles inferiores de la fisura. Por debajo del punto de fluencia Bingham, la lechada se vuelve lodosa y es incapaz de transmitir presión hidráulica a diferencia de los morteros que se encuentran en movimiento. Se puede aprovechar la rigidez tixotrópica para asegurar que la lechada se mantenga en su lugar después de inyectada la fundación frente a la contrapresión o por donde el agua subterránea este pasando rápidamente a través del sistema de formación de grietas. Con este fin, es necesario mantener la presión de rechazo durante un lapso de 15 minutos. Una aplicación típica toma tiempo de entre 30 minutos a 2 ó 3 horas dependiendo de la toma registrada a fin de mantener o garantizar la presión de rechazo.

Con frecuencia una cantidad excesiva de agua de exudación se acumula en las grietas, a pesar de utilizar una dosificación de lechada a:c = 1:1, esto generalmente se da en el caso de grietas amplias tales como 1/8", para este caso es necesario esperar 1 ó 2 días y después aplicar una segunda inyección a fin de verificar el estado de la cortina. Otro caso típico, es registrar cantidades sorprendentes de lechada, es decir, que grietas de más de 1/4" se extiendan a lo largo de distancias mayores a 15 m, en este caso, la técnica de ir cambiando las dosificaciones es la más recomendable, esto es, ir disminuyendo la cantidad de agua a fin de tener una lechada más gruesa y alcanzar la presión de rechazo.

Una consideración esencial en las operaciones de inyección es una revisión del sistema durante varias veces al día mientras el trabajo esté en progreso. La revisión debe evaluar la necesidad de cambiar los ratios de a:c, las presiones, las técnicas, etc. para mejorar la eficacia de la obra. Sin embargo, más allá de la orientación, la experiencia es muy necesaria para una efectiva revisión.

Para ayudar con estas evaluaciones, una prueba de agua debiera llevarse a cabo con la finalidad de identificar cual sería el posible comportamiento durante la inyección de mortero, identificando: conexiones, grietas, fugas, movimientos rocosos, derrumbes, etc. proponiendo de esta manera un manejo eficiente del ratio a:c. Esta evaluación debe realizarse antes de cada etapa en 3 intervalos de 5 minutos a una presión de 15 psi (1 bar),

---

se debe tener en cuenta que el uso de una mayor presión es peligroso porque puede causar agrietamientos ya que el agua posee gran capacidad de penetración.

Para la finalización de las cortinas de lechada de mortero, surge la pregunta de cuándo dar por concluida la inyección, esto es, después de la finalización de los terciarios, cuaternarios, quaternarios, sextarios? La respuesta puede ser en base a las condiciones de la cimentación y para las diferentes etapas de profundidad.

Debemos tener en cuenta para la inyección de lechada:

**1) Una cortina relativamente estrecha.-** Si la pérdida de agua es cara o la tubificación es necesario evitarla, el criterio de cierre debe basarse en la permeabilidad final del trabajo o debe estar en función del valor Lugeon obtenido en ensayos anteriores.

**2) Entre estos extremos se encuentran la mayor parte del criterio a trabajar.-** Un criterio basado en la permeabilidad o en base a una toma de cemento. Últimamente, un enfoque bastante aceptado es establecer el criterio de cierre en base a la toma de cemento. Los valores típicos son de  $0.25 \text{ ft}^3/\text{m}$  (0.25 litros de cemento/cm) en la etapa superior, 0.33 en la segunda etapa, 0.5 en la tercera y posteriores. Estas cifras y otras similares han sido utilizadas para muchas presas. A menudo el rendimiento de las cortinas ha sido satisfactorio, sin embargo, provoca la idea de que las cortinas pueden ser más permeables de lo esperado. Sin duda el viejo concepto de que la lechada produce una “barrera impermeable” es cuestionable.

#### **4.6 ENSAYO DE PERMEABILIDAD LUGEON**

Los ensayos Lugeon son realizados normalmente en terrenos rocosos consolidados y su base es la medición del volumen inyectable en un tramo de longitud conocida de la perforación y bajo una presión determinada. Los terrenos rocosos son muy poco permeables ante la posibilidad de pérdidas de presión o pérdida de carga. El equipo que se emplea es:

- 
- Bomba de inyección.
  - Doble obturador del hueco de perforación.
  - Manómetro.
  - Medidor de caudal.
  - Cronómetro.

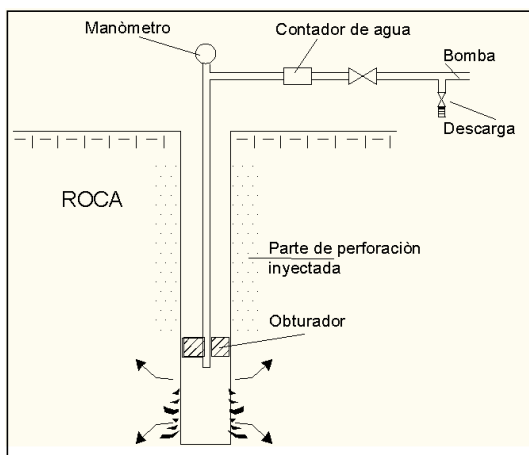
Durante el ensayo se inyecta agua a presión conocida y se anota el volumen introducido en tiempos conocidos. Esta agua se introducirá entre el espacio de la perforación determinado por los obturadores que limitan la capa del terreno en la cual se realiza el ensayo. Normalmente se realizan escalones de presión a 15, 30 y 45 psi, que deben ser mantenidas durante al menos 10 minutos. Los datos del caudal o el volumen de agua introducidos por tiempo, proporcionará información acerca de la permeabilidad del sustrato. De este modo, si los escalones de presión aumentan sin un incremento de caudal significativo, nos encontraremos ante una formación de tipo muy impermeable; cuando el volumen introducido de agua vaya en aumento con la presión significará que éste es menos impermeable.

Habrá que impedir alcanzar la presión de rotura de los materiales durante la realización de estos ensayos, lo que es observable por la bajada repentina de la lectura de presión en el manómetro.

La permeabilidad en estos ensayos será proporcional al caudal introducido por metro de longitud y unidad de presión, de modo que:

$$K = \frac{V}{t \cdot \gamma \cdot P}$$





**Figura 4. 13** Montaje de Lugeon. Fuente: Inyección de suelos-Ischy,1968.

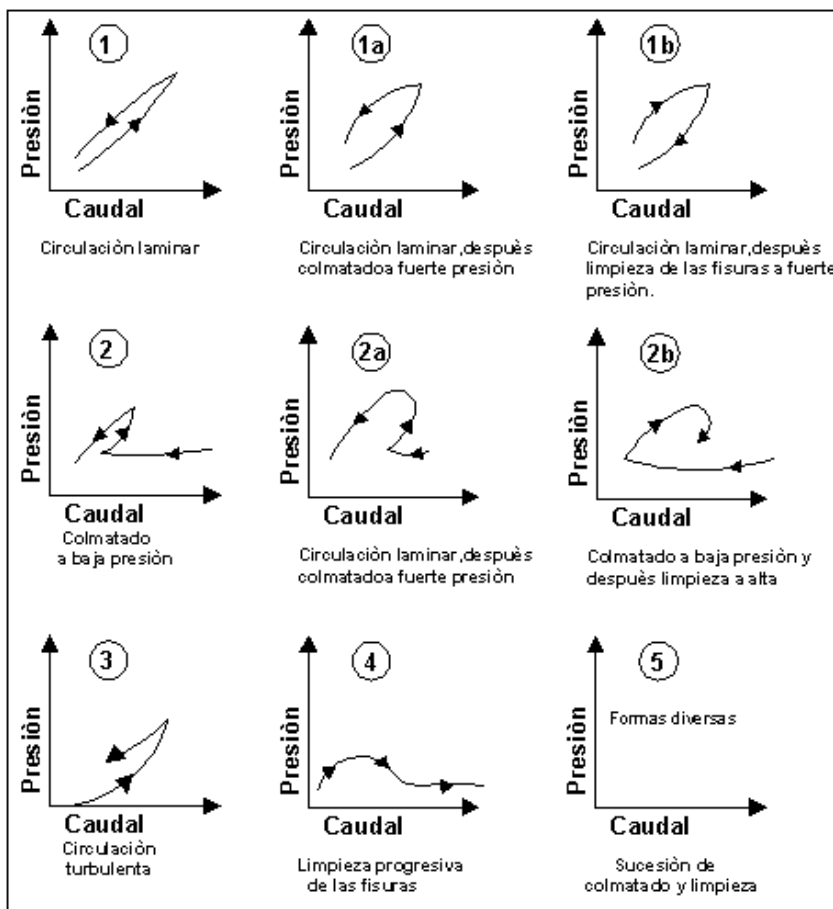
Dónde:  $\gamma$  = longitud de la perforación.

$v$  = volumen de agua inyectado.

$t$  = tiempo.

$P$  = presión.

No hay que olvidar que antes de la ejecución del ensayo, las fisuras cortadas por la perforación están más o menos colmatadas por los sedimentos (Cambefort, 1955). Esto impide efectuar ensayos largos, de 10 m por ejemplo, o deducir las unidades Lugeon de un tramo por diferencia de dos pruebas. Raramente se tienen los mismos resultados según presiones crecientes y decrecientes. En la Figura 4.14, se observa una serie de diagramas obtenidos de estos ensayos. En macizos rocosos, pueden encontrarse otras formas, aun cuando la 1 y la 3 son las más frecuentes. Una corresponde a la circulación laminar y otra a la circulación turbulenta. Podría pensarse que esta diferencia en la circulación del agua proviene de una diferencia en la abertura de las fisuras, correspondiendo la circulación laminar a las fisuras delgadas y la circulación turbulenta a las gruesas.



**Figura 4. 14** Diferentes diagramas de ensayos Lugeon. Fuente: Inyección de suelos Ischy (1968).

Estos ensayos de agua se realizan siempre antes de la inyección de una zona. Ante el gran número de medidas así reunidas, se ha tratado de relacionar el número de unidades Lugeon de una zona con su absorción de cemento. Si pudiera establecerse tal relación simplificaría bastante el reconocimiento, ya que el ensayo de agua indicaría a la vez el estado de fisuración de la roca y la cantidad de cemento necesario para su impermeabilización.

La unidad Lugeon es una unidad de medida para la práctica de inyecciones de mortero, es la permeabilidad mediante el uso de bombas de agua. La definición básica de una unidad Lugeon es la toma de un litro de agua por metro por minuto a una presión de 10 bar, sin embargo, esta presión de 10 bares es alta, también lo es para una rutina de inyección que

---

utiliza presiones más bajas. Una corrección es aplicada para relacionar la baja presión con la definición siguiente:

$$\text{Toma de agua (litros/metro/minuto)} \times \frac{10 \text{ (bares)}}{\text{Actual presión (bares)}} = \text{Valor Lugeon.}$$

Una unidad Lugeon equivale a  $1.3 \times 10^{-5}$  cm/seg o 10 ft/año aproximadamente.

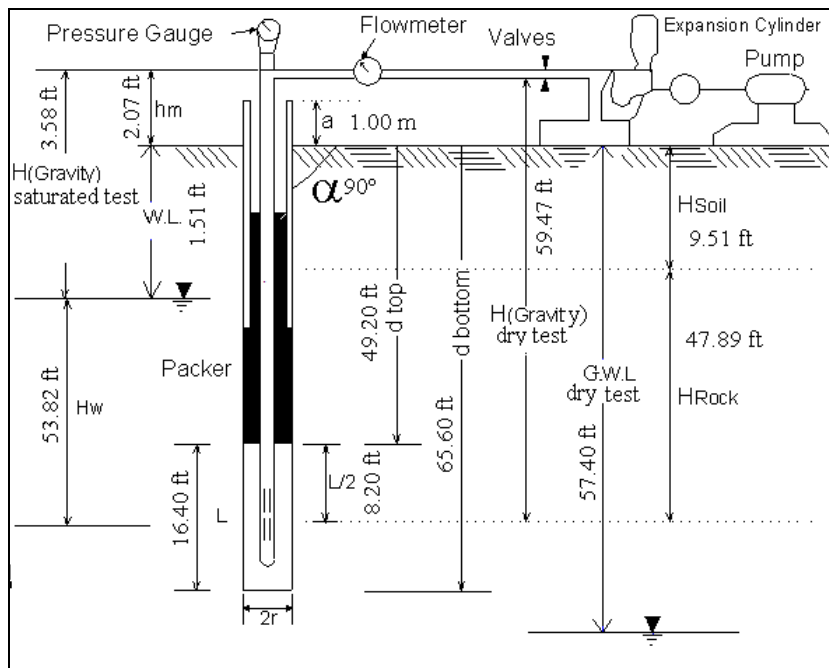
Se tiene la siguiente apreciación acerca del número de Lugeon:

- 1 Lugeon define la permeabilidad existente en la cimentación de la presa para verificar que no es requerimiento proceder con la inyección de mortero.
- 10 Lugeones infiere que es necesario proceder con la inyección de mortero.
- 100 Lugeones, existente en cimentaciones poco agrietadas con aberturas abiertas.

La escala Lugeon decrece su efectividad cuando los valores incrementan. El mejor rango para la escala Lugeon varía de 1 a 5. Cuando los valores son cercanos a 50 la precisión del resultado varía  $\pm 10$  unidades. Si el ensayo Lugeon registra 100, entonces la precisión varía en  $\pm 30$  unidades. La escala Lugeon no tiene límite superior, más allá de 100 unidades el ensayo carece de sentido.

#### **4.6.1 Determinación de presiones específicas para Lugeon**

Se requiere encontrar las presiones para inyectar agua. En base a la Figura 4.15 encuentra la presión máxima y se distribuye porcentualmente los “pasos”.



**Figura 4. 15** Representación esquemática para Lugeon. Fuente: MWH 2013.

### Presión de inflado del packer

- $P_h = (d_{top} + a) \text{ psi}$       Presión hidrostática sobre el packer. 1 psi=0.7m.
- $P_w \sim 200 \text{ psi}$       Presión de trabajo del packer.
- $P_p = (P_h + P_w) * 1.2 \text{ psi}$       Presión de inflado del packer.

### Determinación de presión máxima

- $U = ((H_{soil} + H_{rock} - \text{GWL}) * \gamma_w)$
- $\sigma' = \sigma_t - U$
- $H_g = H_{(gravity)} * \gamma_w$

- 
- $P_{max} = \sigma' - H_g$
  - $P_m = \% P_{max}$  depende del RQD.

Si el **RQD** es  $> 75\%$  entonces la distribución de pasos es :

$$P_{m1} = 25\% P_{max}$$

$$P_{m2} = 50\% P_{max}$$

$$P_{m3} = 75\% P_{max}$$

$$P_{m4} = 50\% P_{max}$$

$$P_{m5} = 25\% P_{max}$$

Si el **RQD** es  $\leq 75\%$  entonces la distribución de pasos es :

$$P_{m1} = 20\% P_{max}$$

$$P_{m2} = 40\% P_{max}$$

$$P_{m3} = 60\% P_{max}$$

$$P_{m4} = 40\% P_{max}$$

$$P_{m5} = 20\% P_{max}$$

**Nota:**

- La máxima presión ( $P_{max}$ ) no debe exceder 1psi/ft ò 3.28psi/m.
- Considerar presión de poros si existe nivel freático.
- La zona de prueba (L) es recomendable deba estar en 5 y 3 m.
- $H_{soil}$ ,  $H_{rock}$  y  $H_w$  deben ser corregidos en caso de perforación inclinada ( $H \text{sen} \alpha$ ).
- Incrementar presiones dependen del RQD.

- El packer debe ser colocado solo para  $RQD > 60\%$ .

En base a la Figura 4.15, tenemos:

Considerar  $\gamma_{soil} = 100 \text{ pcf}$ ,  $\gamma_{rock} = 140 \text{ pcf}$ ,  $\gamma_w = 62.4 \text{ pcf}$

1. 
$$\sigma_t = \frac{(9.51 \times 100 + 47.89 \times 140)}{144} = 53.16 \text{ psi.}$$
2. 
$$u = \frac{(9.51 + 47.89) - 151}{144} = 24.22 \text{ ft. psi.}$$
3. 
$$\sigma' = 53.16 - 24.22 = 28.94 \text{ ft. psi.}$$
4. 
$$H_g = \frac{3.58 \times 62.4}{144} = 1.55 \text{ ft. psi.}$$
5. 
$$P_{m\max} = 28.94 - 1.55 = 27.39 \text{ ft. psi.}$$
- 6.

*$P_m$  si  $RQD$  es  $> 75\%$  en la zona de prueba, entonces:*

$$P_{m1} = 25\% P_{m\max} = 7 \quad P_{m2} = 50\% P_{m\max} = 14 \quad P_{m3} = 75\% P_{m\max} = 21$$

$$P_{m4} = 50\% P_{m\max} = 14 \quad P_{m4} = 25\% P_{m\max} = 7$$

*$P_m$  si  $RQD$  es  $< 75\%$  en la zona de prueba, entonces:*

$$P_{m1} = 20\% P_{m\max} = 5 \quad P_{m2} = 40\% P_{m\max} = 11 \quad P_{m3} = 60\% P_{m\max} = 16$$

$$P_{m4} = 40\% P_{m\max} = 11 \quad P_{m4} = 20\% P_{m\max} = 5$$

7. ***Presión de inflado del packer***
  - $P_h = (15 + 1)m = 23 \text{ psi.}$
  - $P_w = 200 \text{ psi.}$
  - $P_p = (22.86 + 200) \times 1,2 \text{ psi} = 267 \text{ psi.}$

## 4.6.2 Lectura de presión e inyección de agua

A continuación se procede a registrar las absorciones de agua registradas a partir de un volumen estable, según las presiones obtenidas durante un lapso de 10 minutos.

PACKER TEST	$P_{M1}$	<b>7</b>	$P_{M2}$	<b>14</b>	$P_{M3}$	<b>21</b>	$P_{M4}$	<b>14</b>	$P_{M5}$	<b>7</b>
	(psi) =		(psi) =		(psi) =		(psi) =		(psi) =	
Tiempo (minutos)	$R_{caudal}$ (m3)	Q (Litros)	$R_{caudal}$ (m3)	Q (Litros)	$R_{caudal}$ (m3)	Q (Litros)	$R_{caudal}$ (m3)	Q (Litros)	$R_{caudal}$ (m3)	Q (Litros)
0	0.806	-----	0.813	-----	0.820	-----	0.827	-----	0.83	-----
1	0.806	0.45	0.813	0.65	0.820	0.70	0.828	0.60	0.834	0.50
2	0.807	0.55	0.814	0.65	0.821	0.70	0.828	0.55	0.834	0.55
3	0.807	0.45	0.815	0.65	0.822	0.70	0.829	0.60	0.835	0.50
4	0.8079	0.50	0.815	0.60	0.822	0.70	0.83	0.60	0.835	0.55
5	0.8085	0.50	0.816	0.65	0.823	0.70	0.830	0.60	0.836	0.50
6	0.80895	0.50	0.816	0.60	0.824	0.70	0.831	0.55	0.837	0.55
7	0.8095	0.50	0.817	0.65	0.825	0.70	0.831	0.60	0.837	0.55
8	0.8099	0.50	0.818	0.60	0.825	0.70	0.832	0.60	0.838	0.55
9	0.8105	0.50	0.818	0.65	0.826	0.70	0.832	0.60	0.838	0.50
10	0.81095	0.50	0.819	0.65	0.827	0.70	0.833	0.60	0.839	0.50

**Tabla 4. 6** Lecturas de absorciones de agua luego de obtener un caudal constante .Fuente: MWH, 2013.

---

### 4.6.3 Determinación de la permeabilidad y número Lugeon

A continuación evaluamos el ensayo de permeabilidad.

#### 4.6.3.1 Ensayo de permeabilidad

Los ensayos de permeabilidad para estratos individuales pueden ser obtenidos mediante absorciones de agua en perforaciones por acción del bombeo. Los valores obtenidos dependen de la homogeneidad del estrato y ciertas restricciones en las fórmulas matemáticas.

En la Figura 4.16 se muestra el ensayo de permeabilidad en una porción de la perforación en ejecución. Este método es comúnmente usado para presiones desarrolladas en fundaciones rocosas mediante el uso de packers.

Las fórmulas utilizadas para este ensayo son:

$$k = \frac{Q}{2\pi LH} \log_e \frac{L}{R} \quad (\text{donde } L \geq 10r) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$k = \frac{Q}{2\pi LH} \sinh^{-1} \frac{L}{2r} \quad (\text{donde } 10r > L \geq r) \quad \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

K =Permeabilidad.

Q =Caudal constante en la inyección.

L =Longitud de porción de perforación de ensayo.

H =Altura de nivel de agua desde la superficie hasta la mitad del tramo de ensayo más la presión de inyección.

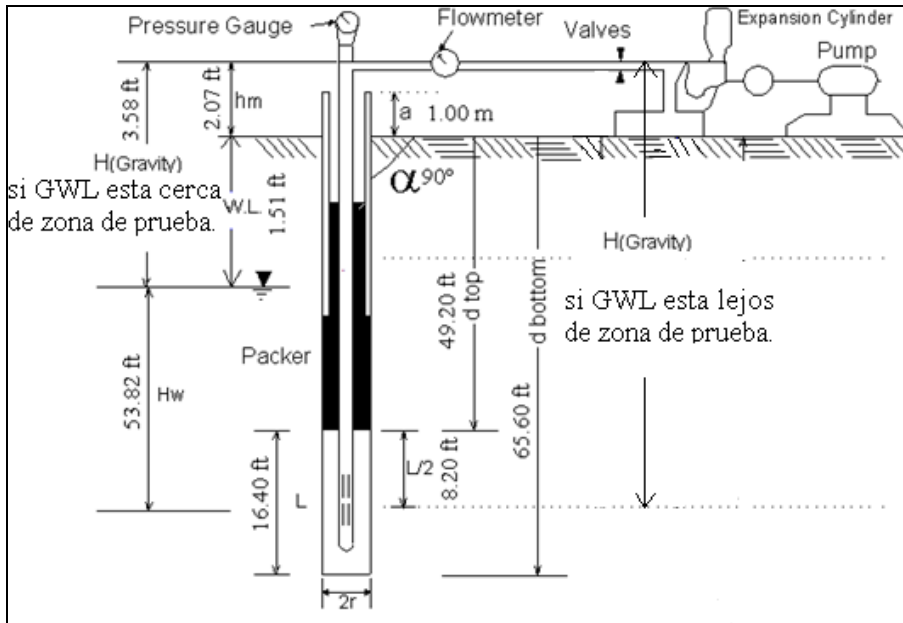
r =Radio de la perforación.



$\log_e =$  Logaritmo natural.

$\sinh^{-1} =$  Inverso de seno hiperbólico.

### 4.6.3.2 Cálculo de permeabilidad



Según los datos obtenidos de la Tabla 4.6 (absorciones de agua durante 10 minutos, presión de inyección) y del gráfico siguiente encontramos la respectiva permeabilidad, según:

$$H_p = P_{Mn} (\text{psi}) + (Y_w (\text{pcf}) \times H_{\text{Gravity (Corrected)}} (\text{ft}) / 144 (\text{psf}))$$

$$K_H = \frac{Q}{2\pi L H_p} * \ln\left(\frac{L}{r}\right)$$

For :  $L \geq 10r$

$$\text{Lugeon} = (\text{liters} / \text{m} / \text{min}) \times (10 / \text{pressure} (\text{bars}))$$

Considerar GWL de la superficie a : 1.51 ft.

$H = (3.58 \text{ ft.}) \cdot \sin 90^\circ = 3.58 \text{ ft}$ ,  $\gamma_w = 62.4 \text{ pcf}$ ,  $r = 2 \text{ pulgadas}$ ,  $1 \text{ psi} = 0.70422535 \text{ m}$ ,  $1 \text{ bar} = 0.06894757 \text{ m}$ .

