

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERA CIVIL**

**TEMA:  
DISEÑO DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO DE LAS PRESAS DE HORMIGÓN  
CIMENTADAS EN SUELO**

**AUTORA:  
MARJORIE MERCEDES MUÑOZ SALINAS**

**Tutor:  
JORGE IVÁN CALERO HIDALGO**

**Quito, marzo del 2021**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo Marjorie Mercedes Muñoz Salinas, con documento N° 1718622820, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: DISEÑO DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO DE PRESAS DE HORMIGÓN CIMENTADAS EN SUELO, misma que ha sido desarrollado para optar por el título de : Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....  
Marjorie Mercedes Muñoz Salinas

C.I: 1718622820

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, DISEÑO DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO DE PRESAS DE HORMIGÓN CIMENTADAS EN SUELO, realizado por la estudiante Marjorie Mercedes Muñoz Salinas, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2021



.....  
Jorge Iván Calero Hidalgo  
C.I: 1800480434

## **DEDICATORIA**

A mis padres Mercedes y Manuel quienes han anhelado tanto como yo este logro y con su apoyo y paciencia me han ayuda a culminar esta meta ya que sin ellos nada de esto sería posible siendo ellos el motor fundamental de mi vida.

A mis hermanas Liliana, Carina y Jéssica quienes con su ejemplo de superación diaria me han impulsado a conseguir este logro.

A mis sobrinos para que esto sea como motivación para que ellos se superen día a día y luchen por sus metas y sueños.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios y a la Virgen por guiarme y bendecirme en el diario vivir y permitirme gozar de este sueño anhelado.

A mis padres por alentarme día a día para no rendirme y lograr mis objetivos, dándome un consejo sincero. Y ser un ejemplo de constancia y perseverancia

A mis hermanas por estar en los momentos difíciles que se presentaron a lo largo del camino.

A Víctor por su apoyo permanente al alentarme y darme su apoyo para poder sobrellevar las caídas que se me presentaron durante este proceso y ayudarme a crecer como persona con su amor y paciencia.

Al ingeniero Iván Calero por su invaluable colaboración y paciencia en este proyecto ya que me ha transmitido sus conocimientos para poder desarrollarlo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I .....	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3. PROBLEMA .....	2
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.5. METODOLOGÍA .....	4
CAPÍTULO II.....	5
ENFOQUE GENERAL DEL TEMA DE FILTRACIÓN DEL AGUA EN SUELOS BAJO PRESAS DE HORMIGÓN.....	5
2.1. CONSIDERACIONES PRELIMINARES .....	5
CAPÍTULO III.....	10
CRITERIOS Y ELEMENTOS BÁSICOS PARA IDENTIFICAR LOS ELEMENTOS DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO DE PRESAS DE HORMIGÓN CIMENTADAS EN SUELO.....	10
3.1 CRITERIOS DE APLICABILIDAD PARA LOS DIFERENTES CAMPOS Y RANGOS .....	10
3.2. PROBLEMAS QUE PUEDEN SER RESUELTOS EN FORMA ANALÍTICA POR LOS MÉTODOS DE LA TEORÍA MATEMÁTICA DE FILTRACIÓN. ....	16
3.3. ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL ANÁLISIS DEL FLUJO DE FILTRACIÓN .....	21
3.3.1. Contorno subterráneo real de una presa de hormigón cimentada en suelo.....	21
3.3.2. Contorno subterráneo aceptable.....	22
3.3.3. Carpeta .....	22
3.3.4. Escalones.....	22
3.3.5. Dentellón.....	23
3.3.6. Tablaestaca.....	23
3.3.7. Filtro invertido .....	24
3.3.8. Drenaje horizontal.....	24
3.4. FORMULACIÓN DE LOS ESQUEMAS DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO, COMPATIBLES CON LAS CONDICIONES FÍSICAS CONCRETAS DE CIMENTACIÓN.....	25
3.4.1. Esquema 1- Contorno subterráneo sin drenaje horizontal bajo la presa .....	25
3.4.2. Esquema 2-Contorno subterráneo con drenaje horizontal bajo la presa.....	26

3.4.3.	Esquema 3-Contorno subterráneo con carpeta rígida anclado al cuerpo de la presa:	27
3.4.4.	Esquema 4-Contorno subterráneo profundo .....	28
3.4.5.	Esquema 5 Contorno subterráneo con drenaje vertical del suelo de cimentación.	29
CAPÍTULO IV.....		31
FORMULACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DEL FLUJO DE FILTRACIÓN DE LOS SUELOS DE LAS PRESAS DE HORMIGÓN .....		31
4.1.	MÉTODO COEFICIENTES DE RESISTENCIA .....	32
4.1.1.	Determinación de los coeficientes de resistencia.....	34
4.1.2.	Determinación de las pérdidas de carga, para subpresión y el diagrama de subpresión W. ....	35
4.1.3.	Determinación de la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración J <sub>máx</sub> sal. ....	37
4.1.4.	Determinación del caudal de filtración. ....	38
4.1.5.	Influencia de las dimensiones de los elementos del contorno subterráneo en la magnitud de la gradiente piezométrica media <b>JHC</b> a lo largo de los elementos horizontales.....	38
4.1.6.	Influencia de las dimensiones del contorno subterráneo en la magnitud de la gradiente piezométrica máxima en la superficie del fondo del cauce, aguas abajo. ....	44
4.1.7.	Influencia de las dimensiones del contorno subterráneo en la magnitud de la subpresión.....	46
4.2.	MÉTODO DE BLIGH (BLIGH W. G. DAMS, BARRAGES AND WEIRS ON POROUS FOUNDATION N.Y.).....	47
4.2.1.	Determinación de las pérdidas de carga.....	48
4.3.	MÉTODO DE LANE (LANE E.W. SECURITY FROM UNDERSEEPAGE OF MASONRY DAMS ON EARTH FOUNDATION N.Y.).....	50
4.4.	MÉTODO DE LÍNEA DE CONTORNO DESARROLLADA.....	51
4.5.	MÉTODO DE RED DE LA RED HIDRODINÁMICA.....	54
4.5.1.	Procedimiento para Construir Una Red De Flujo. ....	58
4.6.	MÉTODO DE RED DE FILTRACIÓN LINEAL.....	60
CAPÍTULO V .....		64
FORMULACIÓN Y APLICACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS DEL DISEÑO DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO.....		64
5.1	ALGORITMO DE CÁLCULO.....	64
5.2	PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO. ....	73

5.2.1	Ejemplo de cálculo por el Método de los coeficientes de resistencia (H=15m; Esquema 2) .....	74
5.2.1.1	Determinación del espesor de cálculo para encontrar la subpresión y gradiente máxima de salida.....	74
5.2.1.2	Determinación de los coeficientes de resistencia para el cálculo de la subpresión.....	76
5.2.1.3	Cálculo de la subpresión W .....	77
5.2.1.4	Determinación de los coeficientes de resistencia para determinar la gradiente máxima de salida.....	79
5.2.1.5	Cálculo de la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración $J_{m\grave{a}x}$ sal .....	80
5.2.1.6	Cálculo del caudal de filtración q .....	81
5.2.2	Ejemplo de cálculo por el Método de Bligh (H=15m; Esquema 2).....	82
5.2.3	Ejemplo de cálculo por el Método de Línea de contorno desarrollada (H=15m; Esquema 2) .....	85
5.2.3.1	Determinación de la longitud virtual: .....	85
5.2.3.2	Cálculo de la subpresión W: .....	87
5.2.3.3	Cálculo del caudal de filtración q: .....	87
5.2.4	Ejemplo de cálculo por el Método de red hidrodinámica (H=15m; Esquema 2) .....	87
5.2.5	Ejemplo de cálculo por el Método de filtración lineal (H=15m; Esquema 2) ...	90
5.3	COMPARACIÒN DE LOS MÈTODOS APLICADOS PARA EL ANÀLISIS DE FILTRACIÒN DEL DISEÑO DEL CONTORNO SUBTERRÀNEO DE PRESAS DE HORMIGON CIMENTADAS EN SUELO .....	93
5.4	Comparación de los métodos de análisis según las características constructivas del contorno subterráneo .....	94
CAPITULO VI.....		100
COMPONENTES COMPLEMENTARIOS DE LA FILTRACIÒN EN EL ENTORNO DE UNA PRESA HORMIGÓN CIMENTADA EN SUELO .....		100
6.1	FILTRACIÒN SEMI-CONFINADA BAJO UNA ESTRUCTURA HIDRÀULICA. ....	100
6.1.1	Aspectos generales.....	100
6.1.2	Contorno subterráneo en caso de ausencia de la capa impermeable (figura 27, a) .....	100
6.1.3	Contorno subterráneo en caso de presencia del nivel impermeable (figura 27, b) .....	103
6.1.4	Contorno subterráneo con tablestaca en caso de presencia del nivel impermeable (figura 27, c). .....	103
6.1.5	Contorno subterráneo con tablestaca y drenaje en presencia de nivel impermeable (figura 25, d) .....	104



6.1.6	Filtración periférica con superficie libre en los tramos de enlace de las estructuras hidráulicas con las laderas, considerando el efecto del flujo de filtración lateral (V.P Nedriga **)	104
6.1.6.1	Esquema del flujo de filtración	104
6.1.6.2	Diafragma impermeable independiente	106
6.1.6.3	Muro de enlace con un diafragma impermeable arbitrariamente ubicado (figura 28)	109
6.1.6.4	Muro de enlace con un diafragma impermeable aguas arriba, en el caso de línea quebrada del nivel de agua en el embalse	116
CAPITULO VII		121
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		121
7.1.	CONCLUSIONES	121
7.2	RECOMENDACIONES	123
BIBLIOGRAFÍA		124
SITIOS WEB		125
ANEXOS		126

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	<i>Espesor de la capa activa de filtración.</i>	33
<b>Tabla 2.</b>	<i>Determinación de la gradiente piezométrica media en función de <math>s/l</math> y <math>s/T</math> (<math>0,1 \leq sT &lt; 0,6</math>).</i>	41
<b>Tabla 3.</b>	<i>Determinación de la gradiente piezométrica media en función de <math>s/l</math> y <math>s/T</math> (<math>0,1 \leq sT \leq 0,6</math>).</i>	42
<b>Tabla 4.</b>	<i>Influencia de las dimensiones del contorno subterráneo en la gradiente máxima de salida</i>	45
<b>Tabla 5.</b>	<i>Coefficientes de Bligh y Lane</i>	51
<b>Tabla 6.</b>	<i>Coefficiente de gradiente para los diferentes tipos de suelos.</i>	62
<b>Tabla 7.</b>	<i>Datos a usar para el ejemplo de cálculo Coeficiente de resistencia.</i>	74
<b>Tabla 8.</b>	<i>Datos a usar para el ejemplo de cálculo M. Bligh.</i>	82
<b>Tabla 9.</b>	<i>Datos a usar para el ejemplo de cálculo M. Línea de contorno desarrollada</i>	85
<b>Tabla 10.</b>	<i>Datos a usar para el ejemplo de cálculo M. Red hidrodinámica</i>	88
<b>Tabla 11.</b>	<i>Datos a usar para el ejemplo de cálculo Filtración Lineal.</i>	90
<b>Tabla 12.</b>	<i>Contorno subterráneo ensanchado.</i>	94
<b>Tabla 13.</b>	<i>T'cal para contorno subterráneo ensanchado.</i>	94
<b>Tabla 14.</b>	<i>Resultados con contorno subterráneo ensanchado</i>	95
<b>Tabla 15.</b>	<i>Contorno subterráneo intermedio.</i>	96
<b>Tabla 16.</b>	<i>T'cal para contorno subterráneo intermedio</i>	96
<b>Tabla 17.</b>	<i>Resultados con contorno subterráneo intermedio</i>	96
<b>Tabla 18.</b>	<i>Contorno subterráneo muy profundo.</i>	97
<b>Tabla 19.</b>	<i>T'cal para contorno subterráneo muy profundo</i>	97
<b>Tabla 20.</b>	<i>Resultados con contorno subterráneo muy profundo</i>	98
<b>Tabla 21.</b>	<i>Esquema con <math>a_2=0</math></i>	99
<b>Tabla 22.</b>	<i>Gradiente máxima de salida con la ausencia del escalón <math>a_2</math></i>	99
<b>Tabla 23.</b>	<i>Determinación de la función <math>\beta_1</math></i>	107
<b>Tabla 24.</b>	<i>Determinación del tipo de contorno subterráneo para Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	127
<b>Tabla 25.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo T'cal para Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	127
<b>Tabla 26.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo T''cal para Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	127
<b>Tabla 27.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo T'''cal Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	128
<b>Tabla 28.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la subpresión Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	128
<b>Tabla 29.</b>	<i>Determinación de las pérdidas de carga para elemento del contorno subterráneo Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	128
<b>Tabla 30.</b>	<i>Determinación de la subpresión Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	129
<b>Tabla 31.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la gradiente máxima de salida Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	129
<b>Tabla 32.</b>	<i>Determinación de la gradiente máxima de salida Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	129

<b>Tabla 33.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener el caudal de filtración Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>130</i>
<b>Tabla 34.</b>	<i>Determinación del caudal de filtración Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>130</i>
<b>Tabla 35.</b>	<i>Determinación del tipo de contorno subterráneo para Esquema2 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>130</i>
<b>Tabla 36.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo <math>T'_{cal}</math> para Esquema 2(M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>131</i>
<b>Tabla 37.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo <math>T''_{cal}</math> para Esquema 2(M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>131</i>
<b>Tabla 38.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo <math>T'''_{cal}</math> Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia).....</i>	<i>131</i>
<b>Tabla 39.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la subpresión Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>132</i>
<b>Tabla 40.</b>	<i>Determinación de las pérdidas de carga para elemento del contorno subterráneo Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia).....</i>	<i>132</i>
<b>Tabla 41.</b>	<i>Determinación de la subpresión Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>132</i>
<b>Tabla 42.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la gradiente máxima de salida Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>133</i>
<b>Tabla 43.</b>	<i>Determinación de la gradiente máxima de salida Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>133</i>
<b>Tabla 44.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener el caudal de filtración Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>133</i>
<b>Tabla 45.</b>	<i>Determinación del caudal de filtración Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>134</i>
<b>Tabla 46.</b>	<i>Determinación del tipo de contorno subterráneo para Esquema3 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>134</i>
<b>Tabla 47.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo <math>T'_{cal}</math> para Esquema 3(M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>134</i>
<b>Tabla 48.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo <math>T''_{cal}</math> para Esquema 3(M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>135</i>
<b>Tabla 49.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo Esquema 2 <math>T'''_{cal}</math> Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>135</i>
<b>Tabla 50.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la subpresión Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>135</i>
<b>Tabla 51.</b>	<i>Determinación de las pérdidas de carga para elemento del contorno subterráneo Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia).....</i>	<i>136</i>
<b>Tabla 52.</b>	<i>Determinación de la subpresión Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>136</i>
<b>Tabla 53.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la gradiente máxima de salida Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>136</i>
<b>Tabla 54.</b>	<i>Determinación de la gradiente máxima de salida Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>137</i>
<b>Tabla 55.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener el caudal de filtración Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia) .....</i>	<i>137</i>

<b>Tabla 56.</b>	<i>Determinación del caudal de filtración Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	137
<b>Tabla 57</b>	<i>Determinación del tipo de contorno subterráneo para Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	138
<b>Tabla 58.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo <math>T'_{cal}</math> para Esquema 5(M. Coeficientes de resistencia).</i>	138
<b>Tabla 59.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo <math>T''_{cal}</math> para Esquema 5(M. Coeficientes de resistencia)</i>	138
<b>Tabla 60.</b>	<i>Determinación del espesor de cálculo Esquema 2 <math>T'''_{cal}</math> Esquema 4 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	139
<b>Tabla 61.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la subpresión Esquema 4 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	139
<b>Tabla 62.</b>	<i>Determinación de las pérdidas de carga para elemento del contorno subterráneo Esquema 4 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	139
<b>Tabla 63.</b>	<i>Determinación de la subpresión Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	140
<b>Tabla 64.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la gradiente máxima de salida Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	140
<b>Tabla 65.</b>	<i>Determinación de la gradiente máxima de salida Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	140
<b>Tabla 66.</b>	<i>Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener el caudal de filtración Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	141
<b>Tabla 67.</b>	<i>Determinación del caudal de filtración Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)</i>	141
<b>Tabla 68.</b>	<i>Determinación de la subpresión para todos los esquemas (M. Bligh)</i>	141
<b>Tabla 69.</b>	<i>Determinación de la gradiente de control de salida para todos los esquemas (M. Bligh)</i>	141
<b>Tabla 70.</b>	<i>Determinación del caudal de filtración para todos los esquemas (M. Bligh)</i>	142
<b>Tabla 71.</b>	<i>Determinación de la subpresión para todos los esquemas (M. Línea de contorno desarrollada)</i>	142
<b>Tabla 72.</b>	<i>Determinación de la gradiente de control de salida para todos los esquemas (M. Línea de contorno desarrollada)</i>	142
<b>Tabla 73.</b>	<i>Determinación del caudal de filtración para todos los esquemas (M. Línea de contorno desarrollada)</i>	142
<b>Tabla 74.</b>	<i>Determinación de la subpresión para todos los esquemas (M. Red hidrodinámica)</i>	143
<b>Tabla 75.</b>	<i>Determinación de la gradiente de control de salida para todos los esquemas (M. Red hidrodinámica)</i>	143
<b>Tabla 76.</b>	<i>Determinación del caudal de filtración para todos los esquemas (M. Red hidrodinámica)</i>	143
<b>Tabla 77.</b>	<i>Determinación de la subpresión para todos los esquemas (M. Filtración Lineal)</i>	143
<b>Tabla 78.</b>	<i>Determinación de la gradiente de control de salida para todos los esquemas (M. Filtración Lineal)</i>	144

<b>Tabla 79.</b>	<i>Determinación del caudal de filtración para todos los esquemas (M. Filtración Lineal).....</i>	<i>144</i>
<b>Tabla 80.</b>	<i>Determinación de la gradiente de control de salida para todos los esquemas (M. Filtración Lineal).....</i>	<i>145</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	<i>Sección transversal de una estructura de contención en un cauce natural, cimentada en suelo.....</i>	11
<b>Figura 2.</b>	<i>.....</i>	17
<b>Figura 3.</b>	<i>Contorno Subterráneo Plano.....</i>	17
<b>Figura 4.</b>	<i>Filtración adoptando los parámetros T1 y T2.....</i>	18
<b>Figura 5.</b>	<i>Esquema general del contorno subterráneo.....</i>	21
<b>Figura 6.</b>	<i>Contorno subterráneo sin drenaje horizontal bajo la presa.....</i>	26
<b>Figura 7.</b>	<i>Contorno subterráneo con drenaje horizontal bajo la presa.....</i>	27
<b>Figura 8.</b>	<i>Contorno subterráneo con carpeta rígida anclado al cuerpo de la presa</i>	28
<b>Figura 9.</b>	<i>Contorno subterráneo profundo.....</i>	29
<b>Figura 10.</b>	<i>Contorno subterráneo con drenaje vertical del suelo de cimentación....</i>	30
<b>Figura 11.</b>	<i>Diagrama de Subpresión.....</i>	36
<b>Figura 12.</b>	<i>Contorno subterráneo con dos tablestacas de igual longitud en sus extremos.</i>	39
<b>Figura 13.</b>	<i>Contorno subterráneo con tabla estaca en su extremo aguas arriba..</i>	40
<b>Figura 14.</b>	<i>Efecto de las dimensiones del CS J_SAL.....</i>	44
<b>Figura 15.</b>	<i>Diagrama de subpresión.....</i>	46
<b>Figura 16.</b>	<i>Factor de Percolación.....</i>	48
<b>Figura 17.</b>	<i>Variación del coeficiente de resistencia de una tablestaca.....</i>	49
<b>Figura 18.</b>	<i>Diagramas de subpresión por el M. Línea de contorno desarrollado.</i>	53
<b>Figura 19.</b>	<i>Láminas elementales de agua.....</i>	55
<b>Figura 20.</b>	<i>Red de flujo mostrando algunas peculiaridades en los cuadros de las esquinas</i>	57
<b>Figura 21.</b>	<i>Detalle de un cuadrado alrededor de la punta en una tablaestaca.....</i>	57
<b>Figura 22.</b>	<i>Detalle de un cuadro alrededor de la esquina en una tablaestaca.....</i>	58
<b>Figura 23.</b>	<i>Detalle de la carga total a lo largo del contorno subterráneo.....</i>	59
<b>Figura 24.</b>	<i>Esquema filtración lineal.....</i>	61
<b>Figura 25.</b>	<i>Puntos característicos del contorno subterráneo.....</i>	61
<b>Figura 26.</b>	<i>Diagrama de carga sobre la línea desarrollada del contorno.....</i>	63
<b>Figura 27.</b>	<i>Esquemas de análisis de la filtración semiconfinada bajo las estructuras hidráulicas.</i>	100
<b>Figura 28.</b>	<i>Esquema de filtración periférica: 1- contorno alimentador; 2- zona de filtración periférica; 3- presa de hormigón.....</i>	105
<b>Figura 29.</b>	<i>Esquema para el análisis de la filtración periférica con presencia de un diafragma impermeable independiente.....</i>	106
<b>Figura 30.</b>	<i>Esquema para el análisis de la filtración periférica, en caso de configuración compleja del muro de enlace. 1- presa; 2- contorno alimentador.....</i>	109
<b>Figura 31.</b>	<i>función <math>n=f[T_1/T_2, ((p+S/2))/T_1]</math>.....</i>	110
<b>Figura 32.</b>	<i>función <math>\lambda=(l_1/T_2, ST_2)</math>.....</i>	111
<b>Figura 33.</b>	<i>función <math>\delta=f(l_2/T_2, ST_2)</math>.....</i>	112
<b>Figura 34.</b>	<i>Posibles esquemas de la configuración del contorno mojado de un muro de enlace.</i>	115
<b>Figura 35.</b>	<i>Análisis de la filtración perimetral en el caso de un muro con diafragma. 1-presa; 2- contorno alimentador.....</i>	117

<b>Figura 36.</b>	<i>función <math>\lambda=f(T_1/T_2, S/T_2)</math>.....</i>	<i>118</i>
<b>Figura 37.</b>	<i>Gráfico de la función <math>\delta=(T_1/T_2 ; /T_2)</math>.....</i>	<i>119</i>

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b>	<i>Determinación de la magnitud <math>\Delta H_{qr}</math></i> .....	20
<b>Gráfico 2.</b>	<i>Determinación de la magnitud <math>\Delta H_{qr}</math> caso 2</i> .....	20
<b>Gráfico 3.</b>	<i>Construcción de la relación JHC S/Z -S/L</i> .....	42
<b>Gráfico 4.</b>	<i>Construcción de la relación JHC S/Z -S/L</i> .....	43
<b>Gráfico 5.</b>	<i>Comportamiento de la gradiente máxima de salida en función de las dimensiones del contorno subterráneo</i> .....	45
<b>Gráfico 6.</b>	<i>Comportamiento del coeficiente de resistencia de la tablaestaca con relación <math>T2/T1, T2/T3</math></i> .....	49
<b>Gráfico 7.</b>	<i>Línea piezométrica empleando todos los métodos de análisis para Esquema1</i>	151
<b>Gráfico 8.</b>	<i>Línea piezométrica empleando todos los métodos de análisis para Esquema2</i>	151
<b>Gráfico 9.</b>	<i>Línea piezométrica empleando todos los métodos de análisis para Esquema3</i>	152
<b>Gráfico 10.</b>	<i>Línea piezométrica empleando todos los métodos de análisis para Esquema4</i>	152
<b>Gráfico 11.</b>	<i>Línea piezométrica empleando todos los métodos de análisis para Esquema 5</i>	153



## ÍDICE DE ESQUEMAS

<b>Esquema 1.</b>	<i>Contorno subterráneo con presencia de carpeta y dos tablaestacas</i>	
<i>aguas arriba</i>		146
<b>Esquema 2.</b>	<i>Contorno subterráneo tablaestaca aguas arriba</i>	146
<b>Esquema 3.</b>	<i>Contorno subterráneo únicamente con escalones a1, a2</i>	147
<b>Esquema 4.</b>	<i>Contorno subterráneo con presencia de tablaestaca aguas arriba y</i>	
<i>aguas abajo</i>		147
<b>Esquema 5.</b>	<i>Contorno subterráneo con presencia de tablaestaca aguas arriba,</i>	
<i>mitad de la presa y aguas abajo</i>		148
<b>Esquema 6.</b>	<i>Contorno subterráneo con presencia de carpeta y dos tablaestacas</i>	
<i>aguas arriba (M.red hidrodinámica)</i>		148
<b>Esquema 7.</b>	<i>Contorno subterráneo tablaestaca aguas arriba (M.red</i>	
<i>hidrodinámica)</i>		149
<b>Esquema 8.</b>	<i>Contorno subterráneo únicamente con escalones a1, a2 (M.red</i>	
<i>hidrodinámica)</i>		149
<b>Esquema 9.</b>	<i>Contorno subterráneo con presencia de tablaestaca aguas arriba y</i>	
<i>aguas abajo (M.red hidrodinámica)</i>		150
<b>Esquema 10.</b>	<i>Contorno subterráneo con presencia de tablaestaca aguas arriba,</i>	
<i>mitad de la presa y aguas abajo (M.red hidrodinámica)</i>		150

## RESUMEN

En el proyecto de DISEÑO DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO DE PRESAS DE HORMIGÓN CIMENTADAS EN SUELO se requiere un análisis de filtración del suelo. Se plantea diferentes esquemas teniendo en cuenta los elementos horizontales y verticales a lo largo del contorno subterráneo. Los mejores esquemas son aquellos que pueden proporcionar economía de la presa, simplicidad y capacidad de fabricación. Las diferentes variables que participan en el análisis son subpresión, gradiente máxima de salida y caudal de filtración que dependiendo de ellas se podrá determinar el comportamiento del diseño si este es el adecuado. De estas opciones igualmente fuertes para el contorno subterráneo, sobre la base de su comparación técnica y económica, teniendo en cuenta los factores enumerados, se selecciona el contorno más racional. Estas variables serán determinadas con la ayuda de diferentes métodos de análisis de filtración aplicando un algoritmo de cálculo para cada uno de ellos.

La aplicación de los métodos de análisis ayudará a la comparación de estos, enfocándonos en el método de los coeficientes de resistencia el mismo que necesita de varios módulos para desarrollarlo por lo que actualmente es una de los más difundidos en este ámbito.

*Palabras clave:* filtración, coeficientes de resistencia, contorno subterráneo, algoritmo, métodos, variables, subpresión, comparación.

## **ABSTRACT**

A project of UNDERGROUND CONTOUR DESIGN OF GROUND-BASED CONCRETE DAMS requires a soil filtration analysis. Different schemes are proposed taking into account the horizontal and vertical elements along the underground boundary. The best schemes are those that can provide dam economy, simplicity and manufacturing capacity. The different variables involved in the analysis are sub pressure, maximum output gradient and filtration flow that depending on them can determine the design behavior if appropriate. Of these equally strong options for the underground contour, based on its technical and economic comparison, taking into account the factors listed, the most rational contour is selected. These variables will be determined with the help of different methods of filtration analysis applying a calculation algorithm for each of them.

The application of the analysis methods will help to compare these, focusing on the method of resistance coefficients the same that needs several modules to develop it so it is currently one of the most widespread in this topic.

Keywords: filtration, resistance coefficients, underground contour, algorithm, methods, variables, subpressure, comparison.

## GLOSARIO DE ABREVIATURAS

$Z$ : carga actuante (m)

$\rho/\gamma_0$ : altura de presión (Pa)

$Y$ : coordenadas de las ordenadas en el punto (m)

$X$ : coordenadas de las abscisas en el punto (m)

$J$ : gradiente piezométrica.

$J_{m\grave{a}x}$ : gradiente máxima de salida.

$J_{sal}$ : gradiente de salida.

$J$ : gradiente piezométrica media.

$H_1$ : altura agua arriba (m)

$H_2$ : altura aguas abajo (m)

$\Delta H$  : franja de presión.

$\Delta s$ : coordenadas medida a lo largo de la línea de flujo que pasa a través del punto dado en dirección del flujo.

$\Delta L$ : distancia entre las equipotenciales que limita el nicho, m

$K$ : coeficiente de filtración del suelo.

$q$ : caudal de filtración.

$h_j$ : pérdidas de carga (m)

$\zeta_j$ : coeficiente de resistencia.

$g$ : gravedad. (m/s<sup>2</sup>)

$T_{real}$ : espesor real de la capa permeable (m)

$T$ : espesor de la capa permeable bajo el elemento horizontal (m)

$T'_{cal}$ : capa permeable para subpresión (m)

$T''_{cal}$ : capa permeable para gradiente máxima de salida (m)

$T'''_{cal}$ : capa permeable para caudal de filtración (m)

$T'act$ : capa activa de filtración para subpresión (m)

$T''act$ : capa activa de filtración para gradiente máxima de salida (m)

$T'''act$ : capa activa para caudal de filtración (m)

$l_o$ : proyección horizontal del contorno subterráneo (m)

$S_o$ : proyección vertical del contorno subterráneo (m)

$a$ : alto del escalón (m)

$s$ : alto de la tablaestaca entre las que se encuentra el elemento horizontal (m)

$T_1$ : mayor espesor de la capa permeable a la izquierda o a la derecha del escalón. (m)

$T_2$ : menor espesor de la capa permeable, a la izquierda o a la derecha de la tablestaca (m)

$l$ : longitud del elemento horizontal (m)

$\zeta_j$ : coeficiente de resistencia.

$\zeta_{ent}$ : coeficiente de resistencia de entrada.

$\zeta_{sal}$ : coeficiente de resistencia a la salida.

$\zeta_{esc}$ : coeficiente de resistencia de un escalón.

$\zeta_{tab}$ : coeficiente de resistencia de una tablaestaca.

$\zeta_l$ : coeficiente de resistencia en un elemento longitudinal.

$\Sigma\xi$ : sumatoria de coeficientes de resistencia.

$W_s$ : subpresión de sumersión (Kn/m)

$W_{exc}$ : subpresión de excedentes. (Kn/m)

$\Omega$ : superficie del diagrama de subpresión.

$d$ : profundización en la base de la presa ajo el nivel de agua, aguas abajo (m)

$b$ : ancho de la base de la sección transversal de la presa (m)

$L_{vir}$ : longitud virtual. (m)

$\alpha$ : coeficiente para el cálculo de la gradiente(rad)

$nf$ : números de franja de caudal.

ne: número de orden de franja de carga contado desde el fondo aguas arriba.

$\gamma_0$ : peso específico de agua (Kn/m<sup>3</sup>)

$\gamma_h$ : peso específico del hormigón (Kn/m<sup>3</sup>)

# **CAPITULO I**

## **ANTECEDENTES Y GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

La importancia del proyecto investigativo concierne en el diseño del contorno subterráneo de una presa de hormigón cimentada en suelo o como se conoce la línea que limita desde abajo los elementos impermeables y poco permeables de la presa que se encuentra en contacto directo con el suelo de cimentación.

Esta realidad apremia en el diseño del contorno subterráneo de la presa de hormigón a reducir de alguna manera las condiciones naturales e imponer el análisis no precisamente con un esquema real sino el esquema simplificado. La prescripción de dicho esquema constituye un problema ingenieril de gran envergadura y necesita preceptuar criterios y resultados de trabajos precedentes al tema.

El diseño del contorno subterráneo involucra ante todo la selección de un contorno que satisfaga las condiciones de funcionalidad, confiabilidad, resistencia y estabilidad al menor costo.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Proponer y aplicar un algoritmo para el análisis del contorno subterráneo de las presas de hormigón a gravedad, con vertido incorporado, cimentadas en suelo, por el método de los coeficientes de resistencia.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Formular algoritmos de cálculo para el diseño del contorno subterráneo de las presas de hormigón cimentadas en suelo, para aplicar los diferentes métodos establecidos por consiguiente establecer el análisis de filtración tomando en cuenta los diferentes criterios y procedimientos.
- b) Formular los criterios y procedimiento para determinar la subpresión bajo el contorno subterráneo de la presa.
- c) Formular los criterios y procedimientos para verificar la resistencia a la filtración del suelo de cimentación de la presa y por consiguiente determinar la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración bajo una presa de hormigón cimentada en suelo.

## **1.3. PROBLEMA**

Las presas de hormigón cimentadas en suelo tienen particularidades en su diseño que difieren substancialmente de las que corresponden a las presas cimentadas en roca. La más importante particularidad es la de su contorno subterráneo constituido por los elementos de contacto de la presa con el macizo de cimentación. De hecho, el contorno subterráneo de la presa define en gran medida las condiciones tanto del estado tensión- deformación del sistema presa-cimentación, como de su estabilidad y también de la resistencia a la filtración del suelo de cimentación.

La configuración subterránea de la presa de hormigón (contorno subterráneo de la presa) que finalmente se adopta debe ser resultado de la comparación de dos a tres alternativas,



considerando. Las condiciones geológicas, hidrogeológicas, así como constructivas, la magnitud de la carga hidráulica, el alto de la presa y los indicadores geomecánicas del macizo de cimentación.

En este contexto, durante el proceso de diseño es ineludible considerar una serie de variantes entre las que existan diferencias tanto por la forma como por las dimensiones de los elementos involucrados. Para la elección del contorno subterráneo más adecuado, la comparación de alternativas debe realizarse, bajo la premisa de que ellas deben originar condiciones equivalentes desde el punto de vista de la resistencia, estabilidad y confiabilidad de la presa.

El flujo de filtración formado por el agua que ingresa en el suelo desde el tramo aguas arriba de la presa, a través del fondo y las márgenes del río, origina una serie de efectos que deben ser tomados en consideración durante el diseño.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

Las presas de derivación más difundidas son las de hormigón con vertido incorporado cimentadas en suelo ya que estas son para sistemas significativos como de agua potable, riego, hidroeléctricos de capacidad pequeña y mediana y con propósitos múltiples.

Las condiciones de estabilidad y resistencia de este tipo de presas y, por consiguiente, su confiabilidad, como se ha indicado, están en gran medida relacionadas con las características del contorno subterráneo y con los parámetros del flujo de filtración bajo dicho contorno.

En este contexto, al resolver uno u otro problema práctico con frecuencia se debe enfrentar condiciones suficientemente complejas, geológicas y de otro tipo que no pueden ser consideradas en su integridad en los análisis.

Esta realidad no obliga en el diseño del contorno subterráneo de la presa a simplificar de alguna manera las condiciones naturales y someter a análisis no precisamente la construcción real sino su esquema de análisis (esquema simplificado). La formulación de este esquema

constituye un problema ingenieril de suma importancia y requiere disponer de criterios y resultados de trabajos previos sobre el tema.

## **1.5. METODOLOGÍA**

La metodología que se utilizará en el análisis del diseño del contorno subterráneo de presas de hormigón cimentadas en suelo constará de lo siguiente:

- a) Bases de diseño
- b) Métodos matemáticos de cálculo
- c) Esquemas definidos
- d) Algoritmo de cálculo
- e) Análisis de resultados
- f) Comparación de métodos
- g) Conclusiones y recomendaciones

Toda la información preliminar será obtenida por fuentes bibliográficas para esclarecer los métodos usados haciendo un énfasis en el método de coeficientes de resistencia que es el principal en este trabajo.

Se elaborará el algoritmo de cálculo mediante un software con este se realizará los cálculos para la aplicación de los métodos en los diferentes esquemas planteados. El algoritmo constará de varios módulos en el caso del método de coeficientes con esto se evidenciará las diferentes variables claves necesarias para el análisis.

Con la obtención de los resultados se llevará a cabo el análisis y comparación de resultados y métodos respectivamente.

## **CAPÍTULO II**

### **ENFOQUE GENERAL DEL TEMA DE FILTRACIÓN DEL AGUA EN SUELOS BAJO PRESAS DE HORMIGÓN**

#### **2.1. CONSIDERACIONES PRELIMINARES**

El problema del movimiento subsuperficial del agua en los suelos es uno de los más importantes en el campo de las construcciones hidráulicas. Un significado importante adquiere este problema en los casos de diseño y construcción de las presas de hormigón y otras estructuras hidráulicas de contención cimentadas en suelo. Precisamente, sobre la base de los análisis de filtración se determinan, por una parte, las cargas principales actuantes en los elementos subterráneos de una construcción de este tipo y, por otra parte, las dimensiones de los principales elementos constructivos.

Considerando integralmente el problema del flujo de filtración, resulta necesario identificar dentro él, las siguientes cinco direcciones principales de investigación:

- a) Identificación de las principales regularidades de la filtración del agua en el suelo, es decir, la formulación de aquellas expresiones analíticas que permitirían en forma teórica determinar la velocidad del movimiento del agua, en función de unos u otros parámetros determinantes del carácter del medio poroso considerado, así como también, en función de la gradiente de carga (gradiente piezométrica). Por supuesto que, al estudiar este problema, es necesario distinguir los casos de los flujos laminar y turbulento del agua, así como los casos correspondientes al espacio transicional de filtración.
- b) Investigaciones teóricas de diferentes flujos de filtración, desarrolladas a partir de las funciones básicas de filtración preestablecidas (punto a). En este ámbito se presentan diferentes tipos de problemas hidrodinámicos, al resolver los cuales se

obtienen la distribución de cargas y de presiones hidrodinámicas en el campo de flujo, los caudales de filtración y otros indicadores.

En este marco son investigados algunos tipos de flujos de filtración (movimiento a presión y con superficie libre, estacionario y no estacionario). En particular se considera el caso de los suelos compresibles, cuando como consecuencia de la variación de volumen de poros en el suelo surge un flujo de filtración especial no estacionario; además se investiga flujos de filtración de una, dos y tres dimensiones.

También en este contexto son considerados diferentes métodos teóricos de investigación de los flujos de filtración. Al respecto es necesario distinguir: a) métodos ingenieriles que son los métodos de la hidrodinámica aplicada, es decir de la hidráulica; b) métodos “exactos” de la investigación, que son los métodos de la hidrodinámica teórica, es decir de la teoría matemática de la filtración.

- a) Investigaciones experimentales de la filtración, en modelos físicos de laboratorio y campo que sirven para: a) para determinar las características correspondientes (por ejemplo, los coeficientes de filtración) involucradas en las ecuaciones fundamentales de filtración (punto 1); b) para investigar casos específicos de los flujos de filtración o de sus fragmentos.
- b) Investigaciones (teóricas y experimentales) sobre la acción mecánica, como también química, del flujo de filtración sobre el esqueleto del suelo, con la particularidad que, especialmente, es necesario considerar las deformaciones de los suelos por filtración (tubificación, obstrucción, desplazamiento local) y los diseños relacionados de filtros invertidos para los drenajes.
- c) Finalmente se puede considerar un componente puramente constructivo: mejoramiento de los drenajes y de las partes subterráneas de las construcciones de contención, en relación con el tema de filtración.

En este trabajo está referido únicamente a algunos elementos de un problema de amplio alcance que, en términos generales ha sido enfocado en las cinco direcciones de investigación identificadas arriba. Básicamente se considera la filtración plana laminar bajo presas de hormigón.

Como es conocido, al diseñar una presa de hormigón cimentada en suelo, nos encontramos frente a un flujo de filtración a presión, caracterizado por tener secciones de flujo con curvatura (es el caso de la denominada filtración de variación brusca). En principio la solución teórica del problema de este tipo de filtración presenta considerables dificultades. Al mismo tiempo, si no se aclaran las características hidrodinámicas del flujo de filtración referido, no es posible realizar el análisis mecánico del cuerpo de la presa, así como evaluar hasta donde el diseño del contorno subterráneo de la presa es correcto; por ejemplo, podría surgir la erosión interna del suelo de cimentación por acción del flujo de filtración.

Al realizar el análisis de estabilidad de una presa es necesario conocer la magnitud de la subpresión; en cambio, al verificar la resistencia a la filtración del suelo de cimentación es necesario conocer las magnitudes de las velocidades de filtración y de las gradientes piezométricas en diferentes puntos del campo vectorial de flujo.

En el caso más general, con ayuda del análisis del flujo de filtración en el suelo de cimentación de una presa de hormigón es necesario:

- a) Construir el diagrama de subpresión, actuante en la base de la presa y de la carpeta anclada, en caso de que esta forme parte de la solución constructiva. Este diagrama es imprescindible para el análisis estático de la presa;
- b) Determinar la carga en el borde inferior de la tablestaca o del dentellón a la salida del flujo de filtración, necesaria para verificar la estabilidad local del suelo de cimentación, respecto al desplazamiento local, en el fragmento o tramo final de filtración;

- c) Determinar la gradiente de control de la resistencia a la filtración del suelo de cimentación;
- d) Determinar la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración en la superficie del fondo del cauce aguas abajo, útil específicamente para el diseño del filtro invertido que cubre el fondo aguas abajo.
- e) Determinar las gradientes piezométricas en los contactos entre los suelos no cohesionados de granulometría gruesa y de granulometría fina que conforman el macizo de cimentación (en aquellos sitios donde se podría esperar el transporte del suelo de granulometría fina a través de los poros del suelo de granulometría gruesa).

En el caso de ser necesario verificar la estabilidad de la presa respecto al deslizamiento sobre una superficie ubicada, a determinada profundidad del nivel de cimentación, es necesario, con ayuda del análisis de filtración, adicionalmente determinar las cargas a lo largo de esta superficie de deslizamiento “profundo”.

Finalmente, en una serie de casos puede ser de interés determinar la magnitud del caudal de filtración, como resultado también del análisis de filtración.

Las secciones transversales de la presa que deben ser sometidas a análisis de filtración, son determinadas durante el análisis estático y durante el análisis de resistencia a la filtración del suelo de cimentación.

El propio análisis de filtración del suelo de cimentación de la presa se ejecuta bajo la premisa de que está dado el contorno subterráneo de la presa. De igual manera, para el análisis de filtración de la presa se consideran dados los niveles de agua aguas arriba y aguas abajo.

Respecto al análisis de filtración del contorno subterráneo dado, ante todo es necesario formular el esquema de cálculo del contorno subterráneo considerado. Este esquema se obtiene del esquema real a través de la exclusión de diferentes tipos de detalles del contorno, respecto

a los cuales previamente se puede afirmar que ellos no pueden influir substancialmente en los resultados del análisis.

Por ejemplo, en una serie de casos, cuando se formula el esquema de cálculo, los dentellones delgados son reemplazados por tablestacas impermeables de la correspondiente profundidad; los dentellones pequeños pueden ser eliminados del esquema de cálculo.

A continuación, al reemplazar el campo de filtración del suelo de cimentación, generalmente algo no homogéneo, por un medio homogéneo isotrópico, caracterizado por un determinado coeficiente de filtración, es necesario tomar en cuenta que, la distribución de las cargas en el suelo de cimentación y la magnitud de las gradientes piezométricas en diferentes puntos del macizo en absoluto no dependen de la magnitud adoptada del coeficiente de filtración. Del coeficiente de filtración depende únicamente el caudal de filtración, cuya magnitud es directamente proporcional a la magnitud d dicho coeficiente.

Es necesario considerar también que las gradientes piezométricas en los diferentes puntos del suelo de cimentación en absoluto no dependen de los niveles de agua, aguas arriba y aguas abajo y se determinan, para el contorno subterráneo dado, a en función de la carga  $Z$ , actuante sobre la estructura. Por su parte, la magnitud de las cargas en los diferentes puntos del suelo de cimentación, si dependen de los niveles de agua en los tramos aguas arriba y aguas abajo; precisamente, debido a este hecho, la magnitud de la subpresión actuante en la base de la presa depende, por ejemplo, de la profundidad del agua aguas abajo.

## CAPÍTULO III

### CRITERIOS Y ELEMENTOS BÁSICOS PARA IDENTIFICAR LOS ELEMENTOS DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO DE PRESAS DE HORMIGÓN CIMENTADAS EN SUELO

#### 3.1 CRITERIOS DE APLICABILIDAD PARA LOS DIFERENTES CAMPOS Y RANGOS

En la siguiente figura se presenta la sección transversal de una estructura de contención en un cauce natural, cimentada en suelo. Las profundidades del agua en los tramos aguas arriba y aguas abajo son, respectivamente  $h_1$  y  $h_2$ . La carga que actúa sobre la estructura es  $Z$ .

Para el análisis subsiguiente, es útil recordar algunos elementos básicos de la teoría de la filtración del agua en los suelos. Considerando que el nivel de referencia 0-0 coincide con el nivel de agua aguas abajo y asumiendo que dicho nivel es a la vez el eje de abscisas X. El eje Y inicia en el eje 0-0 y está dirigido hacia abajo. (Nizhny Novgorod,2011)

En el gráfico se identifica un punto  $m_1$  y a este punto se aplica un piezómetro  $\Pi$ . Como se conoce la carga  $H$  en el punto  $m_1$  constituye la elevación del nivel de agua en el piezómetro, sobre el nivel de referencia 0-0. Tomando en cuenta la dirección dada al eje Y como se puede expresar en la Ecuación 1:

$$H = \frac{p}{\gamma_o} - y \quad (1)$$

Dónde,  $y$  es coordenada del punto considerado;  $\frac{p}{\gamma_o}$ , “altura de presión”, es decir altura de la columna líquida en el piezómetro  $\Pi$ , unido a dicho punto, donde la presión hidrodinámica es  $p$ ;  $\gamma_o$ - peso específico del agua.

La Ecuación 1 anterior puede ser presentada de la siguiente manera:

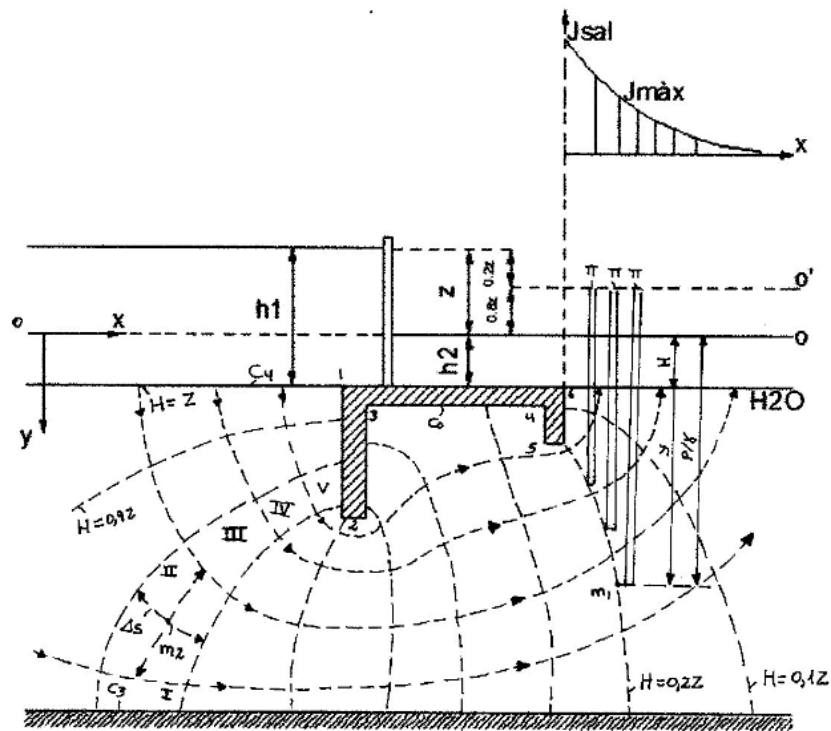
$$\frac{p}{\gamma_o} = H + y \quad (2)$$



De donde se desprende que la altura de presión, en cualquier punto del flujo considerado está dada por la carga en el punto más la profundidad a la que éste se encuentra, bajo el nivel de referencia.

**Figura 1.**

*Sección transversal de una estructura de contención en un cauce natural, cimentada en suelo*



*Elaborado por: Autora*

La gradiente de carga o, en otras palabras, la gradiente piezométrica en el punto considerado del campo de filtración:

$$J = -\frac{dH}{ds} \quad (3)$$

1

Dónde, s- coordenada medida a lo largo de la línea de flujo que pasa a través del punto dado, en dirección del flujo.

Como velocidad de filtración es considerada una velocidad imaginaria:

$$v = \frac{Q}{\omega_{POR} + \omega_{SOL}} = \frac{Q}{\omega_{GEOM}} \quad (4)$$

Donde,  $Q$ - caudal de filtración del agua que se desplaza a lo largo de un conducto que tiene sección transversal  $\omega_{GEOM} = \omega_{POR} + \omega_{SOL}$ , ( $\omega_{POR}$ - área de la sección transversal de los poros;  $\omega_{SOL}$ - área de la sección transversal de las partículas sólidas del suelo).

Para el régimen laminar del movimiento del agua de filtración, en calidad de función básica se toma la Ecuación 5, conocida de Darcy:

$$v = kJ = -k \frac{dH}{ds} \quad (5)$$

Dónde,  $k$ - coeficiente de filtración del suelo, se determina experimentalmente para el suelo dado.

Como se puede apreciar, a partir de la definición de velocidad de filtración, expresada con la Ecuación (4) es reemplazado el campo real de filtración, constituido por poros llenos del agua en movimiento y el esqueleto del suelo, por un medio continuo imaginario cuyo movimiento se sujeta a ecuación de Darcy.

En el caso de la construcción de la figura 1 la sección de entrada del flujo de filtración es el fondo del cauce aguas arriba, en tanto que la sección de salida es el fondo del cauce aguas abajo. Por su parte el flujo de filtración, que se contacta desde abajo con el contorno subterráneo de la construcción (línea 1-2-3-4-5-6), se caracteriza por tener diferentes valores de la carga  $H$  en sus diferentes puntos. Por esta razón se puede afirmar que la carga  $H$  es función de las coordenadas  $x, y$ :

$$H = f(x, y) \quad (6)$$

Por esta razón a la magnitud  $H$  con frecuencia se denomina función de carga.

A partir de la teoría matemática de la filtración se conoce que el campo vectorial de velocidades de la filtración en el suelo de cimentación de una presa es un campo potencial, con

potencial  $\varphi = -kH$ . De la misma manera en la teoría mencionada se demuestra que la función de carga  $H(x, y)$  es una función armónica, es decir una función que en cualquier punto del campo de filtración satisface la Ecuación 7 la misma que es de Laplace:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

La solución matemática del flujo plano de filtración se traduce en la solución de la ecuación de Laplace, es decir en la búsqueda de aquella función  $H(x, y)$  que, de una parte, satisfaga la ecuación de Laplace en cada punto del campo de filtración y, de otra parte, satisfaga las correspondientes condiciones de frontera.

Para el campo de filtración de la figura 1 se tienen las siguientes cuatro condiciones de frontera:

- a) A lo largo de la línea del fondo aguas arriba,  $C_1$ , la carga debe ser constante e igual a la magnitud  $H_1 = Z$  (para la condición arriba mencionada, respecto al nivel de referencia); cómo se puede apreciar, la línea  $C_1$  es una línea con una misma carga;
- b) A lo largo de la línea del fondo aguas abajo,  $C_2$ , la carga debe ser constante e igual a cero (para la condición arriba mencionada, respecto al nivel de referencia); cómo se puede apreciar la línea  $C_2$  también es una línea con una misma carga;
- c) Para todos los puntos del contorno subterráneo de la construcción 1-2-3-4-5-6 (para la línea  $C_0$ ) debe tener lugar la Ecuación 8:

$$\frac{\partial H}{\partial n'} = 0 \quad (8)$$

Dónde,  $\partial n'$  es la normal al contorno subterráneo en el punto considerado.

- Para todos los puntos de la superficie de la capa impermeable (para el límite  $C_3$ ), también debe ser satisfecha la condición de la Ecuación (8), en la cual, por  $n'$  cabe entender a la normal a la línea trazada  $C_3$ , trazada en el punto considerado.

Una vez resuelta la ecuación de Laplace, es decir una vez encontrada la expresión para  $H(x, y)$ , a continuación, fácilmente puede ser construida una serie de líneas de la misma carga o carga constante (equipotenciales) que, a la vez son secciones de flujo. (Nizhny Novgorod, 2011).

$$H(x, y) = \text{const} \quad (9)$$

En la figura 1 se muestran 11 líneas equipotenciales trazadas a través del intervalo igual a  $0,1 Z$ , donde  $Z$ , en este caso, puede ser considerada como la pérdida de carga a lo largo del todo el flujo de filtración, desde la sección de flujo  $C_1$ , hasta la sección de flujo  $C_2$ .

Al ser conectados varios piezómetros  $\Pi$  a lo largo de cualquier equipotencial, entonces, los niveles de agua en ellos será el mismo, es decir se ubicarán en una horizontal 0-0' (figura 1).

Una vez que se cuenta con las equipotenciales, resulta fácil a continuación, teórica o gráficamente, construir las líneas de flujo (líneas entrecortadas en la figura 1). La primera línea de flujo es precisamente el contorno subterráneo 1-2-3-4-5-6, en tanto que la última línea de flujo es la línea  $C_3$ .

El sistema de las líneas de carga constante (que representan las secciones de flujo) y el sistema de las líneas de flujo deben formar una red ortogonal; a esta red se la denomina red hidrodinámica. Todas las líneas de flujo deben formar ángulo recto con las líneas del fondo del cauce aguas arriba y aguas abajo, en tanto que todas las líneas equipotenciales deben formar ángulo recto con la línea del contorno subterráneo  $C_0$  y con la superficie  $C_3$  de la capa impermeable.

Una vez que se dispone de la red hidrodinámica del movimiento, resulta relativamente fácil resolver, con ayuda de dicha red, cualquier problema práctico. Por ejemplo, la magnitud de la gradiente piezométrica en el punto  $m_2$  (figura 1):

$$J = \frac{H_3 - H_4}{\Delta s} = \frac{\Delta H}{\Delta s} = \frac{0,1Z}{\Delta s} \quad (10)$$

Dónde,  $\Delta s$ - distancia entre dos líneas equipotenciales vecinas, medida a lo largo de la línea de flujo trazada a través del punto  $m_2$ ;  $\Delta H$ - pérdida de carga en la longitud  $\Delta s$ .

La magnitud de la velocidad de filtración en el punto  $m_2$  :

$$v = kJ = k \frac{0,1Z}{\Delta s} \quad (11)$$

El caudal elemental unitario de filtración que fluye entre dos líneas vecinas de flujo:

$$\delta Q = v\Delta\sigma \quad (12)$$

Dónde,  $\Delta\sigma$ - distancia entre las dos líneas de flujo consideradas.

El caudal total de filtración  $Q$  que se mueve bajo la presa, en concordancia con Ecuación 11 y Ecuación 12:

$$Q = \sum_{i=1}^{i=m} kZ \cdot 0,1 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta s}\right)_i = kZ \cdot 0,1 \sum_{i=1}^{i=m} \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta s}\right)_i \quad (13)$$

Dónde,  $i$ - número de orden del “cuadrilátero curvilíneo”, de entre los cuadriláteros comprendidos entre dos equipotenciales vecinas (por ejemplo, los cuadriláteros I-V en la figura anterior);  $m$ - número de todos los cuadriláteros. Es evidente que la Ecuación (13) puede ser presentada de la siguiente manera:

$$Q = kZF \quad (14)$$

Dónde: 
$$F = 0,1 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta s}\right)_i \quad (15)$$

Depende únicamente de la forma geométrica del campo de filtración (más no de sus dimensiones: para los campos geoméricamente semejantes las magnitudes de  $F$  deben ser iguales).

Utilizando la red hidrodinámica y considerando la Ecuación (2) es posible construir el diagrama de subpresión (el diagrama de la magnitud  $\frac{p}{\gamma}$ ), para la base de la presa. Finalmente, con ayuda de la red hidrodinámica es posible construir el diagrama de las gradientes de salida (gradientes piezométricas de salida)- ver el diagrama mostrado en la parte superior derecha de la figura anterior. Como se puede apreciar la gradiente piezométrica máxima de salida se

presenta en el punto 6. Está claro que al multiplicar esta gradiente por el coeficiente de filtración se obtiene la velocidad máxima de salida del flujo de filtración. (Nizhny Novgorod,2011).

Como se ha anotado anteriormente, el problema fundamental de la teoría matemática de filtración del agua bajo una presa constituye la solución de la ecuación de Laplace (Ecuación 7). El problema puramente matemático es suficientemente complejo y en muchos casos (por la complejidad del campo de filtración, no uniformidad del suelo, etc.) no tiene solución analítica.

Las primeras investigaciones sistematizadas del problema estacionario plano de la filtración a presión con enfoque matemático fueron desarrolladas por N.N. Pavlovsky en 1922, utilizando el método del mapeo conforme. Simultáneamente Pavlovsky propuso para obtener la red hidrodinámica el método experimental de analogía electro-hidrodinámica, basado en el hecho de que tanto para el flujo eléctrico como el de filtración rige la ecuación bi- cuadrática de Laplace. (Nizhny Novgorod,2011).

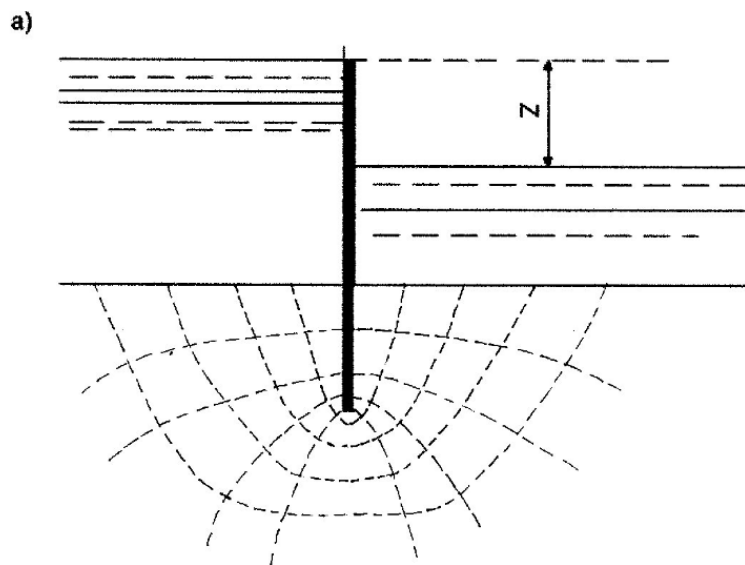
Sin embargo, los problemas reales de filtración bajo presas pertenecen a los problemas para los cuales la ecuación diferencial que rige no tiene solución cerrada y en este caso cabe recurrir a los métodos aproximados sean ingenieriles apoyados en modelos físicos o a los métodos numéricos.