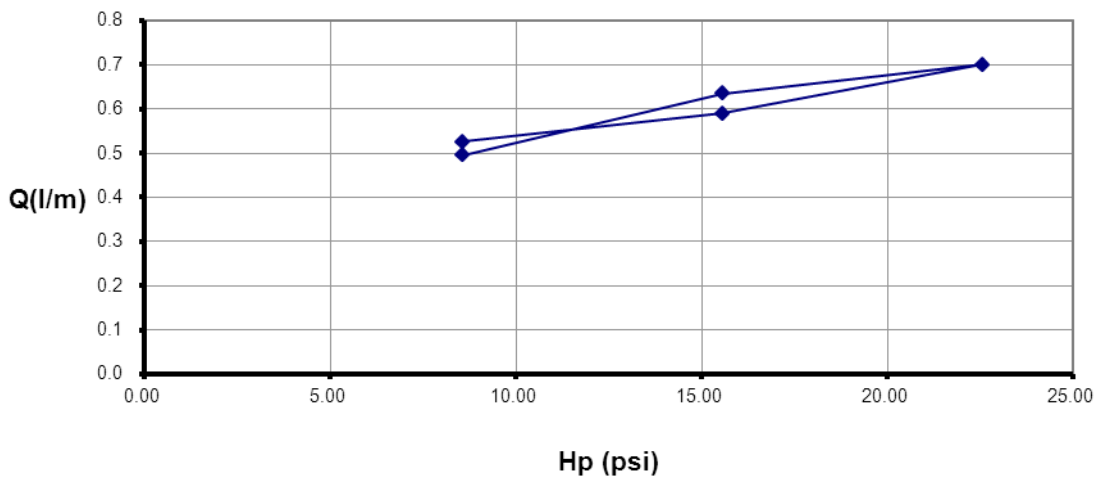
	$P_{M1} \text{ (psi)} =$	7.00
Tiempo (minutos)	Lectura volumen (m <sup>3</sup> /min)	(m <sup>3</sup> /min)*1000(litros/m <sup>3</sup> ) Q (litros/min)
0	0.806	
1	0.806	0.45
2	0.807	0.55
3	0.807	0.45
4	0.808	0.50
5	0.808	0.50
6	0.809	0.50
7	0.809	0.50
8	0.810	0.50
9	0.810	0.50
10	0.811	0.50
<b>Sumatoria (litros) =</b>		4.9
<b>Promedio=(litros/min) =</b>		0.49
<b>Promedio Q(m<sup>3</sup>/seg)=Q (litros/min)*(m<sup>3</sup>/1000 litros)*(1min/60 seg) =</b>		8.25E-06
<b>Hp (psi)= <math>P_{M1} \text{ (psi)} + (\gamma_w \text{ (pcf)} \cdot H \text{ gravity corrected(ft)})/144\text{pcf}</math> =</b>		8.55
<b>Differential Head of Water = H (m)= <math>H_p \cdot 0.70422535</math> =</b>		6.02
<b>Permeability = <math>K(\text{cm/s}) = Q/(2\pi L H) \cdot \ln(L/r)</math> =</b>		2.002E-05

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

<b>Lugeon=(0.49/(16.40*0.3048))*(10/ (7*0.06894757))=</b>										
		<b>7.00</b>		<b>14.00</b>		<b>21.00</b>		<b>14.00</b>		<b>7.00</b>
<b>Time (min)</b>	<b>Flow Meter Reading (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Change in Flow Meter Reading q(l)</b>	<b>Flow Meter Reading (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Change in Flow Meter Reading</b>	<b>Flow Meter Reading (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Change in Flow Meter Reading</b>	<b>Flow Meter Reading (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Change in Flow Meter Reading q(l)</b>	<b>Flow Meter Reading (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Change in Flow Meter Reading q(l)</b>
0	0.806		0.813		0.820		0.828		0.833	
1	0.806	0.45	0.814	0.65	0.821	0.70	0.828	0.60	0.834	0.50
2	0.807	0.55	0.814	0.65	0.822	0.70	0.829	0.55	0.834	0.55
3	0.807	0.45	0.815	0.65	0.822	0.70	0.829	0.60	0.835	0.50
4	0.808	0.50	0.816	0.60	0.823	0.70	0.830	0.60	0.835	0.55
5	0.808	0.50	0.816	0.65	0.824	0.70	0.831	0.60	0.836	0.50
6	0.809	0.50	0.817	0.60	0.824	0.70	0.831	0.55	0.837	0.55
7	0.809	0.50	0.817	0.65	0.825	0.70	0.832	0.60	0.837	0.55
8	0.810	0.50	0.818	0.60	0.826	0.70	0.832	0.60	0.838	0.55
9	0.810	0.50	0.819	0.65	0.826	0.70	0.833	0.60	0.838	0.50
10	0.811	0.50	0.819	0.65	0.827	0.70	0.834	0.60	0.839	0.50
<b>Sum of q (l) =</b>		<b>4.9</b>		<b>6.4</b>		<b>7.0</b>		<b>5.9</b>		<b>5.2</b>
<b>Average q(l) from raw data=Q(l/min) =</b>		<b>0.49</b>		<b>0.64</b>		<b>0.70</b>		<b>0.59</b>		<b>0.52</b>
<b>Average q(l) from raw data=Q (m<sup>3</sup>/sec) =</b>		<b>8.25E-06</b>		<b>1.06E-05</b>		<b>1.17E-05</b>		<b>9.83E-06</b>		<b>8.75E-06</b>
<b>H<sub>s</sub> (psi) =</b>		<b>8.55</b>		<b>15.55</b>		<b>22.55</b>		<b>15.55</b>		<b>8.55</b>
<b>Differential Head of Water = H (m) =</b>		<b>6.02</b>		<b>10.95</b>		<b>15.88</b>		<b>10.95</b>		<b>6.02</b>
<b>Permeability = K(cm/s) =</b>		<b>2.026E-05</b>		<b>1.429E-05</b>		<b>1.086E-05</b>		<b>1.328E-05</b>		<b>2.149E-05</b>
<b>Lugeon =</b>		<b>2.1</b>		<b>1.3</b>		<b>1.0</b>		<b>1.2</b>		<b>2.2</b>

**Tabla 4. 7** Permeabilidad y número Lugeon para los pasos o presiones predeterminados para un tramo de ensayo (Fuente: MWH, 2013).



**Figura 4. 16** Gráfico según la variación del caudal según la presión (Hp) (Fuente: MWH, 2013).

La zona de prueba posee una permeabilidad baja, con variaciones bajas en la absorción de agua debido al traslado de sedimentos en las fisuras casi impermeables.



Por otro lado, la infiltración en la presa se da principalmente en a) en el propio cuerpo de la presa y b) en la cimentación.

En cuanto al agua infiltrada a través del cuerpo de la presa o de su cimiento produce los siguientes efectos: Uno directo, de pérdida de agua, que suele ser el menos importante y más fácil de controlar o subsanar. El segundo, al estar mojados los materiales, disminuye su cohesión y su resistencia al rozamiento, añadiéndose estas al efecto desestabilizador de las presiones internas. El siguiente efecto intrínseco, refiere a que el paso de agua a través de las zonas con material fino tiende a arrastrar esas partículas, con el consiguiente peligro de erosión interna progresiva, denominado sifonamiento.

De los tres efectos, el último es el más peligroso, porque afecta directamente la integridad misma de la presa. El sifonamiento es, después del vertido, la causa más importante de accidentes o roturas de este tipo de presas. Además es el más difícil de controlar. Los efectos desestabilizadores de la presión intersticial siguen en importancia al sifonamiento, porque son más controlables con los dispositivos adecuados y hasta cierto punto previsible en los cálculos de estabilidad.

La pérdida de agua solo tiene valor económico, de ser excesiva, deberá disminuirse con impermeabilizaciones complementarias o cabe recuperar el agua infiltrada bombeándola al embalse, pero en principio más por el peligro el sifonamiento constituye un estado crítico.

Existen varios métodos para determinar las redes de flujo, el más usado era el gráfico, que solía ser suficiente para la mayor parte de las presas de altura moderada o media, hoy, los métodos numéricos han reemplazado este método tradicional.

## **5.2 TEORIA DE INFILTRACIÓN**

Existen dos tipos de análisis para infiltración, esto es para flujo permanente o estacionario y flujo impermanente o transitorio.

---

El modelo de flujo permanente describe un estado donde no se producen cambios. En un análisis de infiltración el “estado” significa presión del agua y caudal. Si ambas alcanzan un valor estable, esto significa que estarán en ese estado para siempre. En muchos casos donde el problema geotécnico está expuesto a condiciones cíclicas, es posible que jamás se llegue a la situación estable. Si la hipótesis contempla condiciones de borde constantes en el tiempo, entonces la respuesta es aquella que se corresponde con un tiempo lo suficientemente extenso como para obtener el estado estacionario. En este tipo de análisis no se considera cuanto tiempo se necesita para alcanzar la condición de estable. Solamente se predice como se presentará la superficie para un conjunto de condiciones de borde que no se modificarán en el tiempo ni el espacio. Como el análisis de flujo permanente no considera la componente tiempo, las ecuaciones que lo gobiernan se simplifican. En el análisis permanente las ecuaciones sacan la variable tiempo y omiten la función del contenido volumétrico del agua. Esto no resulta necesario para la solución. El contenido volumétrico de agua es usado para computar las pérdidas o ganancias en el suelo si hay un cambio en las presiones. En un estado permanente no hay cambios en las presiones.

Un análisis de flujo impermanente por definición significa que hay cambios. Ejemplo de este tipo de análisis es predecir el tiempo que tarda una presa en humedecerse cuando el reservorio se llena en forma rápida. En un análisis impermanente se deben conocer las condiciones iniciales y las funciones que describen el cambio de las mismas. Por ejemplo, en una presa se deberá conocer la función de llenado y vaciado de la misma en el tiempo, también deberán conocerse las funciones hidráulicas del suelo para determinar en distintos tiempos el estado de infiltración en el mismo. Se parte siempre de una condición inicial para poder conocer los estados intermedios en el tiempo y el estado final de la modelación.

### 5.3 ECUACIÓN DE FLUJO PARA UN RÉGIMEN IMPERMANENTE

La ecuación de flujo en medios porosos no saturados o ecuación de Richards (1931) plantea la relación entre la humedad, la conductividad hidráulica, y la succión en un medio poroso no saturado para distintos tiempos. El movimiento del agua que se produce a través de los poros del material o de las fracturas que se encuentran en el mismo se puede expresar a través de la Ley de Darcy (1856). Esta se puede extender a medios no saturados

---

en una dimensión, considerando que la conductividad  $K(\theta)$  es la conductividad hidráulica en función de la humedad del suelo  $\theta$ .

Richards planteó la relación entre la humedad, la conductividad hidráulica y la succión en un medio poroso no saturado en función del tiempo. Esta ecuación tiene la característica de ser altamente no lineal debido a la dependencia que tiene la humedad y la conductividad hidráulica con la succión, Paniconi (1991). Además necesita para su solución de la definición de las funciones hidráulicas del suelo. Para definir las funciones hidráulicas de los suelos (curvas de humedad y conductividad hidráulica en función de la succión) es necesario determinar las propiedades hidráulicas del suelo a través de las mediciones de laboratorio o de campo.

Las curvas de humedad en función de la profundidad y del tiempo de un suelo son importantes para entender el problema del flujo transitorio en la zona no saturada. La pendiente de la curva representa el almacenamiento característico del suelo. La pendiente indica la cantidad de agua tomada o entregada por el suelo como un resultado del cambio de la presión de agua de poros.

El caudal de agua que se infiltra, también denominada tasa de infiltración, es igual a la variación de la humedad para dos tiempos distintos dividido por la variación del tiempo, es decir:

$$f = \frac{\Delta\theta_{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{\theta(t+\Delta t)(h) - \theta_t(h)}{\Delta t}$$

Donde  $\theta(t + \Delta t)$  es la humedad en el tiempo y  $\theta$  es función de  $h$ . La ecuación de Richards permite calcular los perfiles de la humedad del suelo y por ende la tasa de infiltración.

La ecuación que describe el flujo del agua de un medio anisotrópico saturado o no saturado que considera que el flujo cumple con la Ley de Darcy, normalmente se refiere como la ecuación de Richards ( Mein y Larson,1973),se expresa como:

---


$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k_x k_{rw}(H)}{\mu_w} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{k_y k_{rw}(H)}{\mu_w} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k_z k_{rw}(H)}{\mu_w} \frac{\partial h}{\partial z} \right]$$

Donde  $\theta_w$  es la cantidad volumétrica de la fase líquida,  $k_x, k_y, k_z$  son las permeabilidades intrínsecas correspondientes a las direcciones x, y, z respectivamente,  $k_{rw}$  es la permeabilidad relativa de la fase líquida,  $\mu_w$  es la viscosidad dinámica de la fase líquida, H es la succión (z-h) y h es la altura piezométrica.

Esta ecuación altamente no lineal, para su solución necesita la definición de las propiedades hidráulicas del suelo. La ecuación de Richards, o cualquiera de sus formas modificadas, ha sido la piedra angular para el desarrollo de la mayoría de los modelos numéricos del cálculo de infiltración en medios porosos no saturados (Espinoza, 1993).

La no linealidad de la ecuación de Richards se debe a que la conductividad hidráulica es función de h entonces se tiene el producto de  $K_{ii}(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$ , donde  $K_{ii}$  es la conductividad hidráulica, e i indica las direcciones x,y,z. La conductividad hidráulica está dada por la siguiente relación:

$$K_{ii} = k_{ii} k_{rw} / \mu_w$$

La conductividad hidráulica no solo es una función lineal de la succión sino que depende además de la historia del humedecimiento y secado del suelo (histéresis).



$$\frac{\partial \theta_w(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k_{xx}(H) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_{yy}(H) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_{zz}(H) \frac{\partial h}{\partial z} \right]$$

Para resolver numéricamente esta ecuación es necesario resolver un problema de valores de condiciones iniciales y de borde, es decir de condiciones mixtas (Paniconi y otros, 1991). Cuando la conductividad hidráulica no es función de la succión (es una constante) en la ecuación anterior se puede retirar de la derivada parcial y la ecuación de Richards toma la forma matemática de la Ecuación de Laplace. Esto ocurre en realidad cuando en el suelo se estudian los fenómenos permanentes o estacionarios.

$$K_{sx} \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right] + K_{sy} \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] + K_{sz} \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right]$$

Donde  $K_{sx}, K_{sy}, K_{sz}$  son las conductividades hidráulicas saturadas en las direcciones x,y,z respectivamente.

Si el medio es isotrópico las conductividades hidráulicas saturadas en las tres direcciones son iguales ( $K_{sx} = K_{sy} = K_{sz}$ ), quedando:

$$\left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right] + \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] + \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = 0$$

Y para un flujo bidimensional:

$$\left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right] + \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] = 0$$

---

## 5.4 MÉTODO DE SOLUCIÓN PARA UN RÉGIMEN PERMANENTE DE LA ECUACIÓN DE LAPLACE

La solución para problemas de infiltración en régimen laminar y permanente se obtiene resolviendo la ecuación de Laplace. Varios métodos se han desarrollado para resolver la ecuación de Laplace en forma exacta o aproximada. Siendo los principales: Método de redes de flujo (gráfico), y métodos numéricos y computacionales (diferencias finitas).

### 5.4.1 Redes de flujo

Constituye uno de los métodos ampliamente usado para dar solución a problemas hidráulicos respecto de filtraciones en presas y problemas que incluyan obras hidráulicas. Este método gráfico constituye una buena alternativa para resolver problemas de infiltración resolviendo en forma simplificada la ecuación de Laplace. Si se conoce las condiciones de borde es fácil predecir el comportamiento del flujo reconociendo el caudal y presión de la región en estudio.

La ecuación  $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$ , es una ecuación de derivadas parciales elípticas cuya solución puede representarse por dos familias de curvas que se intersectan en ángulo recto. Dos funciones conjugadas armónicas  $\Phi$  y  $\omega$  satisfacen la ecuación de Laplace y las curvas  $\Phi(x,z)=cte$ ,  $\omega(x,z) = cte$ , son ortogonales (Harr 1962). Una de estas familias de curvas representa las trayectorias de flujo de las partículas de agua filtrante  $\omega(x,z)$ , la otra familia constituye la presión piezométrica y se denomina líneas equipotenciales  $\Phi(x,z)$ . Las redes de flujo son una solución única para una condición específica de infiltración, es decir, que existe una sola familia de curvas que será solución para una geometría y condiciones de contorno dadas.

#### 5.4.1.1 Trazo de la red de flujo. Cálculo del gasto

Al intentar el trazo de las familias de líneas equipotenciales y de flujo surge el problema de que por cada punto de la región de flujo deberá de pasar una línea de flujo y una equipotencial, pues en cada punto de la región de flujo el agua tiene una velocidad y una carga hidráulica; esto llevaría a trazar todas las líneas posibles a una mancha uniforme en toda la región de flujo, obteniendo una solución carente de todo valor práctico. Una

---

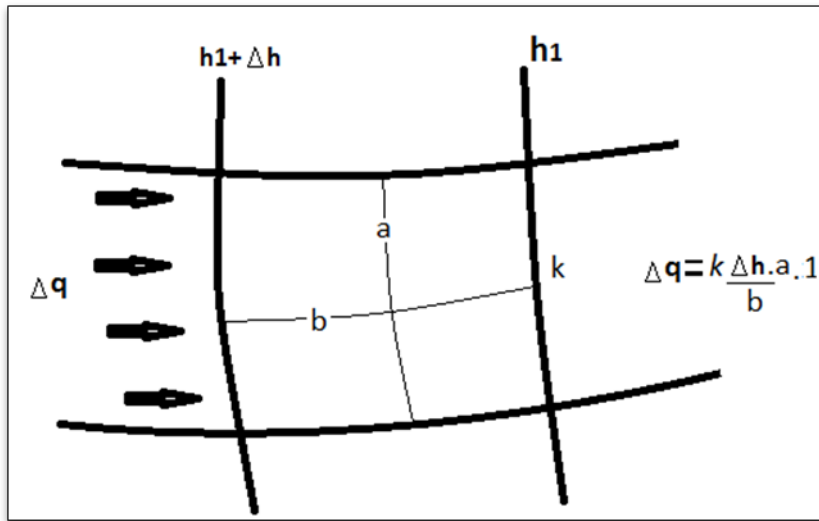
solución que consiga diferenciar un problema de flujo de otro, será preciso no seleccionar todas las posibles líneas, sino, solo unas cuantas con cierto ritmo útil y conveniente. La solución viene así: **a)** Dibujar las líneas de flujo de manera de que el gasto que pase por el canal formado entre cada dos de ellas sea el mismo ( $\Delta q$ ), **b)** Dibujar las líneas equipotenciales de manera de que la caída de carga hidráulica entre cada dos de ellas sea la misma ( $\Delta h$ ).

El método gráfico de redes de flujo es aplicable para flujo bidimensional y en ciertos casos de tridimensional con simetría axial. Este método tiene sobre los demás la ventaja de desarrollar en quien lo utiliza sistemáticamente una clara concepción física de las características generales del flujo de agua en suelos y de sus detalles más significativos.

La solución en un dominio de flujo homogéneo e isótropo está representada gráficamente por lo que se llama red de flujo, formada por infinidad de curvas pertenecientes a dos familias de líneas mutuamente ortogonales: las de flujo o corriente, y las equipotenciales.

De la infinidad de equipotenciales y líneas de corriente, deben tomarse número de curvas de cada familia, de modo de que entre cada par de líneas de flujo adyacentes el caudal sea el mismo,  $\Delta q$ , y entre dos equipotenciales vecinas cualesquiera la caída de carga hidráulica sea idéntica,  $\Delta h$ .

De ese modo se obtiene una red formada por  $n_f = q/\Delta q$  canales de flujo, y  $n_e = h/\Delta q$  caídas de potencial, en que  $q$  es el caudal total a través de la zona de flujo y  $h$  es la diferencia de carga hidráulica entre las equipotenciales extremas.



**Figura 5. 2** Rectángulo formado a partir de la red de flujo resultante, (Casagrande, 1925-1940).

Por la Ley de Darcy, el caudal que pasa a través del rectángulo es:

$$\Delta q = K \frac{\Delta h}{b} \cdot a \cdot 1 = k \frac{a}{b} \cdot \frac{h}{n_g}$$

Se considera que el espesor del tubo de flujo en la dirección perpendicular al plano de la figura es unitario, donde:

$$q = n_f \Delta q = K h \frac{n_f a}{n_g b}$$

En vista de que  $q$ ,  $K$ ,  $h$  y  $\frac{n_f}{n_g}$  son constantes para un problema dado, la relación de lados  $a/b$  debe ser la misma para todos los rectángulos de la red. Este es uno de los principios

básicos para el trazado de las redes de flujo. En el caso de que se elija  $a/b:1$ , todos los elementos de la red serán cuadrados, y la ecuación para el caudal por unidad de flujo será:

---

$$q = Kh \frac{n_f}{n_e}$$

El coeficiente  $\frac{n_f}{n_e}$  se llama factor de forma de la red de flujo y fija la relación de lados a/b, su valor es la relación del número de canales de flujo y caída de cargas usados.

Por otra parte, se puede demostrar que la ecuación de Laplace para flujo bidimensional tiene solución única, es decir, que si en un problema dado se logra trazar dos familias de curvas mutuamente ortogonales cuyas intersecciones definan cuadrados y satisfagan las condiciones de frontera, dichas familias son la solución a la ecuación de Laplace para el problema dado. Esto constituye la justificación del método gráfico para la solución de problemas de flujo de agua en suelos.

### 5.4.2 Métodos numéricos y computacionales

Los métodos computacionales se usan para condiciones de flujo complejas y usan aproximaciones para la solución de la Ecuación de Laplace.

Los dos métodos de solución numérica son el método de diferencias finitas y el de elementos finitos, ambos pueden modelar en forma bidimensional o tridimensional.

#### 5.4.2.1 Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas resuelve la ecuación de Laplace aproximándola con un sistema de ecuaciones algebraicas lineales. La región de flujo es dividida en una malla rectangular discreta con puntos nodales a los que se les asigna valores de carga (valores de carga conocidos en los bordes o puntos fijos, y valores de carga estimados para los puntos nodales de los que se desconoce su valor inicialmente). Usando la Ley de Darcy y la hipótesis de que la carga en un nodo es el promedio de los nodos circundantes, se forma un sistema N de ecuaciones algebraicas lineales con N incógnitas (N igual al número de nodos). Pueden resolverse mallas simples con pocos nodos. Normalmente, N es grande y deben aplicarse métodos de relajación que involucran iteraciones y el uso de una computadora.

---

#### 5.4.2.2 Método de elementos finitos

El método de elementos finitos es una segunda forma de solución numérica. Este método también se basa en el modelo de malla (no necesariamente rectangular) que divide la región de flujo en elementos discretos y proporciona N ecuaciones con N incógnitas. Para cada elemento se proporcionan sus propiedades como la permeabilidad, y se establecen las condiciones de borde (cargas y caudales). Se resuelve el sistema de ecuaciones para determinar las cargas en los nodos y caudales en los elementos.

### 5.5 LEY DE DARCY. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

La Ley de Darcy describe con base en experimentos de laboratorio, las características del movimiento del agua a través de un medio poroso.

La expresión matemática de la Ley de Darcy es la siguiente:

$$Q = k \cdot \frac{h_3 - h_4}{L} \cdot A = k \cdot i \cdot A$$

Donde:

$Q$  = gasto, descarga o caudal en m<sup>3</sup>/s.

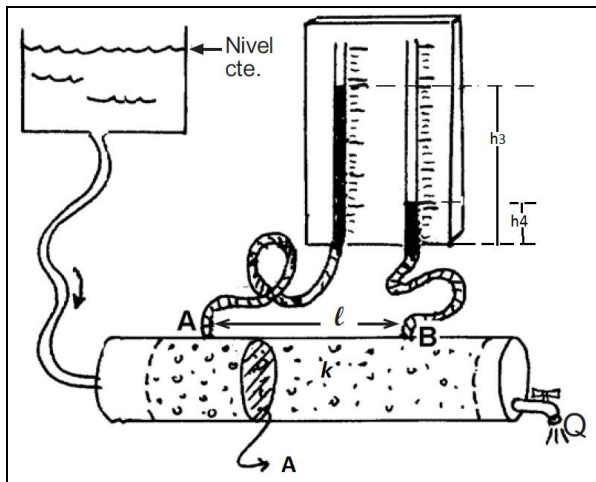
$L$  = longitud en metros de la muestra.

$k$  = una constante, actualmente conocida como coeficiente de permeabilidad de Darcy, variable en función del material de la muestra, en m/s.

$A$  = área de la sección transversal de la muestra, en m<sup>2</sup>.

$h_3$  = altura, sobre el plano de referencia que alcanza el agua en un tubo colocado a la entrada de la capa filtrante.

$h_4$  = altura, sobre el plano de referencia que alcanza el agua en un tubo colocado a la salida de la capa filtrante.



**Figura 5. 3** Permeámetro de carga constante. Ley de Darcy. Fuente: Experiencia de Darcy, J. Sánchez, 2011).

El coeficiente de permeabilidad es una característica de los suelos, específicamente ligado a la Ley de Darcy, que se refiere al flujo de fluidos a través de los suelos. El coeficiente de permeabilidad, generalmente representado por la letra  $k$ , es extremadamente variable según el tipo de suelo.