### **3.2. PROBLEMAS QUE PUEDEN SER RESUELTOS EN FORMA ANALÍTICA POR LOS MÉTODOS DE LA TEORÍA MATEMÁTICA DE FILTRACIÓN.**

N.N. Pavlovsky, aplicando el método teórico propuesto por él resolvió, en particular, el problema plano de la filtración relativo a los casos de “solo una tablestaca” (figura 2) y contorno plano (figura 3). Como resultado de esta solución resulto evidente que en caso de nivel impermeable ubicado a una profundidad considerablemente grande ( $T = \infty$ ) las líneas de flujo del campo de filtración, en los casos de solo una tabla estaca y contorno plano son elipses, en tanto que las equipotenciales son hipérbolas. (Nicolás Torres,2010)

**Figura 2.**

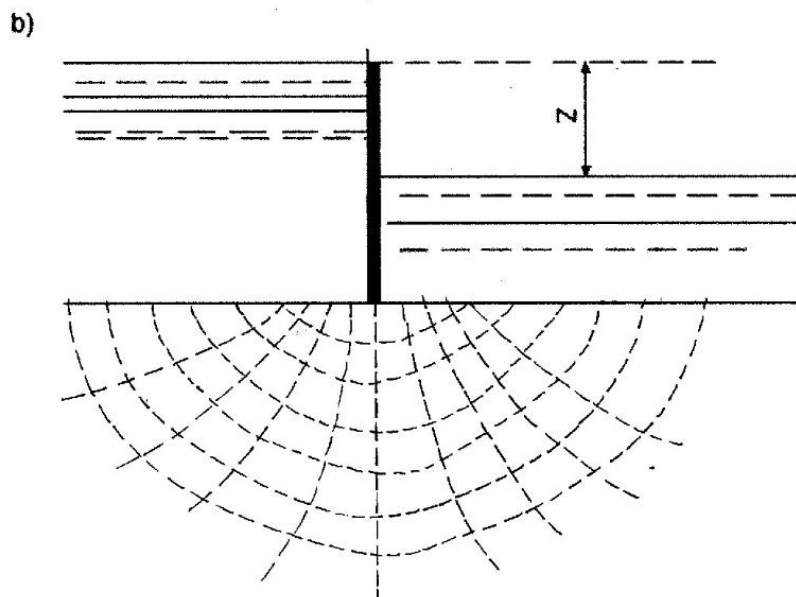
*Filtración relativo a los casos de solo una tablaestaca*



*Elaborado por: Autora*

**Figura 3.**

*Contorno Subterráneo Plano*



*Elaborado por: Autora*

S. N. Numerov analizando el problema plano y utilizando el método matemático de N.N. Pavlovsky resolvió dos problemas importantes de la filtración, con fines ingenieriles:

El primer problema de S. N. Numerov: determinación de la pérdida de carga en una tablestaca interna, en caso de profundización pequeña de la capa impermeable y longitudes infinitamente grandes de los acercamientos horizontales a la tablestaca considerada. En la figura (4) se presenta el caso de filtración adoptando los parámetros  $T_1, T_2, s$  mostrados en la figura.

Adicionalmente a la magnitud del caudal unitario relativo se representa con el símbolo  $q_r$ :

$$q_r = \frac{q}{k} \quad (16)$$

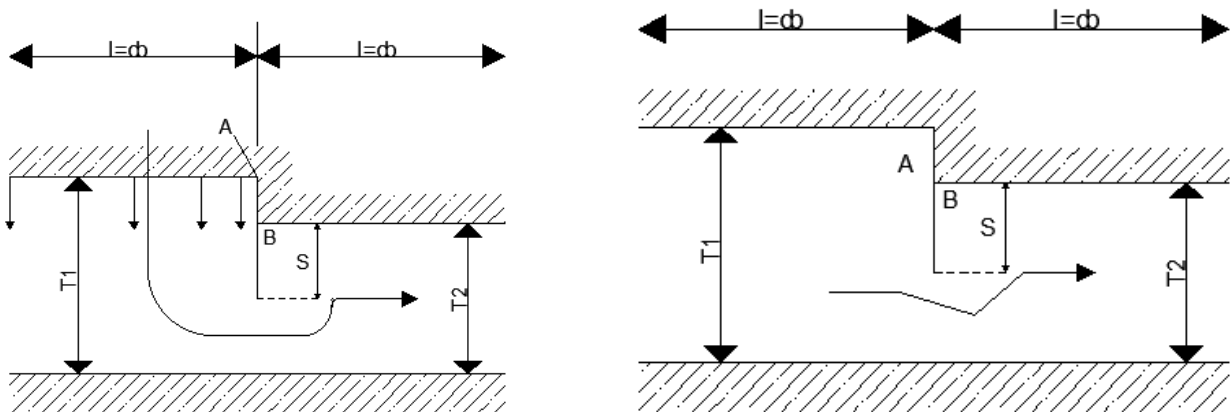
Dónde,  $k$ - coeficiente de filtración;  $q$ - caudal unitario correspondiente a la unidad de longitud del frente de filtración;  $\Delta H$  es la pérdida de carga,

$$\Delta H = H_A - H_B \quad (17)$$

Donde  $H_A$  y  $H_B$  son las cargas, respectivamente, en los puntos A y B indicados en la figura (4)

**Figura 4.**

*Filtración adoptando los parámetros  $T_1$  y  $T_2$*



*Elaborado por: Autora*



Aplicando las funciones matemáticas obtenidas por N.N. Pavlovsky S. N. Numerov obtuvo para el caso de tablestaca interior el gráfico de la figura 4. Como se puede apreciar, a través de dicho gráfico, conociendo las dimensiones  $s, T_1$  y  $T_2$ , es posible determinar la magnitud  $\frac{\Delta H}{q_r}$ .

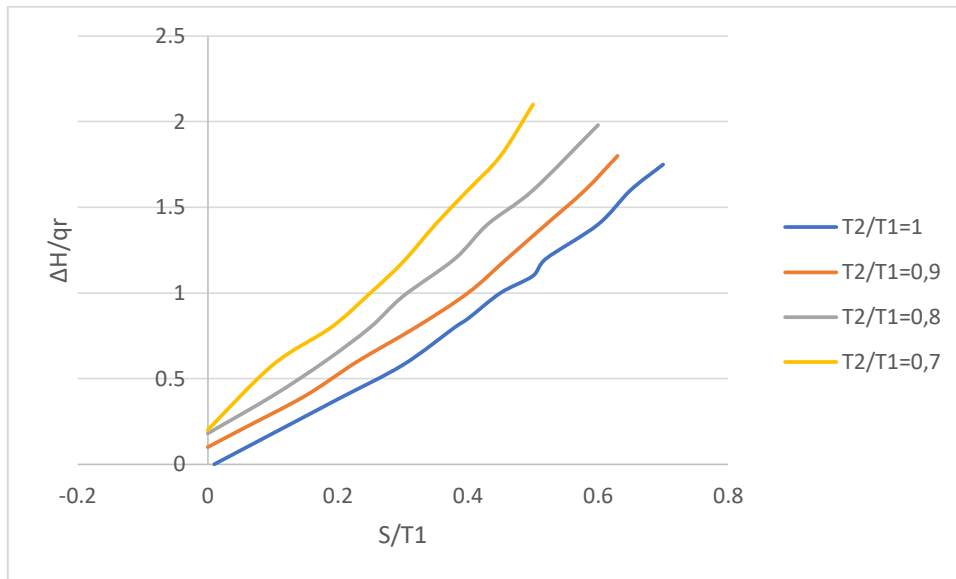
El segundo problema de S. N. Numerov: búsqueda de la pérdida de carga en la tablestaca de entrada (o de salida) en caso de profundización pequeña de la capa impermeable y longitudes infinitamente grandes del tramo horizontal de alejamiento desde la tablestaca considerada (o del tramo de acercamiento horizontal a la tablestaca considerada).

Aplicando la simbología ya adoptada (Ecuaciones (16) y (17)), así como las dimensiones indicadas en la grafico 1 S.N. Numerov, en forma similar al caso del gráfico 1, obtuvo el gráfico de la figura gráfico 2, correspondiente a una tablestaca de entrada o de salida); con ayuda de este gráfico, conociendo las dimensiones  $s, T_1, T_2$ , es posible determinar la magnitud  $\frac{\Delta H}{q_r}$ , para el esquema del gráfico 1.

N.N. Pavlovsky demostró que la magnitud  $\frac{\Delta H}{q_r}$ , en el caso de flujo de filtración laminar, no depende de la dirección del flujo, es decir que el valor absoluto de la magnitud  $\frac{\Delta H}{q_r}$  es igual para la tablestaca de entada y de salida (en el caso de dimensiones iguales del campo de filtración). Estas observaciones son válidas de igual manera para el esquema del gráfico 2.

### Gráfico 1.

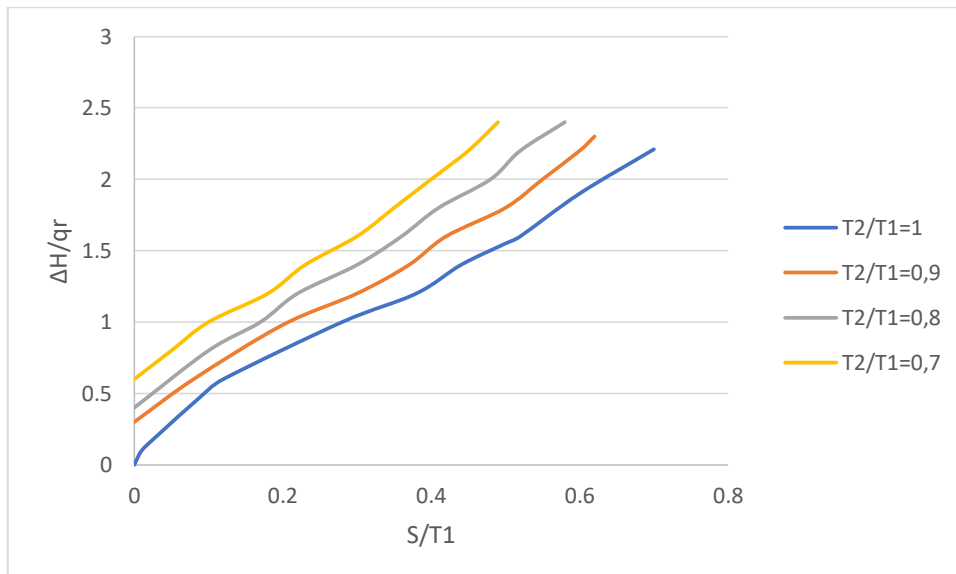
Determinación de la magnitud  $\frac{\Delta H}{q_r}$



Elaborado por: Autora

### Gráfico 2.

Determinación de la magnitud  $\frac{\Delta H}{q_r}$  caso 2



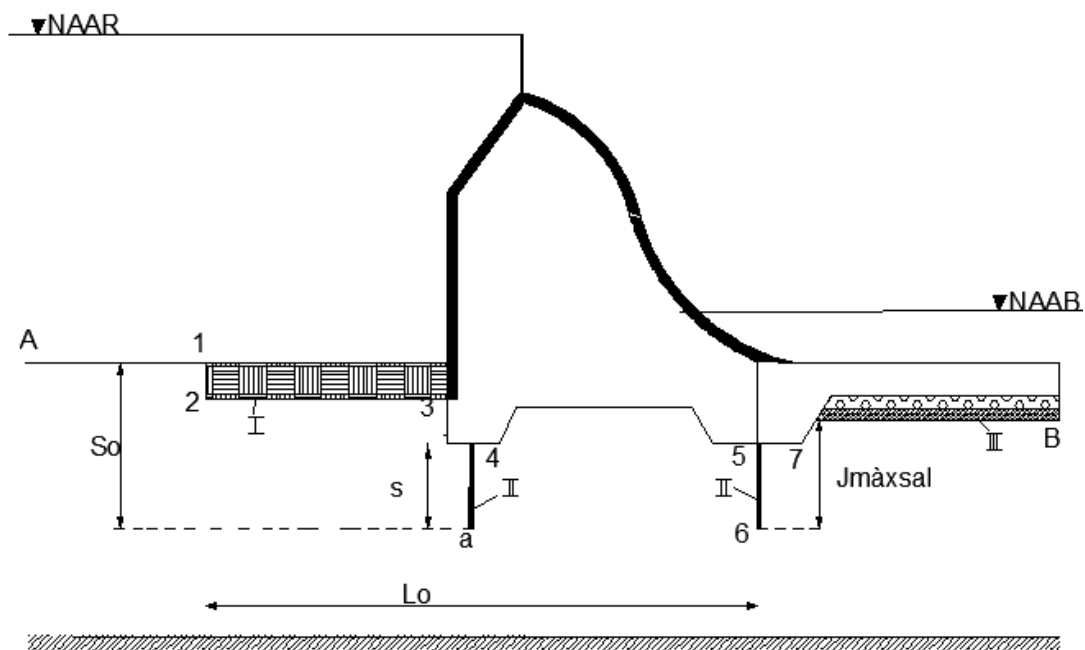
Elaborador por: Autora

### 3.3. ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL ANÁLISIS DEL FLUJO DE FILTRACIÓN

Como se ha definido el contorno subterráneo de una presa de hormigón cimentada en suelo es la línea que limita desde abajo los elementos impermeables y poco permeables de la presa que están en contacto directo con el suelo de cimentación (línea 1-2-3-a-4-5-b- 6-7, Figura 6).

**Figura 5.**

*Esquema general del contorno subterráneo*



*Elaborador por: Autora*

En el caso más general el contorno subterráneo de una presa de hormigón cimentada en suelo está constituida de los siguientes elementos:

#### 3.3.1. Contorno subterráneo real de una presa de hormigón cimentada en suelo

Es el contorno impermeable de contacto de una presa de hormigón con el suelo de cimentación, constituido de diferentes elementos horizontales y verticales como: carpeta, dentellones, tablaestaca, base de la presa, escalones, drenaje horizontal.

### **3.3.2. Contorno subterráneo aceptable**

Es aquel que en las mejores condiciones económicas aseguran la estabilidad al deslizamiento de la presa con la adecuada distribución de los esfuerzos de contacto con el suelo de cimentación y la resistencia a la filtración del suelo de cimentación.

### **3.3.3. Carpeta**

Elemento longitudinal del contorno subterráneo que se empalma en la parte inferior del paramento aguas arriba cuyo objetivo es alargar el camino del flujo de filtración para poder incrementar la pérdida de carga y a su vez disminuir la gradiente de dicho flujo.

### **3.3.4. Escalones**

Son elementos verticales del contorno subterráneo que incrementa la pérdida de carga y disminuye la subpresión.

#### **3.3.4.1 Escalón al final del flujo de filtración**

Según Filchakov (1986) demostró que el dispositivo de escalón al final del contorno subterráneo es muy deseable y no provoca un aumento peligroso de la subpresión total.

Su función para reducir los gradientes de salida (o velocidades) de filtración y, en consecuencia, para eliminar la posibilidad de que se desarrolle una deformación de la apertura de contacto, para proteger la base de la estructura reguladora de la erosión por flujo superficial. Al mismo tiempo, apoya el flujo de filtración y provoca un aumento de la presión de filtración en el depósito de la estructura. Por lo tanto, su longitud, por regla general, debe establecerse como óptima, dentro de los valores recomendados según las dependencias.

$$a_2 = (0,05 \div 0,1)T$$

pero no más de:

$$a_2 = (0,05 \div 0,1)L_0$$

### **3.3.5. Dentellón**

Son incrustaciones de la presa en el suelo de cimentación al pie de los paramentos aguas arriba y aguas abajo. Mejora las condiciones de empotramiento del cuerpo de la presa en el macizo, son elementos verticales y su profundidad generalmente es de 2-3m, pero en ningún caso mayor que 5m; el ancho de la base del dentellón es normalmente de 2-3m.

### **3.3.6. Tablaestaca**

Elemento vertical del contorno subterráneo el cual permite disminuir la subpresión bajo la presa, en una magnitud proporcional doble de su profundidad. La profundidad mínima de la tablaestaca es de 3m generalmente es de hormigón armado, hormigón colado o acero.

La opción constructiva más definida de una tablaestaca es la de pilotes de hormigón armado.

#### **3.3.6.1 Tablaestacas y su ubicación**

Estos elementos, al alargar el recorrido de filtración, reducen así la presión de filtración en los elementos planos horizontales ubicados detrás de ellos. Las hileras de tablestacas (cortinas), según la profundidad de la superficie del acuicludo, se disponen con colgantes (no llevado a un sellado) o perfecto (llevado a un sellado). La profundidad de su conducción está determinada, en primer lugar, por el material del que están hechos. Las paredes de tablestacas de madera se pueden hincar a una profundidad de 5-6 m, las paredes metálicas hasta 20-30 m, pero este no es el límite de su inmersión. No se recomienda martillar las paredes de tablestacas a una profundidad inferior a 2 m.

Las paredes de tablestacas están dispuestas al comienzo del sumidero (solo con un ancla que se hunde), en la unión del sumidero con el depósito (rey o caballo) para reducir las presiones de filtración en la parte tranquilizadora y al final de la cascada. (pared de tablestacas aguas abajo) - para reducir las tasas de filtración de salida o los gradientes de presión de salida. (“Estructuras de retención de agua y eludiralas”,2013)

### **3.3.7. Filtro invertido**

Permite localizar, filtrar y canalizar las aguas que pudieran escaparse del embalse y estará formado por sendas capas de filtro y un relleno general que aportará peso al conjunto y dará forma a la nueva rasante del terreno.

La parte de entrada del drenaje está en contacto con el suelo, en el que se mueve el flujo de filtración. En un drenaje de poros grandes, por ejemplo, hecho de piedra o mezcla de grava y guijarros, las partículas del suelo en contacto bajo la influencia del flujo de filtración pueden ingresar a los poros del drenaje. Para evitar tal movimiento a lo largo de la línea de contacto entre el suelo y el drenaje, se colocan filtros inversos, colocándolos en una o varias capas. Se supone que el grosor de cada capa del filtro de retorno no es inferior a 0,2 m. (“Estructuras de retención de agua y eludirlas”,2013)

### **3.3.8. Drenaje horizontal**

Ubicado bajo los elementos horizontales del contorno subterráneo. Permite descargar substancialmente la subpresión bajo la presa.

El drenaje se puede ubicar debajo de la planta del cuerpo de la presa simultáneamente con el drenaje debajo del depósito. En este caso, la contrapresión de filtración se eliminará en ambos tramos del circuito. Aplicar esquemas con drenaje al final de la depresión, y se utilizan galerías como drenaje. Al organizar el drenaje debajo del embalse o debajo del fondo de la presa, es necesario garantizar el drenaje sin obstáculos del agua filtrada hacia el río abajo. Para hacer esto, los desagües se conectan a la plataforma o se colocan agujeros pasantes en las losas del estanque, a través de los cuales se libera el agua. Las plataformas planas con orificios pasantes para la descarga de agua en el agua de cola se llaman pasantes. (“Estructuras de retención de agua y eludirlas”,2013).

### **3.4. FORMULACIÓN DE LOS ESQUEMAS DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO, COMPATIBLES CON LAS CONDICIONES FÍSICAS CONCRETAS DE CIMENTACIÓN.**

El diseño del contorno subterráneo involucra ante todo la selección de un contorno que satisfaga las condiciones de funcionalidad, confiabilidad, resistencia y estabilidad al menor costo. En consecuencia, para este diseño se requiere también el planteamiento y comparación de alternativas. Para el efecto se procede de la siguiente manera:

- a) Para las condiciones concretas se adopta un esquema compatible del contorno subterráneo. Los esquemas referenciales serán presentados más abajo.
- b) Para el esquema adoptado, sobre la base de análisis previos se formulan una serie de alternativas, equivalentes en relación con la resistencia mecánica, estabilidad y resistencia a la filtración.
- c) Las variantes planteadas son comparadas desde el punto de vista económico para seleccionar la alternativamente razonablemente válida.

El esquema que se llegue adoptar después de un análisis previo, se plantean una serie de alternativas las cuales tienen relación a la resistencia mecánica, estabilidad y de gran importancia a la resistencia a la filtración.

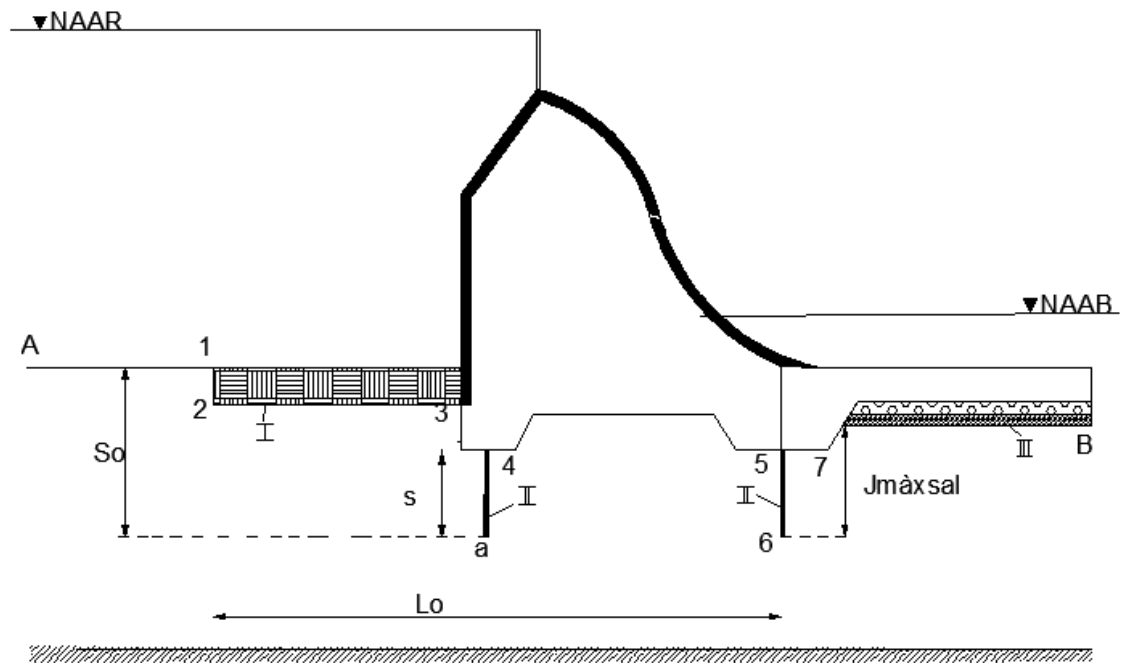
#### ***3.4.1. Esquema 1- Contorno subterráneo sin drenaje horizontal bajo la presa***

La característica fundamental de este esquema es la ausencia de drenaje horizontal bajo la presa. La sección de entrada del flujo de filtración es la superficie del fondo aguas arriba del cauce A-1; la superficie de salida es a superficie del fondo del cauce aguas abajo 6-B, generalmente cubierto en la parte superior, bajo la losa de disipación, con drenaje horizontal y filtro invertido. Este esquema cabe adoptar exclusivamente cuando existe el riesgo de obstrucción del filtro invertido, ubicado bajo el drenaje horizontal, es decir cuando el suelo de

cimentación está constituido por suelos finos no cohesionados como limos arenosos sin contenido de arcilla. En otros casos este esquema no debe ser adoptado.

**Figura 6.**

*Contorno subterráneo sin drenaje horizontal bajo la presa*



*Elaborador por: Autora*

### 3.4.2. Esquema 2-Contorno subterráneo con drenaje horizontal bajo la presa.

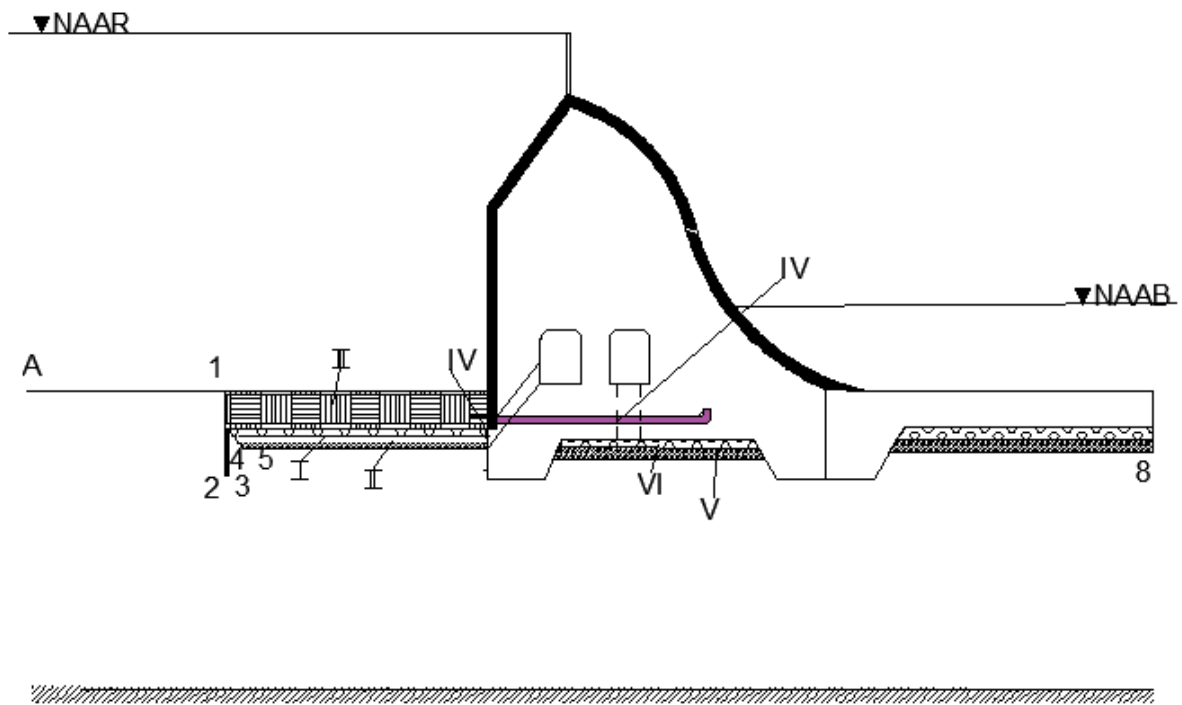
La característica fundamental de este esquema es la presencia de drenaje horizontal bajo la presa. Se adopta en todos los casos a excepción de los casos correspondientes al esquema anterior. En este esquema, bajo la presa y bajo el dentellón aguas abajo la carga es prácticamente la misma y corresponde al nivel de agua aguas abajo. Gracias a la inclusión del drenaje horizontal bajo la presa de buena parte de su base se elimina en gran medida la subpresión excedente; por esta razón puede resultar viable disminuir el peso de la presa.





**Figura 8.**

*Contorno subterráneo con carpeta rígida anclado al cuerpo de la presa*



*Elaborado por: Autora*

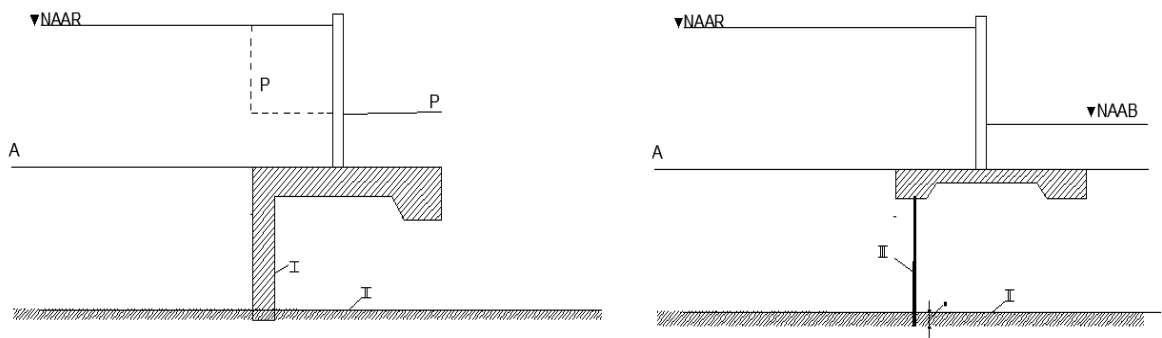
#### **3.4.4. Esquema 4-Contorno subterráneo profundo**

En este caso la capa permeable del suelo de cimentación en todo su espesor hasta el nivel impermeable está atravesada por un diafragma formado o por un dentellón de hormigón o por una cortina de pilotes; la capa permeable puede ser atravesada por uno o por varios diafragmas. El esquema profundo del contorno subterráneo se adopta en los casos cuando el nivel impermeable se ubica a una profundidad relativamente pequeña (hasta 15- 20 metros). De hecho, como en cualquier otro caso, el esquema se adopta luego de ser comparado desde el punto de vista económico con otro u otros esquemas. Debido a que la capa permeable es atravesada en todo su espesor por el diafragma, el flujo de filtración bajo la presa se elimina, a la vez que la carga antes del diafragma corresponde a la profundidad aguas arriba, en tanto que la carga luego del diafragma corresponde a la profundidad aguas abajo (ver la línea

piezométrica P-P-P). Cuando la capa permeable del suelo de cimentación es atravesada por una cortina de pilotes, debido a la conocida separación entre ellos, se presenta algún flujo de filtración bajo la presa, como resultado de lo que la presión antes de la cortina disminuye, en tanto que a continuación de la cortina se incrementa.

**Figura 9.**

*Contorno subterráneo profundo*



*Elaborado por: Autora*

### **3.4.5. Esquema 5 Contorno subterráneo con drenaje vertical del suelo de cimentación.**

Para condiciones en las cuales la presa esta cimentada sobre una capa relativamente delgada de material poco permeable que yace sobre suelo permeable; en este caso el drenaje vertical atraviesa la capa poco permeable y de esta manera elimina los esfuerzos de acción hidrodinámica que pueden originar deformaciones de filtración particularmente desplazamiento local de dicha capa permeable.

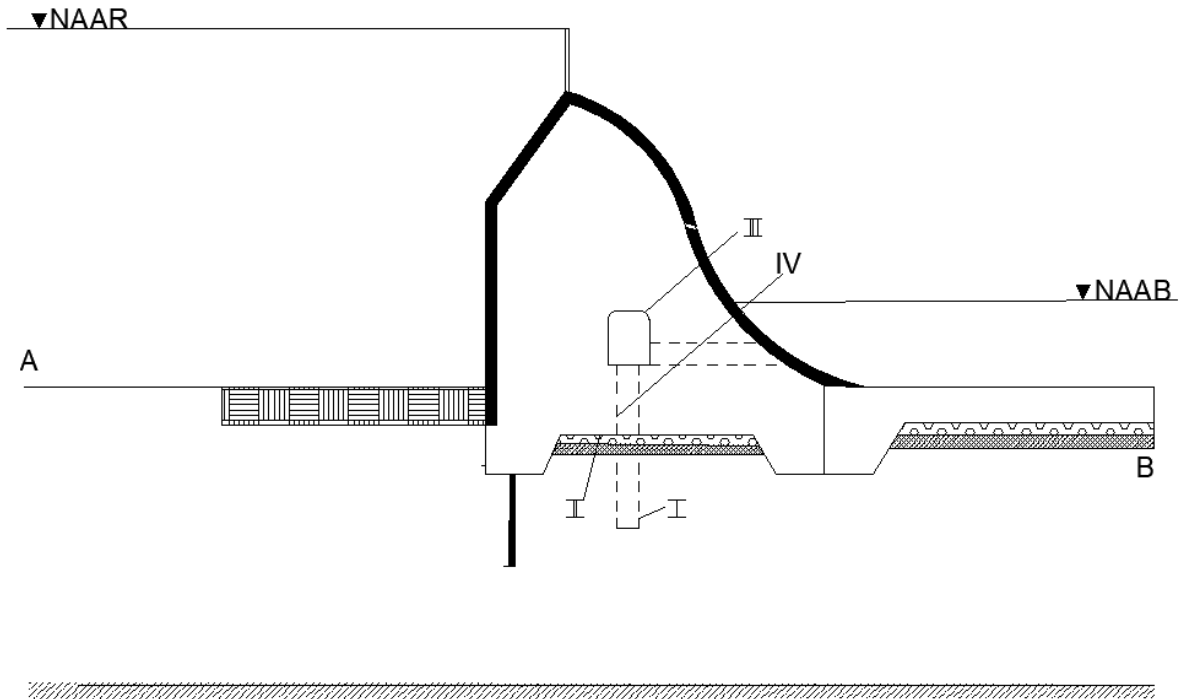
Cuando el suelo de cimentación es anisotrópico con relación al coeficiente de filtración y la magnitud de este es pequeña, en dirección vertical, lo que podría originar el incremento de la fuerza de subpresión bajo la presa.

Cuando el suelo de cimentación tiene incrustaciones de material con bajos indicadores de corte, lo que puede determinar que sea superada la estabilidad al deslizamiento a lo largo de dichas incrustaciones en este caso el drenaje vertical debe atravesar dicha incrustación y de esta

manera eliminar las fuerzas de acción hidrodinámica. (Calero. "Obras Hidráulicas II". Clases presenciales UPS-Campus Sur. 2018)

**Figura 10.**

*Contorno subterráneo con drenaje vertical del suelo de cimentación.*



*Elaborado por: Autora*

## CAPÍTULO IV

### FORMULACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DEL FLUJO DE FILTRACIÓN DE LOS SUELOS DE LAS PRESAS DE HORMIGÓN

Como base para formular los métodos de la hidromecánica aplicada es decir de los métodos hidráulicos) están los resultados obtenidos en las soluciones cerradas posibles de la teoría matemática de la filtración, los resultados de la práctica validada de diseño y los resultados de experimentación en modelos físicos. Adicionalmente se aplican ciertas premisas propias de la practica ingenieril:

- a) A partir del modelo del medio continuo y homogéneo en movimiento no resulta necesario ni posible llegar a soluciones absolutamente “exactas” puesto que, en la realidad, no existe tal medio continuo y homogéneo; adicionalmente, los parámetros caracterizadores del medio continuo y homogéneo asumido (coeficientes de filtración) solo pueden ser determinados con un grado de aproximación no tan cercano a la “exactitud”;
- b) Los grados de aproximación de los métodos ingenieriles generalmente corresponden a los grados de aproximación en la determinación de la información básica de entrada (indicadores hidro-geológicos, geo-mecánicos, etc.).

A los largo de los años se han formulado una serie de diferentes métodos de análisis (analíticos, gráficos, grafo-analíticos), basados en la aplicación de los más variados principios, como por ejemplo: a) el método de superposición (superposición de flujos simples de filtración); b) método de transformación del contorno subterráneo dado en otro de menor complejidad; c) método basado en la introducción de las denominadas longitudes virtuales (o relativas); d) método de las pérdidas de carga complementarias; y otros).

Sin embargo, muchos de estos métodos no han persistido, sea por su inaplicabilidad, aplicabilidad limitada o al no ser validados por la realidad. Entre las principales deficiencias de

dichos métodos están: a) alta complejidad; b) limitación del campo de aplicación, por ejemplo, algunos métodos se refieren únicamente al caso cuando el límite de la capa impermeable es poco profundo, en tanto que otros al caso cuando, por el contrario, está a una profundidad infinitamente grande. (Nizhny Novgorod,2011).

#### **4.1. MÉTODO COEFICIENTES DE RESISTENCIA**

Este método coeficientes es muy conocido por poseer un desarrollo totalmente adicional al renombrado método de los fragmentos de N.N Pavlovsky .

PP Chugaev (1953/1955) plantea esta nueva idea para completar este análisis de filtración cambiándolo a método de los coeficientes con ayuda del Instituto de Hidráulica de la Unión.

En el análisis del flujo de filtración por el método de los coeficientes de resistencia tiene presente un esquema de filtración plana por lo mismo se le permite resolver las fundamentales variables:

- a) Construcción de la línea piezométrica a lo largo del contorno subterráneo.
- b) Determinación de la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración.
- c) Determinación del caudal de filtración.

Para resolver estos problemas es necesario determinar la ubicación de cálculo del nivel impermeable la misma que, no necesariamente coincide con la ubicación real. El espesor de cálculo  $TCAL$ , de acuerdo con el método de los coeficientes de resistencia, debe ser diferentes para resolver los tres problemas establecidos.

En adelante, a través de los símbolos  $Tcal'$ ,  $Tcal''$  y  $Tcal'''$  serán identificadas las profundidades de cálculo para determinar, respectivamente, las pérdidas de carga  $h_j$  y la subpresión  $W$ , la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración  $JMAX$ ,  $SAL$  y el caudal de filtración  $q$ . A través de  $TREAL$  se identificará la profundidad real de la capa permeable.

El espesor de la capa permeable se mide desde el nivel impermeable hasta el punto más alto de la superficie de cimentación.

Uno de los puntos más importantes para el inicio de este método es la determinación de la vertical  $S_o$  y la horizontal  $L_o$  las mismas que son la proyección del contorno subterráneo y de ellas se determina la relación  $L_o/S_o$  con esto obtenido se podrá establecer en que zona de filtración activa se trabajará como se muestra en la Tabla 1.

La capa activa ( $T'act$ ,  $Tact''$ ,  $Tact'''$ ), es decir de aquella capa que ciertamente incide en la magnitud de los parámetros a ser determinados y por debajo de la cual la incidencia es despreciable. Dicha profundidad es aquella en donde el confinamiento del agua no repercute en todas las variables que intervienen en el flujo de filtración.

El espesor de cálculo, en cualquiera de los tres problemas, es el menor entre el espesor real y el espesor de la capa activa.

El espesor de la capa activa  $TACT$  depende de las características constructivas del contorno subterráneo.

**Tabla 1.**

*Espesor de la capa activa de filtración.*

Esquema del contorno subterráneo	Relación	
	$l_o/S_o$	Tact
Ensanchado	$l_o/S_o \geq 5$	$0,5l_o$
Intermedio	$3,4 \leq l_o/S_o < 5$	$2,5S_o$
Profundo	$1 \leq l_o/S_o < 3,4$	$0,8S_o + 0,5l_o$
Muy profundo	$l_o/S_o < 1$	$S_o + 0,5l_o$

*Fuente: Calero. (2018) Determinación del espesor de cálculo. Clases presenciales UPS-Quito-Campus Sur*

**Donde:**

$$S_o = a + S$$

**Espesor de la capa activa para la gradiente máxima de la salida del flujo de filtración**

$$T''_{act} = 2 T'_{act}$$

### **Espesor de la capa activa para el caudal de filtración**

$$T'''_{act} = T_{real} \rightarrow \text{cuando } T_{real} \leq 0,5 l_0$$

Cuando la condición anterior no se cumple el método de coeficientes de resistencia para determinar el caudal de filtración, puesto que el margen de error es alto. En estos casos se opta por usar el método de la Línea desarrollada del contorno subterráneo

**El error de cálculo para los tres parámetros se debe tomar en cuenta los siguientes rangos:**

$$T_{cal} = T_{real}; \text{ cuando } T_{real} \leq T_{act}$$

$$T_{cal} = T_{act}; \text{ cuando } T_{real} > T_{act}$$

#### **4.1.1. Determinación de los coeficientes de resistencia**

Todos los contornos subterráneos se pueden dividir en tres secciones individuales comunes como lo son estos se caracterizan con los coeficientes de resistencia:

- Coeficientes de resistencia de entrada y salida
- Coeficientes internos como los son de escalón y tablaestaca
- Coeficientes de resistencia horizontal

En los valores que adopta los coeficientes de resistencia como se trata de una filtración plana cualquiera de los elementos no está en función de la dirección de flujo de filtración así que si la zona de filtración es semejante podemos asumir que  $\zeta_{ent} = \zeta_{sal}$  se considera el coeficiente de arrastre del giro neto del flujo de filtración en  $90^\circ$ , cuyo valor se va muestra posteriormente.

Partiendo de las soluciones obtenidas a través de la teoría matemática de la filtración, los valores de los coeficientes de resistencia pueden ser adoptados de la siguiente manera:

- a) Coeficiente de resistencia de entrada y salida:

$$\zeta_{ent} = \zeta_{sal} = 0,44$$



b) Coeficiente de resistencia en un escalón:

$$\zeta_{\text{esc}} = \frac{a}{T_1}$$

c) Coeficientes de resistencia en una tablaestaca:

$$\zeta_{\text{tab}} = 1,5 \frac{S}{T_2} + \frac{0,5 \frac{S}{T_2}}{1 - 0,75 \frac{S}{T_2}}$$

La distancia de la tablaestaca debe ser suficiente para no obtener un coeficiente de resistencia negativo, ya que esto significa que se anula el efecto del elemento longitudinal en las pérdidas de carga.

d) Coeficiente de resistencia en un elemento longitudinal:

Cuando:  $l > 0,5(s_1 + s_2)$ :

$$\zeta_L = \frac{L - 0,5(S_1 + S_2)}{T}$$

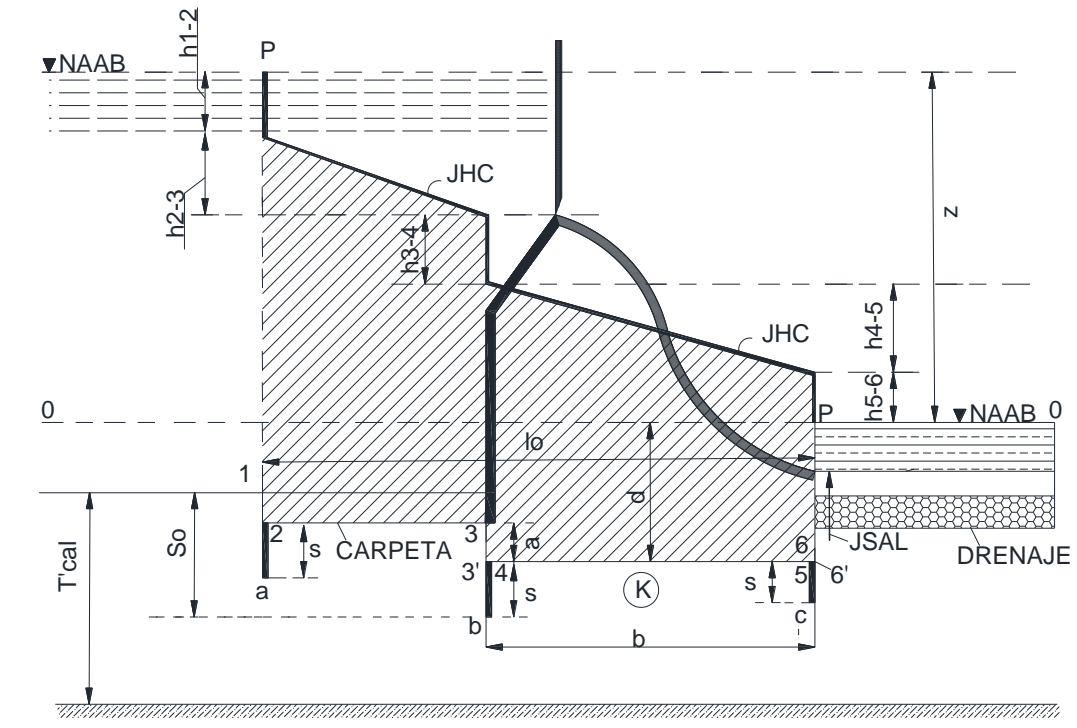
Cuando:  $l \leq 0,5(s_1 + s_2)$ :

$$\zeta_L = 0$$

**4.1.2. Determinación de las pérdidas de carga, para subpresión y el diagrama de subpresión W.**

**Figura 11.**

*Diagrama de Subpresión*



*Elaborado por: Autora*

Una vez determinado  $T'_{cal}$  y, a continuación, los coeficientes de resistencia para  $T'_{cal}$  se procede a determinar los coeficientes de resistencia con las ecuaciones anteriormente identificadas.

Posteriormente, se determinan la pérdida de carga en cada uno de los elementos del contorno subterráneo y con esta información finalmente se construye el diagrama de subpresión. Para el efecto es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- a) La carga disponible  $Z$  se distribuye en las pérdidas de carga  $h_j$  en forma proporcional al valor de cada coeficiente de resistencia  $c_j$ ; es decir que:

$$\sum h_j = Z$$

$$h_j = \zeta_j \frac{z}{\sum \zeta_j}$$

- b) Determinando con la ecuación anterior la pérdida de carga en cada elemento del contorno subterráneo (ver en el gráfico anterior *hI, hII, hIII, hIV, hV*) se construye la línea piezométrica P-P.
- c) Superficie obtenida (sombreada en la figura anterior), comprendida entre la
- d) Línea piezométrica construida P-P y el contorno subterráneo 1-2-3-4-5-6 constituye el diagrama de subpresión requerido y cuya superficie es igual al valor total W de la subpresión.
- e) Es importante recordar que la subpresión incluye dos componentes: subpresión de sumersión WS, dada por la superficie del diagrama ubicada bajo el nivel de agua aguas abajo; y, subpresión excedente, dada por la superficie del diagrama de subpresión ubicada sobre el nivel de agua aguas abajo.

#### **4.1.3. Determinación de la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración $J_{máxsal}$ .**

La gradiente máxima  $J_{MAX.SAL}$ , a la salida del flujo de filtración se presenta en el punto 6 del contorno subterráneo (ver esquemas del contorno subterráneo). Luego de establecer a través de  $T''$  la ubicación del nivel de cálculo de la capa impermeable y de determinar para esta ubicación los coeficientes de resistencia  $\zeta_j$  para los diferentes elementos de contorno y su suma  $\sum \zeta_j$ , la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración se determina con la siguiente ecuación:

$$J_{máxsal} = \frac{Z}{T_1} * \frac{1}{\alpha * \zeta''_j}$$

**Donde:**

**T1.-** Espesor de la capa permeable bajo el filtro invertido del flujo de filtración.

$$\alpha = \sqrt{\text{seno}\left(0,5\pi\left(\frac{s}{T1} - \frac{T2}{T1} + 1\right)\right)}$$

**Donde:**

**T2** - Espesor de la capa permeable bajo el filtro invertido a la salida del flujo de filtración.

**T1**- Espesor de la capa permeable bajo la presa.

#### **4.1.4. Determinación del caudal de filtración.**

Quando el espesor real  $TREAL$  de la capa permeable cumple la condición  $TREAL \leq 0,5l_0$ , el caudal de filtración  $q$  se determina de la siguiente manera:

- a) Se asume  $T'''_{cal} = TREAL$ :
- b) Para el valor  $T'''$  se determinan los coeficientes de resistencia  $\zeta_j$  de todos los elementos del contorno su suma  $\Sigma \zeta_j$ .
- c) Se determina el caudal de filtración con la siguiente ecuación:

$$q = \frac{Z}{\zeta'''_j} * Kc$$

Donde:  $k$ - coeficiente de filtración.

Quando el espesor real de la capa permeable es mayor al 50% del valor de la proyección horizontal del contorno ( $TREAL > 0,5l_0$  el caudal se determina por el método de la línea desarrollada del contorno subterráneo que se indicará en el capítulo posterior. (Calero. “Obras Hidráulicas II”; 2018; “Estructuras de retención de agua y eludiralas”,2013).

#### **4.1.5. Influencia de las dimensiones de los elementos del contorno subterráneo en la magnitud de la gradiente piezométrica media $J_{HC}$ a lo largo de los elementos horizontales.**

Para la gradiente piezométrica media se tienen la Ecuación 18:

$$J_{HC} = \frac{h_{HC}}{l} \quad (18)$$

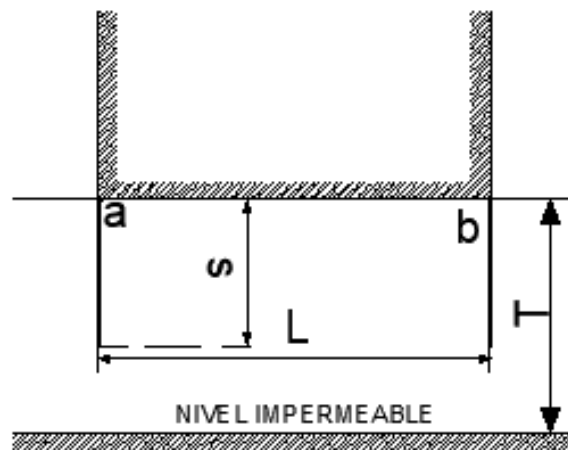
Dónde,  $h_{HC}$ - pérdida de carga a lo largo del elemento horizontal considerado;  $l$ - longitud de dicho elemento.

A fin de aclarar cómo varía  $h_{HC}$  en función de las dimensiones del contorno, a continuación, se considera:

- a) Un contorno plano de longitud  $l$  con dos tablestacas de igual longitud  $s$  en los extremos (figura 12);

**Figura 12.**

*Contorno subterráneo con dos tablestacas de igual longitud en sus extremos.*

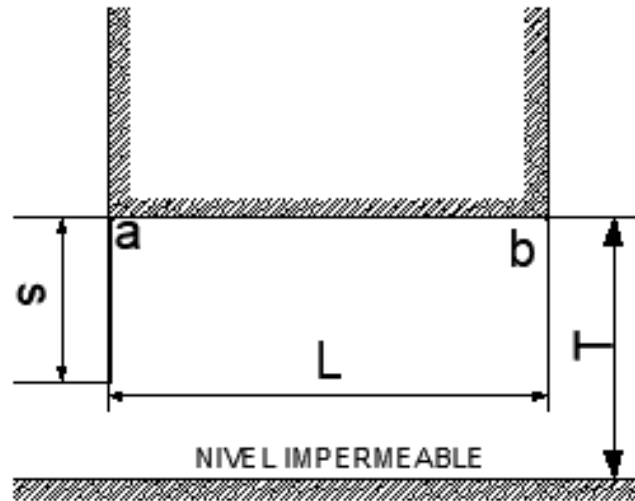


*Elaborado por: Autora*

- b) Un contorno plano con una tablestaca de longitud  $s$  en el extremo aguas arriba (figura 13).

**Figura 13.**

*Contorno subterráneo con tabla estaca en su extremo aguas arriba.*



*Elaborado por: Autora*

Para el esquema de doble tablestaca la magnitud  $h_{HC}$ , es decir la pérdida de carga desde el punto  $a$  hasta el punto  $b$  del contorno se expresa de la siguiente manera:

$$h_{HC} = Z - 2 \frac{Z}{\Sigma \zeta_j} \zeta_{EN} \quad (19)$$

Cuando  $l > s$ :

$$\Sigma \zeta_j = 2\zeta_{ENT} + \frac{l-s}{T} \quad (20)$$

Reemplazando (19) en (18), luego de las correspondientes transformaciones se obtiene.

$$\frac{J_{HCS}}{Z} = \frac{s}{l} \left[ 1 - \frac{2\zeta_{EN}}{2\zeta_{ENT} + \frac{s}{T} \left( \frac{1}{s/l} - 1 \right)} \right] \quad (21)$$

Analizando de manera semejante para el esquema de una tablestaca, se obtiene:

$$\frac{J_{HCS}}{Z} = \frac{s}{l} \left[ 1 - \frac{2\zeta_{EN}}{\zeta_{EN+0,44} + \frac{s}{T} \left( \frac{1}{s/l} - 0,5 \right)} \right] \quad (22)$$

A partir de las Ecuaciones (21) y (22) se han obtenido tablas 2 y 3 a partir de la cuales se pueden construir los gráficos 3 y 4:

$$J_{HC}(s/Z) = f(s/l; s/T) \quad (23)$$

**Tabla 2.**

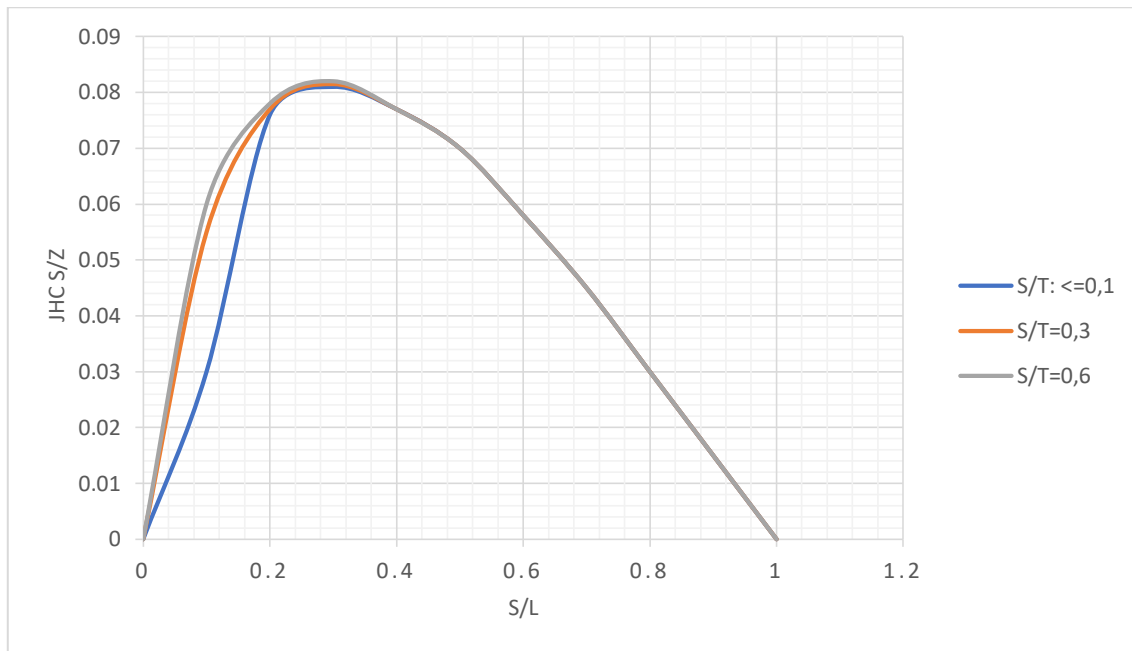
*Determinación de la gradiente piezométrica media en función de s/l y s/T ( $0,1 \leq \frac{s}{T} < 0,6$ )*

		s/l									
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
s/T		$J_{HC^{s/z}}$									
	$\leq 0,1$	0	0,03	0,076	0,081	0,077	0,07	0,058	0,045	0,03	0,015
0,3	0	0,055	0,077	0,0815	0,077	0,07	0,058	0,045	0,03	0,015	0
0,6	0	0,06	0,078	0,082	0,077	0,07	0,058	0,045	0,03	0,015	0

*Fuente: Novoherkask, I. Incremento de la eficiencia y confiabilidad de los elementos de control de la filtración en las estructuras hidráulicas (2008).*

**Gráfico 3.**

*Construcción de la relación JHC S/Z -S/L*



*Elaborado por: Autora*

**Tabla 3.**

*Determinación de la gradiente piezométrica media en función de s/l y s/T ( $0,1 \leq \frac{s}{T} \leq 0,6$ )*

$\leq 0,6$ )

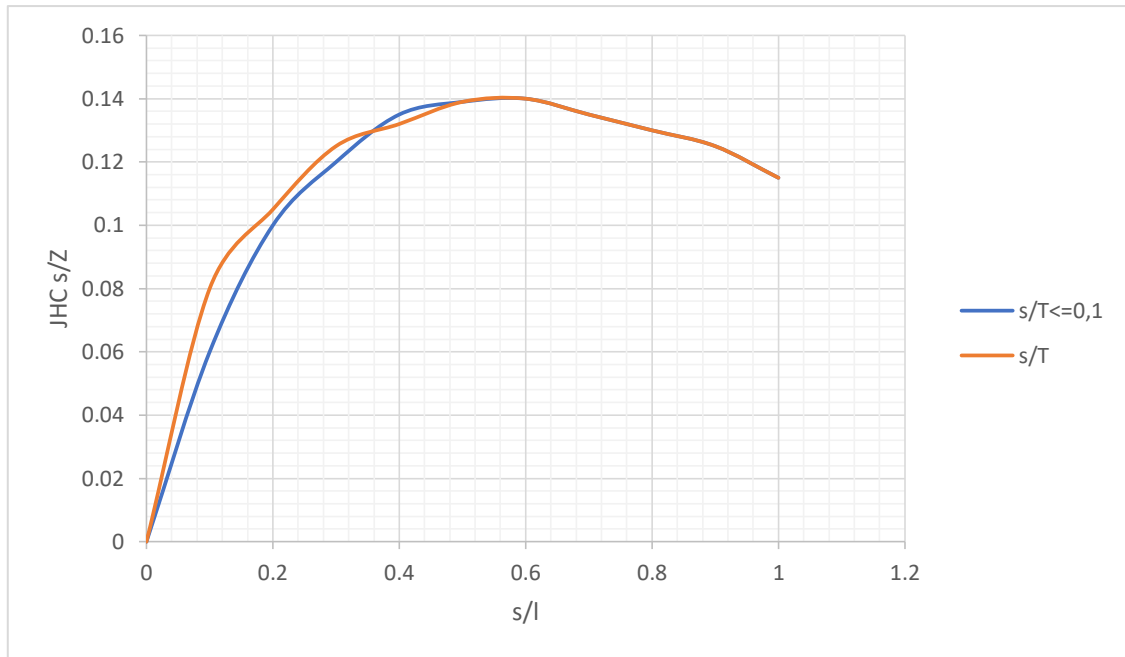
s/T	s/l										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\leq 0,1$	0	0,06	0,1	0,12	0,135	0,139	0,14	0,135	0,13	0,125	0,115
0,6	0	0,08	0,105	0,125	0,132	0,139	0,14	0,135	0,13	0,125	0,115

*Fuente: Novoherkask, I. Incremento de la eficiencia y confiabilidad de los elementos de control de la filtración en las estructuras hidráulicas (2008)*



#### Gráfico 4.

Construcción de la relación  $J_{HC} s/Z - s/L$



Elaborado por: Autora

Es necesario anotar que para la construcción de estos gráficos la magnitud  $T$  debe ser entendida como su valor de diseño (es decir que, para el caso de ubicación profunda de la capa impermeable, en lugar del espesor real de la capa permeable ha sido asumido el espesor de la capa activa de filtración para carga).