Grado de permeabilidad	Valor de $k$ (cm/s)
Elevada	Superior a $10^{-1}$
Media	$10^{-1}$ a $10^{-3}$
Baja	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
Muy baja	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Prácticamente impermeable	Menor de $10^{-7}$

**Tabla 5. 1** Grado de permeabilidad.

El núcleo impermeable de una presa de tierra en su mayoría de veces es arcilla, la cual posee un coeficiente de permeabilidad por debajo de  $10^{-6}$  cm/s.

---

## 5.6 CONDICIONES DE FRONTERA

Se presenta a continuación la descripción realizada por Marsall y Resendiz Núñez en 1975, respecto a las condiciones de frontera.

El primer paso para problemas de flujo es reconocer las condiciones de frontera, para lo cual es necesario reconocer las condiciones de frontera y las características geométricas e hidráulicas de las superficies extremas que limitan el dominio de flujo. En los casos de flujo bidimensional, una sección del medio es representativa de la condiciones en cualquier otra y aquellas superficies se reducen a líneas. Se presenta a continuación un resumen de las condiciones de frontera.

En medios homogéneos hay cuatro posibles condiciones de fronteras:

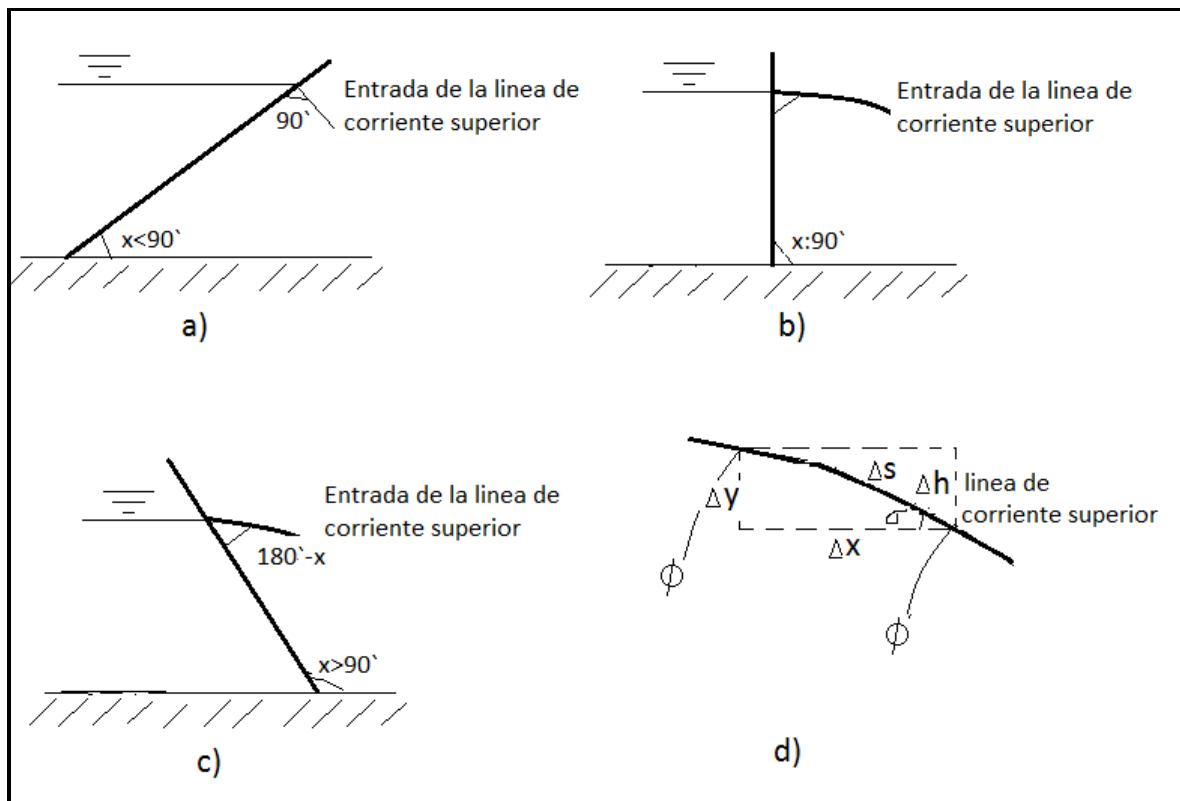
1. Frontera suelo infiltrado-suelo impermeable (frontera impermeable).
2. Frontera agua-suelo infiltrado.
3. Frontera suelo infiltrado –suelo permeable (línea superior de flujo).
4. Frontera suelo infiltrado-aire (línea de descarga libre).

## 5.7 CONDICIONES GENERALES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA LINEA SUPERIOR

La forma como debe entrar la línea superior a la presa de material permeable es en base a la ortogonalidad entre una equipotencial y una de flujo, es decir, la línea 1-2 viene a ser una equipotencial mientras que la 2-4 una de flujo, por lo tanto esta debe ingresar formando un ángulo de  $90^\circ$  respecto de la línea 1-2.

La línea superior de entrada puede entrar de manera diferente según el ángulo de inclinación del talud aguas arriba, según se muestra en la Figura 5.4.

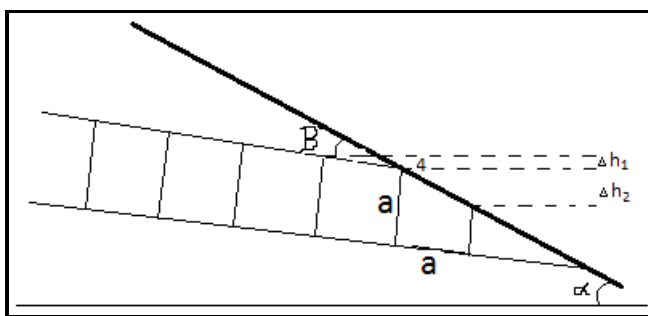




**Figura 5. 4** Condiciones de entrada de la línea de corriente superior en la presa de tierra (Casagrande 1925-1940).

Las condiciones de salida de la línea de corriente superior, o sea el ángulo con que dicha línea intercepta al talud debajo de la presa en el punto 4 (Figura 5.5), dependen del ángulo que dicho talud forma con la horizontal. Es fácil deducir que cuando el ángulo es menor o igual a  $90^\circ$  como sucede con el ángulo  $x$ . La línea de corriente superior debe salir tangente al talud aguas abajo, siendo el punto de tangencia el 4.

Considérese la zona de salida de la línea de corriente superior, tal como aparece en la Figura 5.5.



**Figura 5. 5** Estudio de la condición de salida de la línea de corriente superior para  $\alpha \leq 90^\circ$  (Casagrande 1925-1940).

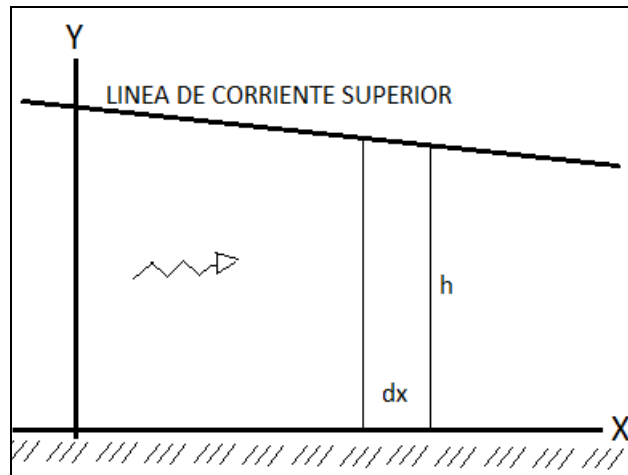
## 5.8 TEORIA DE DUPUIT

Existen dos grupos para clasificar las líneas de corriente superior dentro de una presa de tierra. El primer grupo es el de flujo no confinado, donde no se conoce la ubicación de la línea superior de corriente, que viene a ser la traza de una superficie a la presión atmosférica (superficie libre). El segundo grupo de problemas de flujo corresponde cuando son conocidas todas las fronteras de la región, que se denomina flujo confinado.

En 1863, Dupuit estableció dos hipótesis básicas para el estudio de flujos no confinados:

1. Para pequeñas inclinaciones de la línea de corriente superior las líneas de flujo pueden considerarse horizontales y, consecuentemente, las líneas equipotenciales como verticales.
2. Que el gradiente hidráulico es igual a la pendiente de la línea de corriente superior en el punto de que se trate y es constante en cualquier punto de la vertical que se trace por aquél.

Con base a las hipótesis de Dupuit se obtendrá ahora una relación útil para el estudio de varios problemas de flujo no confinado, considere la Figura 5.6 sujeta a un flujo bidimensional, la base de ese elemento es  $dx$  y su altura es  $h$ , carga hidráulica en los puntos de la línea de corriente superior que limita al elemento.



**Figura 5. 6** Aplicación de la teoría de Dupuit a un flujo bidimensional. Charny (1951).

La velocidad del agua que cruza el elemento según Dupuit:

$$v_x = -k \frac{dh}{dx}$$

Y el gasto a través de la cara izquierda del elemento será, por unidad de ancho:

$$q_x = -k \left( h \frac{dh}{dx} \right)_x$$

En la cara derecha, el gasto será:

$$q_{x+dx} = -k \left( h \frac{dh}{dx} \right)_{x+dx}$$

Por continuidad debe tenerse:

$$q_x = q_{x+dx} \quad ; \quad q_{x+dx} - q_x = 0 \quad \text{o sea}$$

$$k \left( h \frac{dh}{dx} \right) + k \left[ \frac{d}{dx} \left( h \frac{dh}{dx} \right) \right] - k \left( h \frac{dh}{dx} \right) = 0$$

de donde

$$\left[ \frac{d}{dx} \left( h \frac{dh}{dx} \right) \right] = 0 \dots\dots\dots 1$$

La integración de la fórmula 1, da:

$$\frac{dh^2}{dx} = A \quad \text{y} \quad h^2 = Ax + B \dots\dots\dots 2$$

donde A y B son constantes.

Las condiciones de frontera del problema son :

Para  $x = 0$              $h = h_1$

Para  $x = L$              $h = h_2$

Tomando estos valores, la ec. 2 , llega a:

$$A = \frac{h_2^2 - h_1^2}{L},$$

$$B = h_1^2$$

Llevando esto valores a la ecuación 2:

$$h^2 = \frac{h_2^2 - h_1^2}{L} x + h_1^2$$

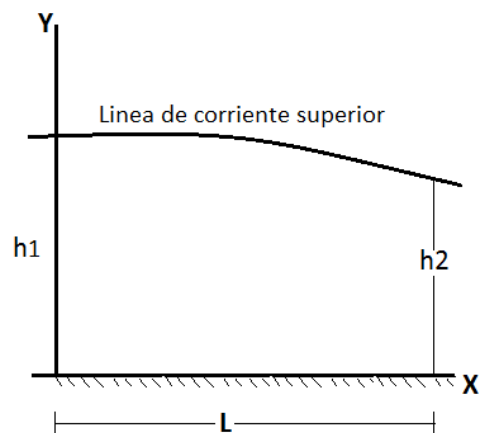
De donde:

$$h = \sqrt{h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{L} x} \dots\dots\dots 3$$

El gasto q, por unidad de ancho bajo la línea de corriente superior, será:

$$q = -kh \frac{dh}{dx}, \text{ resolviendo la ecuación se obtiene:}$$

$$qx = -k \frac{h^2}{2} + C, \text{ con la primera condición de frontera del caso analizado, se deduce:}$$

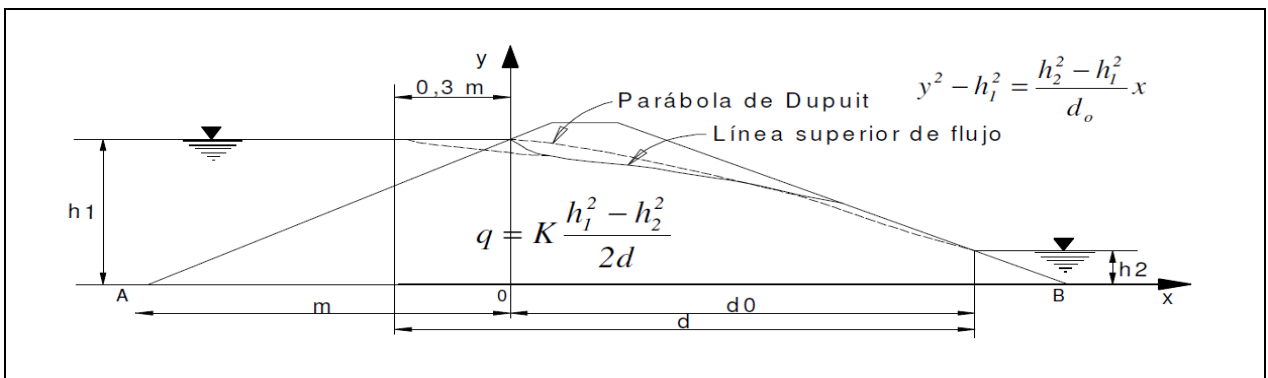


$C = k \frac{h_1^2}{2}$ , de donde:

$qx = \frac{k}{2} (h_1^2 - h^2)$ , con la segunda condición de frontera se obtiene,

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}$$

Siendo esta expresión utilizada por la Teoría de Dupuit conocida como la Fórmula de Dupuit.



**Figura 5. 7** Parábola de Dupuit y cálculo de caudal según la Teoría de Dupuit  
 Fuente: Marsal y Resendiz, 1975.

## **CAPÍTULO VI**

### **CASO APLICATIVO.PRESA LAS GORDAS.**

#### **6.1 DESCRIPCIÓN**

Básicamente, en este capítulo se desarrolla las consideraciones a seguir para el diseño de la cortina de mortero y la idealización en el Seep/W con diferentes cota de relave; el flujo de filtración estimado será comparado con el flujo real de la presa según las cotas de embalse.

Se considera una presa de relaves ubicada en la sierra del Perú con una elevación aproximada en el fondo del valle de 3640 m.s.n.m. y la cresta llega a la cota 3760 m.s.n.m. Esta estructura está conformada por material rocoso (aguas arriba y aguas abajo), material arcilloso en el núcleo impermeable y zona de filtros.

El caso práctico consiste en el procedimiento a seguir en las inyecciones de mortero donde se tiene en cuenta las consideraciones geológicas, diseño de lechada de cemento, presiones de inyección, y finalmente con el Seep/w se estiman las filtraciones existentes aguas abajo de la presa, según su geometría, características mecánicas de los materiales que la conforman, conductividad hidráulica de los materiales, cotas de embalse. Finalmente, se realiza una comparación de filtraciones reales y estimadas para discusión de resultados.

#### **6.2 CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS**

##### **6.2.1 GEOMORFOLOGIA**

En el eje de presa las quebradas son algo simétricas con pendientes del orden del 50% y 60%. En el margen izquierdo y margen derecho, se presentan laderas empinadas, con morfología de farallones donde se ha generado incluso paredes sub-verticales con alturas que varían entre 10 m y 30 m.

## 6.2.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Los rasgos estructurales más importantes que se observan en el área de depósito de relaves y sus alrededores corresponden a fallamientos, fracturamientos, y estratificaciones.

## 6.2.3 RIESGO GEOLÓGICO

En la presa de relaves no se ha encontrado fenómenos relacionados a deslizamientos, quebradas activas y reptación de suelos.

## 6.2.4 PARÁMETROS DE RESISTENCIA, DEFORMACIÓN Y PERMEABILIDAD

En base a la estratigrafía, clasificación RMR, Lugeon y ensayos de laboratorio, se ha descrito y calculado la densidad, resistencia, permeabilidad, y deformación de la fundación de la presa de relaves. Según:

UNIDAD GEOTECNICA	UNIDAD ESTRATIGRAFICA	RMR	DENSIDAD (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia residual según corte directo		Permeabilidad (cm/s)	Módulo de poisson "μ"	Módulo de deformación E (GPa)
				Angulo de fricción	Cohesión "C" (kPa)			
UG-DS-III A	Pórfido diorítico	40	26.0	38	135	9.8 10E-04 a 1.6 10E-05	0.30	5.62E+00

## 6.2.5 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD GEOTÉCNICA UG-DS-III A

Según el informe geológico, se tiene: "La unidad geotécnica III A se localiza el eje de la presa. Sobre esta unidad III A se emplazará la estructura principal de la presa. La profundidad que alcanza esta unidad es variable entre 25 a 40 m referido al nivel de terreno actual. Consiste de pórfido diorítico argilizado, de grano medio a grueso, de color gris claro blanquecino, moderadamente alterada por soluciones hidrotermales, resistencia baja a media (8.0 a 46.0MPa), en las fracturas la resistencia es muy débil (1.0 a 5.0 MPa) y en material de falla la resistencia es extremadamente débil (0.2 a 1.0 MPa), fracturada y triturada en tramos de falla. La permeabilidad es media a baja con valores variables entre

$9.8 \times 10^{-4}$  a  $1.6 \times 10^{-5}$  cm/s. La caracterización geomecánica con el índice “RMR” básico, indica la presencia de masas rocosas de calidad mala “RMR = 35” (80%) y regular “RMR = 49” (20%).

En la unidad geotécnica IIIA del eje de la presa de relaves por las permeabilidades de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  cm/s encontrados, para mejorar la estanqueidad del depósito de relaves es necesario la construcción de una cortina de mortero mediante inyecciones de impermeabilización hasta secundarios, las inyecciones terciarias y cuaternarias serán determinados previa evolución de los resultados de las inyecciones primarios y secundarios.

La profundidad del nivel de agua en el valle se encuentra a nivel del terreno, tal como lo indica los piezómetros, manantiales y los ojos de agua registrado en las márgenes. Hacia la ladera superior de las quebradas el nivel de agua se encuentra a la profundidad de 10 y 17m. Sin embargo es importante indicar que los niveles de agua en el área del proyecto fueron registrados durante la época seca, en consecuencia en épocas de lluvia, este nivel de agua podría subir próximo a la superficie.”

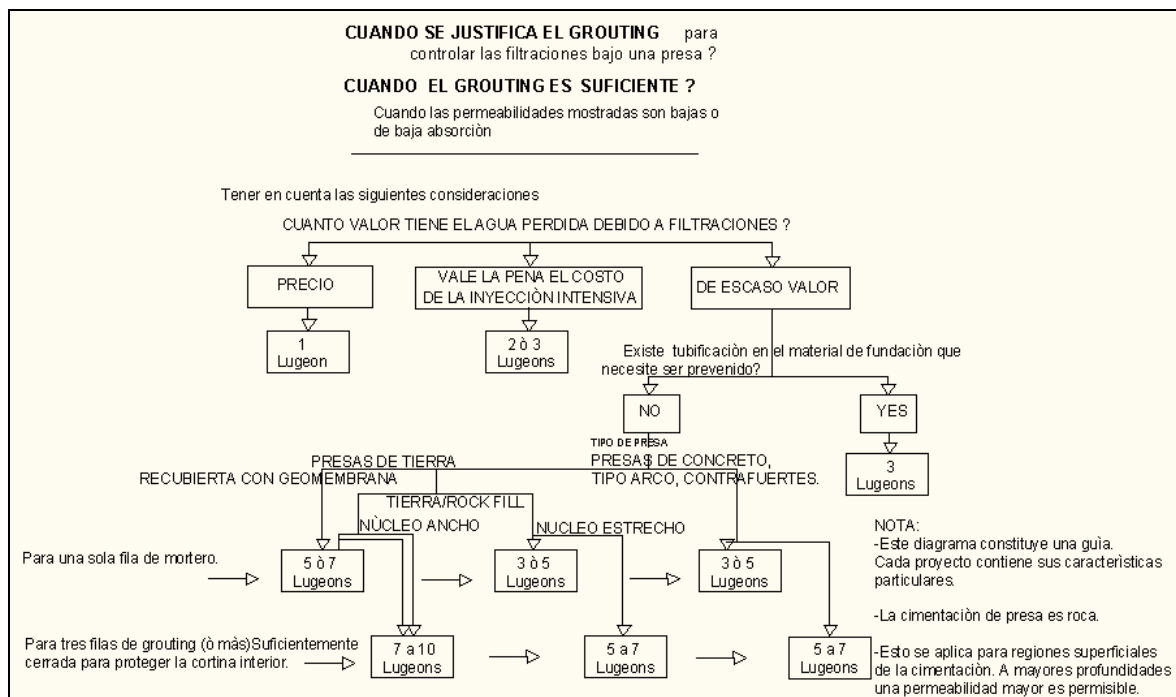
### **6.3 CRITERIO PARA EVALUAR LA CORTINA DE MORTERO EN LA FUNDACIÓN**

En base a la Figura 6.1, determinamos que la presencia de la cortina de mortero si es necesaria debido a que se debe controlar las filtraciones del embalse aguas abajo, para evitar que se combine con las aguas naturales de un río próximo al pie de presa.

Según ensayos de permeabilidad se tiene en la fundación valores de  $10^{-4}$  cm/s a  $10^{-5}$  cm/s, esto es, de 7 a 1 Lugeones (1 Lugeon= $1.3 \times 10^{-5}$  cm/seg).El costo en el impacto del contacto del agua de relave filtrado y el agua del río seria considerablemente alto, por lo que valdría la pena considerar el costo de una inyección masiva.



La presa en estudio es zonificada, es decir, relleno de material rocoso que confina un núcleo arcilloso impermeable, considerando una permeabilidad en la fundación de 1 a 7 Lugeones es recomendable la inyección de 01 fila de taladros bajo el área del núcleo arcilloso. Pero es recomendable ejecutar hasta 03 filas de inyecciones por la presencia de un nivel freático alto y la caracterización geomecánica arroja una masa rocosa de calidad pobre.



**Figura 6.1** Guía para determinar si la inyección es necesaria. Fuente: Inyección de suelos- Ischy, 1968.

## 6.4 INYECCIÓN DE LA CORTINA DE MORTERO

### 6.4.1 INTRODUCCIÓN

Se realizará la descripción de actividades para la determinación de la lechada de cemento a inyectar en la fundación. Esta estructura se encuentra entre las cotas 3600 y 3800 msnm. La presa tiene una altura de represamiento de 200 m. Según los ensayos realizados en las perforaciones, la presa requiere la cortina de inyecciones para impermeabilizar y solidificar su fundación.

Para la cortina de inyecciones se ejecutan taladros de investigación, y paralelo a la perforación se realizaron los diseños de mezclas.

Esta inyección de mortero reducirá el flujo de agua, reforzará la fundación de roca, y mitigará la aparición de formación de sumideros por debajo de la presa.

### **6.4.2 TALADROS DE INVESTIGACIÓN**

El objetivo de los taladros de investigación es:

- Evaluar la fundación.
- Verificar los equipos de inyección y perforación.
- Evaluar la calidad de roca mediante logeos y ensayos de permeabilidad Lugeon.
- Realizar pruebas de lechada, esto es, ensayos de mezcla en laboratorio y definir las presiones de inyección. Los ensayos de mezcla en laboratorio tienen por objetivo determinar las dosificaciones óptimas de mezclas utilizando aditivos.
- Determinación de las instrucciones para la inyección de lechada para la cortina de impermeabilización.

### **6.4.3 CRITERIOS DE LA PRUEBA**

- Determinar los índices de desempeño de la lechada de cemento y aditivos disponibles. A partir de estas mezclas se selecciona las más adecuadas para reducir la permeabilidad y mejorar la fundación de la presa.-En base a los ensayos de inyección in situ, con presiones de inyección diferentes y múltiples etapas, se determinó el parámetro de presiones máxima de diseño en diferentes tramos para la cortina de inyección.
- La metodología y secuencias de inyección, están en base a la absorción de lechada, y criterios de cambio de mezcla.
- Cierre y criterios de aceptación.
- Desarrollo de instrucción de inyección e inspección, control de calidad, y finalmente el diagrama de flujo durante la operación.

#### **6.4.4 DISEÑO DE MEZCLAS DE GROUT**

En laboratorio y en el centro de inyecciones instalado a un costado de la presa, se llevaron a cabo las pruebas básicas con mezcla de lechada estable. Se preparó en el mezclador cemento portland Tipo I y aditivo, las relaciones a/c fueron de 0,5:1 a 1:1 a una temperatura superior a 5°C.

##### **6.4.4.1 Equipos de ensayo de mezcla para inyecciones**

Los equipos utilizados fueron:

- Balanza de lodos.
- Cono de Marsh.
- Aguja de Vicat.
- Probetas graduadas.
- Moldes para briquetas.
- Balanza de 500 gr.
- Termómetro de aguja.
- Cronómetro.

El tiempo de fraguado se verificó en laboratorio. En campo, se evaluó: densidad, cohesión, sedimentación, tiempo de fraguado con aguja Vicat, resistencia a la compresión, y temperatura.

En total se evaluaron 37 mezclas utilizando cemento Andino Tipo I y IP, aditivo Rheobuild, bentonita, y agua limpia.

#### 6.4.4.2 Ensayos de mezclas para lechadas de cemento

Mezcla	Cemento	a/c	Rheobuild % en peso	Bentonita % en peso	Temperatura mezcla, °C	Fluidez Marsh (seg)	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Cohesión g/cm <sup>2</sup>	Cohesión (mm)	Sedimentación (2hrs)	Fragua inicial (hrs)	Fragua final (hrs)
1	IP	1:1	1%	0%	18.1	29.44	1.52	0.016	0.102	7.50%	22:00	32:00:00
2	IP	0.9:1	1%	0%	17.4	29.91	1.555	0.019	0.119	7.00%	20:40	30:00:00
3	IP	0.8:1	1%	0%	15.3	30.72	1.59	0.020	0.126	10.00%	20:20	29:00:00
4	IP	0.7:1	1%	0%	16.5	34.07	1.69	0.029	0.169	1.50%		
5	IP	0.6:1	1%	0%	18.3	35.59	1.73	0.033	0.191	1.00%		
6	IP	0.5:1	1%	0%	17.6	42.14	1.81	0.041	0.227	0.50%		
7	IP	1:01	0.50%	0%	16.1	30.7	1.49	0.019	0.124	15.00%	23:40	35:40:00
8	IP	0.95:1z	0.50%	0%	14.4	30.3	1.52	0.020	0.129	13.00%	23:40	33:20:00
9	I	0.9:1	0.50%	0%	15.8	30.39	1.55	0.025	0.162	10.00%	22:00	33:00:00
10	I	0.85:1	1%	0%	15.9	30.98	1.58	0.032	0.139	10.00%	19:20	30:00:00

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

Mezcla	Cemento	a/c	Rheobuild % en peso	Bentonita % en peso	Temperatura mezcla, °C	Fluidez Marsh (seg)	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Cohesión g/cm <sup>2</sup>	Cohesión (mm)	Sedimentación (2hrs)	Fragua inicial (hrs)	Fragua final (hrs)
11	I	0.75:1	1%	0%	14.7	31.66	1.625	0.019	0.151	1.50%	19:20	29:20:00
12	I	0.65:1	1%	0%	16	34.84	1.75	0.013	0.18	1.00%	7:30	12:50
13	I	0.8:1	1%	0%	30.93		1.595	0.019	0.119	8.00%		
14	I	1:01	1%	0%	15.2	29.78	1.52	0.013	0.086	11.00%	17:00	24:50:00
15	I	0.9:1	1%	0%	14.5	30.49	1.6	0.016	0.1	10.00%	13:40	20:40
16	I	0.8:1	1%	0%	16.5	30.61	1.61	0.017	0.106	13.00%	18:00	26:00:00
17	I	0.7:1	1%	0%	16.6	29.66	1.65	0.023	0.137	9.00%	15:00	25:00:00
18	I	0.6:1	1%	0%	17.4	32.64	1.76	0.024	0.134	1.50%	6:00	19:00
19	I	0.5:1	1%	0%	17.4	36.32	1.84	0.033	0.177	0.50%	7:40	11:00
20	I	0.85:1	0.50%	0%	15.1	30.76	1.6	0.022	0.138	21.00%	13:00	22:00
21	I	0.8:1	0.50%	0%	14.9	30.58	1.61	0.024	0.151	13.00%	12:40	21:00

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

Mezcla	Cemento	a/c	Rheobuild % en peso	Bentonita % en peso	Temperatura mezcla, °C	Fluidez Marsh (seg)	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Cohesión g/cm <sup>2</sup>	Cohesión (mm)	Sedimentación (2hrs)	Fragua inicial (hrs)	Fragua final (hrs)
22	I	0.75:1	1%	0%	15	30.5	1.63	0.021	0.129	10.00%	26:15:00	33:15:00
23	I	0.7:1	1%	0.50%	15.7	32.06	1.67	0.03	0.181	1.00%	10:15	17:15
24	I	0.9:1	1%	0.50%	14.9	30.99	1.58	0.021	0.132	13.00%	11:20	19:00
25	I	0.8:1	1%	0.50%	17	32.02	1.605	0.027	0.167	12.00%	10:40	20:00
26	I	0.75:1	0.50%	0.50%	19.1	33	1.65	0.044	0.264	2%	10:40	17:20
27	I	0.75:1	1%	0%	14.5	29.78	1.66	0.028	0.169	4.20%	10:40	19:00
28	I	0.75:1	0.50%	0%	16	30.37	1.66	0.028	0.17	3.60%	9:40	19:00
29	I	0.70:1	0.50%	0%	16	31.78	1.68	0.026	0.155	2.90%	9:30	17:40
30	I	0.65:1	0.50%	0%	17.1	31.9	1.72	0.039	0.227	2.20%	9:20	17:00
31	I	0.80:1	0.50%	0%	15.6	29.28	1.63	0.018	0.111	18%	8:40	19:00
32	I	0.9:1	0.50%	0.50%	20.5	31.56	1.585	0.032	0.199	4%	9:20	22:20
33	I	0.85:1	0.50%	0.50%	19.5	31.82	1.59	0.034	0.212	3%	10:20	21:40

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

Mezcla	Cemento	a/c	Rheobuild % en peso	Bentonita % en peso	Temperatura mezcla, °C	Fluidez Marsh (seg)	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Cohesión g/cm <sup>2</sup>	Cohesión (mm)	Sedimentación (2hrs)	Fragua inicial (hrs)	Fragua final (hrs)
34	I	0.8:1	0.50%	0.50%	19.4	32.5	1.605	0.037	0.232	1.8	9:40	19:40
35	I	0.8:1	0.50%	0%	18.3	31.44	1.61	0.026	0.163	18%	10:20	21:20
36	I	0.75:1	0.50%	0%	19	32.41	1.655	0.026	0.159	4%	9:40	20:40
37	I	0.7:1	0.50%	0%	19	34.09	1.68	0.042	0.249	2%	9:00	19:40

**Tabla 6. 1** Ensayo de mezclas para lechadas de cemento. Fuente MWH, 2013.

Peso específico del cemento Andino IP      2.98 gr/cm<sup>3</sup>.

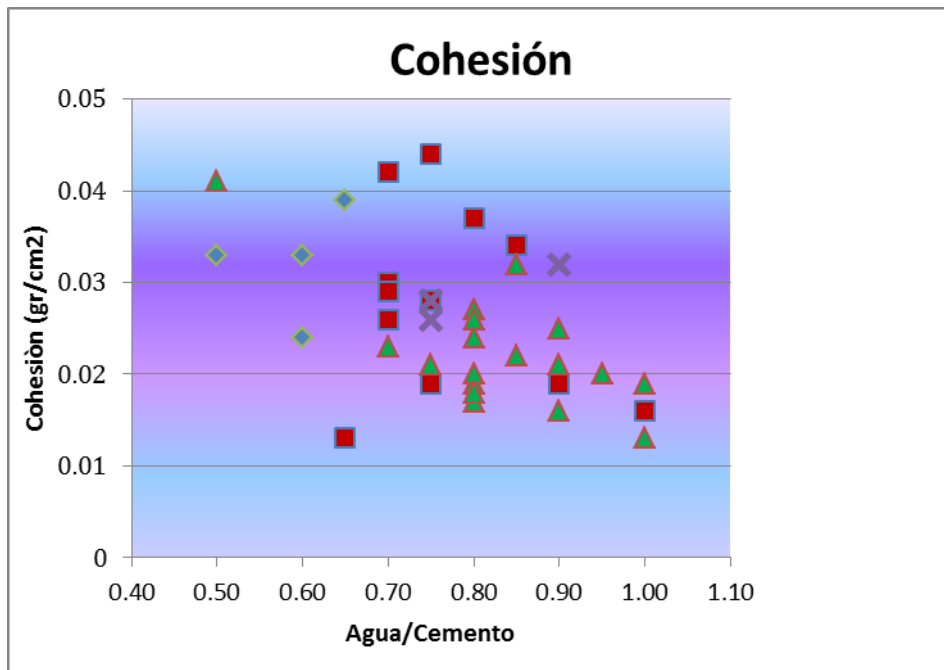
Pesos específico del cemento Andino tipo I    3.15 gr/cm<sup>3</sup>.

Pesos específico del Rheobuild 1000        1.21 gr/cm<sup>3</sup>

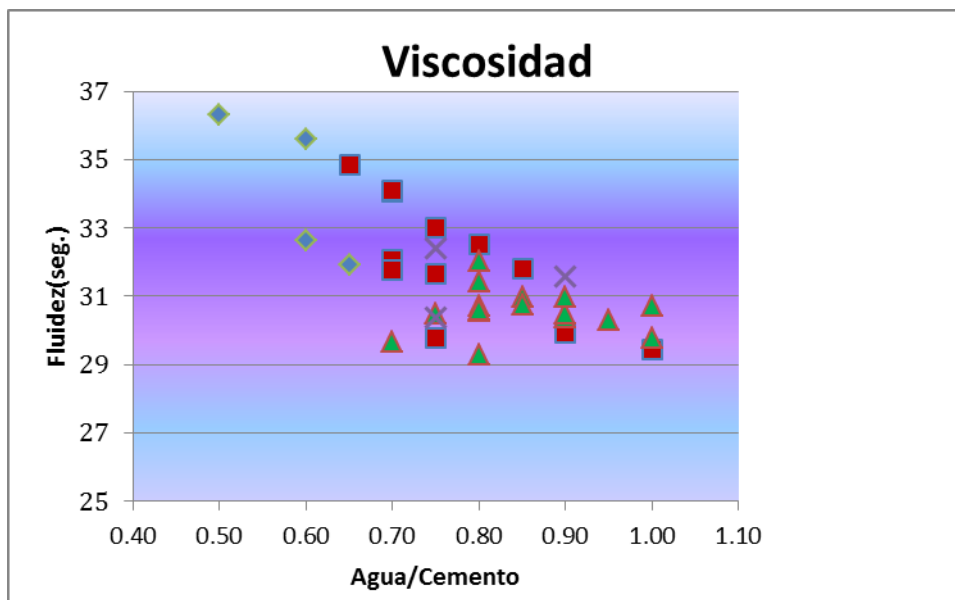
Pesos específico de bentonita sódica        2.5 gr/cm<sup>3</sup>

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto



**Figura 6. 2** Cohesión de mezcla. Fuente: MWH, 2013.



**Figura 6. 3** Viscosidad de mezcla. Fuente: MWH, 2013.



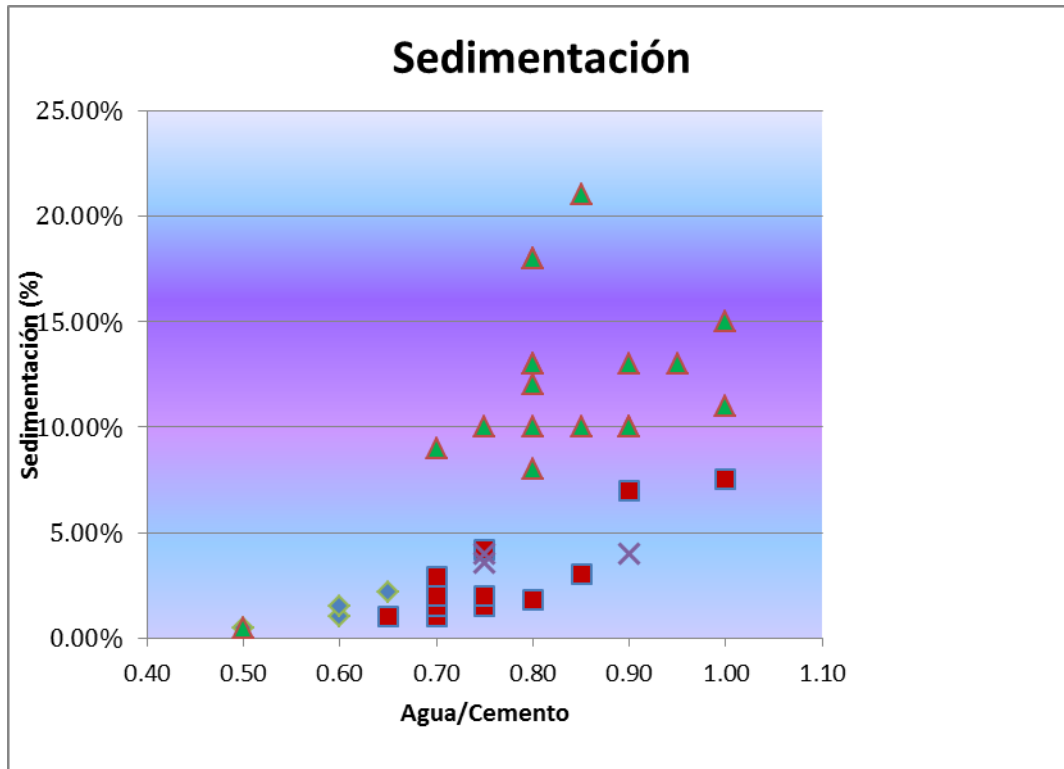


Figura 6. 4 Sedimentación de mezcla .Fuente: MWH, 2013.

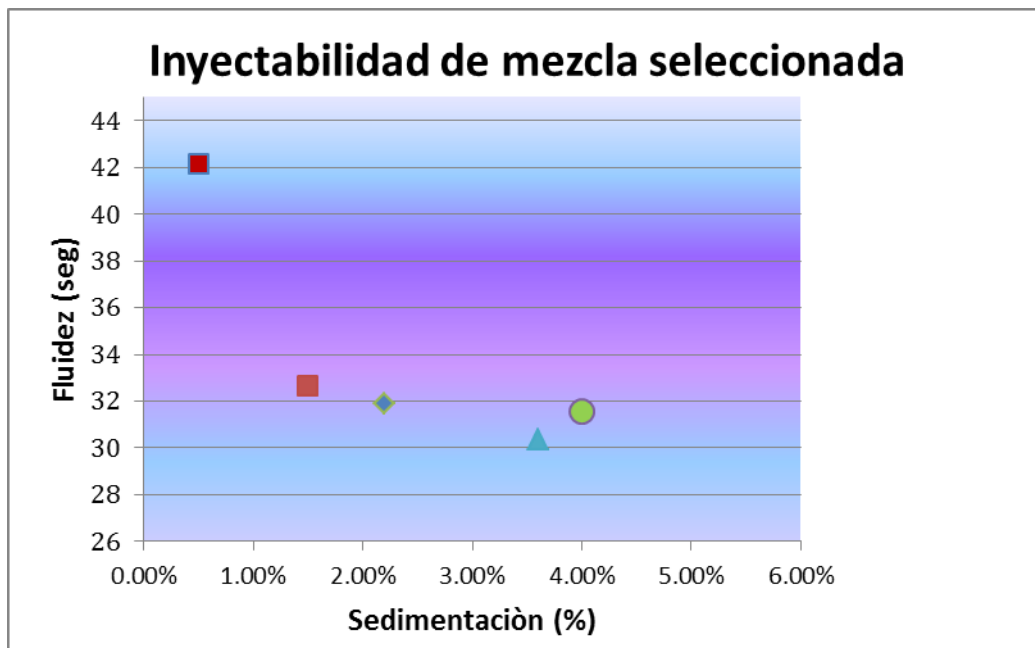


Figura 6. 5 Inyectabilidad de la mezcla seleccionada. Fuente: MWH, 2013.

#### 6.4.4.3 Selección de la mezcla de diseño

Las mezclas de diseño seleccionadas para las pruebas de inyección fueron:

- 0.9:1+0.5%+0.5% (a/c+Aditivo+Bentonita).
- 0.75:1+0.5% (a/c+Aditivo).
- 0.65:1+0.5%.
- 0.6:1+0.5%.
- 0.5:1+0.5%.

El agua usada es neutral, pH de  $7 \pm 1$ , no contiene elementos que sean dañinos al cemento.

La mezcla 0.75:1+0.5% de aditivo plastificante (Rheobuild 1000) es escogida como mezcla de partida porque contiene una alta fluidez de 32.41 segundos en el Cono de Marsh (fluidez de agua 27 seg), y una sedimentación menor a 4%.

Para toma alta, la mezcla seleccionada es 0.5:1 + 1 % de plastificante. Esta mezcla de lechada estable tiene una fluidez de 36.32 segundos con la viscosidad de Cono de Marsh y una sedimentación de 0.5% en 2 horas.

#### 6.4.4.4 Tabla de mezcla de diseño escogidas

Mezcla	a/c	a/c2	Rheobuild % en peso	Bentonita % en peso	T° mezcla	Fluidez Marsh	Densidad gr/cm3	Cohesión g/cm2	Cohesión (mm)	Sedimentación (2hrs)	Fragua inicial	Fragua final
18	0.6:1	0.60	1%	0%	17.4	32.64	1.76	0.024	0.134	1.50%	6:00	19:00
19	0.5:1	0.50	1%	0%	17.4	36.32	1.84	0.033	0.177	0.50%	7:40	11:00
30	0.65:1	0.65	0.50%	0%	17.1	31.9	1.72	0.039	0.227	2.20%	9:20	17:00
32	0.9:1	0.90	0.50%	0.50%	20.5	31.56	1.585	0.032	0.199	4%	9:20	22:20
36	0.75:1	0.75	0.50%	0%	19	32.41	1.655	0.026	0.159	4%	9:40	20:40

**Tabla 6. 2** Diseños de mezcla seleccionados. Fuente MWH, 2013.

- Peso específico del cemento Andino IP      2.98 gr/cm3.
- Pesos específico del cemento Andino tipo I      3.15 gr/cm3.
- Peso específico del Rheobuild 1000      1.21 gr/cm3.
- Pesos específico de bentonita sódica      2.5 gr/cm3.

#### 6.4.4.5 Mezclas aprobadas para la inyección de mortero

Mezcla	a/c	Rheobuild % en peso	Bentonita % en peso	T° mezcla	Fluidez Marsh	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Cohesión g/cm <sup>2</sup>	Cohesión (mm)	Sedimentación (2hrs)	Fragua inicial	Fragua final
19	0.5:1	1%	0%	17.4	36.32	1.84	0.033	0.177	0.50%	7:40	11:00
30	0.65:1	0.50%	0%	17.1	31.9	1.72	0.039	0.227	2.20%	9:20	17:00
36	0.75:1	0.50%	0%	19	32.41	1.655	0.026	0.159	4%	9:40	20:40

**Tabla 6. 3** Diseños de mezclas aprobados. Fuente: MWH, 2013.

Se restringe el uso de bentonita porque la inyección de lechada de cemento servirá para impermeabilizar y solidificar la fundación de la presa.

---

## **6.4.5 PRUEBAS DE GROUT**

Se realizaron pruebas de inyección para definir los parámetros de inyección para la construcción de la cortina.

### **6.4.5.1 Pruebas de inyección IN-SITU**

Las pruebas de inyección se llevaron a cabo en los taladros de exploración en la fundación de la presa, siendo: IMD-19, IMD 31, IMI 30, IMI 18. El equipo de inyección consta de: Bomba de inyección tipo Moyno, mezclador, agitador y registro electrónico en tiempo real. Las pruebas de lechada fueron realizadas en todos los taladros de investigación, ubicados en el eje de la presa.

Los taladros fueron inyectados por etapas de 5 metros. Los taladros fueron lavados y rellenados de acuerdo a especificación técnica. La lechada se verificó y controló en tiempo real, se llevaron a cabo las pruebas de presión de inyección, llegando a 15 bares. Durante las pruebas no se produjo hidrofracturamiento.

Cemento: Tipo I 3.15 gr/cc																			
Tipo de aditivo Rheobuild 1000 1.21gr/cc																			
Código de inyección: 0.75:1 ±0.5%																			
# de Taladro	Tramo (m)				Mezcla inyectada				Presión (bar)		Caudal (l/min)		CONTROL DE CALIDAD						
	De (Sup.)	A (Inf.)	Ce (bls)	Ad (kg)	Vol (l)	Ce (kg)	Ad (kg)	Abs (kg/m)	Inicial	Final	Inicial	Final	T mezcla °C	Fluidez (s)	Sedim. %	Densid. g/cc	Cohesión gr/cm2	Cohesión (mm)	
	IMI 18	14.00	17.65	14	2.98	394.51	368.15	1.84	100.86	0.07	15.15	0.17	0.60	15.9	30	4	1.625	0.031	0.191
10.00		14.00	19.84			18.51	0.09	4.63	0.00	10.08	0.26	0.35							
5.00		10.00	36.31			33.88	0.17	6.78	0.03	5.23	0.17	0.60							
1.00		5.00	38.47			35.90	0.18	8.97	0.00	2.96	0.17	0.43							
IMI 30	30.00	33.00	12	2.55	546.5	509.99	2.55	170.00	0.03	0.50	0	0.52	15	31	4	1.62	0.036	0.224	
	30.00	33.00			8	1.70	182.74	170.53	0.85	56.84		15.21							
	26.00	30.00			67.36	62.86	0.31	15.71	0.00	15.28	0.00	0.86							
	20.00	26.00			68.74	64.15	0.32	10.69	0.00	15.57	0.17	0.69							
	15.00	20.00			26.31	24.55	0.12	4.91	0.00	15.15	0.17	0.52							
	10.00	15.00			47.09	43.94	0.22	8.79	0.07	10.30	0.17	0.43							
	5.00	10.00			23.2	21.65	0.11	4.33	0.00	5.40	0.17	0.69							
	1.00	5.00			20.36	19.00	0.09	4.75	0.00	3.06	0.00	0.6							
IMD 19	11.00	16.00	8	1.7	35.28	32.92	0.16	6.58	0.00	10.21	0.00	0.78	19	31	4.7	1.63	0.037	0.224	
	6.00	11.00			12.42	11.59	0.06	2.32	0.00	0.26	5.07	0.86							
	1.00	6.00			8.37	7.81	0.04	1.56	0.16	3.25	0.26	0.60							
IMD 31	25.00	30	10	2.13	80.47	75.09	0.38	15.02	0	15.28	0	0.43	18.9	32	5	1.62	0.036	0.224	
	20.00	25			31.05	28.98	0.14	5.80	0.13	15.18	0	0.52							
	15.00	20			19.32	18.03	0.09	3.61	0	14.98	0	0.95							
	10.00	15			29.67	27.69	0.14	5.54	0	10.11	0.09	0.6							
	6.00	10			14.75	13.76	0.07	3.44	0.2	5.72	0	0.69							
	1.00	6			15.75	14.70	0.07	2.94	0.26	3.19	0.09	0.26							

**Tabla 6. 4** Registro de pruebas de inyección in situ .Fuente: MWH, 2013.

En base a la observación de taladros de exploración, las presiones de cierre, límite de presión máxima en bar (P<sub>máx</sub>) y volúmenes máximos expresados en litros (V<sub>máx</sub>) fueron seleccionados para la producción de lechada.

A continuación se resume las absorciones registradas en los taladros de exploración.

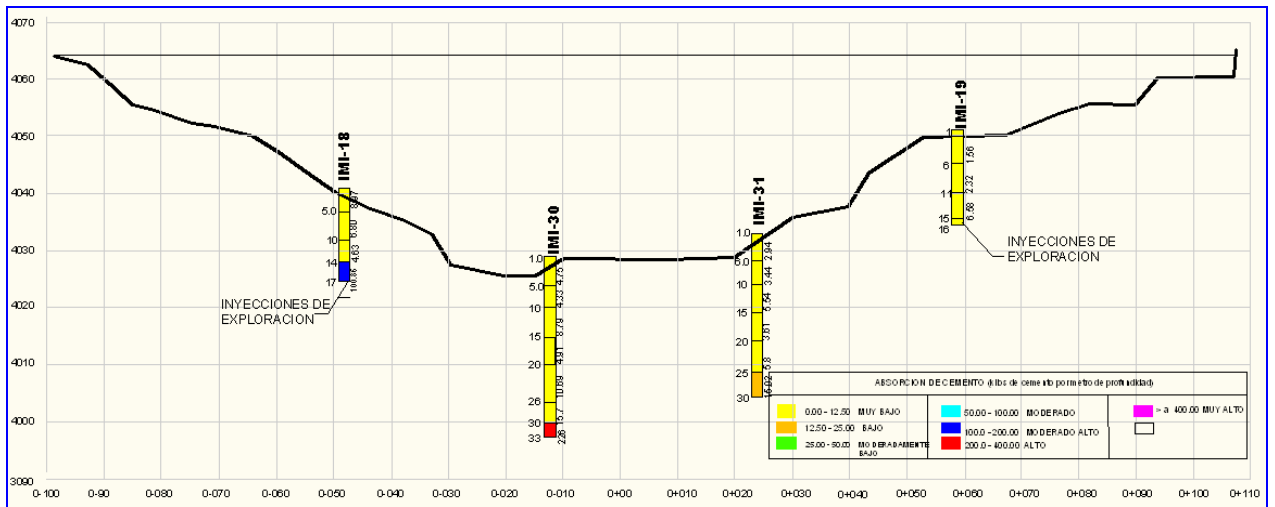


Figura 6.6 Absorciones registradas en los taladros de exploración.