A partir del análisis de los resultados de las tablas 2 y 3 y de sus gráficos es posible llegar a las siguientes conclusiones:

**a) Respecto al esquema de doble tablestaca, cuando:**

$$3 < \frac{l}{s} < \infty \quad (24)$$

con el incremento de  $l$  la magnitud  $J_{HC}$  disminuye; en cambio, cuando:

$$\frac{l}{s} < 3 \quad (25)$$

con el incremento de  $l$  la magnitud  $J_{HC}$  aumenta.

b) Respecto al esquema de una tablestaca, cuando:

$$\sim 2 < \frac{l}{s} < \infty \quad (26)$$

Con el aumento de la dimensión  $l$  la magnitud  $J_{HC}$  disminuye; en cambio cuando:

$$\frac{l}{s} < 2 \quad (27)$$

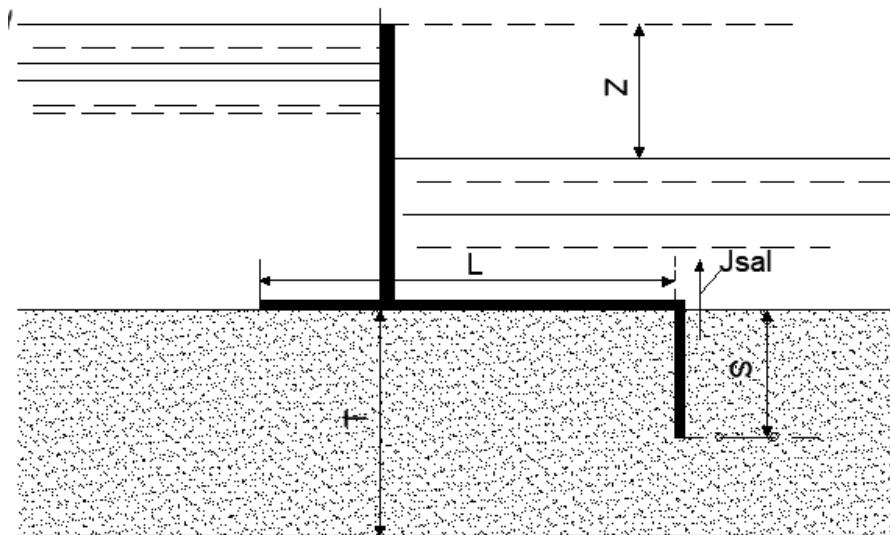
Con el incremento de la dimensión  $l$  la magnitud  $J_{HC}$  aumenta.

**4.1.6. Influencia de las dimensiones del contorno subterráneo en la magnitud de la gradiente piezométrica máxima en la superficie del fondo del cauce, aguas abajo.**

Considerando en este caso únicamente el esquema de una tablestaca, (figura 14):

**Figura 14.**

*Efecto de las dimensiones del CS J\_SAL*



*Elaborado por: Autora*

$$\Sigma \zeta_j = 0,44 + \frac{l-0,5s}{T} + \zeta_{TAB} + 0,44 = 0,88 + \frac{l}{T} - 0,5 \frac{s}{T} + \zeta_{TAB} \quad (28)$$

En este caso, considerando la ecuación de la gradiente de salida:

$$J_{SAL} = \frac{Z}{T_1} \frac{1}{\alpha \Sigma \zeta_j}$$

Se obtiene:

$$\frac{J_{SALT}}{Z} = \frac{1}{\alpha \left( 0,88 + \frac{l}{T} - 0,5 \frac{s}{T} + \zeta_{TAB} \right)} \quad (29)$$

Con esta Ecuación 29 se obtienen se obtiene la tabla 4 y su correspondiente gráfico.

**Tabla 4.**

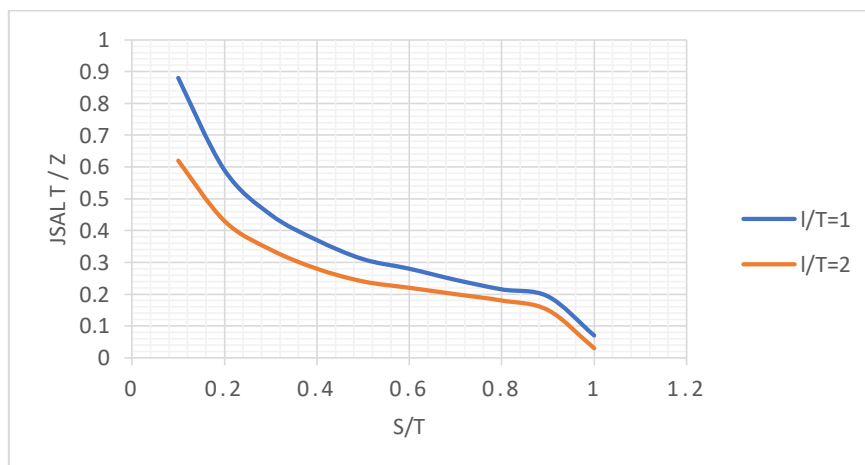
*Influencia de las dimensiones del contorno subterráneo en la gradiente máxima de salida*

l/T	s/T										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	$\frac{J_{SALT}}{Z}$										
1	0,88	0,59	0,45	0,37	0,31	0,28	0,245	0,215	0,193	0,07	
2	0,62	0,43	0,34	0,28	0,24	0,22	0,2	0,18	0,15	0,03	

*Fuente: Novoherkask, I. Incremento de la eficiencia y confiabilidad de los elementos de control de la filtración en las estructuras hidráulicas (2008).*

**Gráfico 5.**

*Comportamiento de la gradiente máxima de salida en función de las dimensiones del contorno subterráneo*



*Elaborado por: Marjorie Muñoz*

Considerando la tabla 4 y su correspondiente gráfico:

$$\frac{J_{SALT}}{Z} = f(s/T) \quad (30)$$

Una de las filas de la tabla 4 y su respectivo gráfico corresponde al caso  $\frac{l}{T} = 2,0$ , en tanto que, la otra fila y su correspondiente gráfico, al caso  $\frac{l}{T} = 1,0$ .

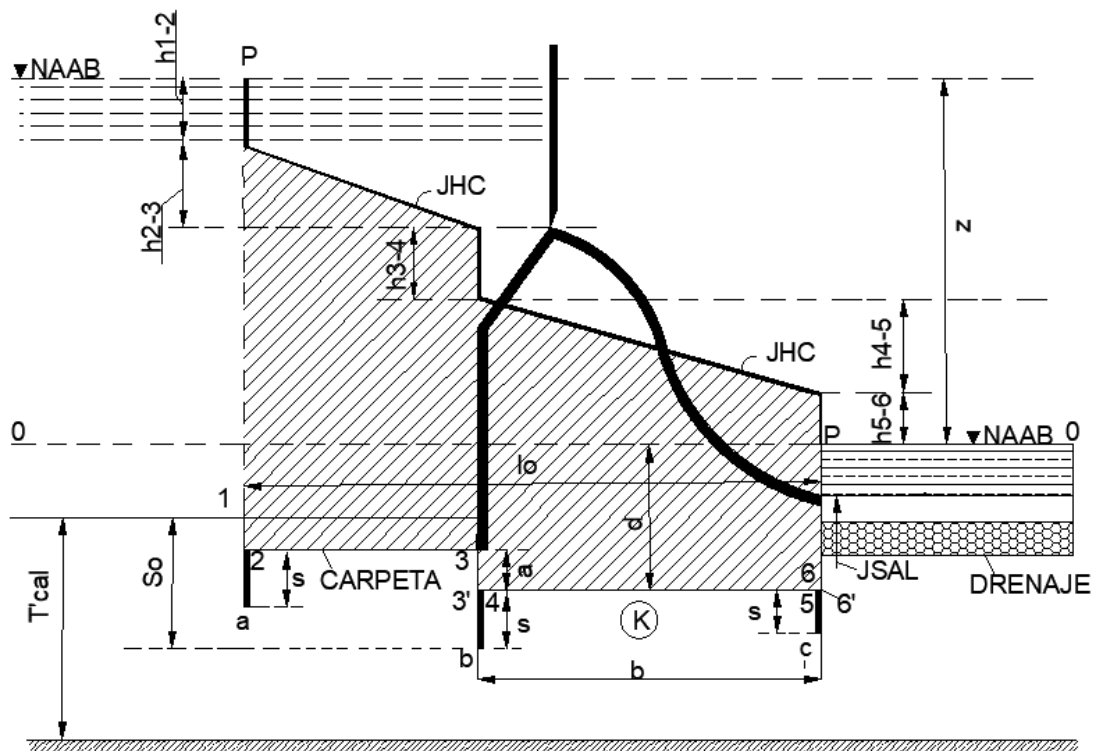
#### 4.1.7. Influencia de las dimensiones del contorno subterráneo en la magnitud de la subpresión.

Al aplicar el método de los coeficientes de resistencia resulta fácil determinar la magnitud de la subpresión para cualquier tipo de contorno subterráneo.

En efecto, la superficie  $\Omega$  del diagrama de subpresión del esquema de la siguiente figura:

**Figura 15.**

*Diagrama de subpresión.*



*Elaborado por: Autora*

Se expresa a través de la siguiente expresión:

$$\Omega = b(d + \frac{0,5\zeta'_H + \zeta_{SAL}}{T} Z) \quad (31)$$

Dónde  $d$ - profundización de la base de la presa bajo el nivel de agua aguas abajo;  $b$ - ancho de la base la sección transversal de la presa;  $\zeta'_H$ - coeficiente de resistencia del elemento horizontal 4-5 (de la base de la presa).

Aplicando esta ecuación resulta fácil analizar la influencia de los diferentes elementos del contorno subterráneo en la magnitud  $\Omega$  de uno u otro caso concreto de presa.

Cabe advertir lo siguiente:

Es posible disminuir la magnitud de la presión en el punto 4 gracias al alargamiento sea de la tablestaca interior bajo la presa 3-b-4, sea de la tablestaca 1-a-2 bajo la carpeta sea, finalmente, con el alargamiento de la carpeta. Al respecto surge la pregunta sobre cual, de las tres medidas anotadas, para disminuir la presión en el punto 4, es la más razonable.

Para responder a esta pregunta es necesario disponer de:

- a) Costo de 1 metro de longitud (profundidad) de la tablestaca y costo de 1 metro de longitud de la ca carpeta;
- b) Datos sobre la eficacia de la disipación de energía en el punto 4 con la tablestaca y con la carpeta.

Para aclarar únicamente el último punto, es necesario considerar el siguiente gráfico en el que se muestran los valores obtenidos para el coeficiente de resistencia de la tablestaca (bajo el paramento aguas arriba de la presa o bajo la carpeta) para diferentes valores de  $s/T_1$ , por el método de los coeficientes de resistencia

#### **4.2. MÉTODO DE BLIGH (BLIGH W. G. DAMS, BARRAGES AND WEIRS ON POROUS FOUNDATION N.Y.).**

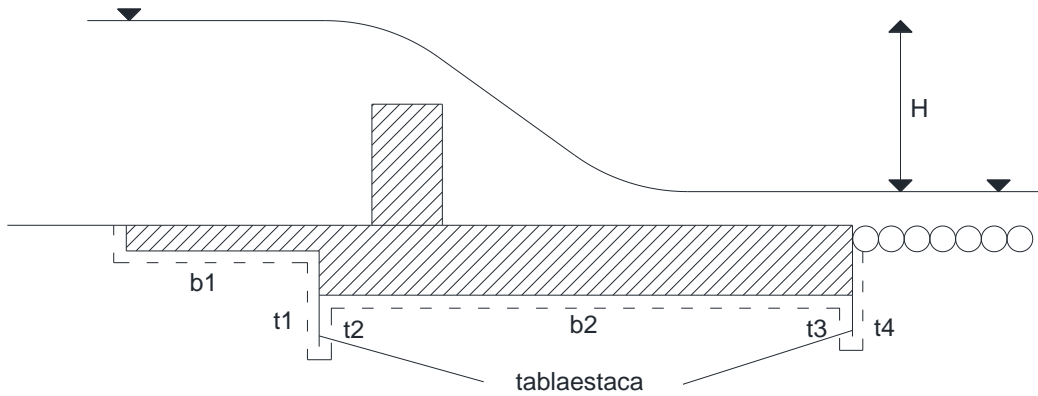
El primero que analizó este problema fue Bligh quien publicó un artículo, en el cual definió el factor de percolación según la siguiente expresión.

$$C_B = \frac{\Sigma b + \Sigma t}{h}$$

El significado de este factor se encuentra explicado en la siguiente figura 16:

**Figura 16.**

*Factor de Percolación*



*Elaborado por: Autora*

De acuerdo con este método la longitud mínima permisible del contorno subterráneo está dada por la relación:

$$L_{min} = cZ \quad (32)$$

Donde:

c: coeficiente empírico cuyo valor depende del tipo de suelo

#### 4.2.1. Determinación de las pérdidas de carga

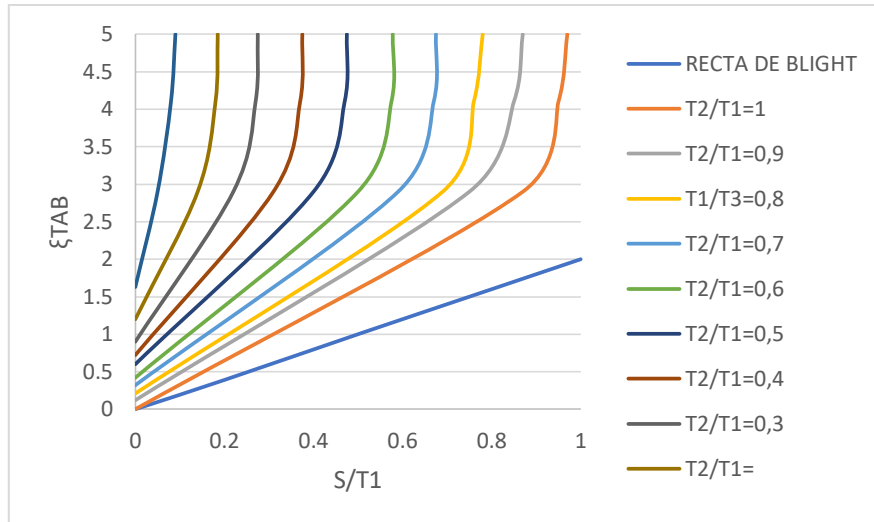
$$h_j = Z * \frac{\text{lelemento}}{L}$$

$$L = 1 - 2 + 2 - 3 + 3 - 4 + 4 - 5 + 5 - 6 + 6 - 7 + 7 - 8 + 8 - 9 + 9 - 10$$

La recta construida por el método de Bligh (recta de Bligh).

**Gráfico 6.**

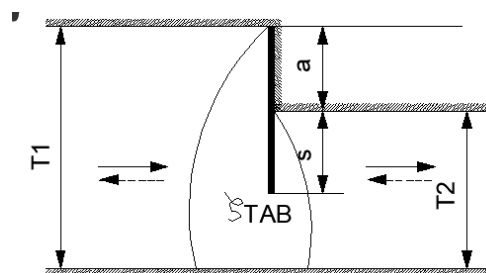
Comportamiento del coeficiente de resistencia de la tablaestaca con relación  $T2/T1, T2/T3$



Elaborado por: Autora

**Figura 17.**

Variación del coeficiente de resistencia de una tablestaca.



Elaborado por: Autora

Se puede observar que para el campo de las curvas del gráfico:

$$\zeta_{TAB} = f\left(\frac{s}{T_1}; \frac{T_2}{T_1}\right),$$

Donde estas son aproximadamente paralelas a la referida recta de Blight, es decir para el campo determinados por las relaciones:

$$s \leq (0,4 \div 0,5)T;$$

$$s \leq (0,2 \div 0,25)l_o$$

1 metro de longitud (profundidad) de tablestaca (bajo presa o bajo carpeta) es equivalente (respecto a la disipación de la energía en el punto 4) a dos metros de longitud de carpeta.

A partir del gráfico anterior es posible realizar una evaluación comparativa de la eficacia de los elementos verticales y horizontales del contorno subterráneo, para otros campos de los valores  $s/T$  y  $T_2/T_1$ .

En particular, para los campos donde las curvas  $\zeta_{TAB}$  tienen pendiente respecto a la horizontal, mayor a la de la recta de Bligh, 1 metro de longitud (profundidad) de la tablestaca, es más eficaz que 2 metros de carpeta. (Flores Berrones,2000)

#### **4.3. MÉTODO DE LANE (LANE E.W. SECURITY FROM UNDERSEEPAGE OF MASONRY DAMS ON EARTH FOUNDATION N.Y.).**

De acuerdo con este método para el análisis de la resistencia a la filtración del suelo de cimentación se determina no la longitud mínima del contorno subterráneo (como en el método de Bligh) sino el valor mínimo de una longitud virtual dada por la ecuación:

$$L_o = L_V + \frac{1}{3}L_H \quad (33)$$

Donde:

$L_V$ : longitud sumatoria de los tramos verticales del contorno subterráneo

$L_H$ : Longitud sumatoria de los tramos horizontales del contorno subterráneo.

Para el valor mínimo permisible de  $L_o$  (por consideraciones de resistencia a la filtración)

E. Lane propone la siguiente Ecuación 34 :

$$(L_o)_{min} = c_o Z \quad (34)$$

Donde:

$c_o$ - coeficiente cuya magnitud depende también del tipo de suelo.



**Tabla 5.**

*Coefficientes de Bligh y Lane*

Material	Coeficiente C	
	Bligh	Lane
Limo	18	8
Arena fina	15	6
Arena gruesa	13	5
Arena mediana	12	4
Grava fina	9	3,5
Grava gruesa	4	3

*Fuente: Flores. R. Flujo a través de suelos (2000).*

Los valores indicados en la tabla anterior son los mínimos que deben tener para que bajo el criterio de Bligh no se presente falla por tubificación.

En la realidad es que debido a que la permeabilidad es mayor en el sentido horizontal comparado con el sentido vertical, la distancia horizontal tiene menor influencia que la vertical. (Flores Berrones,2000)

Con dicho concepto Lane modificó la fórmula anteriormente dada a la siguiente expresión:

$$C_L = \frac{\Sigma t + \frac{1}{3} \Sigma b}{h}$$

#### **4.4. MÉTODO DE LÍNEA DE CONTORNO DESARROLLADA**

Según el método desarrollado por R.R.Chugaev se basa en la suposición de un cambio lineal en la presión a lo largo del contorno subterráneo, teniendo en cuenta pérdidas más efectivas en las vías de filtración verticales en la entrada y salida. Este método le permite trazar la altura de presión y determinar los gradientes en secciones individuales del contorno (entrada, salida y a lo largo de la longitud entre ellas)

$$L_{virtual} = 0.44 * T_{real} + a1 + 2 S + lo + a2 + 0.44 * T_{real}$$

El diagrama de presión de filtración se construye al estirar en línea recta al mismo que se debe agregar un valor ficticio de 0,44 T para cada lado, estos segmentos tienen en cuenta las pérdidas de carga en las secciones de entrada y salida del circuito. Luego, desde el comienzo de la línea resultante, la presión efectiva se deposita y se conecta al final de la línea alargada. Desde el punto 1 del contorno subterráneo, también se traza la presión efectiva, que está conectada al punto 2 del contorno subterráneo.

Para las pérdidas de carga  $h_j$  se obtiene de la siguiente manera:

$$h_j = J * (h_e);$$

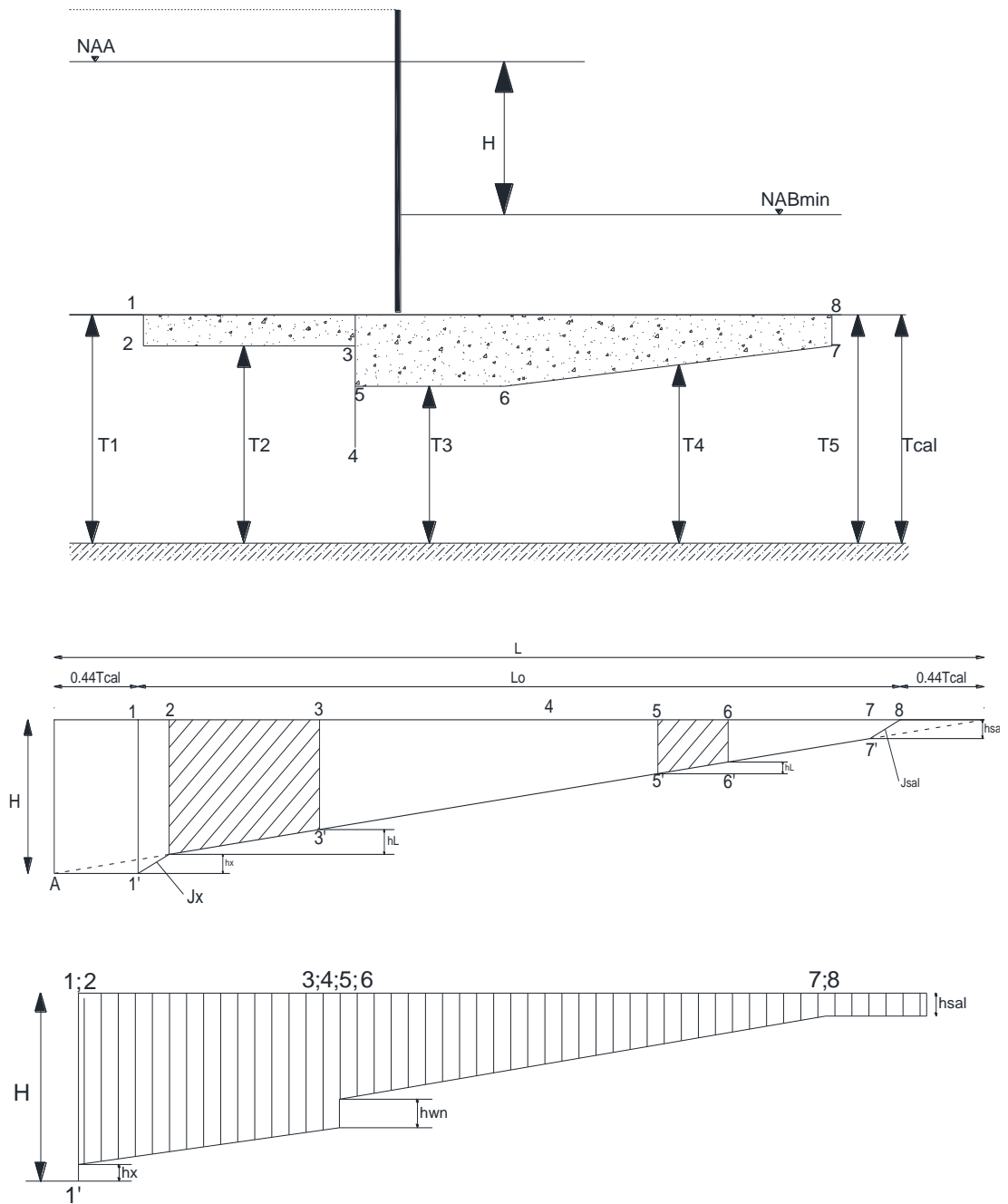
$$h_e = 0.44T + 2S1 + 2a1)$$

Además, del triángulo resultante, corte todas las áreas, cuya proyección en el eje X es igual a 0. Las partes restantes se desplazan en una dirección. Además, el punto inferior del diente superior debe permanecer en su lugar como unión del diagrama al contorno subterráneo. En el gráfico resultante, se determina el centro de gravedad. La fuerza de la presión de filtración sobre el contorno subterráneo de la presa de hormigón la atravesará.

Los diagramas de subpresión se presenta a continuación en la Figura 18:

**Figura 18.**

*Diagramas de subpresión por el M. Línea de contorno desarrollado.*



*Elaborado por: Autora*

En presencia de una depresión de anclaje de hormigón armado, el drenaje se coloca delante del diente superior, lo que elimina toda la presión de filtración restante. Desde el drenaje en el cuerpo de la presa de hormigón hay galerías de drenaje que conducen el flujo de filtración al agua de cola.

El gradiente de salida máximo se puede aproximar de la siguiente manera:

$$J_{m\grave{a}x\ salid} = \frac{ha2}{La2}$$

Donde:  $La2$  es la longitud del elemento vertical al final del contorno subterráneo (escalón a la salida) y  $ha2$  es la pérdida de presión a lo largo de la longitud anterior

Como se indicó en el subcapítulo anterior este método se usa especialmente cuando se presenta el caso de una capa permeable que sea mayor en un 50% del valor de la proyección horizontal del contorno  $TREAL > 0,5lo$ . Tiene la particularidad para la determinación del caudal presentando un énfasis en la ecuación de Darcy. (Calero. “Obras Hidráulicas II”; 2018; “Estructuras de retención de agua y eludiralas”,2013).

$$q = \frac{Z}{L_{virtual}} * K * Treal$$

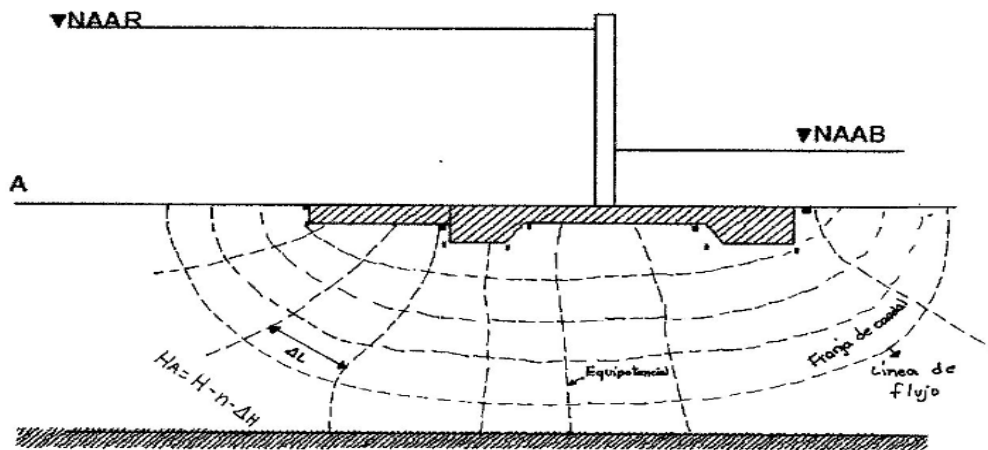
Donde:  $Tcal=0,5lo$

#### **4.5. MÉTODO DE RED DE LA RED HIDRODINÁMICA**

Una red hidrodinámica es la representación gráfica de la dirección de las láminas elementales de agua (líneas de flujo) y de las líneas en cada una de las cuales la carga es constante (equipotenciales)

**Figura 19.**

*Láminas elementales de agua.*



*Elaborado por: Autora*

Las líneas que ingresan en el suelo de cimentación desde la línea del fondo del río aguas arriba,  $\nabla_{CIM}$  y que salen en la línea del fondo del cauce aguas abajo, se denominan líneas de flujo, en tanto que las líneas que se dirigen desde el contorno subterráneo hacia el nivel impermeable, son las líneas de igual carga o equipotenciales.

Las franjas limitadas por dos líneas vecinas de flujo se denominan franjas de caudal, en tanto que las franjas limitadas por dos equipotenciales vecinas se denominan franjas de presión o carga.

El contorno subterráneo es la primera línea de flujo y el nivel impermeable la última línea de flujo. El fondo aguas abajo, donde la carga es igual a la carga del esquema, es la primera equipotencial.

El campo vectorial de flujo ocupado por la red de flujo es dividido por las líneas de flujo y por las equipotenciales en cuadrados curvilíneos con diagonales iguales.

Para construir una red de flujo es necesario satisfacer las siguientes exigencias:

- a) Las líneas de flujo y las equipotenciales deben encontrarse con ángulos rectos (condición de ortogonalidad).
- b) Las equipotenciales en los puntos de contacto con el contorno subterráneo y con el nivel impermeables deben ser ortogonales.
- c) Las líneas de flujo en los puntos de contacto con el fondo aguas arriba y aguas abajo también deben ser ortogonales.
- d) La red debe estar constituida por cuadrados curvilíneos.
- e) En caso de que el nivel impermeable se encuentre a gran profundidad se asume que la línea de flujo ubicada a la profundidad de la capa activa es la última línea de flujo, es decir que se trata del nivel impermeable de cálculo.  $T_{ACT} = 2,5 L_o$ .

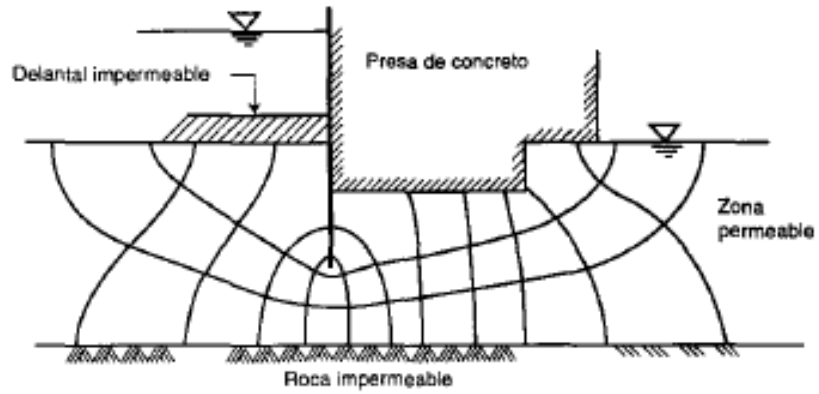
Una red de flujo tiene las siguientes propiedades:

- f) A través de cada franja de caudal pasa un mismo caudal.
- g) Dentro de los límites de cada franja de presión se disipa la misma carga  $\Delta H = \frac{H}{\Pi}$ , donde  $\Pi$  es el número dado de franjas de carga. Por ejemplo, si  $\Pi=10$ , significa que en cada franja de presión se disipa una carga igual a  $0,1H$ .
- h) La velocidad de flujo a lo largo de una franja de caudal no es constante (flujo no uniforme); cuanto mayor sea la dimensión del cuadrado tanto menor será la velocidad y a la inversa. Esto se explica por cuanto a través de cada cuadrado pasa el mismo caudal.

Siempre se debe buscar simetría en especial cuando se tiene la presencia de elementos verticales como lo es una tablaestaca. Se muestra las siguientes figuras las zonas que se debe tener en cuenta alrededor de la misma:

**Figura 20.**

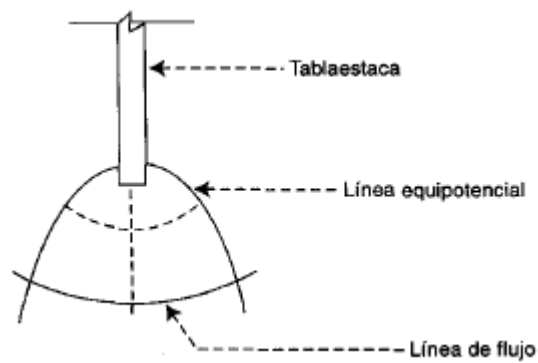
*Red de flujo mostrando algunas peculiaridades en los cuadros de las esquinas*



*Fuente: Flujo de agua a través de suelos (2000)*

**Figura 21.**

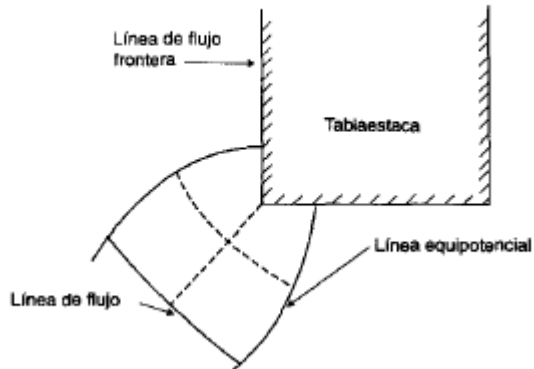
*Detalle de un cuadrado alrededor de la punta en una tablaestaca*



*Fuente: Flujo de agua a través de suelos (2000)*

## Figura 22.

*Detalle de un cuadro alrededor de la esquina en una tablaestaca*



*Fuente: Flujo de agua a través de suelos (2000)*

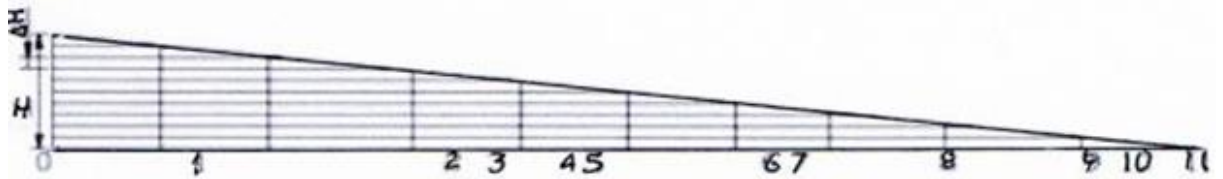
### 4.5.1. Procedimiento para Construir Una Red De Flujo.

- Se determinan los puntos de contacto de las equipotenciales con el contorno subterráneo; para el efecto se asume el número de franjas de carga, por ejemplo,  $n_f = 10$  y en el diagrama de carga la carga total  $H$  se divide en tramos de igual magnitud  $\Delta H$  (el número de tramos es igual al número de franjas de carga  $n_f$ ); desde estos puntos se trazan líneas horizontales hasta el diagrama y desde el punto de cruce se bajan líneas verticales.



**Figura 23.**

*Detalle de la carga total a lo largo del contorno subterráneo*



*Fuente: Flujo de agua a través de suelos (2000)*

Se determinan los puntos de contacto de las líneas de flujo con las líneas del fondo del cauce aguas arriba y aguas abajo. Para el efecto se mide el ancho de cada franja de carga (en la cercanía del contorno subterráneo) y se determina su valor promedio. Colocando esta magnitud hacia aguas arriba, desde el punto inicial del contorno subterráneo, a lo largo del fondo del cauce y hacia aguas abajo desde el punto final del contorno subterráneo, a lo largo del fondo del cauce, se determinan los puntos de contacto de la primera línea de flujo, la misma que es trazada observando las condiciones y exigencias para la construcción de la red de flujo. Colocando esta misma magnitud desde los puntos de contacto de la primera línea es posible obtener la segunda y así sucesivamente. (Flores Berrones,2000; I.V. Zavgorodnyaya, I.V. Ivanova, V.T. Ostrovsky. Krasnodar2013)

Para determinar los elementos del flujo de filtración se utilizan las siguientes expresiones:

a) La carga de cualquier equipotencial.

$$H_x = H - ne \frac{H}{ne}$$

Dónde  $ne$  es el número de orden de la franja de carga contado desde el fondo aguas arriba.

b) Gradiente en el interior de un nicho (cuadrado curvilíneo).

$$J = \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

Donde  $\Delta L$ - distancia entre las equipotenciales que limitan el nicho, m.

c) Velocidad de filtración.

La velocidad de filtración en el nicho se determina con la ecuación de Darcy:

$$V_F = J \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

Donde K- coeficiente de filtración.

#### **4.6. MÉTODO DE RED DE FILTRACIÓN LINEAL**

Se considera que el flujo de filtración en el suelo de cementación, bajo el contorno subterráneo de la presa tiene dirección hacia aguas abajo. La lámina elemental hipotética de dicho flujo en rigor contornea la línea de contacto de los elementos del contorno con el suelo de cimentación, desde el punto 0 hasta el punto 11 (figura siguiente). Esta hipótesis permite determinar la longitud teórica del contorno subterráneo con la siguiente ecuación:

$$L = CZ$$

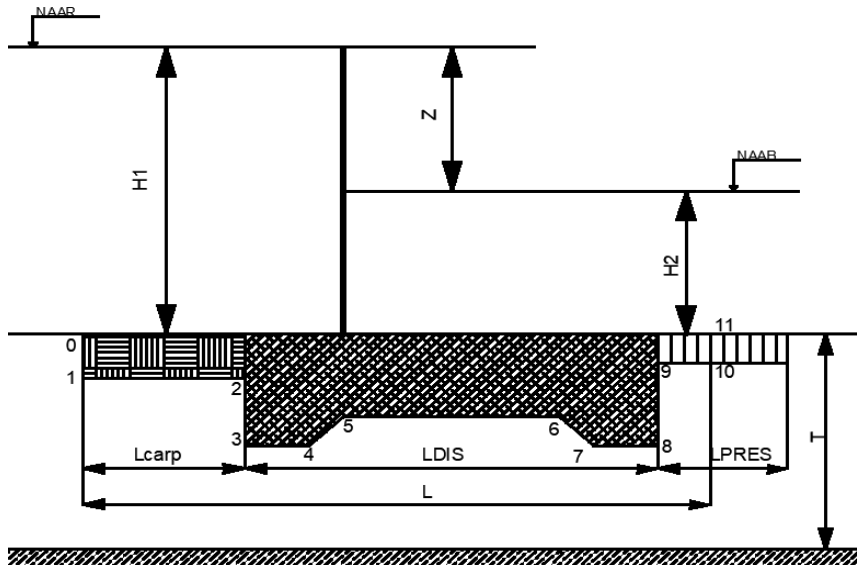
Donde:

C- coeficiente de gradiente que depende del tipo de suelo;

Z- carga actuante

**Figura 24.**

*Esquema filtración lineal.*



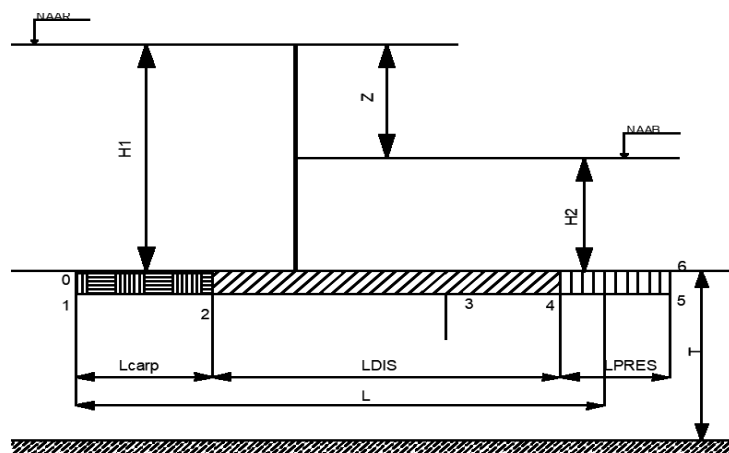
*Elaborado por: Autora*

### PROCEDIMIENTO

- a) A partir de los datos de entrada y de la práctica de diseño se adoptan las siguientes longitudes de los elementos del contorno como se identifica en la siguiente figura:

**Figura 25.**

*Puntos característicos del contorno subterráneo.*



*Elaborado por: Autora*

Para el análisis se marcan los puntos característicos a lo largo del contorno subterráneo 0-1-2-3-4-5-6. El punto 3 se ubica en el punto medio de la longitud del tramo de disipación.

- a) Se determina la longitud real del contorno desarrollado considerando las dimensiones anteriormente establecidas y se verifica el cumplimiento de la condición:

$$L_{REAL} \geq L_{PER}$$

$$L_{PER} = C \cdot Z$$

En la tabla siguiente se presentan los valores del coeficiente de gradiente para los diferentes tipos de suelos.

**Tabla 6.**

*Coeficiente de gradiente para los diferentes tipos de suelos.*

SUELO	C	SUELO	C
ARCILLOSO	8	CANTO RODADO	3
ARENOSO FINO	6	TOBA DESCOMPUESTA	8
ARENOSO MEDIO	5	TOBA SIN DESCOMONER	5
ARENOSO GRUESO	4	LOES	4-3,5
GRAVOSO	3,5	LIMO ARCILLOSO	3,5-3,0

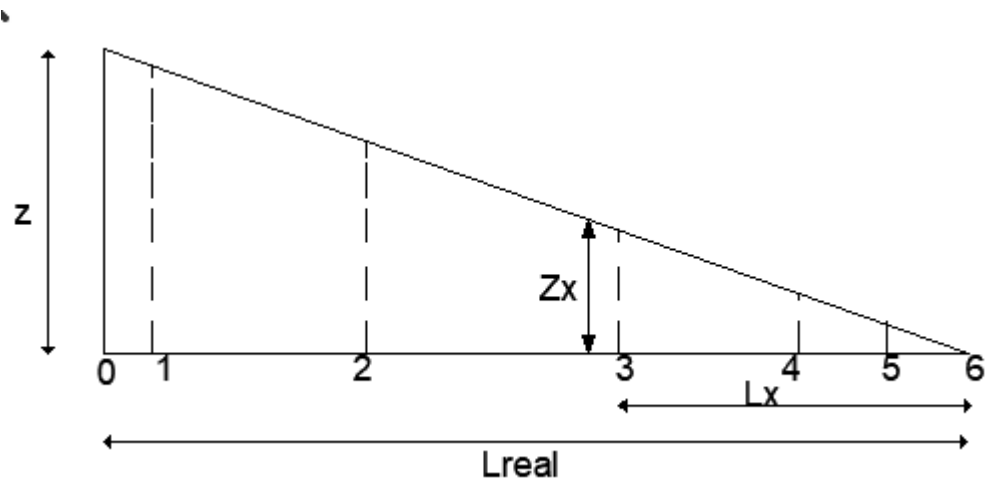
*Fuente: Cálculo flutbet de estructuras hidráulicas (2013)*

- b) Se determina la carga  $h$  a lo largo del contorno subterráneo. Para el efecto se construye en escala el diagrama de carga sobre la línea desarrollada del contorno

(figura siguiente). En el método de la FLC se asume que la variación de la carga de Z a 0 es lineal.

**Figura 26.**

*Diagrama de carga sobre la línea desarrollada del contorno*



*Elaborado por: Autora*

La carga también puede ser determinada con la siguiente ecuación:

$$h_x = \frac{Z}{L_{REAL}} L_x$$

Donde  $L_x$ - distancia desde el punto final del contorno desarrollado hasta la sección en la que se determina la carga  $m$ ;

En caso de que, el espesor de los elementos lineales del contorno, sean determinados en función de la carga, se aplica la siguiente ecuación, que considera la condición de “no flotación”:

$$t_x = n \frac{\gamma_o h_x}{\gamma_{HOR} - \gamma_o}$$

Donde:

$n$ - factor de seguridad (1-1,2), depende del nivel de importancia de la construcción. (I.V.

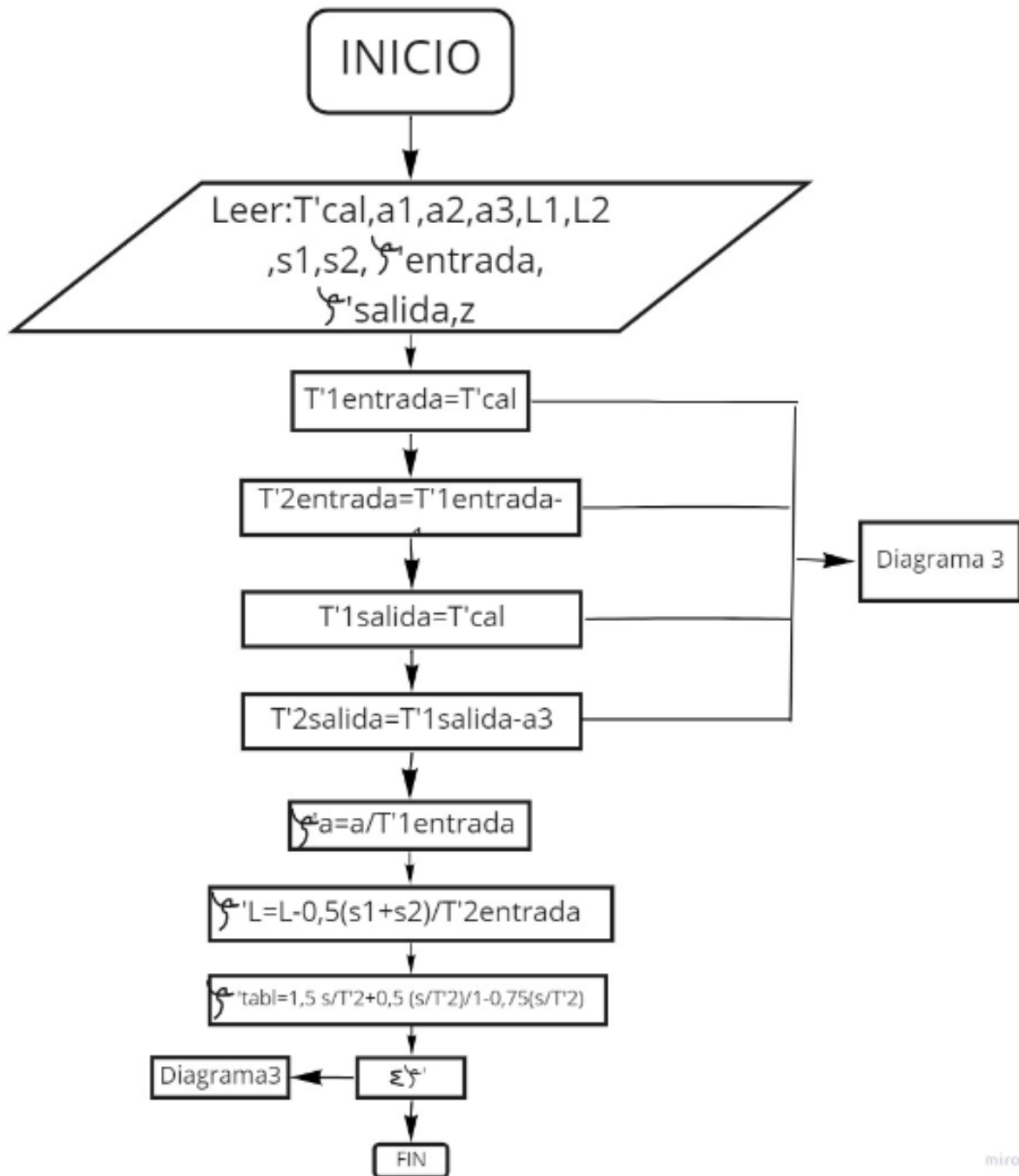
Zavgorodnyaya, I.V. Ivanova, V.T. Ostrovsky. Krasnodar2013)



**Diagrama 2.**

*Determinación de los coeficientes de resistencia para determinar la subpresión.*

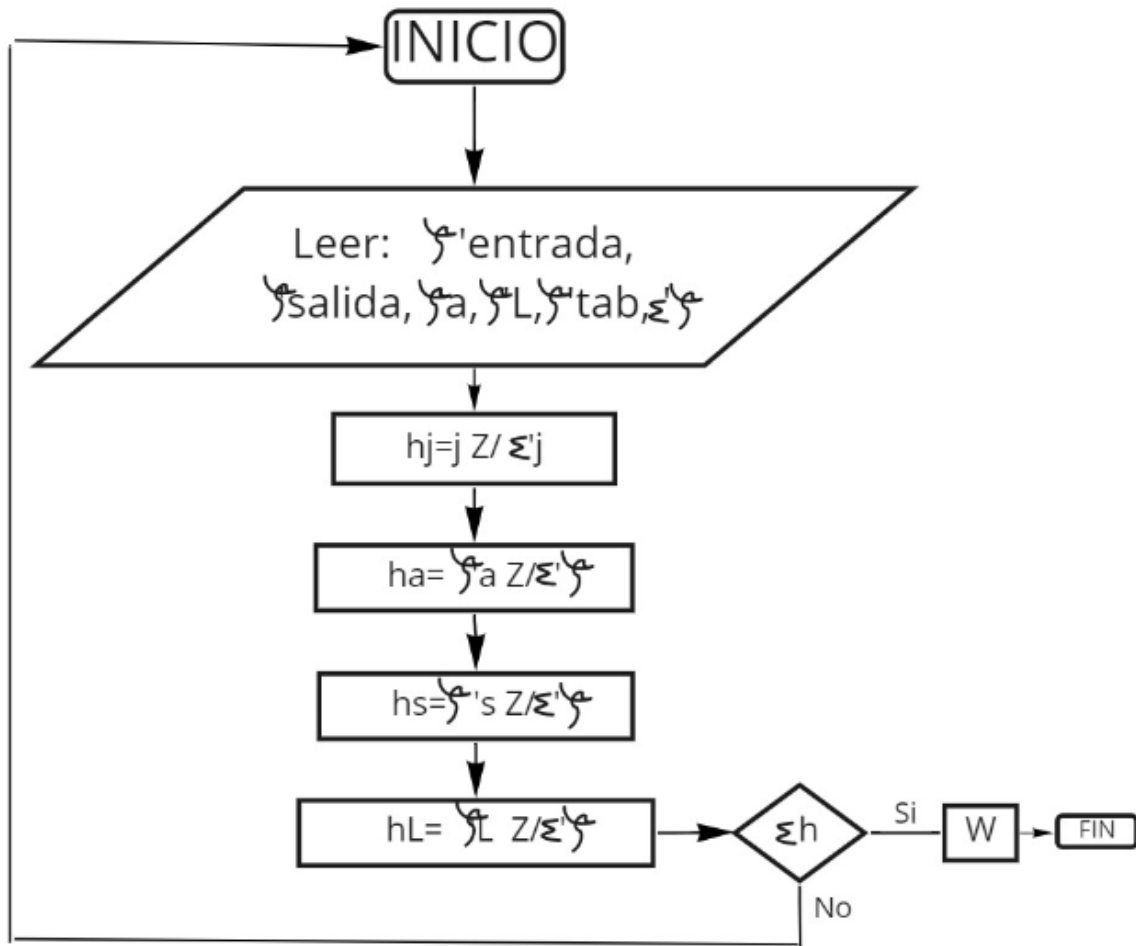
*(Método de los coeficientes de resistencia)*



*Elaborado por: Autora*

**Diagrama 3.**

*Cálculo de la subpresión. (Método de los coeficientes de resistencia)*

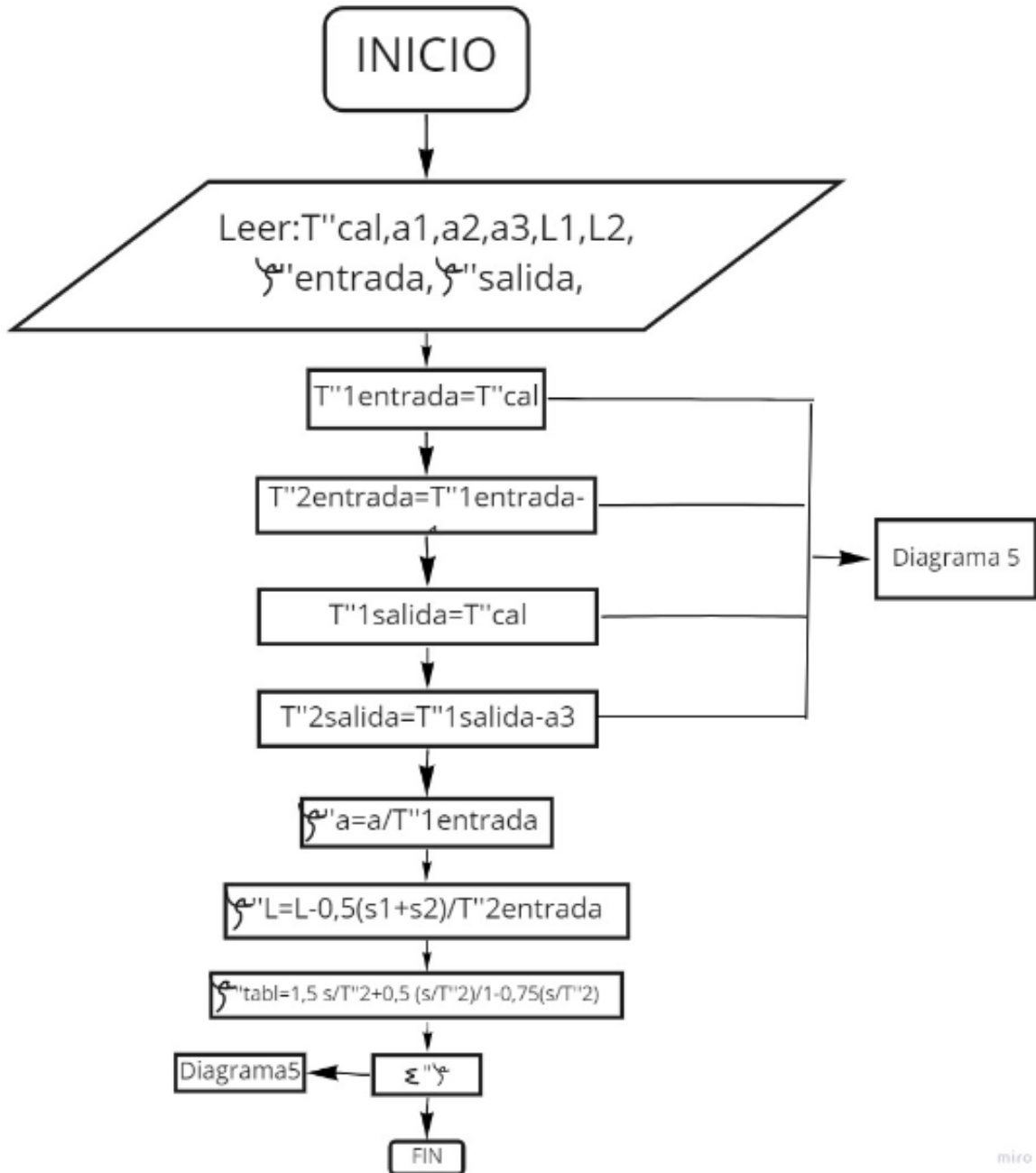


*Elaborado por: Autora*



**Diagrama 4.**

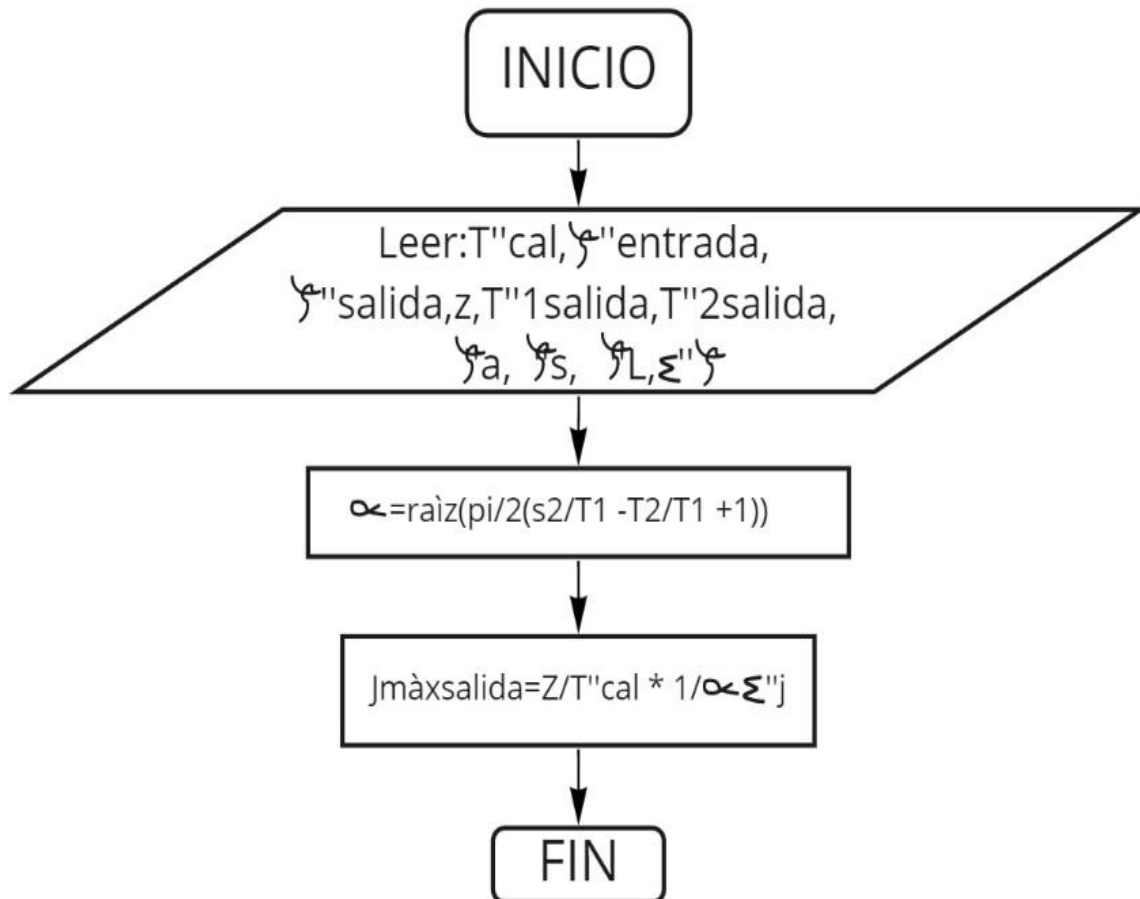
*Cálculo de los coeficientes de resistencia para determinar la gradiente máxima de salida (Método de los coeficientes de resistencia)*



*Elaborado por: Autora*

**Diagrama 5.**

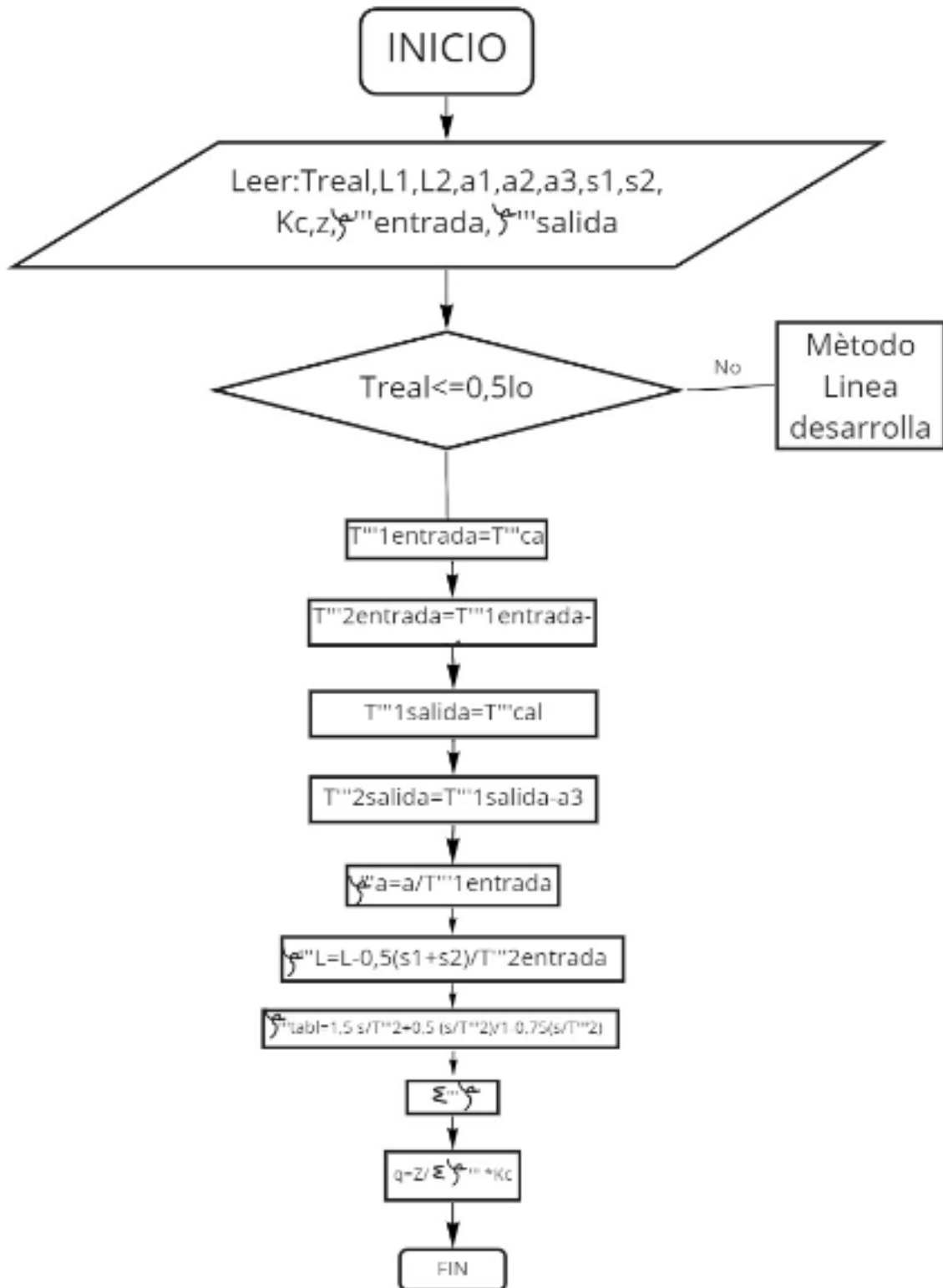
*Cálculo de la gradiente máxima de salida. (Método de los coeficientes de resistencia)*