### 6.4.5.2 Ploteo de absorciones

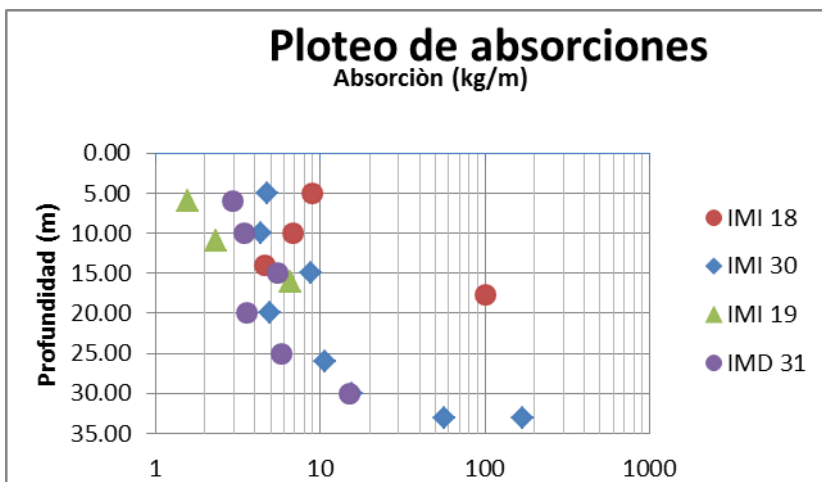


Figura 6.7 Absorciones de cemento en taladros de investigación. Fuente MWH, 2013.

### 6.4.6 ESTRUCTURA DE LA CORTINA DE MORTERO

Cada etapa de inyección se completa cuando la presión máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) y/o volumen máximo hayan alcanzado el límite superior. Se establecieron presiones manométricas en función de las investigaciones geológicas (Logeos, RQD) y las investigaciones geotécnicas (ensayos de Lugeon).

#### 6.4.6.1 Presiones manométricas usadas para los taladros de investigación

Profundidad (m)	Presión manométrica (Bar)
0 – 5	3
5 – 10	5
10 – 15	10
Mayor a 15	15

**Tabla 6. 5** Presiones manométricas para inyección de lechada en los taladros de investigación .Fuente: MWH, 2013.

#### 6.4.6.2 Presiones manométricas recomendadas

Profundidad (m)	Presión manométrica (Bar)
0 – 5	2.5
5 – 10	4
10 – 15	8
Mayor a 15	12

**Tabla 6. 6** Presiones manométricas recomendadas para inyecciones de presa. Fuente: MWH, 2013.



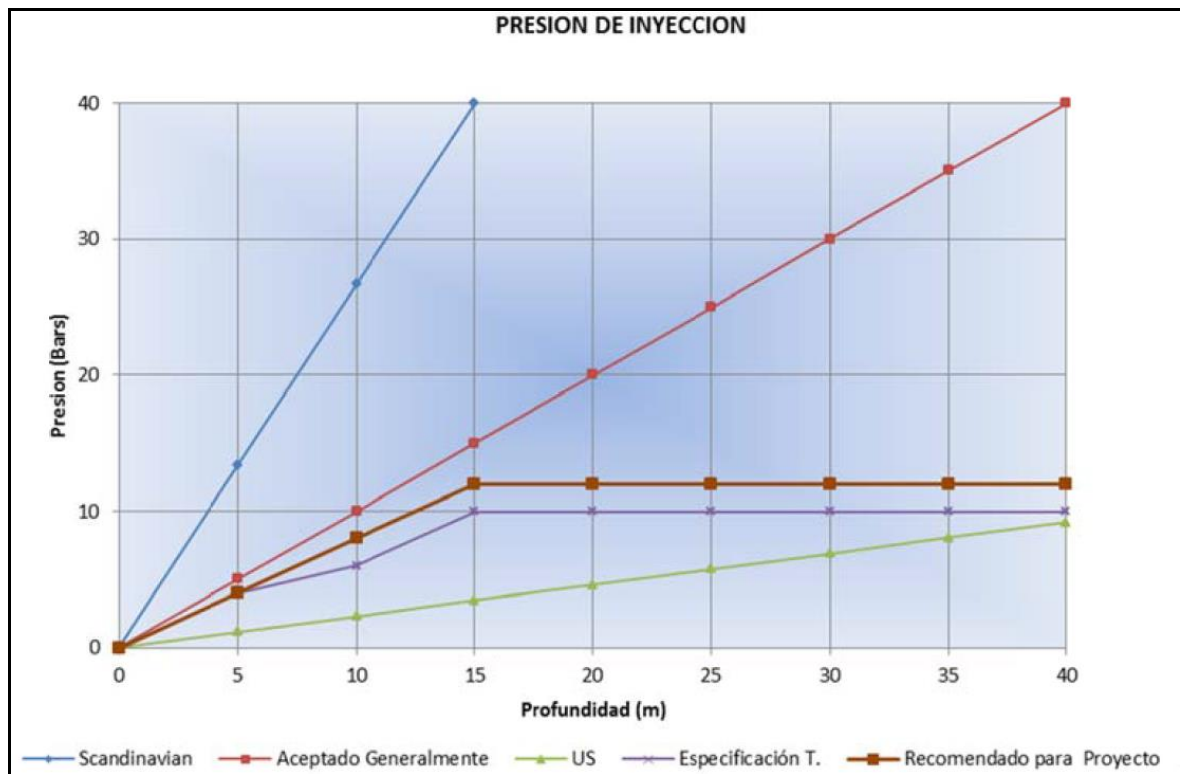
### 6.4.6.3 Volumen máximo

El volumen máximo será de 300 litros/metro para las tres mezclas de lechada. El cambio de lechada será cada 100 litros.

### 6.4.7 CRITERIOS DE CIERRE

La presión máxima (PM) y el volumen máximo ( $V_{m\acute{a}x}$ ) son parámetros que definen la permeabilidad y la consolidación de la roca. Con presiones de inyección más altas la permeabilidad y consolidación de la roca no se considera posible. De exceder los límites de presión, es posible ocasionar un hidrofracturamiento (se produce cuando la resistencia a la tracción y las tensiones de confinamiento del manto rocoso fueron superadas).

Generalmente, la inyección se inicia con presiones bajas, verificando la existencia de fracturas y conexiones hasta alcanzar la totalidad de la presión máxima.



**Figura 6. 8** Presiones de inyección de lechada recomendado para la presa. Fuente: MWH, 2013.

---

## 6.4.8 MONITOREO DE GROUT

El control y seguimiento de los parámetros de la inyección en tiempo real es esencial, debido a que durante la inyección los parámetros presión, caudal, y tiempo son visualizados y es posible realizar ajustes en la válvulas de presión y caudal a fin de lograr una inyección óptima. Si la presión aumenta y el caudal disminuye la inyección debe continuar hasta alcanzar la presión de rechazo. Si la presión se mantiene constante y el caudal constante o se incrementa y se llega al volumen máximo establecido, entonces cambiar la mezcla. Se considera taladro inyectado cuando se alcanza la presión de rechazo y se mantiene constante durante 5 minutos con un caudal menor a 1 litro/minuto. La presión de inyección se incrementará de manera uniforme hasta la presión máxima admisible, sólo cuando el caudal es significativo disminuir la presión o mantenerlo constante. El aumento brusco de presión no está permitido. La inyección de un tramo o etapa deberá durar mínimo 15 minutos.

## 6.5 ANÁLISIS DE FILTRACIONES EN LA PRESA DE RELAVES

Los relaves producidos por la planta de procesamiento se almacenan en el Tailing Storage Facilities (TSF) ubicado al norte de la planta. La presa realiza su crecimiento mediante el método de la línea central (CL).

### 6.5.1 METODOLOGÍA

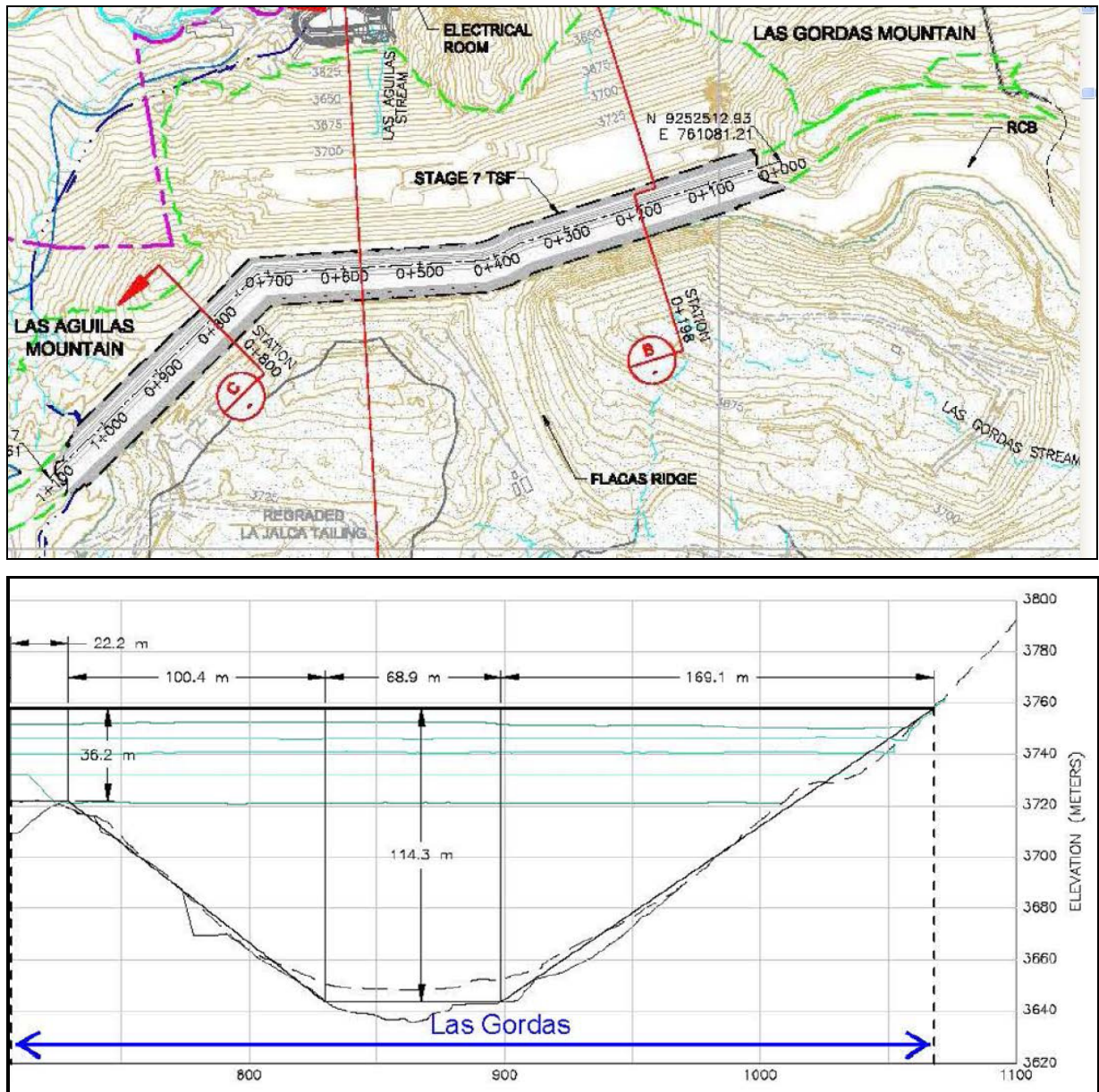
Los análisis de filtración tipo Estacionario se realizó en el Seep/W. Se debe considerar las fechas de las diferentes etapas constructivas, información histórica de filtraciones disponibles y cotas de embalse, según:

ETAPA CONSTRUCCION	COTA CRESTA	INICIO	FIN	COTA EMBALSE SEEP/W	INFORMACION FILTRACION HISTORICA
Fundación	3640	----	Jun 2007	-----	-----
1	3720	Jun 2007	Sep 2008	3680	NO
2	3720	Jun 2007	Sep 2008	3720	NO
3	3738	May 2009	Abr 2010	3732	SI
4	3740	Mar 2010	Ago 2010	3740	SI
5	3746	Ago 2010	Sep 2011	3746	SI
6	3752	Nov 2011	Ago 2012	3752	SI
7	3758	May 2012	Oct 2012	3758	NO
8	3760	Oct 2012	Ene 2014	3760	NO

**Tabla 6. 6** Consideraciones en las etapas constructivas, cotas de embalse SEEP/w, información histórica disponible. Fuente: MWH, 2013.

### 6.5.2 GEOMETRIA

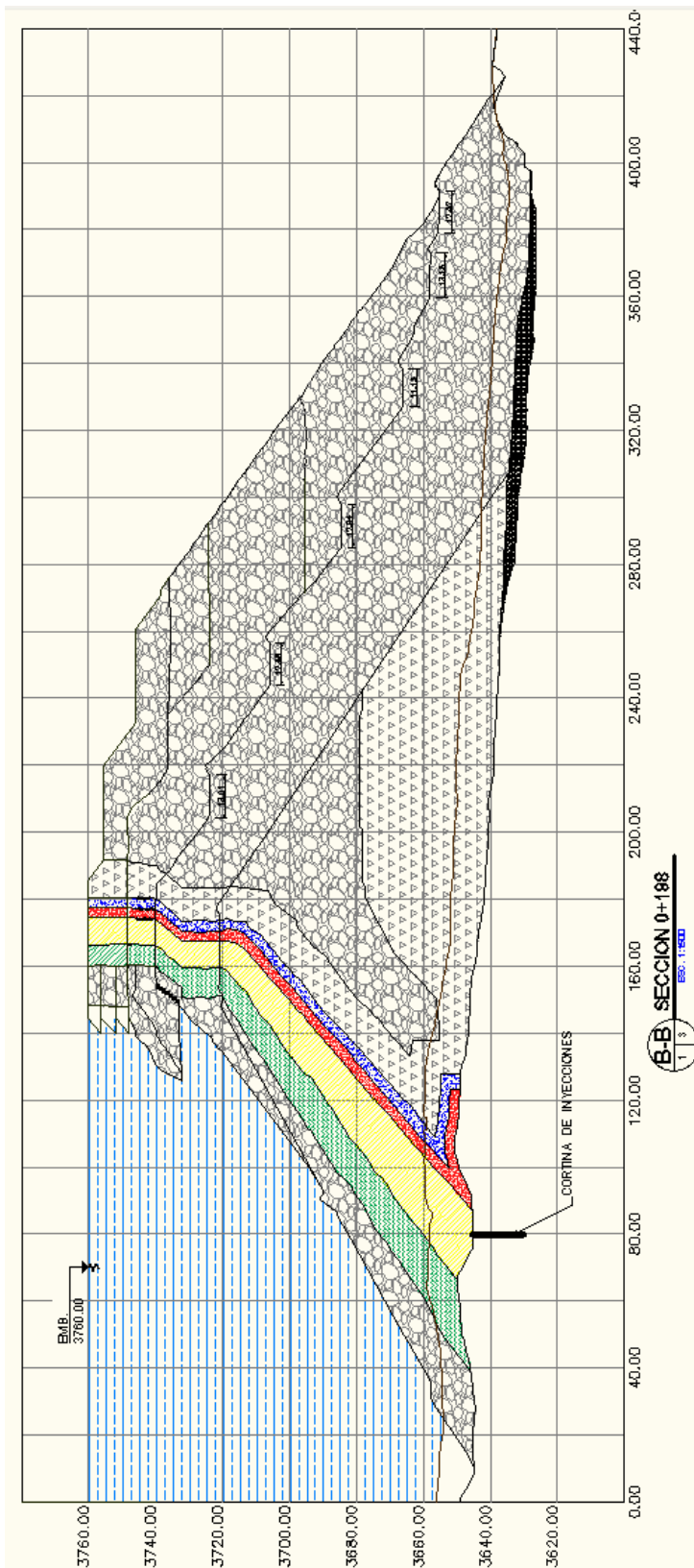
El estimado de filtraciones se realiza en donde se presenta la mayor altura de la presa Las Gordas (Progresiva 0+198). La cresta se encuentra en la cota 3760 m.s.n.m, y la cota inferior en la fundación de la presa es 3640 m.s.n.m. En la Figura 7.9 se presenta una vista en planta y corte de la presa de relaves. La cortina de inyección posee una profundidad de 15 metros ubicada en el eje del núcleo arcilloso.



**Figura 6. 9** Presa Las Gordas (Progresiva 0+198).Vista en Planta y Corte. Fuente: MWH, 2013.

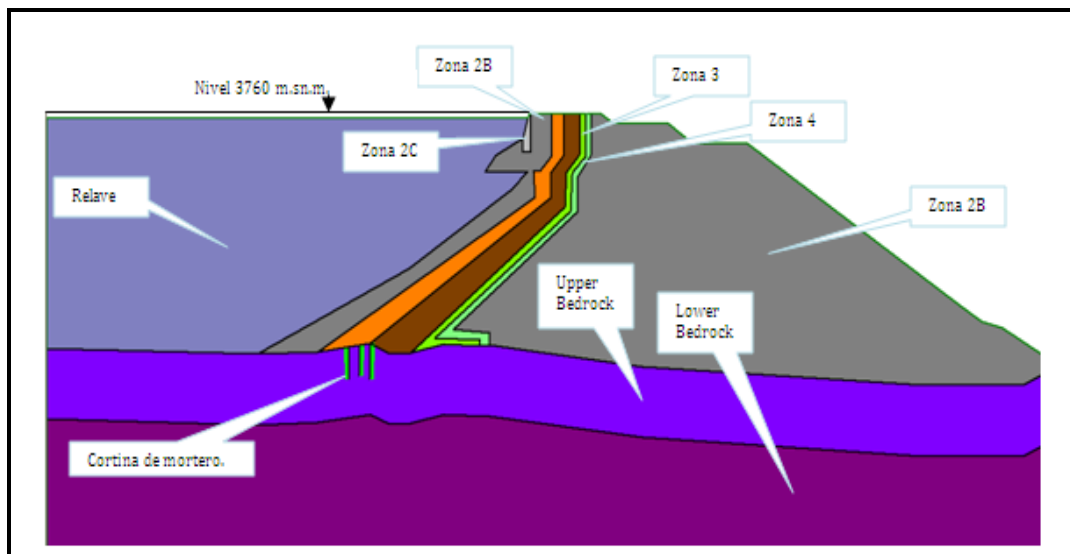
Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto



Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto



**Figura 6. 10** Distribución de zonas presa Las Gordas. Progresiva 0+198. Fuente MWH, 2013.

### 6.5.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

La Tabla 6.8 presenta un resumen de las propiedades hidráulicas de los materiales.

Material	Conductividad hidráulica saturado (m/s)	Modelo hidráulico
Z1 núcleo impermeable	$k_h : 1 \times 10^{-8}$ $\frac{k_v}{k_h} : 0.70$	Saturado/No saturado
Z5 núcleo impermeable	$k_h : 1 \times 10^{-8}$ $\frac{k_v}{k_h} : 0.70$	Saturado/No saturado
Zona 2B,2C (rockfill)	$k_h : k_v 1 \times 10^{-2}$	Saturado
Zona 3 (filtro)	$k_h : k_v 1.65 \times 10^{-4}$	Saturado/No saturado
Zona 4 (filtro)	$k_h : k_v 1.16 \times 10^{-3}$	Saturado/No saturado
Cortina de mortero:	$k_h : k_v 1 \times 10^{-7}$	Interface
Fundación	$k_h : k_v 1 \times 10^{-7}$	Saturado/No saturado

**Tabla 6. 7** Propiedades hidráulicas para el análisis de filtraciones. Fuente: MWH, 2013.

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

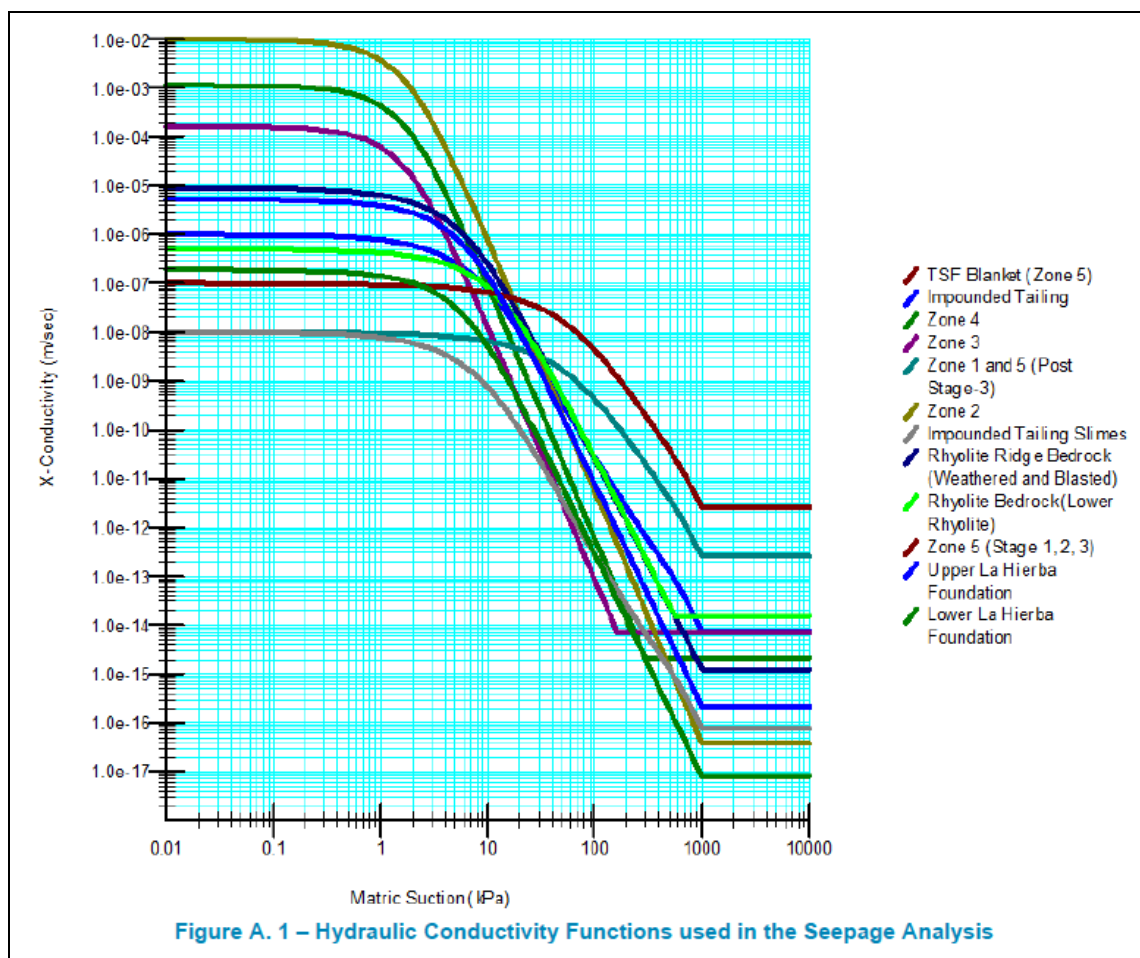


### 6.5.4 CONDICIONES DE CONTORNO

Aguas arriba, la cota superior del embalse representa una condición de frontera de carga constante. Aguas abajo, se considera posibles condiciones de frontera los puntos donde la presión de agua sea cero, siendo estos en el contacto del lecho rocoso con la fundación hasta llegar a las instalaciones de los LVU (low volumen underflow).

#### Parámetros hidráulicos de material No saturados

Como se describe en el punto 6.5.3 todos los materiales fueron analizados utilizando el modelamiento saturado/no saturado en el  $Seep/W$ , según Figura 6.11.