*Elaborado por: Autora*

**Diagrama 6.**

*Cálculo del caudal de filtración. (Método de los coeficientes de resistencia)*

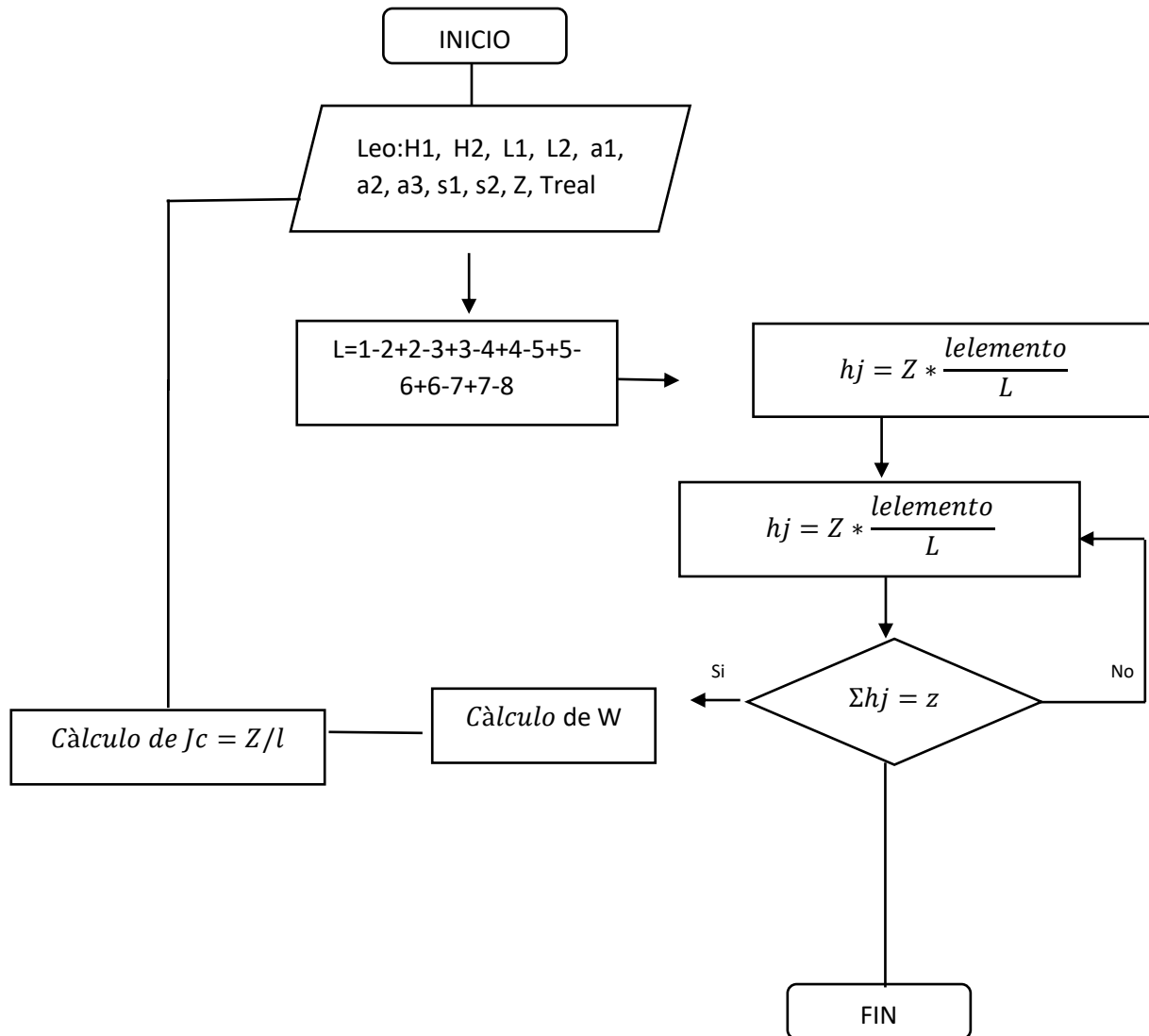


*Elaborado por: Autora*

miró

**Diagrama 7.**

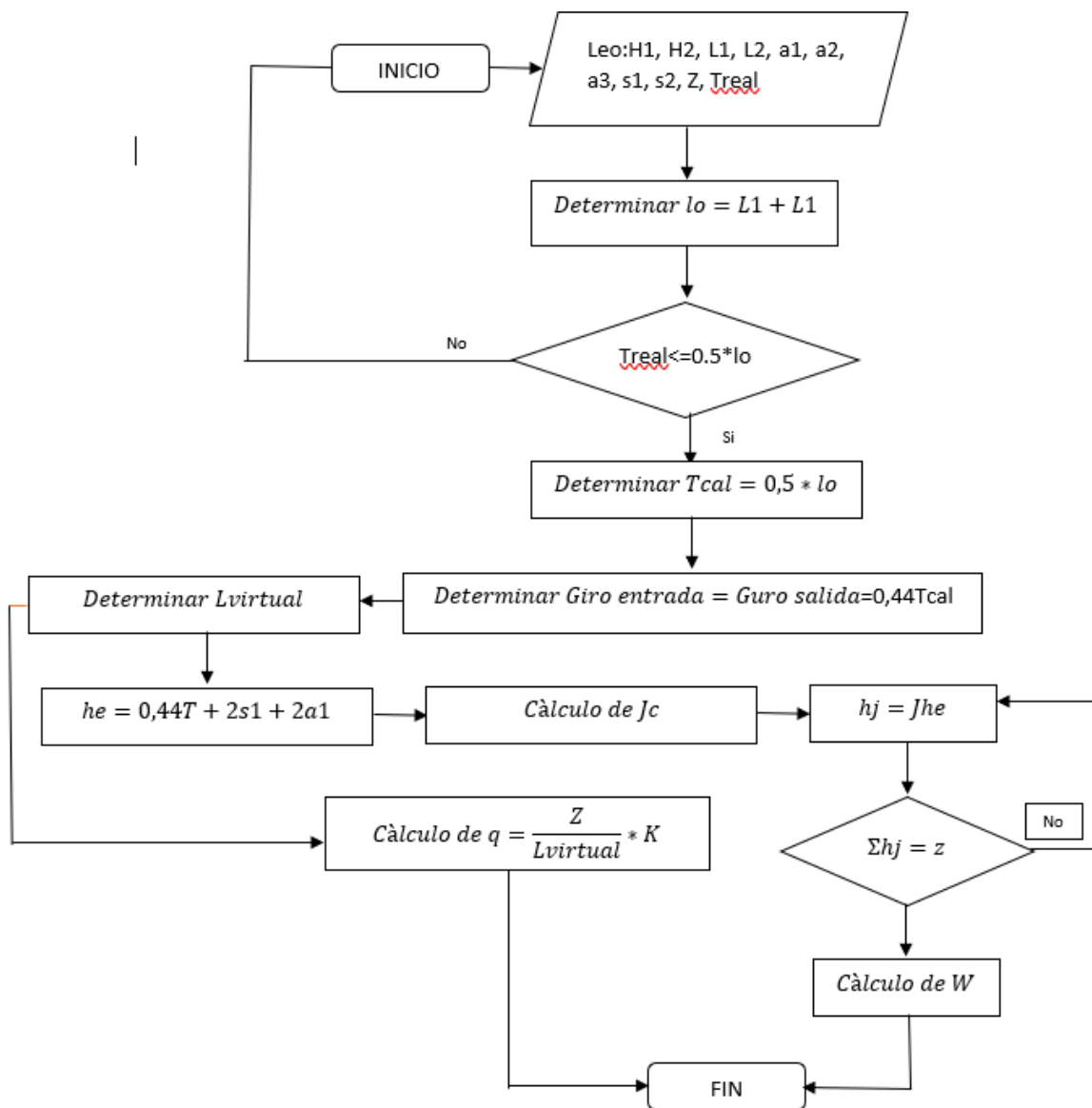
*Cálculo de subpresión y gradiente de control por el método de Bligh*



*Elaborado por: Autora*

### Diagrama 8.

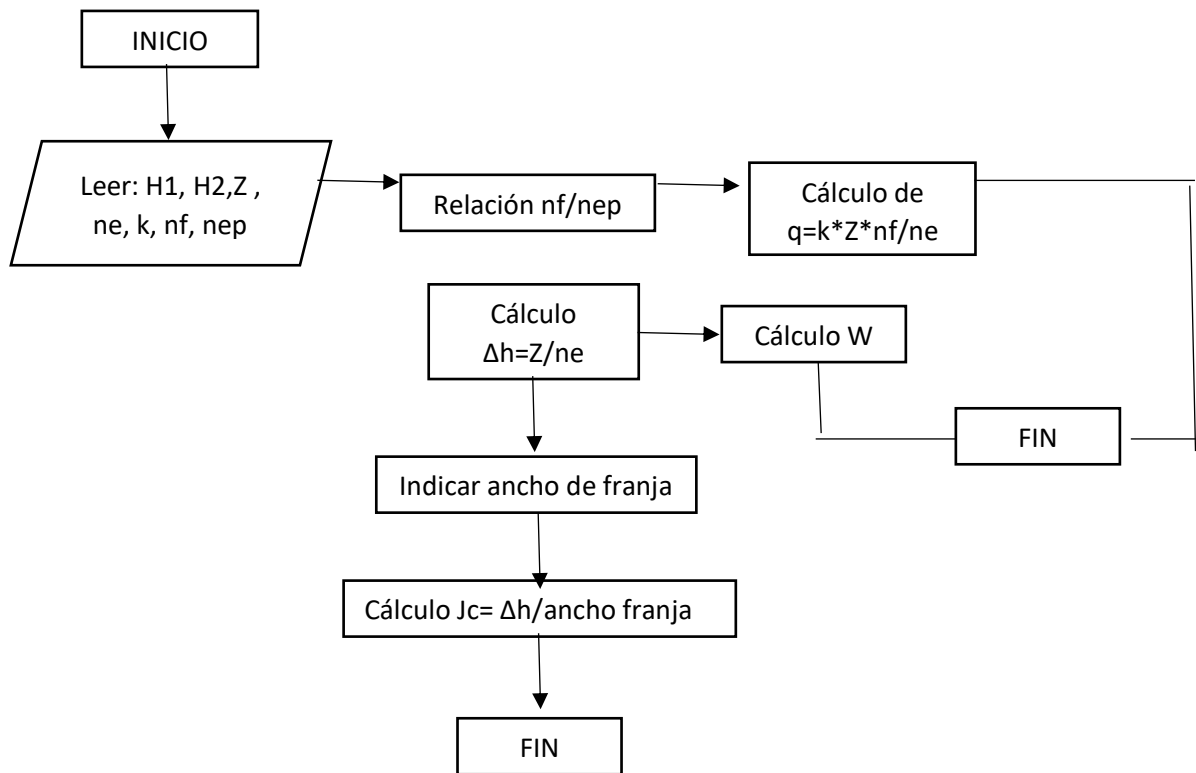
*Cálculo de la subpresión y gradiente de control por el método de Línea desarrollada*



*Elaborado por: Autora*

**Diagrama 9.**

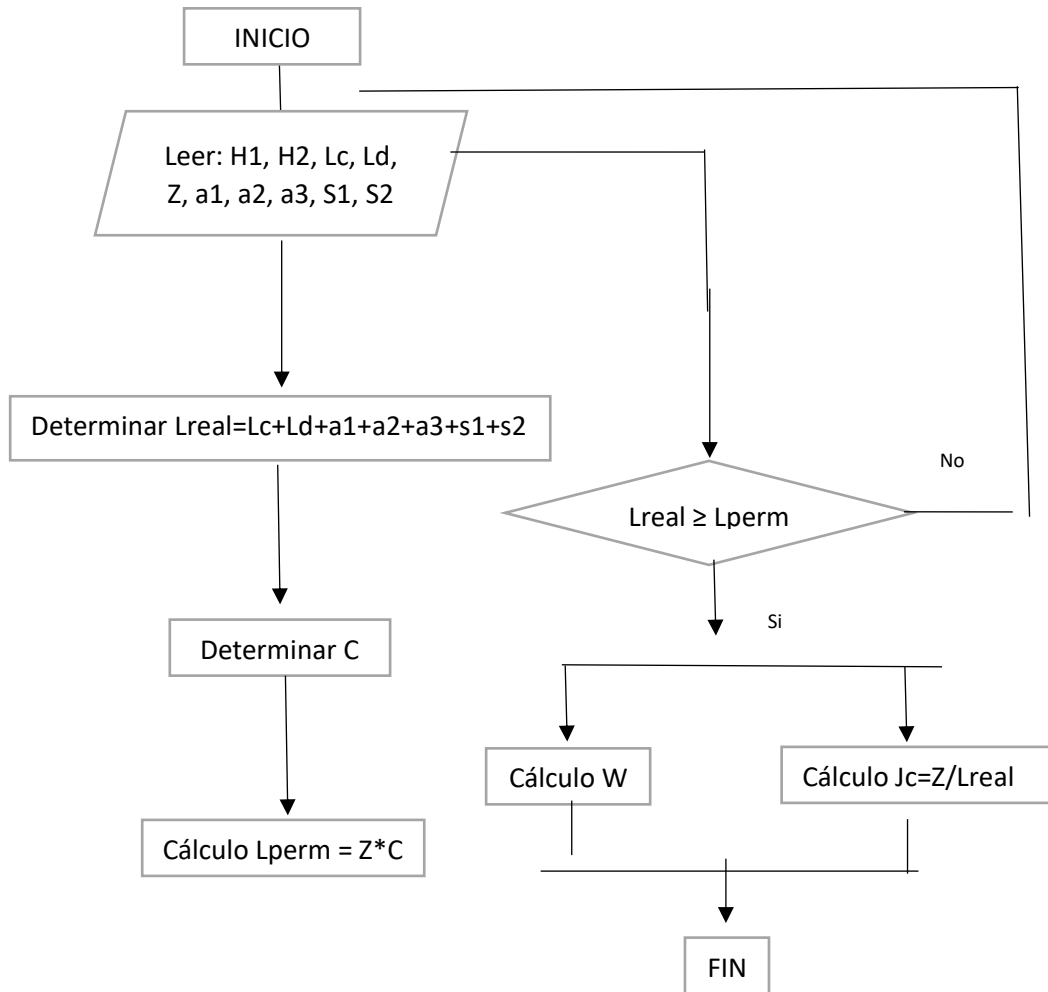
*Cálculo de la subpresión y gradiente de control por el método de red hidrodinámica*



*Elaborado por: Autora*

### Diagrama 10.

*Cálculo de la subpresión y gradiente de control por el método de flujo lineal*



*Elaborado por: Autora*

## 5.2 PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO.

Se mostrará ejemplos de cálculo de cada método aplicado para el diseño del contorno subterráneo para cada esquema seleccionado en consecuencia se aplicarán ecuaciones formuladas en capítulos anteriores. Para formulación de dichos cálculos y poder verificar los resultados se usó un paquete computacional conocido perfectamente en el mercado.

**5.2.1 Ejemplo de cálculo por el Método de los coeficientes de resistencia ( $H=15m$ ; Esquema 2)**

En el desarrollo del ejemplo cabe recalcar los parámetros usados para encontrar los valores de las diferentes variables que intervienen en el espesor de cálculo explicado en el siguiente subcapítulo:

$$H2 = 0,5 H$$

$s1$  estará en  $f(L1)$ ; donde  $L1 =$  Base de la presa

$$s1 = 0,2L1$$

**5.2.1.1 Determinación del espesor de cálculo para encontrar la subpresión y gradiente máxima de salida**

Para determinar los espesores de cálculo se debe encontrar la relación  $Lo/So$  para encontrar el tipo de esquema (ensanchado, intermedio, profundo, muy profundo).

**Tabla 7.**

*Datos a usar para el ejemplo de cálculo Coeficiente de resistencia*

Datos			
H1(m)		15	
H2(m)		7.5	
Treal(m)		infinito	
L1(m)	60.0	a1(m)	5.8
s1(m)	12.00	a2(m)	3.0
Ltotal(m)		80.75	

*Elaborado por: Autora*

$$Lo = L1$$

$$Lo = 60m$$

$$So = s1 + a1$$

$$So = 12 + 5,8 = 17,75m$$

$$\frac{Lo}{So} = \frac{60}{17,75} = 3,38$$



***∴ esquema profundo***

Con la obtención de del tipo de esquema se podrá escoger la ecuación correspondiente al caso para determinar el espesor de la capa activa de filtración  $T'activa$

$$T'act = 0,8S_o + 0,5l_o \quad (5.1)$$

$$T'act = 0,8 * 17,75 + 0,5 * 60 = 44,20$$

En la obtención del espesor de cálculo para las dos variables antes mencionadas se necesita conocer las siguientes condiciones:

$$Tcal = Treal; \text{ cuando } Treal \leq Tact \quad (a)$$

$$Tcal = Tact; \text{ cuando } Treal > Tact \quad (b)$$

Para el caso:

$$T'cal > Tact'$$

$$\therefore T'cal = 44,20 \text{ m}$$

Nota: Este valor se usa para la determinación de la subpresión.

Determinación de la capa activa de filtración  $T''act$ , para esto se necesita el cálculo hecho en (1) ya que se tiene la siguiente ecuación:

$$T''act = 2T'act \quad (5.2)$$

$$T''act = 2 * 44,30 = 88,4m$$

Teniendo en cuenta las consideras a y b planteadas anteriormente se determina el espesor de cálculo  $T''cal$ :

$$T''cal = 88,4m$$

**Nota:** Este valor se usa para la determinación de la gradiente máxima de salida.

### 5.2.1.2 Determinación de los coeficientes de resistencia para el cálculo de la subpresión.

En este punto ya intervienen los espesores en los diferentes puntos del contorno subterráneo T1(entrada), T2(entrada), T1(salida), T2(salida) que se puede identificar en el siguiente gráfico.

$$T1(\text{entrada}) = T'_{\text{cal}} = 44,20 \text{ m}$$

$$T2 = T1(\text{entrada}) - a1$$

$$T2(\text{entrada}) = 44,20 - 5,8 = 38,45 \text{ m}$$

$$T2(\text{salida}) = T2(\text{entrada})$$

$$T2(\text{salida}) = 38,45 \text{ m}$$

$$T1(\text{salida}) = T2(\text{salida}) + a2$$

$$T1(\text{salida}) = 38,45 + 3 = 41,5 \text{ m}$$

**Nota:** Para este esquema 2 se dio estos resultados para T2(salida), se recomienda siempre verificar los niveles para esquemas diferentes.

Con los resultados obtenidos en 3, 4 y 5 se obtiene los coeficientes de resistencia para cada elemento que conforma el contorno subterráneo tanto vertical como horizontal.

a) Coeficiente de resistencia de entrada y salida:

$$\zeta_{\text{ent}} = \zeta_{\text{sal}} = 0,44$$

b) Coeficiente de resistencia de los escalones:

$$\zeta_{\text{esc1}} = \frac{a1}{T1(\text{entrada})}$$

$$\zeta_{\text{esc1}} = \frac{5,8}{44,20} = 0,13$$

$$\zeta_{\text{esc2}} = \frac{a2}{41,5}$$

$$\zeta_{\text{esc2}} = \frac{3}{41,5} = 0,07$$

c) Coeficientes de resistencia en una tablaestaca:

$$\zeta_{s1} = 1,5 \frac{S1}{T2(entrada)} + \frac{0,5 \frac{S1}{T2}}{1 - 0,75 \frac{S1}{T2(entrada o salida)}}$$

$$\zeta_{s1} = 1,5 \frac{12}{38,45} + \frac{0,5 \frac{12}{34,50}}{1 - 0,75 \frac{S1}{38,45}} = 0,67$$

d) Coeficiente de resistencia en un elemento longitudinal:

$$\zeta_L = \frac{L1 - 0,5(S1 + S2)}{T2(entrada o salida)}$$

$$\zeta_L = \frac{60 - 0,5(12)}{38,45} = 1,4$$

Determinación de la sumatoria de los coeficientes de resistencia esto contribuye con el próximo cálculo para llegar a la obtención de la subpresión.

$$\Sigma\zeta = \zeta_{ent} + \zeta_{sal} + \zeta_{esc1} + \zeta_{esc2} + \zeta_{tab} + \zeta_L$$

$$\Sigma\zeta = 0,44 + 0,44 + 0,13 + 0,07 + 0,67 + 1,4$$

$$\Sigma\zeta = 3,2 \text{ (6)}$$

### 5.2.1.3 Cálculo de la subpresión W

A partir de las soluciones obtenidas anteriormente se puede obtener cálculo de las pérdidas de carga  $h_j$  tanto longitudinales como locales del contorno subterráneo y con esta información finalmente se obtiene el diagrama de subpresión. Se debe tener en cuenta la siguiente expresión:

$$h_j = \zeta_j \frac{Z}{\Sigma\zeta_j} \quad (5.3)$$

Donde: Z es la carga actuante

La carga disponible es distribuida en las pérdidas de carga en una manera proporcional al valor de cada coeficiente de resistencia por lo cual se tiene:

$$\Sigma h_j = Z \quad (5.4)$$

Con lo anteriormente explicado se determina las pérdidas de carga para cada elemento del contorno subterráneo:

a) Pérdida de carga de entrada y salida

$$h_{entra, salida} = 0,44 * \frac{7,5}{3,2} = 1,04m$$

b) Pérdida de carga de escalón 1 y escalón 2

$$ha1 = 0,13 * \frac{7,5}{3,2} = 0,31m$$

$$ha2 = 0,07 * \frac{7,5}{3,2} = 0,17m$$

c) Pérdida de carga tablaestaca

$$hs1 = 0,67 * \frac{7,5}{3,2} = 1,60m$$

d) Pérdida de carga del elemento longitudinal

$$hL = 1,4 * \frac{7,5}{3,2} = 3,33m$$

Verificación de la expresión (5.4) dada anteriormente:

$$\Sigma hj = h_{entrada} + h_{salida} + ha1 + ha2 + hs1 + hL$$

$$\Sigma hj = 1,04 + 1,04 + 0,31 + 0,17 + 1,60 + 3,33$$

$$\Sigma hj = 7,5m = Z$$

Determinación de la subpresión:

Es de mucha importancia recordar que la subpresión incluye dos compones: subpresión de excedentes y la subpresión de sumersión como se aclara en capítulos anteriores.

$$W_{excedentes} = \left( \left( Lo * \frac{hL}{2} \right) + Lo * (ha2 + hsal) \right) * \gamma_o$$

$$W_{excedentes} = \left( \left( 60 * \frac{3,33}{2} \right) + 60 * (0,17 + 1,04) \right) * 10$$

$$W_{excedentes} = 1730,31 \frac{Kn}{m}$$

$$W(\text{sumersiòn}) = ((\text{Haguasabajo} + \text{pozo} + \text{losa} + \text{filtro}) * \text{Lo}) * \gamma_o$$

$$W(\text{sumersiòn}) = ((7,5 + 1 + 1,2 + 0,55) * 60) * 10$$

$$W(\text{sumersiòn}) = 6150 \frac{\text{Kn}}{\text{m}}$$

$$W_{\text{total}} = W_{\text{excedentes}} + W_{\text{sumesriòn}}$$

$$W_{\text{total}} = 1730,31 + 6150 = 7880,31 \frac{\text{Kn}}{\text{m}}$$

#### 5.2.1.4 Determinación de los coeficientes de resistencia para determinar la gradiente máxima de salida

Con la obtención del espesor de cálculo  $T''_{cal}$  se inicia calculando los coeficientes de resistencia para los diferentes elementos del contorno subterráneo que intervienen para el cálculo de la gradiente máxima de salida con la previa determinación de los espesores de cálculo que van a actuar y que se puede identificar en el siguiente gráfico:

Grafico

$$T1(\text{entrada}) = T''_{cal} = 88,4 \text{ m}$$

$$T2 = T1(\text{entrada}) - a1$$

$$T2(\text{entrada}) = 88,4 - 5,8 = 82,65\text{m}$$

$$T2(\text{salida}) = T2(\text{entrada})$$

$$T2(\text{salida}) = 82,65\text{m}$$

$$T1(\text{salida}) = T2(\text{salida}) + a2$$

$$T1(\text{salida}) = 82,65 + 3 = 85,65\text{m}$$

a) Coeficiente de resistencia de entrada y salida:

$$\zeta_{\text{ent}} = \zeta_{\text{sal}} = 0,44$$

b) Coeficiente de resistencia de los escalones:

$$\zeta_{a1} = \frac{a1}{T1(\text{entrada})}$$

$$\zeta_{a1} = \frac{5,8}{88,4} = 0,07$$

$$\zeta_{a2} = \frac{a2}{T1(\text{salida})}$$

$$\zeta_{a2} = \frac{3}{85,65} = 0,04$$

c) Coeficientes de resistencia en una tablaestaca:

$$\zeta_{s1} = 1,5 \frac{S1}{T2(\text{entrada})} + \frac{0,5 \frac{S1}{T2}}{1 - 0,75 \frac{S1}{T2(\text{entrada o salida})}}$$

$$\zeta_{s1} = 1,5 \frac{12}{82,65} + \frac{0,5 \frac{12}{82,65}}{1 - 0,75 \frac{S1}{82,65}} = 0,30$$

d) Coeficiente de resistencia en un elemento longitudinal:

$$\zeta_L = \frac{L1 - 0,5(S1 + S2)}{T2(\text{entrada o salida})}$$

$$\zeta_L = \frac{60 - 0,5(12)}{82,65} = 0,65$$

Determinación de la sumatoria de los coeficientes de resistencia esto contribuye con el próximo cálculo para llegar a la obtención de la subpresión.

$$\Sigma\zeta = \zeta_{ent} + \zeta_{sal} + \zeta_{a1} + \zeta_{a2} + \zeta_{s1} + \zeta_L$$

$$\Sigma\zeta = 0,44 + 0,44 + 0,07 + 0,04 + 0,30 + 0,65$$

$$\Sigma\zeta = 1,93$$

### 5.2.1.5 Cálculo de la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración $J_{m\grave{a}xsal}$

Como se aclaró en otro capítulo la gradiente máxima de salida se presenta en el último punto del contorno subterráneo. Se determina con la siguiente ecuación.

$$J_{m\grave{a}xsal} = \frac{Z}{T1} * \frac{1}{\alpha * \zeta''_j} \quad (5.5)$$

El coeficiente que interviene en la ecuación anterior se determina de la siguiente manera:

$$\alpha = \sqrt{\text{seno}\left(0,5\pi\left(\frac{s2}{T1} - \frac{T2}{T1} + 1\right)\right)} \quad (5.6)$$

$$\alpha = \sqrt{\text{seno}\left(0,5\pi\left(\frac{12}{85,65} - \frac{82,65}{85,65} + 1\right)\right)}$$

$$\alpha = 0,23 \text{ rad}$$

Reemplazar (5.6) en (5.5)

$$Jmàxsal = \frac{7,5}{85,65} * \frac{1}{0,19 * 1,93}$$

$$Jmàxsal = 0,19$$

### 5.2.1.6 Cálculo del caudal de filtración q

Para este cálculo el método de los coeficientes de resistencia tiene ciertos parámetros de aplicación. En este caso si cumple con la condición de  $Treal \leq 0,5lo$  se puede aplicar el método mencionado caso contrario el método a usarse es el de Línea contorno desarrollada que posteriormente se va a desarrollar.

En el ejemplo dado la **Treal = infinito** por lo cual este método es inaplicable por lo que rápidamente se usará el método de Línea de contorno desarrollada para poder obtener un caudal de filtración para una próxima comparación de resultados.

$$q = \frac{Z}{0,44 * Treal + 2 * a1 + 2 S + lo + a2 + 0,44 * Treal} * K * Tcàl$$

**Donde: TCAL = 0,5lo**

$$q = \frac{7,5}{124,90} * 0,30 * 0,5 * 60$$

$$q = 0,54 \frac{m^3}{d\grave{a}} * m$$

Nota: Los cálculos se presentarán en el subcapítulo del método de Línea de contorno desarrollada.