**Figura 6. 11** Funciones de conductividad hidráulica usado para el análisis de filtraciones.(Fuente: MWH, 2013).

## Condiciones de frontera

### ➤ Condiciones de contorno aguas arriba

Para análisis de filtraciones se considera el máximo nivel de embalsamiento de la presa.

### ➤ Condiciones de contorno aguas abajo

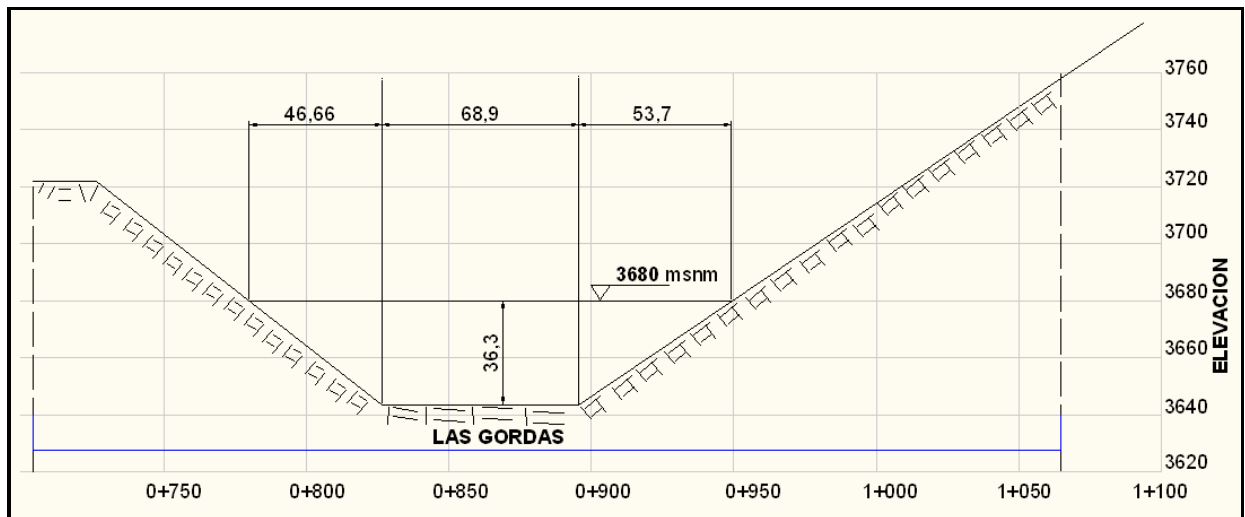
Se considera potencial filtración con presión de poros igual a cero.

Para Las Gordas, se tiene previsto la aparición de filtraciones en la poza de colección aguas debajo de la presa.

## 6.5.5 ANCHO EFECTIVO Y FILTRACIONES ESTIMADAS EN EL SEEP/W

El ancho efectivo se estima según su sección transversal:

**COTA: 3680 m.s.n.m.**



Ancho efectivo (m) :

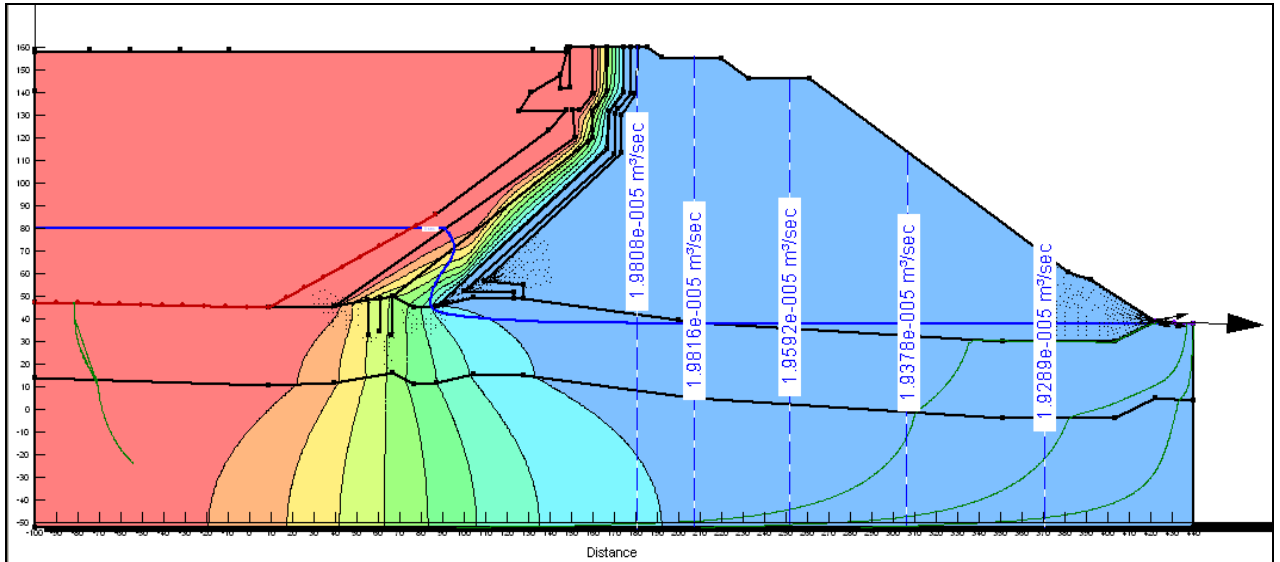
Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto



$$= 68.9 + 53.70 \left( \frac{36.3 + 0}{2} \right) / 36.3 + 46.66 \left( \frac{36.3 + 0}{2} \right) / 36.3$$

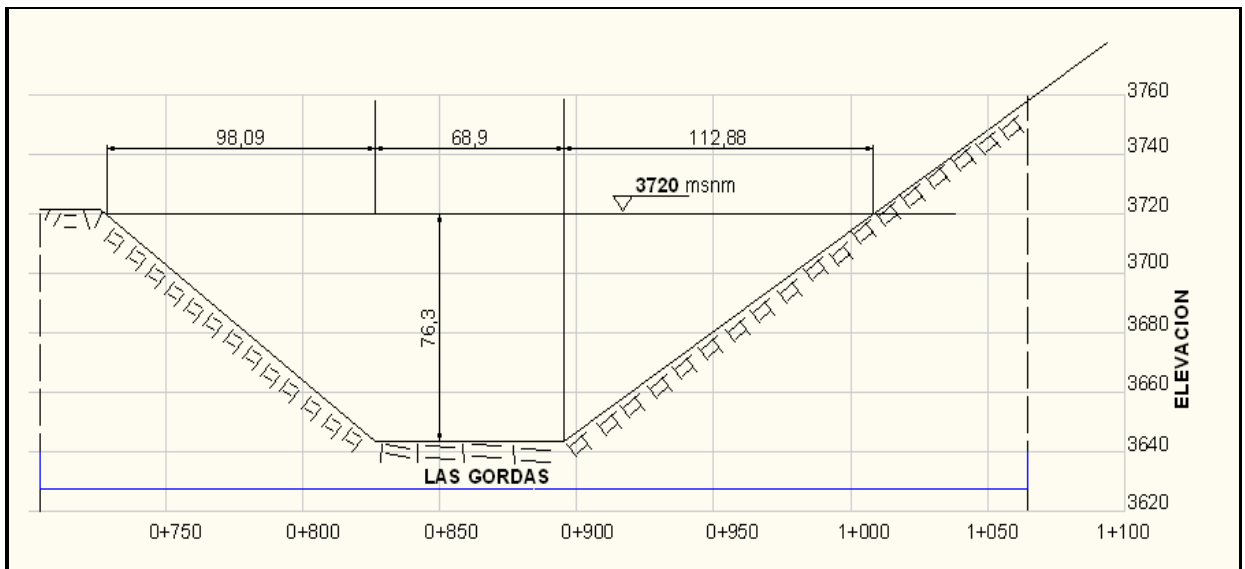
$$= 145.93 \text{ m.}$$



Según el SEEP/W tenemos una filtración de:  $1.9289 \times 10^{-05} \text{ (m}^3\text{/s/m)}$

Siendo el flujo total:  $1.9289 \times 10^{-05} \text{ (m}^3\text{/s/m)} \times 145.93 \text{ (m)} = 0.00281 \text{ (m}^3\text{/s)} = 2.81 \text{ (l/s)}$ .

**COTA: 3720 m.s.n.m.**



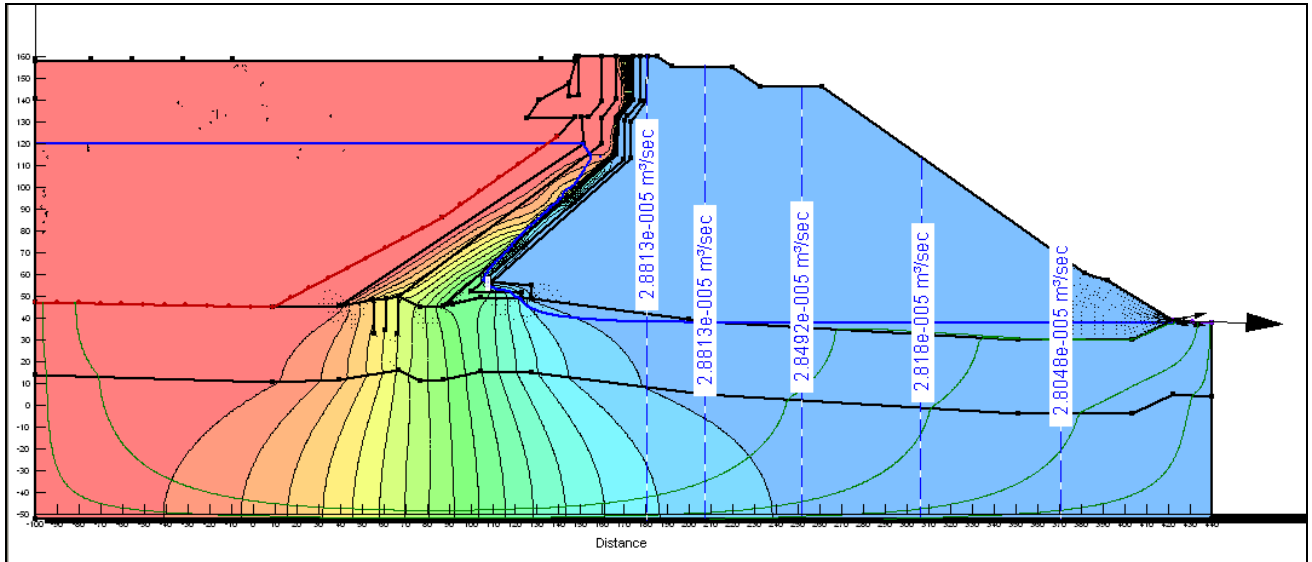
Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

Ancho efectivo (m) :

$$= 68.9 + 112.88 \left( \frac{(76.3 + 0)}{2} \right) / 76.3 + 98.09 \left( \frac{(76.3 + 0)}{2} \right) / 76.3$$

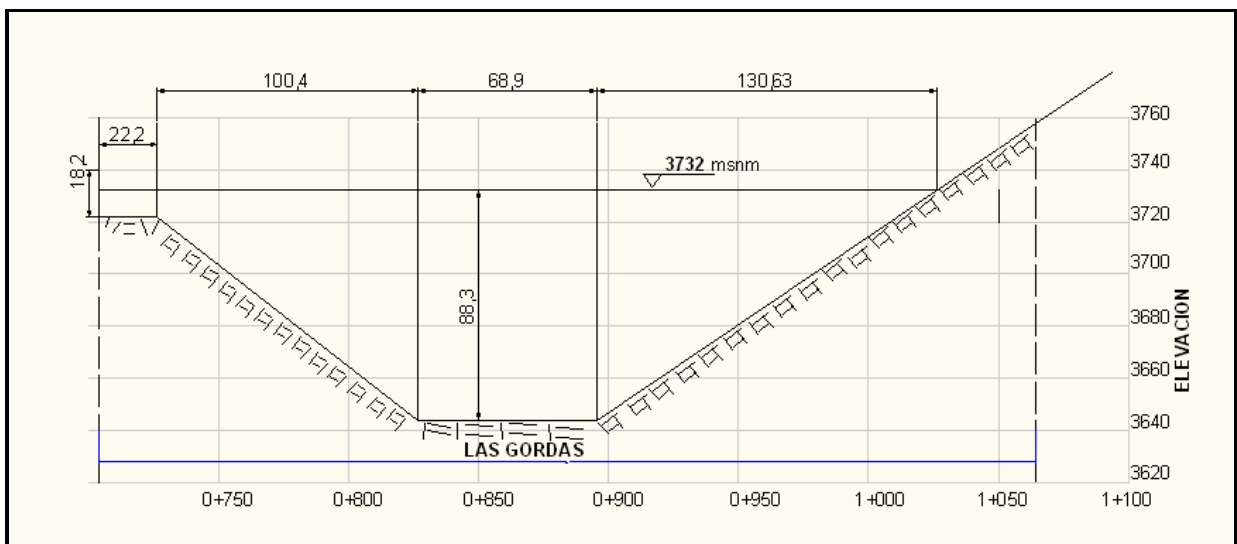
$$= 174.38 \text{ m.}$$



Según el SEEP/W tenemos una filtración de:  $2.8048 \times 10^{-05} \text{ (m}^3\text{/s/m)}$

Siendo el flujo total:  $2.8048 \times 10^{-05} \text{ (m}^3\text{/s/m)} \times 174.38 \text{ (m)} = 0.00489 \text{ (m}^3\text{/s)} = 4.89 \text{ (l/s)}$ .

**COTA: 3732 m.s.n.m.**

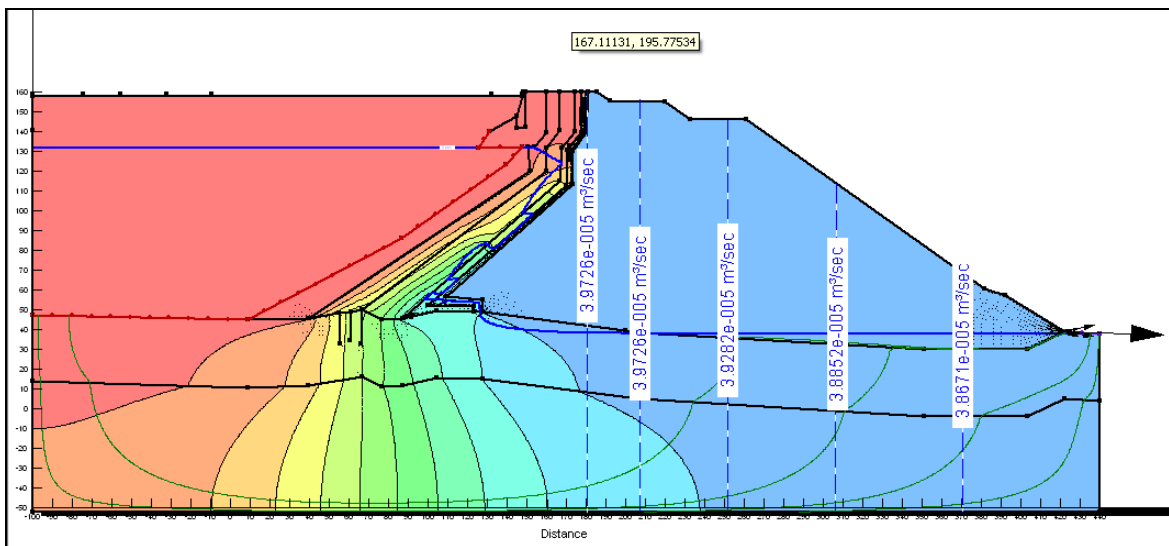


Ancho efectivo

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

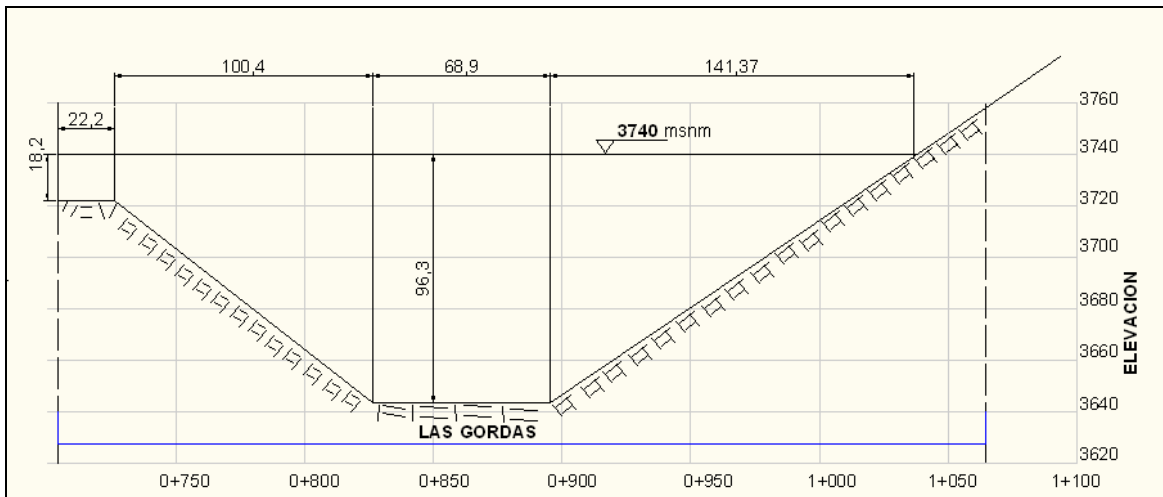
$$\begin{aligned} &= 68.9 + 130.63 \left( \frac{88.3 + 0}{2} \right) / 88.3 + 100.4 \left( \frac{88.30 + 10.2}{2} \right) / 88.3 + 22.2 (10.2 / 88.30) \\ &= 192.77 \text{ m.} \end{aligned}$$



Según el SEEP/W tenemos una filtración de:  $3.8671 \times 10^{-05} \text{ (m}^3/\text{s/m)}$ .

Siendo el flujo total:  $3.8671 \times 10^{-05} \text{ (m}^3/\text{s/m)} \times 192.77 \text{ (m)} = 0.00745 \text{ (m}^3/\text{s)} = 7.45 \text{ (l/s)}$ .

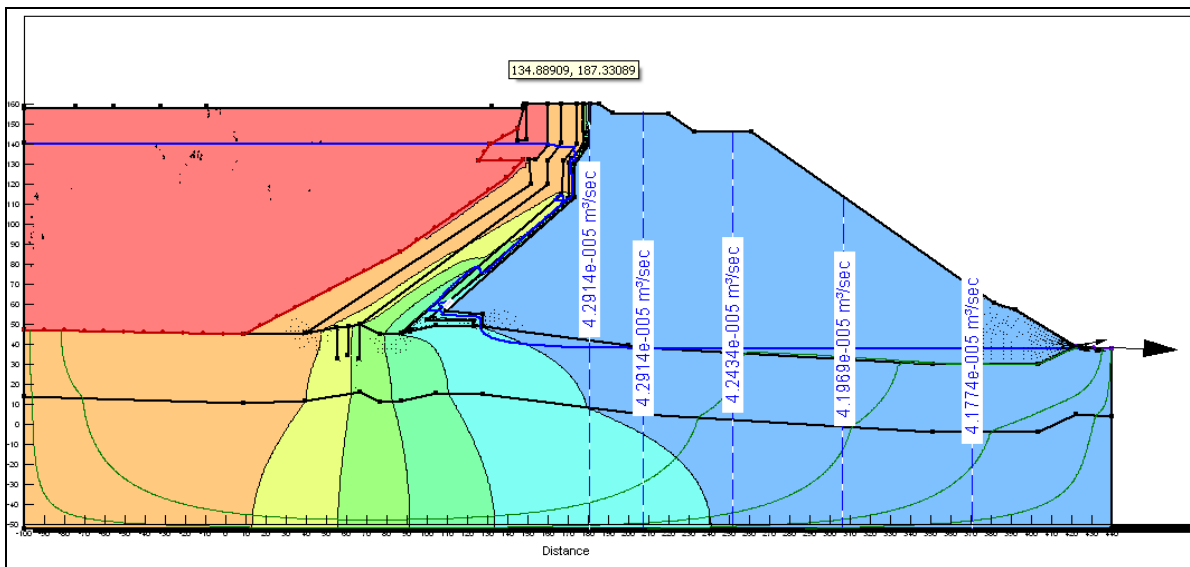
**COTA: 3740 m.s.n.m.**



Ancho efectivo (m) :

$$= 68.9 + 141.37 \left( \frac{96.3 + 0}{2} \right) / 96.3 + 100.4 \left( \frac{96.3 + 18.2}{2} \right) / 96.3 + 22.2 (18.2 / 96.3)$$

$$= 203.45 \text{ m.}$$



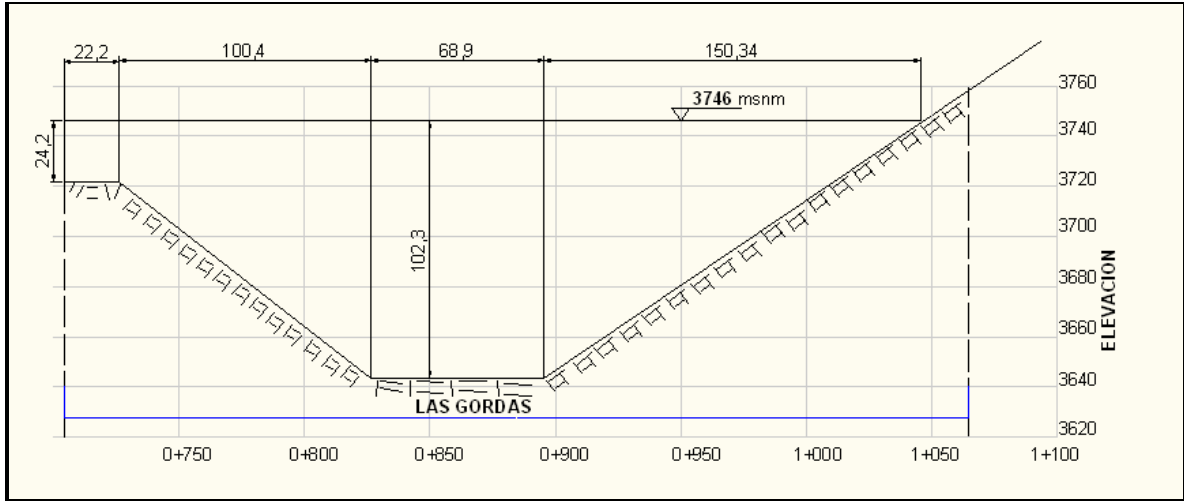
Según el SEEP/W tenemos una filtración de:  $4.1774 \times 10^{-05} \text{ (m}^3/\text{s/m)}$ .

Siendo el flujo total:  $4.1774 \times 10^{-05} \text{ (m}^3/\text{s/m)} \times 203.45 \text{ (m)} = 0.00849 \text{ (m}^3/\text{s)} = 8.49 \text{ (l/s)}$ .

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

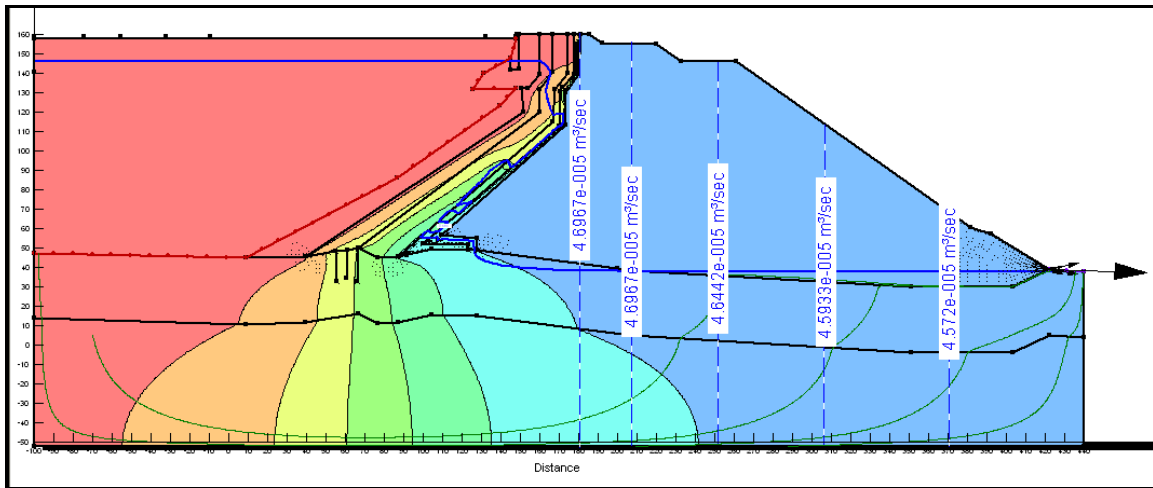
**COTA: 3746 m.s.n.m.**



Ancho efectivo (m) :

$$= 68.9 + 150.34 \left( \frac{102.3 + 0}{2} \right) / 102.3 + 100.4 \left( \frac{102.3 + 24.2}{2} \right) / 102.3 + 22.2 (24.2 / 102.3)$$

$$= 211.39 \text{ m.}$$



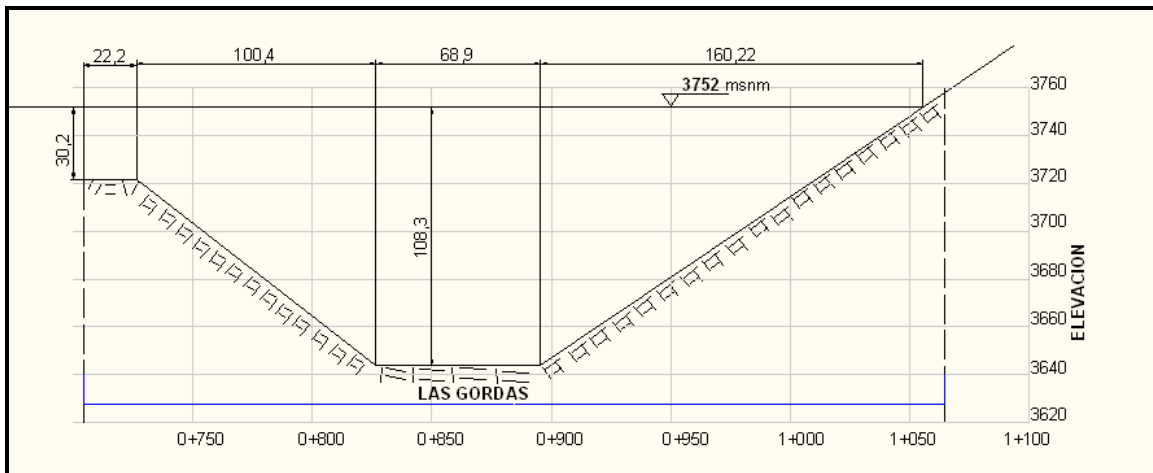
Según el SEEP/W tenemos una filtración de:  $4.5720 \times 10^{-05} \text{ (m}^3\text{/s/m)}$ .

Siendo el flujo total:  $4.5720 \times 10^{-05} \text{ (m}^3\text{/s/m)} \times 211.39 \text{ (m)} = 0.00966 \text{ (m}^3\text{/s)} = 9.66 \text{ (l/s)}$ .

**COTA: 3752 m.s.n.m.**

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

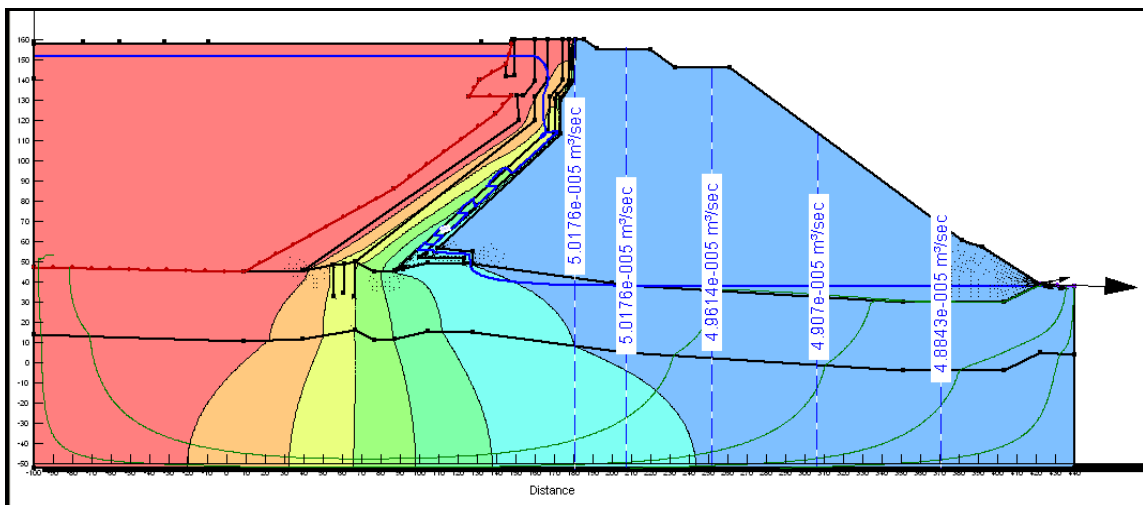
Collado Medina, César Augusto



Ancho efectivo (m) :

$$= 68.9 + 160.22 \left( \frac{(108.3 + 0)}{2} / 108.3 \right) + 100.4 \left( \frac{(108.3 + 30.2)}{2} / 108.3 \right) + 22.2 \left( \frac{30.2}{108.3} \right)$$

$$= 219.39 \text{ m.}$$



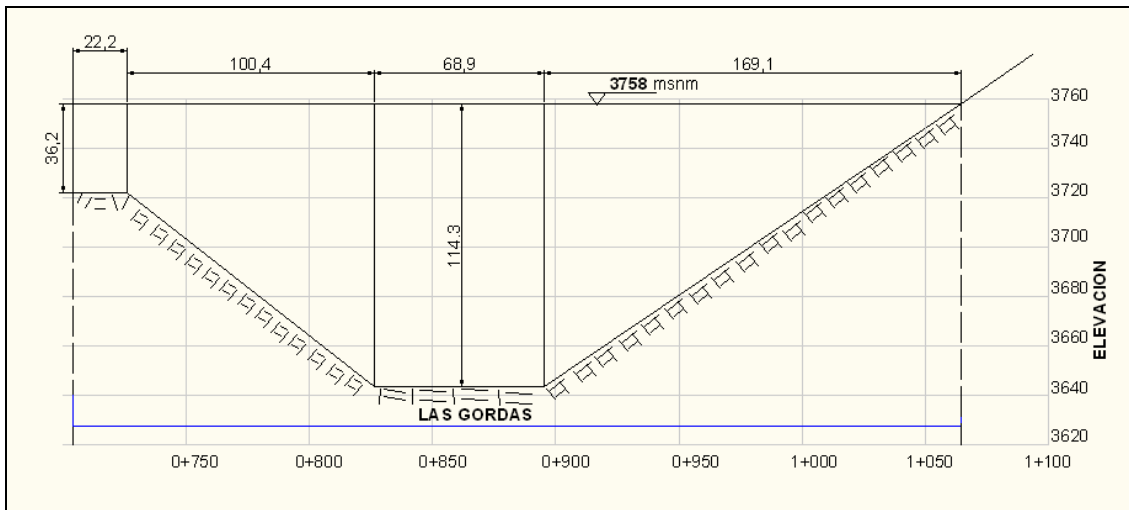
Según el SEEP/W tenemos una filtración de:  $4.8843 \times 10^{-05} (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$ .

Siendo el flujo total:  $4.8843 \times 10^{-05} (\text{m}^3/\text{s}/\text{m}) \times 219.39 (\text{m}) = 0.001071 (\text{m}^3/\text{s}) = 10.71 (\text{l/s})$ .

**COTA: 3758 m.s.n.m.**

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

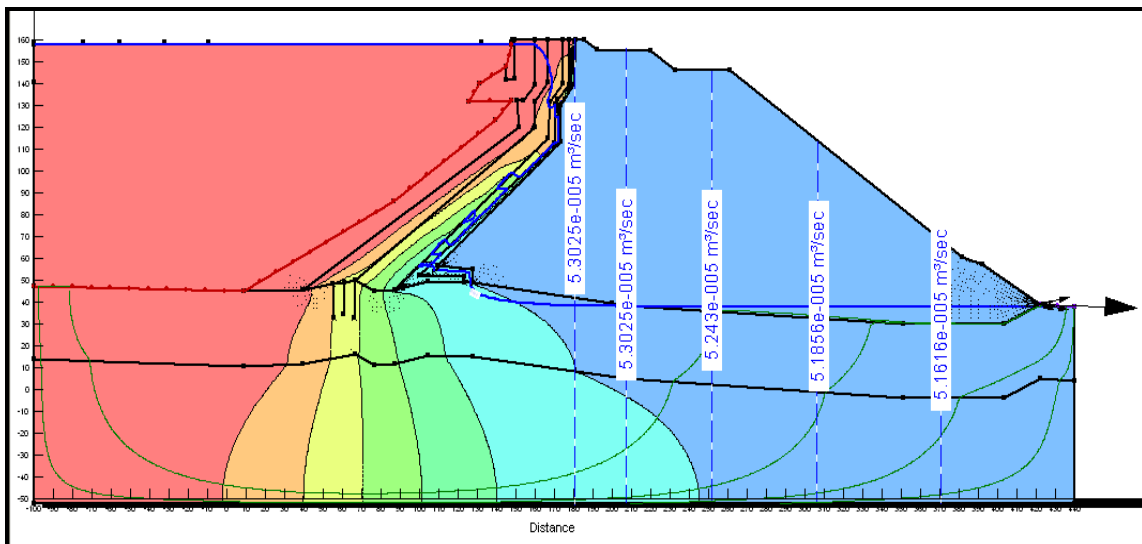
Collado Medina, César Augusto



Ancho efectivo (m) :

$$= 68.9 + 169.1 \left( \frac{114.3 + 0}{2} \right) / 114.3 + 100.4 \left( \frac{114.3 + 36.2}{2} \right) / 114.3 + 22.2(36.2/114.3)$$

$$= 226.2 \text{ m.}$$



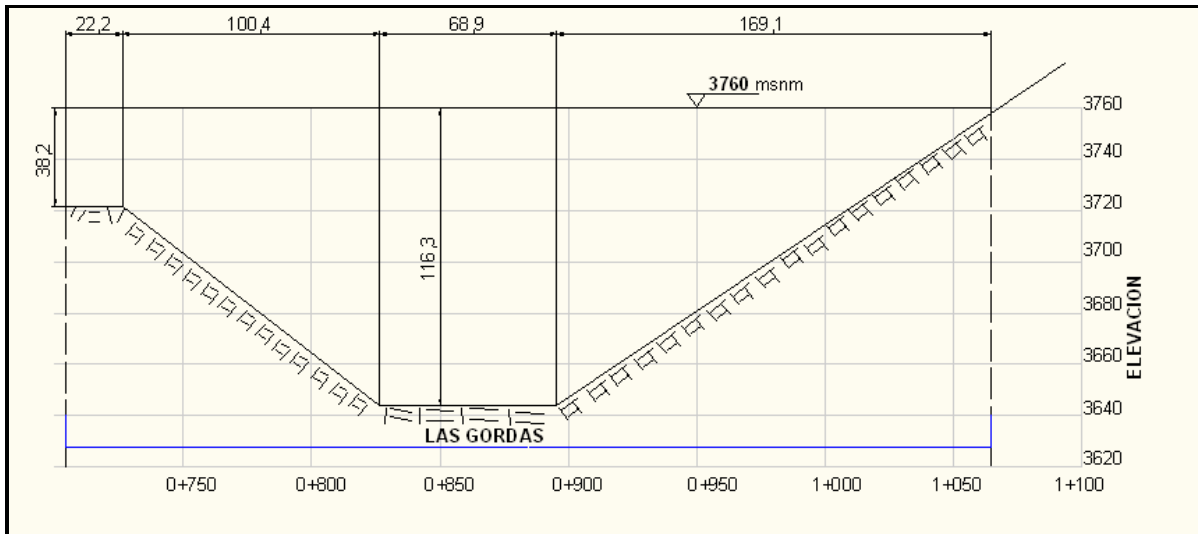
Según el SEEP/W tenemos una filtración de:  $5.1616 \times 10^{-05} \text{ (m}^3/\text{s/m)}$ .

Siendo el flujo total:  $5.1616 \times 10^{-05} \text{ (m}^3/\text{s/m)} \times 226.2 \text{ (m)} = 0.01167 \text{ (m}^3/\text{s)} = 12.31 \text{ (l/s)}$ .

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

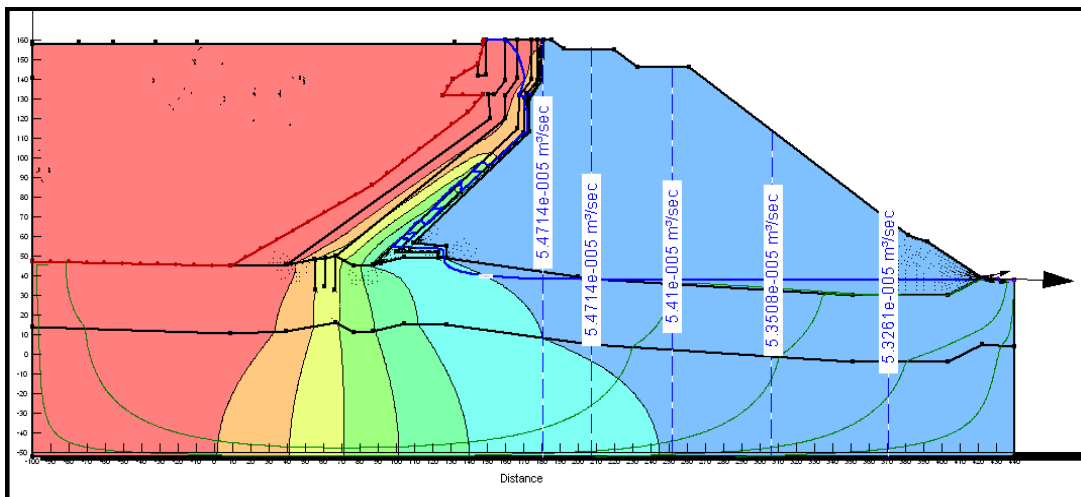
**COTA: 3760 m.s.n.m.**



Ancho efectivo (m) :

$$= 68.9 + 169.1 \left( \frac{(116.3 + 0)}{2} \right) / 116.3 + 100.4 \left( \frac{(116.3 + 38.2)}{2} \right) / 116.3 + 22.2 (38.2 / 116.3)$$

$$= 227.43 \text{ m.}$$



Según el SEEP/W tenemos una filtración de:  $5.3261 \times 10^{-05}$  (m³/s/m).

Siendo el flujo total:  $5.3261 \times 10^{-05}$  (m³/s/m)  $\times$  227.43(m) = 0.01211(m³/s) = 12.11 (l/s).

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto



### 6.5.6 RESULTADO DE FILTRACIONES ESTIMADAS A PIE DE PRESA

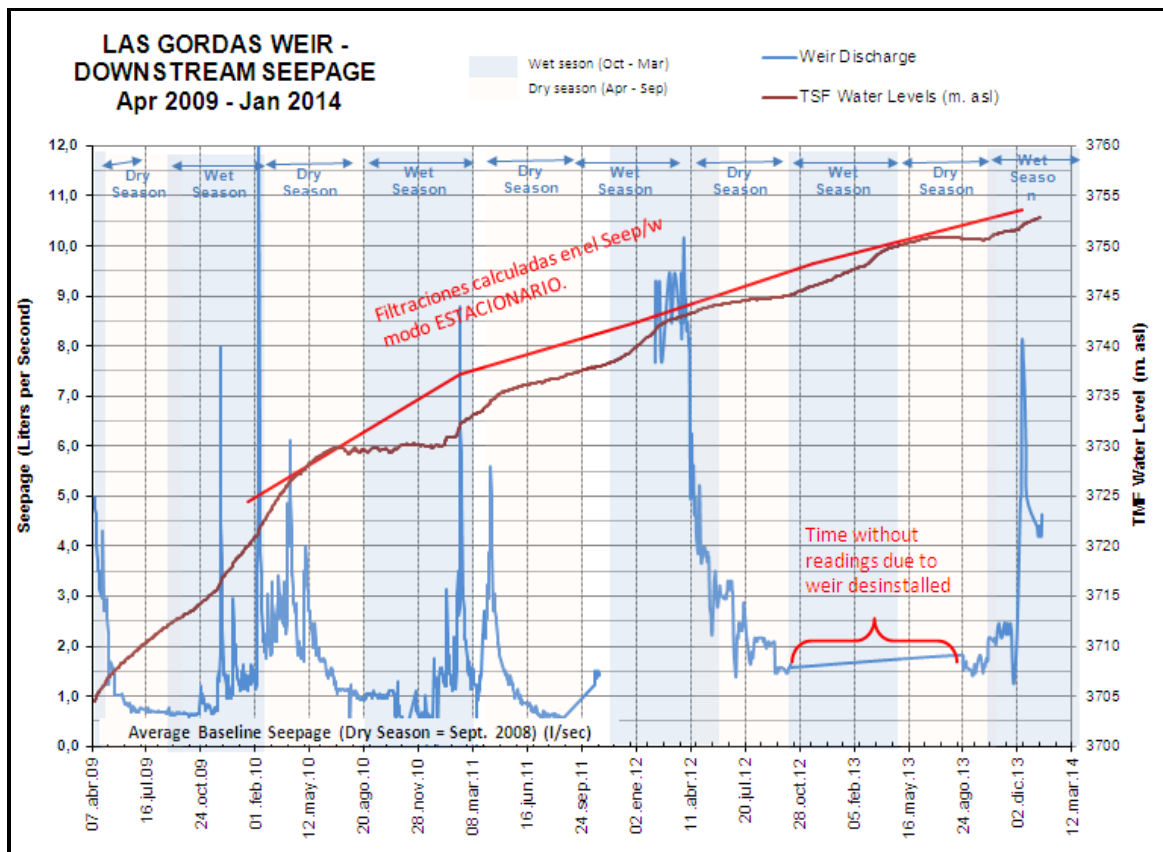
Según los resultados en el SEEP/W tenemos:

Presa	Cota embalse (m.s.n.m.)	Ancho efectivo (m)	Flujo de filtración calculado SEEP/W(m <sup>3</sup> /s/m)	Flujo total en Presa (l/s)
Las Gordas	3640	-----	-----	-----
	3680	145.93	1.9289 x10 <sup>-05</sup>	2.81
	3720	174.38	2.8048 x10 <sup>-05</sup>	4.89
	3732	192.77	3.8671 x10 <sup>-05</sup>	7.45
	3740	203.45	4.1774x10 <sup>-05</sup>	8.49
	3746	211.39	4.5720 x10 <sup>-05</sup>	9.66
	3752	219.39	4.8843 x10 <sup>-05</sup>	10.71
	3758	226.2	5.1616x10 <sup>-05</sup>	12.31
	3760	227.43	5.4714x10 <sup>-05</sup>	12.44

**Tabla 6. 8** Resultado de filtraciones SEEP/W para Las Gordas (Prog 0+198).

### 6.5.7 COMPARATIVO DE FILTRACIONES REALES Y ESTIMADAS EN EL SEEP/W

A continuación se grafican los resultados del Seep/W (línea roja).



**Figura 6. 12** Cuadro comparativo de filtraciones, en línea roja se grafica las estimaciones del Seep/w, y en azul se grafican las filtraciones reales registradas a pie de presa.

Se observa que las filtraciones reales son inferiores a las estimadas en el Seep/W. Se observa que las filtraciones reales están alrededor de 1 l/s a 3 l/s, mientras que las estimadas en el Seep/W van de 5 l/s a 11 l/s. Es probable que la idealización realizada debiera mejorarse con la modificación de las permeabilidades en el núcleo arcilloso y/o presentar el relave consolidado aguas arriba como una pantalla impermeable adicional.

Tras lo cual, se disminuyó el coeficiente de permeabilidad en el núcleo arcilloso, pero la variación en la filtración fue mínima, mientras que una pantalla de relave aguas arriba varía significativamente los resultados acercándonos a los flujos reales.

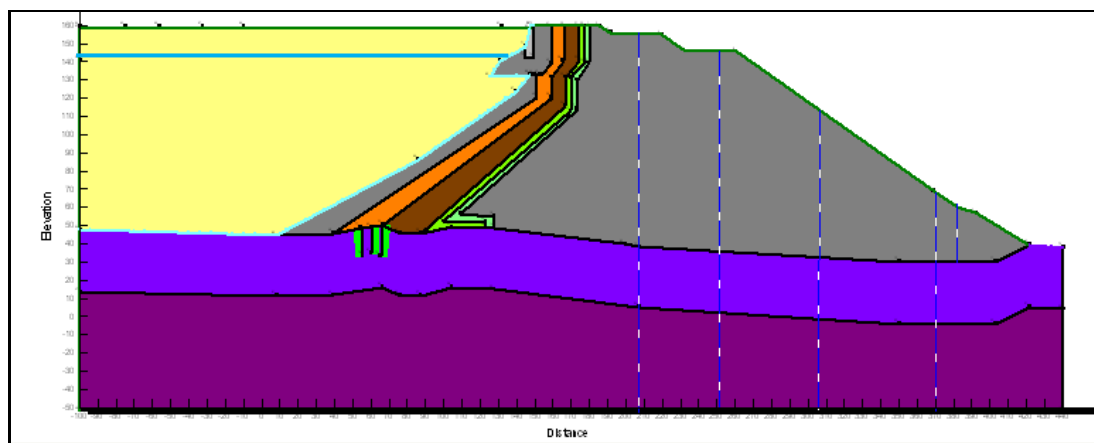
## 6.5.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS-MEJORAMIENTO DE LA IDEALIZACIÓN

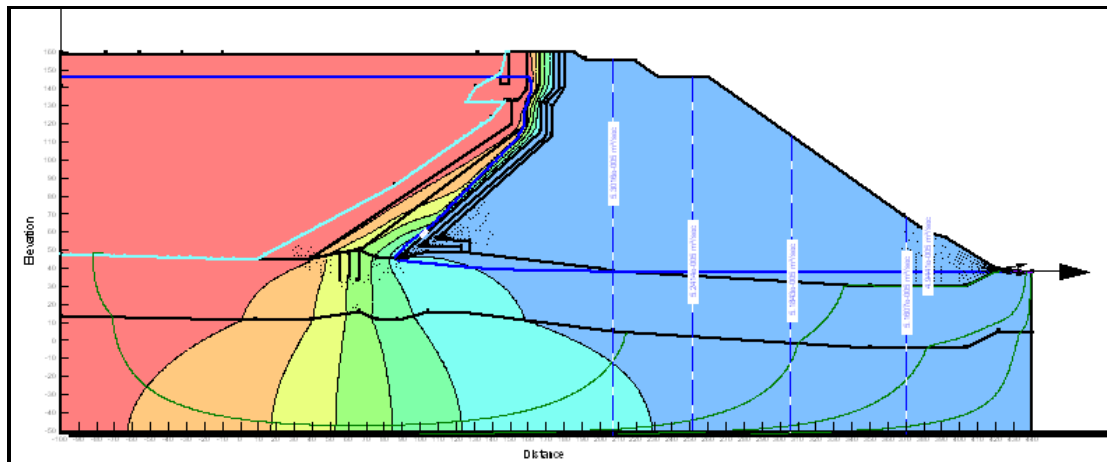
En base a la Figura 6.12 verificamos que el flujo calculado excede las filtraciones reales registradas en lecturas a pie de la presa.

Luego de varios intentos se trata de obtener resultados similares a la filtración real, se logran valores con tendencia al resultado esperado. Básicamente, el relave depositado aguas arriba va constituyendo en el tiempo una barrera impermeable que reduce el paso del agua a través del núcleo arcilloso, a su vez que deprime el nivel freático. Considerar que el núcleo arcilloso alcanza un coeficiente de permeabilidad cercano a  $1 \times 10^{-8}$  m/s, mientras que el relave sedimentado se ensaya con una permeabilidad cercana a  $1 \times 10^{-6}$  m/s, además de considerar de que el cuerpo de relave depositado es de mayor extensión, se logra obtener una reducción de filtración con tendencia a las lecturas reales registradas aguas abajo de la presa.

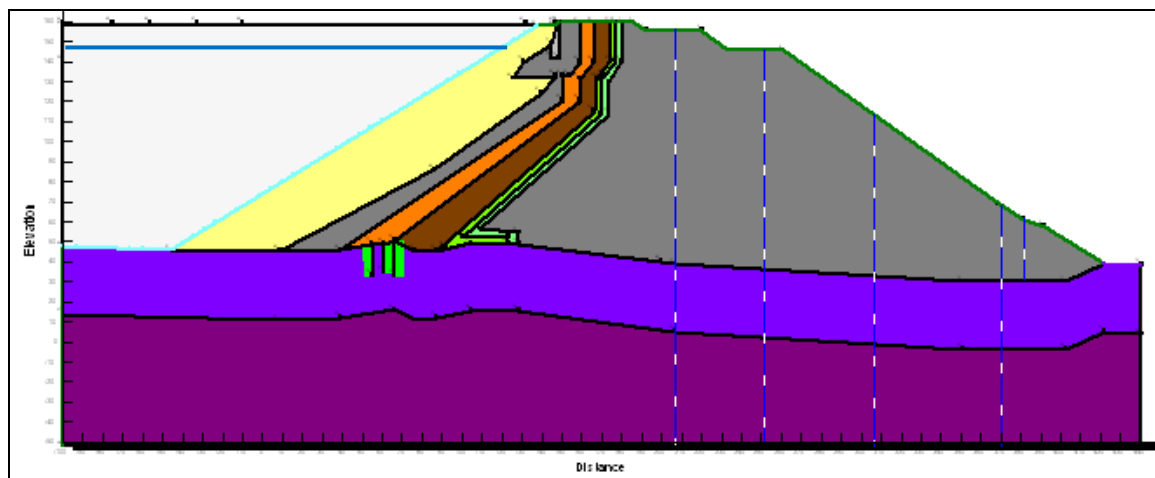
A continuación se describe los casos idealizados con el fin de reducir las filtraciones.

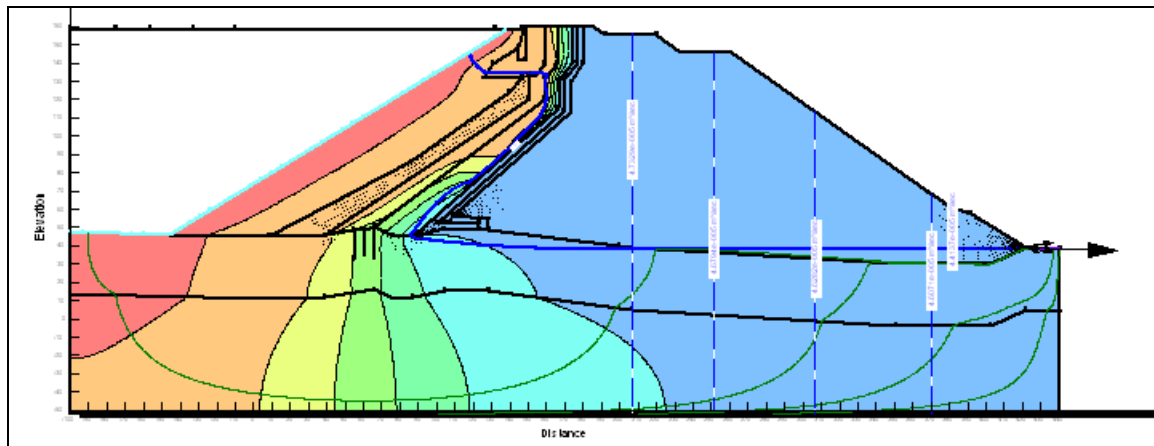
- **Caso 1: Seep 1**, cota de embalse: **3746** msnm. Caso anterior estudiado. La idealización refiere a que el relave se presenta en toda su extensión y el nivel freático recorre la cota 3746.00 msnm. Permeabilidad del relave  $1 \times 10^{-6}$  m/s. Luego de calculada la filtración, el Seep/w refiere de que el relave no deprime el nivel freático.



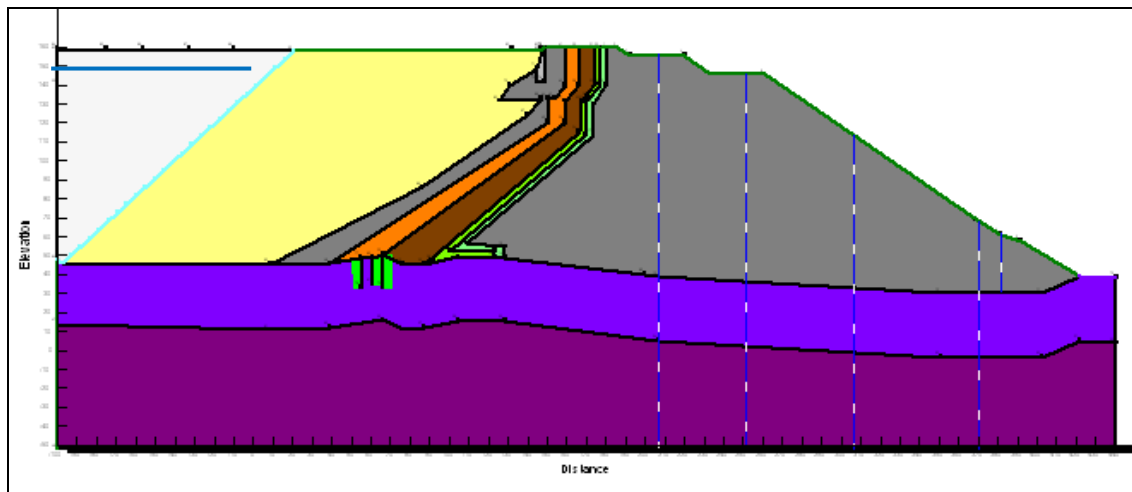


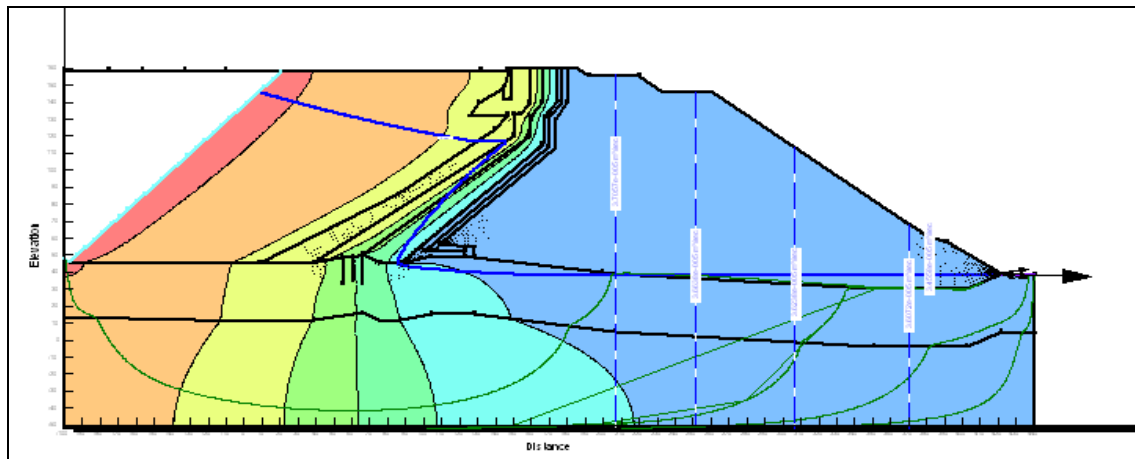
- **Caso 2: Seep 2**, cota de embalse: **3746** msnm. El relave se configura como una barrera al embalse de agua, que deprime el nivel freático, por ende el flujo de filtración disminuye. Permeabilidad del relave  $1 \times 10^{-6}$  m/s. La base del relave presenta aproximadamente 20 metros de ancho.



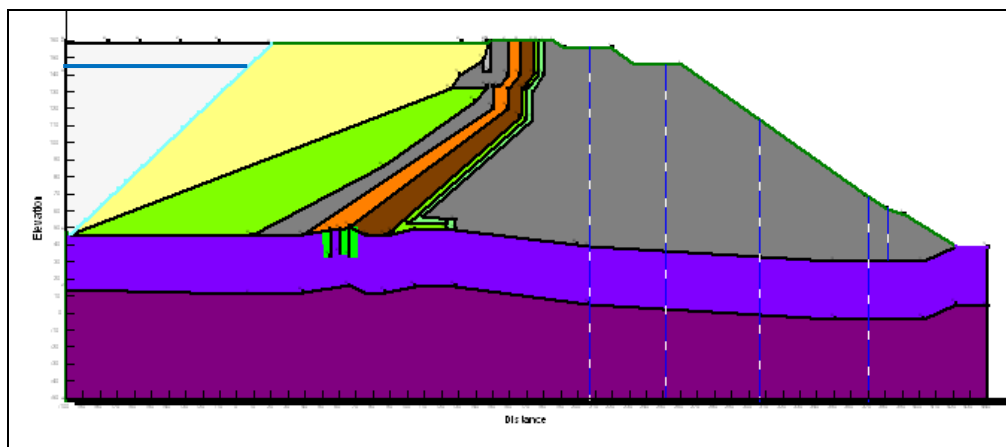


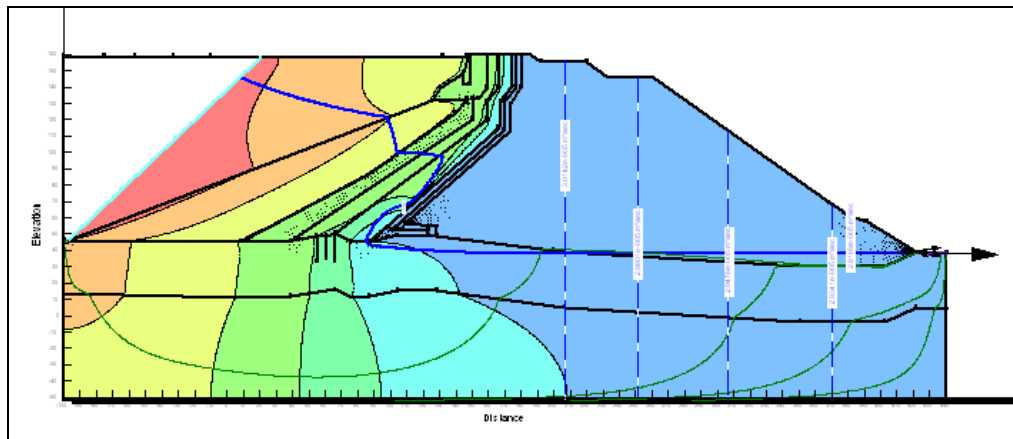
- **Caso 3: Seep 3**, cota de embalse: 3746 msnm. El relave incrementa sus dimensiones, de igual forma se deprime el nivel freático y el flujo de filtración disminuye. Permeabilidad del relave  $1 \times 10^{-6}$  m/s. La base del relave presenta aproximadamente 85 metros de ancho.





- **Caso 4: Seep 4**, cota de embalse: 3746 msnm. El relave se presenta en dos secciones, la zona en contacto con el agua presenta una permeabilidad de  $1 \times 10^{-6}$  m/s y la sección de relave intermedio  $1 \times 10^{-7}$  m/s. En esta idealización el flujo de filtración es cercana a la filtración real registrada aguas abajo de la presa Las Gordas.





A continuación se resume las filtraciones obtenidas para los 04 casos en las diferentes cotas de embalse (Tabla 6.10) y la gráfica correspondiente (Figura 6.13).

### Presas Las Gordas

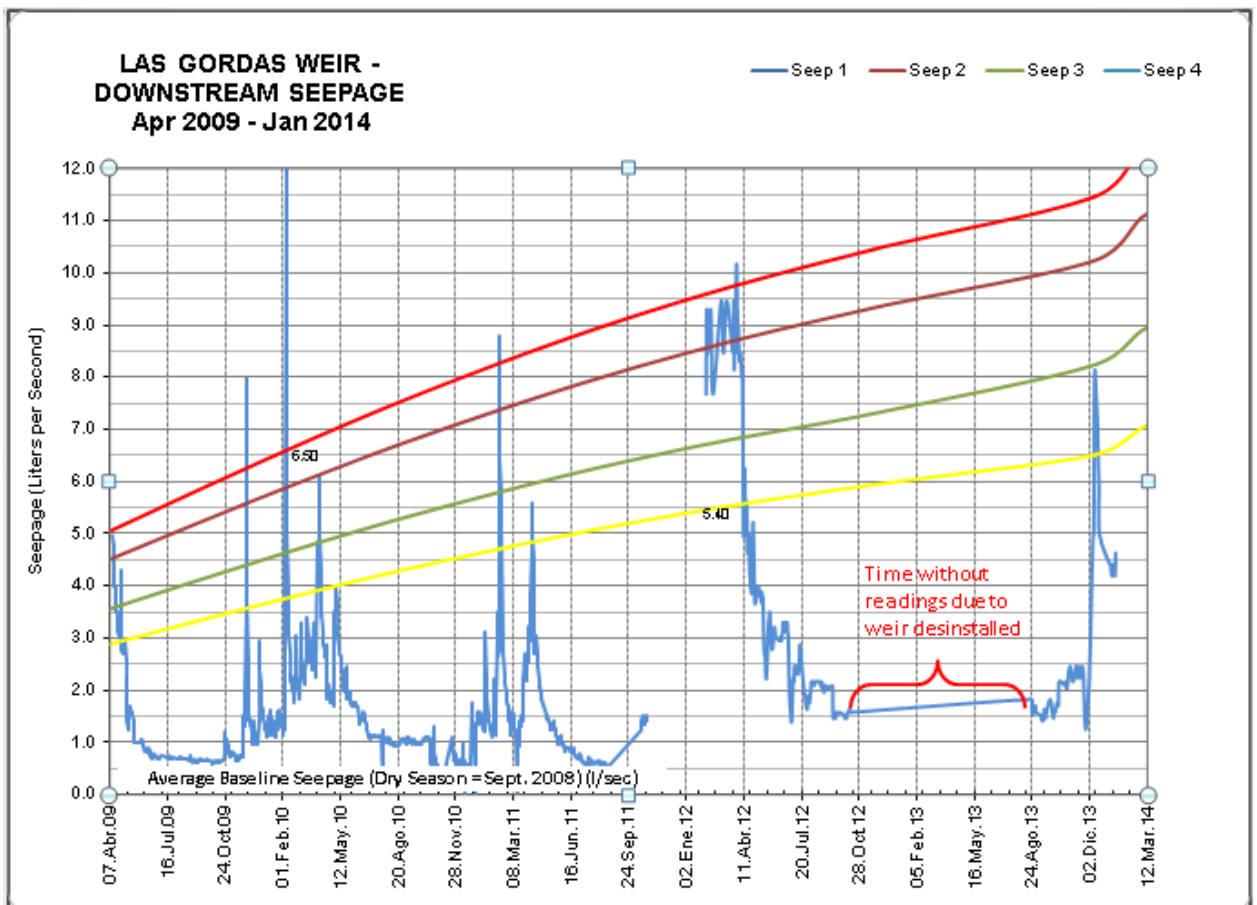
Cota	Ancho efectivo (m)	Flujo m <sup>3</sup> /s/m Seep 1	Flujo m <sup>3</sup> /s/m Seep 2	Flujo m <sup>3</sup> /s/m Seep 3	Flujo m <sup>3</sup> /s/m Seep 4	Flujo en Presa Seep 1 l/s	Flujo en Presa Seep 2 l/s	Flujo en Presa Seep 3 l/s	Flujo en Presa Seep 4 l/s
3680	145.93	1.9289 x10 <sup>-05</sup>	1.6989 x10 <sup>-05</sup>	1.3439 x10 <sup>-05</sup>	1.0841 x10 <sup>-05</sup>	2.81	2.48	1.96	1.58
3720	174.38	2.8048 x10 <sup>-05</sup>	3.3266 x10 <sup>-05</sup>	2.6238 x10 <sup>-05</sup>	2.1286 x10 <sup>-05</sup>	4.89	5.80	4.58	3.71
3732	192.77	3.8671 x10 <sup>-05</sup>	3.8252 x10 <sup>-05</sup>	3.0078 x10 <sup>-05</sup>	2.4432 x10 <sup>-05</sup>	7.45	7.37	5.80	4.71
3740	203.45	4.1774 x10 <sup>-05</sup>	4.1609 x10 <sup>-05</sup>	3.2638 x10 <sup>-05</sup>	2.6532 x10 <sup>-05</sup>	8.49	8.47	6.64	5.40
<b>3746</b>	<b>211.39</b>	<b>4.5720 x10<sup>-05</sup></b>	<b>4.4137 x10<sup>-05</sup></b>	<b>3.4558 x10<sup>-05</sup></b>	2.8109 x10 <sup>-05</sup>	9.66	9.33	7.31	5.94

Inyección e infiltración en presas de relave. Aplicación de la presa Las Gordas.

Collado Medina, César Augusto

3752	219.39	4.8843 $\times 10^{-05}$	4.6674 $\times 10^{-05}$	3.7549 $\times 10^{-05}$	2.9688 $\times 10^{-05}$	10.71	10.25	8.24	6.51
3758	226.2	5.1616 $\times 10^{-05}$	4.9218 $\times 10^{-05}$	3.9568 $\times 10^{-05}$	3.1268 $\times 10^{-05}$	12.31	11.13	8.95	7.07
3760	227.43	5.4714 $\times 10^{-05}$	5.0068 $\times 10^{-05}$	4.0243 $\times 10^{-05}$	3.1795 $\times 10^{-05}$	12.44	11.39	9.15	7.23

**Tabla 6. 9** Resultado de filtraciones estimadas en el SEEP/W para Las Gordas (prog 0+198).



**Figura 6.13.** Según las filtraciones reales se idealizaron 04 modelos en el Seep/w con la intención de acercarse a las filtraciones reales.



---

Como observamos la filtración obtenida en el Seep/w varia sus resultados según se modifique el cuerpo de relave aguas arriba. Inicialmente la hipótesis era que las permeabilidades de los diferentes materiales que conforman la presa decrecían conforme la presa crecía, esto por motivos de su peso propio que generaría esfuerzos de compresión que aumentaría la permeabilidad respectiva. Se modificó la permeabilidad del núcleo arcilloso y los resultados no mostraban una variación significativa, motivo por el cual se intentó con la variación del cuerpo de relave, siendo los resultados satisfactorios, es decir, las estimaciones en el Seep/w se acercan a las filtraciones reales bajo la consideración de que el relave va constituyendo una barrera que deprime el nivel freático y por ende las filtraciones respectivas.

---

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a la revisión bibliográfica y experiencia en campo para la elaboración de esta Tesis, referente a las consideraciones en el diseño e inyección de una pantalla de mortero en la cimentación de una presa de relaves se logran obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- Las inyección de mortero de cemento para impermeabilizar y/o solidificar la fundación o cimienta de una presa confiere la siguiente metodología a seguir, el cual considera que tipo de presa se requiere respecto de la recuperación del agua filtrada, un estudio geológico de la cimentación para determinar cuan complejo es el lecho rocoso, un diseño de mezcla de la lechada de cemento dentro del cual se considera el uso de aditivos acelerantes según las condiciones climáticas, así como también la inyección propiamente dicha el cual comprende la perforación e inyección de lechada de cemento.
- Luego de realizar la consulta respectiva a un experto en la inyección de mortero (E. Ampuero, MWH) respecto del uso de la bentonita, nos recomienda que el uso de este solo sirve para impermeabilizar la fundación rocosa, mas no para el mejoramiento en la solidificación del lecho rocoso, además de que durante la etapa de inyección la presión de inyección tiene mayores limitaciones por ser proclive a la generación de hidro-fracturamientos.
- Durante el estudio geológico, en la etapa de inyecciones de agua para determinar el número Lugeon (el cual debería ir de 1 a 7 para considerar una cimentación adecuada), este no es determinante en la etapa de inyección para estimar la cantidad de lechada de cemento que pueda inyectarse en el complejo sistema de fisuras del lecho rocoso.
- La cortina de mortero, no disminuye el caudal filtración, simplemente hace que la filtración incremente su recorrido contorneando la pantalla, el cual origina que los gradientes disminuyan convenientemente con el fin de evitar los procesos de erosión en la base del cuerpo arcilloso.
- Las presiones de inyección del mortero de cemento son relativamente bajas, esto es, por cada metro de profundidad corresponde 01bar adicional de inyección (01 bar equivale a 10 metros de columna de agua), para inyectar a 15 metros de

---

profundidad es suficiente la inyección a 15 bares. Incrementar la presión ocasionaría fracturamientos, los cuales generalmente son utilizados para investigaciones en la búsqueda de petróleo.

- Durante la etapa de inyección, la información de caudal y presión en tiempo real, son determinantes para realizar el seguimiento respectivo, esto es, cualquier cambio brusco refiere a controlar la presión ó caudal para lograr estabilizar el proceso, caso contrario anular la operación y reiniciar. Generalmente, se tienen aprobados hasta 3 diseños de mezcla los cuales son cambiados oportunamente según la cantidad de kilos de cemento inyectados, se infiere la ejecución de mayor cantidad de taladros a inyectar, esto es aparición de taladros secundarios, terciarios, cuaternarios, quinaros hasta lograr una pantalla casi impermeable y/o solidificada.

Respecto a las filtraciones estimadas a través del cuerpo de presa, tenemos las siguientes:

- Luego de idealizar las filtraciones en el Seep/w, nos damos cuenta que la pantalla de mortero no varía el caudal de filtración registrado aguas abajo, inicialmente se pensó que la pantalla de mortero de cemento con un coeficiente de permeabilidad cercano a  $1 \times 10^{-7}$  m/s (Tabla 6.8) disminuiría el caudal de filtración, pero luego de realizar el cálculo los resultados se mantenían prácticamente iguales. Por esto, queda claro que la pantalla de mortero hace que las filtraciones incrementen su recorrido y el gradiente hidráulico disminuya para evitar erosión en la base del núcleo arcilloso.
- Al tener los registros de las filtraciones reales al pie de presa, y la idealización inicial en el Seep/w, observamos que la diferencia era notable, por un lado la filtración real fluctúa alrededor de 4 l/s, mientras que la idealización inicial arroja alrededor de 11 l/s. La hipótesis inicial, era de que las características de permeabilidad en el núcleo arcilloso disminuirían debido al incremento de presiones por el aumento en el peso propio de la presa, es que en el Seep/w se realiza la modificación respectiva, y resulta que la filtración estimada sea similar a la inicial. Para esto, se planteó una modificación a considerar que era aumentar el cuerpo de relave aguas arriba con una permeabilidad de  $1 \times 10^{-6}$  m/s (Tabla 6.8) para que el nivel freático disminuya de cota y se logre una reducción en la filtración a través del cuerpo de la presa, y así fue, en el Seep/w se verificó que el caudal disminuyó a 6 l/s, logrando que la idealización se pareciera a lo que realmente sucede en la presa. Ahora bien, el incremento del cuerpo de relave “impermeable” es sólo una estimación, por lo que sería recomendable ahondar en el estudio del relave, esto es, realizar perforaciones para obtener testigos en donde se evalúe las características mecánicas del relave y estudios de batimetría para las dimensiones del cuerpo de relave depositado.

---

## BIBLIOGRAFIA

- Ampuero, E. (2011), *Informes de proyecto perforaciones e inyección*. Informe MWH, Lima.
- Ampuero, E. (2012), *Mejoramiento de cimentaciones en suelos y rocas aplicando las técnicas de grouting*. Tesis UNI, Lima.
- Cárdenas, J. (2001), *Plan de Abandono de Depósitos de Relaves de la mina Casapalca*. Tesis UNI, Lima.
- Das B. M (2006), *Principio de Ingeniería de cimentaciones*. Thomson, 5ta Ed., California.
- Fiecela N. J. (2011), *Foundation drilling and grouting, TSF Area Manager Assistance*. Informe MWH, Denver.
- Francisco Tsao Santín (2008), *Mejora de suelos con la técnica de Jet Grouting*.
- Geo-slope International (2010), *Stability Modeling with Slope/W 2007*. Version, 4ta.
- Ischy, E. (1968), *Inyección de suelos*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Lombardi, G. (2002), *Grouting of rock masses.3rd International Conference on grouting and grout treatment*. Minusio.
- Lombardi G. y Deere D. (1993), Diseño y control del inyectado empleando el principio GIN. Traducción Ulrich Hungsberg de: *Water Power & Dam Construction*. IMTA México.
- Lambe W. y Whitman R. (1969), *Soil Mechanics*. Massachusetts Institute of Technology. EUA.
- Gonzales, L. (2002), *Ingeniería Geológica*. Madrid.
- MWH (2013), *Stage 8/9 Tailing Storage Facility (to elevation 3761 m) Design report*. Informe MWH, Denver.
- Murillo R. (2012), *Cortinas de presas*. México.
- Royle M. (s.d.), *Procedimientos de operación estándar para el ensayo packer en perforaciones*.
- Sánchez, (2011), *“Ley de Darcy. Conductividad Hidráulica. Experiencia de Darcy”*. Universidad de Salamanca.
- Tsuyoshi Miyazaki (2006), *Water Flow in Soils*. Universidad de Tokio.