Para los casos que si se pueda ocupar el método de coeficientes de resistencia para el cálculo del caudal de filtración se procederá como se encuentra explicado en el Capítulo IV.

- a) Para el valor  $T'''_{cal}=T_{real}$  y se determinan los coeficientes de resistencia  $\zeta_j$  de todos los elementos como se determinó para los casos de subpresión y gradiente máxima de salida y se suma  $\sum \zeta_j$ .
- b) Se determina el caudal de filtración con la siguiente expresión:

$$q = k \frac{Z}{\sum \zeta_j}, \text{ donde } k: \text{ coeficiente de filtración del suelo}$$

### 5.2.2 Ejemplo de cálculo por el Método de Bligh ( $H=15m$ ; Esquema 2)

**Tabla 8.**

*Datos a usar para el ejemplo de cálculo M. Bligh*

Datos			
H1(m)		15	
H2(m)		7.50	
Treal(m)		infinito	
L1(m)	60	a1(m)	5.8
s1	12	a2(m)	3

*Elaborado por: Autora*

$$H2 = 0,5 H$$

*s1 estará en  $f(L1)$ ; donde  $L1 = \text{Base de la presa}$*

$$s1 = 0,2L1$$

Este método es bastante sencillo para la determinación de la subpresión influye así mismo las pérdidas de carga, pero en este proceso no se toma en cuenta los giros en la entrada y salida. La pérdida de carga se basa en la siguiente ecuación:



$$h_j = Z * \frac{Lelemento}{L} \quad (5.7)$$

$$L = 1 - 2 + 2 - 3 + 3 - 4 + 4 - 5 + 5 - 6 + ..$$

$$L = 5,8 + 12 + 60 + 3 = 80,75m$$

Con esto se aplica a la ecuación (5.7) para:

a) Pérdida de carga escalón entrada y salida

$$ha1 = Z * \frac{a1}{L}$$

$$ha1 = 7,5 * \frac{5,8}{80,75m} = 0,53m$$

$$ha2 = Z * \frac{a2}{L}$$

$$ha2 = 7,5 * \frac{3}{80,75m} = 0,28m$$

b) Pérdida de carga de la tablaestaca

$$hs1 = Z * \frac{s1}{L}$$

$$hs1 = 7,5 * \frac{12}{80,75} = 1,11m$$

c) Pérdida de carga del elemento longitudinal

$$hL1 = Z * \frac{L1}{L}$$

$$hL1 = 7,5 * \frac{60}{80,75} = 5,57m$$

Se realiza la comprobación siguiente:

$$\Sigma h_j = Z$$

$$\Sigma h_j = 0,53 + 1,11 + 5,57 + 0,28 = 7,5m = Z$$

A partir de los cálculos realizados se calcula la subpresión existente:

$$Wexcedentes = \left( \left( hL * \frac{Lo}{2} \right) + hs2 * Lo \right) * 10$$

$$W_{excedentes} = \left( \left( 5,57 * \frac{60}{2} \right) + 0,28 * 60 \right) * 10 = 1839 \frac{Kn}{m}$$

$$W(\text{sumersiòn}) = ((7,5 + 1 + 1,2 + 0,55) * 60) * 10$$

$$W(\text{sumersiòn}) = 6150 \frac{Kn}{m}$$

$$W_{total} = 1839 + 6150 = 7989 \frac{Kn}{m}$$

En este método no existe una forma exclusiva para encontrar la gradiente máxima de salida ya que ese procedimiento es exclusivo del método de coeficientes por lo cual se procede a determinar la gradiente de salida  $J_{sal}$ :

$$J_{sal} = \frac{ha^2}{a^2}$$

$$J_{sal} = \frac{0,28}{3} = 0,093$$

Con los resultados obtenidos se determina el caudal de filtración con la siguiente ecuación:

$$q = \frac{Z}{L} * K * T_{cal} \quad (16)$$

Para  $T_{cal}$  se debe tener en cuenta lo siguiente:

$$T_{cal} = T_{real} \quad ; T_{real} < \frac{L}{2}$$

$$T_{cal} = \frac{L}{2} \quad ; T_{real} > \frac{L}{2}$$

En el ejemplo se tiene que  $T_{real} = \text{infinito}$ , por consiguiente:

$$T_{cal} = \frac{L}{2} = \frac{78}{2} = 39m$$

Reemplazar en ecuación (16):

$$q = \frac{7,5}{80,75} * 0,30 * 40,38$$

$$q = 1,12 \frac{m^3}{d^2 a} * m$$

### 5.2.3 Ejemplo de cálculo por el Método de Línea de contorno desarrollada (H=15m;

Esquema 2)

**Tabla 9.**

Datos a usar para el ejemplo de cálculo M. Línea de contorno desarrollada

Datos			
H1(m)		15	
H2(m)		7.5	
Treal(m)		infinito	
L1(m)	60	a1(m)	5.8
s1(m)	12	a2(m)	3.0

Elaborado por: Autora

$$H2 = 0,5 H$$

s1 estará en  $f(L1)$ ; donde  $L1 =$  Base de la presa

$$s1 = 0,2L1$$

En este método se debe verificar la condición siguiente:

$$Treal > 0,5Lo$$

Para el ejemplo que se va a desarrollar se tiene que  $Treal=infinito$  por lo que cumple con dicha condición sin embargo en el caso que no cumpliera se recomienda usar el método de los coeficientes puesto que se va a tratar un espesor real delgado. A pesar de ello este método también se puede desarrollar para dicho caso.

El espesor de cálculo se encontrará de la siguiente manera:

$$Tcal = 0,5Lo$$

$$Tcal = 0,5 * 60 = 30m$$

#### 5.2.3.1 Determinación de la longitud virtual:

$$Lvirtual = 0,44T + 2s1 + a1 + a2 + L1 + 0,44T$$

$$L_{virtual} = 0,44(30) + 2(12) + 2 * 5,8 + 3 + 60 + 0,44(30) = 124,90$$

En este método nuevamente se toma en cuenta los giros de entrada y salida

$$Giro\ de\ entrada\ y\ salida = 0,44T = 0,44 * 30 = 13,20m$$

En este método no existe una forma exclusiva para encontrar la gradiente máxima de salida ya que ese procedimiento es exclusivo del método de coeficientes por lo cual se procede a determinar la gradiente de salida  $J_c$  a la salida. Determinación de la gradiente de control  $J_c$  con la siguiente expresión:

$$J_c = \frac{Z}{L_{virtual}} = \frac{7,5}{124,90} = 0,060$$

A partir de los resultados obtenidos determinar las pérdidas de carga:

$$h_j = J_c * L_j; L_j: longitud\ del\ elemento$$

a) Pérdida de carga de entrada

$$h_e = J_c * (giro_{entrada} + 2s_1 + 2 * a_1)$$

$$h_e = 0,060 * (13,20 + 2 * 12 + 2 * 5,8) = 3,60m$$

b) Pérdida de carga longitudinal

$$h_{L1} = J_c * L_1$$

$$h_{L1} = 0,060 * 60 = 3,60m$$

c) Pérdida de carga de salida

$$h_{sal} = J_c * (giro_{salida} + a_1)$$

$$h_{sal} = 0,060 * (13,20 + 5,8) = 0,97m$$

Verificación de la siguiente expresión:

$$\Sigma h_j = Z$$

$$\Sigma h_j = h_e + h_{L1} + h_{sal}$$

$$\Sigma h_j = 2,92 + 3,60 + 0,97 = 7,50m$$

### 5.2.3.2 Cálculo de la subpresión W:

$$W_{excedentes} = \left( \left( hL1 * \frac{Lo}{2} \right) + h_{sal} * Lo \right) * \gamma_o$$

$$W_{excedentes} = \left( \left( 3,60 * \frac{60}{2} \right) + 0,97 * 60 \right) * 10$$

$$W_{excedentes} = 1664,53 \text{ Kn/m}$$

$$W_{sumersi\grave{o}n} = (H_{aguasabajo} + pozo + losa + filtro) * Lo * \gamma_o$$

$$W(\text{sumersi\grave{o}n}) = ((7,5 + 1 + 1,2 + 0,55) * 60) * 10$$

$$W(\text{sumersi\grave{o}n}) = 6150 \frac{\text{Kn}}{\text{m}}$$

$$W_{total} = W_{excedentes} + W_{sumersi\grave{o}n}$$

$$W_{total} = 1664,53 + 6150 = 7814,53 \frac{\text{Kn}}{\text{m}}$$

### 5.2.3.3 Cálculo del caudal de filtración q:

$$q = \frac{Z}{L_{virtual}} * K * T_{cal}$$

$$q = \frac{7,5}{124,90} * 0,30 * 30$$

$$q = 0,54 \frac{\text{m}^3}{\text{d}\grave{\text{a}}a} * m$$

### 5.2.4 Ejemplo de cálculo por el Método de red hidrodinámica (H=15m; Esquema 2)

En este método varía el esquema ya que se adopta el siguiente esquema representativo para las líneas equipotenciales y de flujo donde se visualice la ortogonalidad como se muestra a continuación

Para este ejemplo de cálculo se utilizó los siguientes datos:

**Tabla 10.**

*Datos a usar para el ejemplo de cálculo M. Red hidrodinámica*

Datos			
H1(m)	15	H2(m)	7.5
H(Z)			7.5
ne			10
k			3.0E-01
nf			4
nep			4

*Elaborado por: Autora*

$$H2 = 0,5 H$$

*s1 estará en  $f(L1)$ ; donde  $L1 = \text{Base de la presa}$*

$$s1 = 0,2L1$$

Se iniciará con la determinación de la fracción de caída potencial entre dos equipotenciales mediante la siguiente expresión:

$$\Delta h = \frac{Z}{ne}$$

$$\Delta h = \frac{7,5}{10} = 0,75$$

Determinación de la relación  $nf/ne$  la cual interviene el cálculo del caudal de filtración

$$\frac{nf}{ne} = \frac{4}{10} = 0,40$$

Con el paso anterior se puede calcular el caudal de filtración por este método teniendo en cuenta que el caudal es por cada metro.

$$q = Z * k * \frac{nf}{ne} * \text{sección}$$

*sección =  $a * 1$ ; al ser una red cuadrada  $a = 1$*

$$q = 7,5 * 0,30 * 0,40 * 1m^2$$

$$q = 0,90 \frac{m^3}{d\grave{a}a} * m; \text{este caudal es por tubo}$$

$$q_{total} = q * n; n : n\grave{u}mero de tubos$$

$$q_{total} = 0,90 * 4 = 3,60 \frac{m^3}{d\grave{a}a} * m$$

Para la altura del agua en punto simular como si abriéramos un tubo piezométrico para este caso no se hará en  $n_p=4$  (cuarta línea equipotencial) como se muestra en el gráfico: Como se vio en pasos anteriores la pérdida de energía corresponde a **0,75 m por** lo que en cuatro intervalos la pérdida será:

$$h_{punto} = 0,75 * 4 = 3m$$

En el cálculo de la subpresión W se conoce la carga actuante en cada línea equipotencial como lo muestra en el siguiente gráfico:

$$W_{excedentes} = \left( \left( hL1 * \frac{L1}{2} \right) + ha2 * L1 \right) * \gamma_o$$

$$W_{excedentes} = \left( \left( 2,25 * \frac{60}{2} \right) + 1,5 * 60 \right) * 20$$

$$W_{excedentes} = 1575 \text{ Kn/m}$$

$$W_{sumersi\grave{o}n} = (h2 + pozo + losa + filtro) * \gamma_o$$

$$W_{sumersi\grave{o}n} = (7,5 + 1 + 1,2 + 0,55) * 10 = 6150 \text{ Kn/m}$$

$$W_{total} = 1575 + 7725 = 7725 \text{ Kn/m}$$

Las pérdidas de carga también interfieren en este método y el procedimiento más simple para determinarlas es semejante al método de la línea de contorno desarrollada, pero en este caso de red hidrodinámica actúan los puntos de contacto de las equipotenciales con el contorno subterráneo, se conoce la carga en cada punto y, a partir de los puntos que corresponden a los extremos de la base usted tiene la subpresión. La línea piezométrica a lo largo del elemento horizontal (la base de la presa) puede asumir como una línea promedio.

En la determinación de la gradiente de control se debe de obtener la distancia entre equipotenciales, esto valor será un aproximado ya que es método que se realiza el trazo de las líneas a mano tratando de buscar una simetría y debido a esto puede tener un porcentaje de error por la falta de precisión al realizar los trazos. Para este caso se tiene un aproximado de **8,075 m** y con esta información determinamos la gradiente:

$$Jc = \frac{\Delta h}{\Delta L} = \frac{0,75}{8,075}$$

$$Jc = 0,0929$$

### 5.2.5 Ejemplo de cálculo por el Método de filtración lineal ( $H=15m$ ; Esquema 2)

**Tabla 11.**

*Datos a usar para el ejemplo de cálculo Filtración Lineal*

DATOS			
h1(m)			15
h2(m)			7.5
Z(m)			7.5
L1(m)	60	a2(m)	3.00
a1(m)	6	s1(m)	12
Treal(m)			infinito

*Elaborado por: Autora*

Determinación de la longitud real del contorno desarrollado considerando las dimensiones establecidas en la tabla de datos

$$Lreal = a1 + s1 + L1 + a2$$

$$Lreal = 5,8 + 12 + 60 + 3 = 80,75m$$

En el cálculo de la longitud permisible interviene los coeficientes de gradientes para los diferentes tipos de suelos para el caso se asume que el tipo de suelo es arcilloso por cual le corresponde un coeficiente de **8** dando como resultado:

$$Lperm = Z * c$$

$$Lperm = 7,5 * 8 = 60m$$



Se verifica la condición:

$$L_{real} \geq L_{perm}$$

$$80,75 > 60 \therefore \text{si cumple}$$

Las pérdidas de carga se determinarán para la obtención de la subpresión:

$$h_j = Z * \frac{Lelemento}{L_{real}}$$

a) Pérdida de carga en los escalones de a entrada y salida

$$ha1 = Z * \frac{a1}{L_{real}}$$

$$ha1 = 7,5 * \frac{5,8}{7880,75} = 0,53m$$

$$ha2 = Z * \frac{a2}{L_{real}}$$

$$ha1 = 7,5 * \frac{3}{80,75} = 0,53m$$

b) Pérdida de carga de la tablaestaca

$$hs1 = Z * \frac{s1}{L_{real}}$$

$$hs1 = 7,5 * \frac{12}{80,75} = 1,12$$

c) Pérdida del elemento longitudinal

$$hL = Z * \frac{L1}{L_{real}}$$

$$hL = 7,5 * \frac{60}{80,75} = 5,57m$$

Verificación de la siguiente expresión:

$$\Sigma h_j = Z$$

$$\Sigma h_j = ha1 + ha2 + hs1 + hL1$$

$$\Sigma h_j = 0,53 + 1,12 + 5,57 + 0,27 = 7,5m$$

Cálculo de la subpresión W:

$$W_{excedentes} = \left( \left( hL1 * \frac{Lo}{2} \right) + ha2 * Lo \right) * \gamma_o$$

$$W_{excedentes} = \left( \left( 5,57 * \frac{60}{2} \right) + 0,27 * 60 \right) * 10$$

$$W_{excedentes} = 1839,01 \text{ Kn/m}$$

$$W_{sumersi\grave{o}n} = ((Haguasabajo + pozo + losa + filtro) * Lo) * \gamma_o$$

$$W(\text{sumersi\grave{o}n}) = ((7,5 + 1 + 1,2 + 0,55) * 60) * 10$$

$$W(\text{sumersi\grave{o}n}) = 6150 \frac{\text{Kn}}{\text{m}} \quad (10)$$

$$W_{total} = W_{excedentes} + W_{sumesri\grave{o}n}$$

$$W_{total} = 1839,01 + 6150 = 7989,01 \frac{\text{Kn}}{\text{m}}$$

Determinación de la gradiente de control a la salida:

$$Jc = \frac{Z}{L_{real}}$$

$$Jc = \frac{7,5}{80,75} = 0,0929$$

En el cálculo del caudal de filtración se necesita de la determinación del espesor de cálculo para lo cual se necesita tener en cuenta las siguientes condiciones:

$$T_{cal} = T_{real} \quad ; T_{real} < \frac{L}{2}$$

$$T_{cal} = \frac{L}{2} \quad ; T_{real} > \frac{L}{2}$$

En el ejemplo se tiene que T real = infinito, por consiguiente:

$$T_{cal} = \frac{L}{2} = \frac{80,75}{2} = 40,38m$$

Cálculo del caudal de filtración q:

$$q = \frac{Z}{L_{real}} * k * T_{cal}$$

$$q = \frac{7,5}{80,75} * 0,3 * 40,38$$

$$q = 1,13 \frac{m^3}{d\grave{a}a} * m$$

### **5.3 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS APLICADOS PARA EL ANÁLISIS DE FILTRACIÓN DEL DISEÑO DEL CONTORNO SUBTERRÁNEO DE PRESAS DE HORMIGÓN CIMENTADAS EN SUELO**

Una vez explicado los procesos de cada método para la obtención de las diferentes variables que influyen en la filtración del suelo de cimentación de presas de hormigón se presenta a continuación la comparación de los resultados entre los cinco métodos planteados desarrollados con el algoritmo de cálculo con la ayuda del software, al igual que en capítulo anterior se presenta subdividido en tablas para diferentes alturas de presa.

Con este tipo de comparaciones se podrá obtener más adelante las conclusiones respectivas para identificar las diferencias existentes de todos los métodos exclusivamente del método de coeficientes de resistencia. (Ver Anexo Tabla 80).

Como se puede visualizar a medida que aumenta la altura de presa los valores de las diferentes variables que intervienen en la filtración van aumentando representativamente.

La diferencia existente entre el método de Bligh y el de coeficientes de resistencia fluctúa para los casos de 0,4-1,8% para los diferentes esquemas planteados esto radica en los elementos que forman partes del contorno subterráneo, así como manera de obtención de la subpresión ya que en los casos de Bligh, Filtración Lineal y red hidrodinámica no se toma en cuenta las pérdidas de carga de entrada y de salida del contorno subterráneo.

Comparando para la altura más crítica que es de H=20m los resultados obtenidos en la gradiente máxima de salida (únicamente aplicado en el método de coeficientes ) ya que para los demás métodos se adopta la gradiente de control a la salida del flujo de filtración, lógicamente que en cada esquema cambia el valor de dicha variable debido a la presencia de los elementos verticales y horizontales que se encuentran establecidos se realiza este método ya que se realiza un cálculo minucioso para dicha obtención evaluando cada fragmento del

contorno subterráneo mientras que los demás métodos únicamente analizan la fracción de carga a la salida del flujo.

En el caudal de filtración se hace énfasis la línea de contorno desarrollada ya que si el método de coeficientes no ayuda con la obtención de esta variable rápidamente se procede a resolver por dicho método. Los valores obtenidos para el caso demuestran que se usó lo explicado anteriormente debido a la presencia de una capa que tiende al infinito como se mostró en el Capítulo V.

#### **5.4. Comparación de los métodos de análisis según las características constructivas del contorno subterráneo**

- Para un esquema de contorno subterráneo ensanchado los elementos tanto horizontales como verticales se los puede identificar en la siguiente la tabla 13.

**Tabla 12.**

*Contorno subterráneo ensanchado*

Lo(m)	60,00
So(m)	10,75
Lo/So	5,58
ensanchado	

*Elaborado por: Autora*

El cambio del espesor de cálculo se muestra en la tabla 14.

**Tabla 13.**

*T'cal para contorno subterráneo ensanchado*

Determinación de T'cal	
T'cal(m)	30,00

*Elaborado por: Autora*

Los cambios en las variables de filtración se muestran en la siguiente tabla 14

**Tabla 14.**

*Resultados con contorno subterráneo ensanchado*

Método	ESQUEMA2		
	W(Kn/m)	Jmàx	q(m <sup>3</sup> /s*m)
Coefficientes	8059,34	0,237	0,614
M.Bligh	8129,38	0,103	1,125
Línea c.	8000,77	0,068	0,614
M.Red hidro	7725,00	0,103	0,900
M.Filtración	8129,38	0,103	1,125

*Elaborado por: Autora*

Para el esquema dos con un contorno subterráneo ensanchado lo cual implica que la relación de la proyección horizontal y vertical del contorno subterráneo disminuye y el espesor de cálculo también se reduce ya que se encuentra en función de la mitad de la proyección horizontal recordando que en este caso el espesor real es considerado al infinito.

Esta variación se refleja en la subpresión que existe bajo la presa, esta aumenta aproximadamente en un 3% con referencia a la tabla 15 y esto es en la aplicación de todos los métodos propuestos.

Para la gradiente de salida aumenta debido a que la longitud de recorrido del flujo ha disminuido, para el método de coeficientes de resistencia es la mayor en comparación con todos los métodos debido a que este presenta una exclusividad para determinar la gradiente máxima de salida y para el caso como la gradiente está en función del espesor de cálculo y este es menor al caso de contorno subterráneo profundo.

El caudal de filtración para este caso aumentó en el método de coeficientes debido a la presencia de reducción de la longitud de recorrido del flujo.

Para un esquema de contorno subterráneo intermedio los elementos tanto horizontales como verticales se los puede identificar en la tabla 15.

**Tabla 15.***Contorno subterráneo intermedio*

Lo(m)	60,00
So(m)	16,75
Lo/So	3,58
intermedio	

*Elaborado por: Autora*

El cambio del espesor de cálculo se muestra en la tabla 16.

**Tabla 16.***T'cal para contorno subterráneo intermedio*

Determinación de T'cal	
T'cal(m)	41,88

*Elaborado por: Autora*

Los cambios en las variables de filtración se muestran en la siguiente tabla 17.

**Tabla 17.***Resultados con contorno subterráneo intermedio*

Método	ESQUEMA2		
	W(Kn/m)	Jmàx	q(m3/s*m)
M.coeficientes	7864,82	0,232	0,554
M.Bligh	7978,57	0,095	1,125
Línea c	7818,58	0,062	0,554
M.red hidro	7725,00	0,095	0,900
M.Filtraciòn L	7978,57	0,095	1,125

*Elaborado por: Autora*

Comparando los resultados obtenidos anteriormente en este caso se obtiene un esquema de contorno subterráneo intermedio lo que involucra una disminución de la relación de la

proyección horizontal con la vertical sin embargo el espesor de cálculo aumentará puesto que se encuentra en función de un aumento de 2,5 veces la proyección vertical de los elementos.

Como los elementos verticales (escalón y tablaestaca) tuvieron que aumentar para cumplir la relación que se mencionó la subpresión para el caso también ha disminuido alrededor de un 2,40 % aproximadamente.

La gradiente de salida ha disminuido por presencia de más longitud de recorrido al aumentar los elementos verticales como lo es la tablaestaca.

Para el caudal de filtración en el método de los coeficientes de resistencia y línea de contorno desarrollada se nota un cambio a más de la longitud de desarrollo la presencia de un espesor de cálculo mayor siendo el doble de la mostrada en la tabla 18. lo que hace que dicho caudal disminuya en un 9,77% aproximadamente para el caso dado.

Para un esquema de contorno subterráneo muy profundo los elementos tanto horizontales como verticales se los puede identificar en la tabla 18:

**Tabla 18.**

*Contorno subterráneo muy profundo*

Lo(m)	20,00
So(m)	20,55
Lo/So	0,97
muy profundo	

*Elaborado por: Autora*

El cambio del espesor de cálculo se muestra en la tabla 19.

**Tabla 19.**

*T'cal para contorno subterráneo muy profundo*

Determinación de T'cal
------------------------

$$\frac{T'_{cal}(m)}{30,55}$$

*Elaborado por: Autora*

Los cambios en las variables de filtración se muestran en la siguiente tabla 20.

**Tabla 20.**

*Resultados con contorno subterráneo muy profundo*

Método	ESQUEMA2		
	W(Kn/m)	Jmàx	q(m3/s*m)
M.coeficientes	1144,55	0,068	0,101
M.Bligh	1167,13	0,056	0,375
M.Linea c	1134,49	0,034	0,101
M.red hidro	1185,00	0,056	0,300
M.Filtraciòn L	1167,13	0,056	0,375

*Elaborado por: Autora*

Como se puede identificar en la tabla 19. para obtener un contorno subterráneo muy profundo se tuvo que hacer modificaciones en sus proyecciones horizontales y verticales hablando más claramente en la tablaestaca aguas arriba.

El espesor de cálculo ha disminuido en un 23,67% aproximadamente para el caso.

La subpresión tiene una representativa reducción lo que es un beneficio para el funcionamiento de la estructura, pero siempre se debe tener presente un aumento lógico de la situación.

La gradiente máxima de salida, así como el caudal de filtración tienen una disminución lo cual se da por el aumento de recorrido del flujo beneficiando de esta manera a la estructura.

Para un esquema que carece de la presencia de un escalón (a2) aguas abajo se obtiene los siguientes resultados:



**Tabla 21.**

*Esquema con  $a_2=0$*

Datos			
H1(m)		15	
H2(m)		7.5	
Treal(m)		infinito	
L1(m)	60	a1(m)	2.8
s1(m)	12	a2(m)	0
Ltotal(m)		74.75	

*Elaborado por: Autora*

**Tabla 22.**

*Gradiente máxima de salida con la ausencia del escalón  $a_2$*

Método	Jmàx
M.coeficientes	#¡DIV/0!

*Elaborado por: Autora*

Como se identifica en la tabla 22 por la ausencia del escalón aguas abajo ( $a_2$ ) se produce una indeterminación en el cálculo de la gradiente máxima de salida de filtración aquí se muestra la importancia del mismo para evitar estos sucesos.

## CAPITULO VI

### COMPONENTES COMPLEMENTARIOS DE LA FILTRACIÓN EN EL ENTORNO DE UNA PRESA HORMIGÓN CIMENTADA EN SUELO

#### 6.1 FILTRACIÓN SEMI-CONFINADA BAJO UNA ESTRUCTURA HIDRÁULICA.

##### 6.1.1 Aspectos generales.

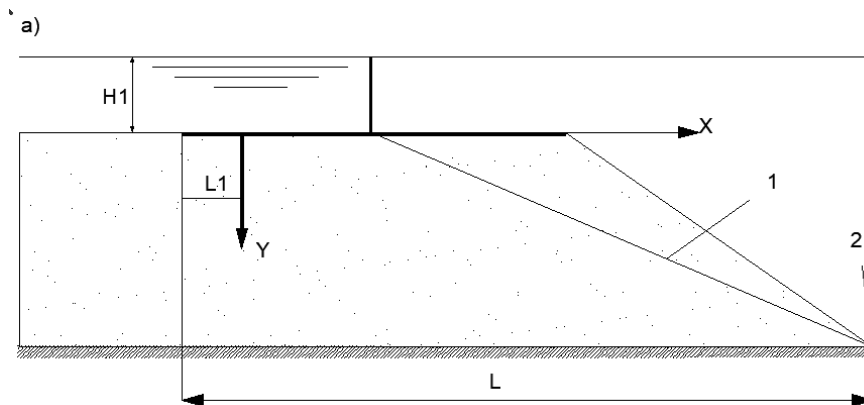
Cuando el flujo de filtración bajo una estructura hidráulica, en parte de su recorrido es a presión y, en parte con superficie libre, se denomina semi- confinada.

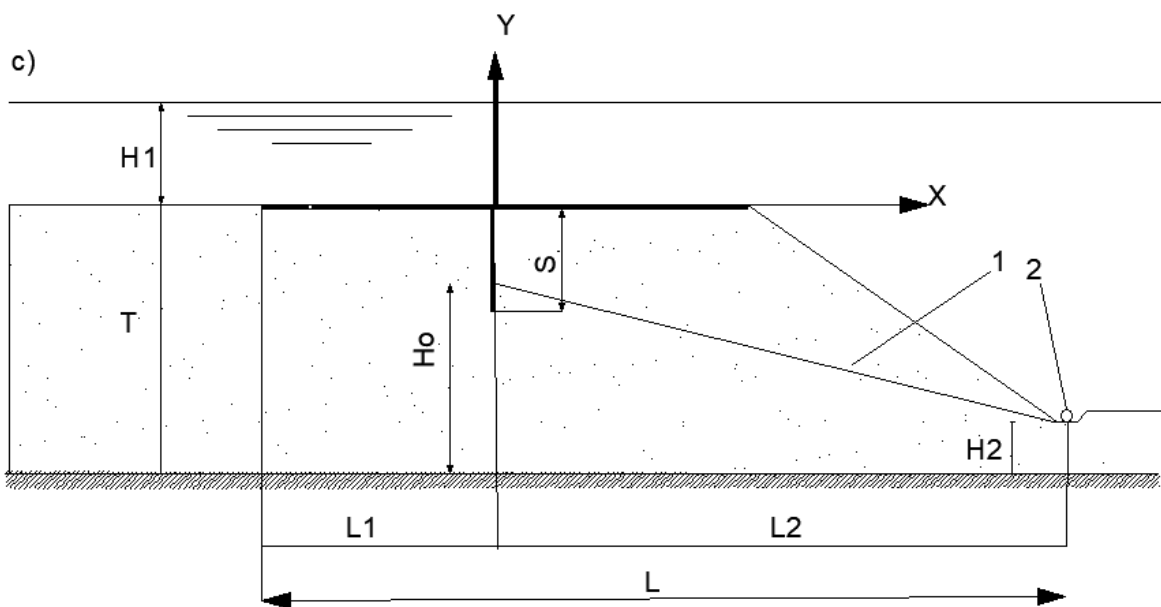
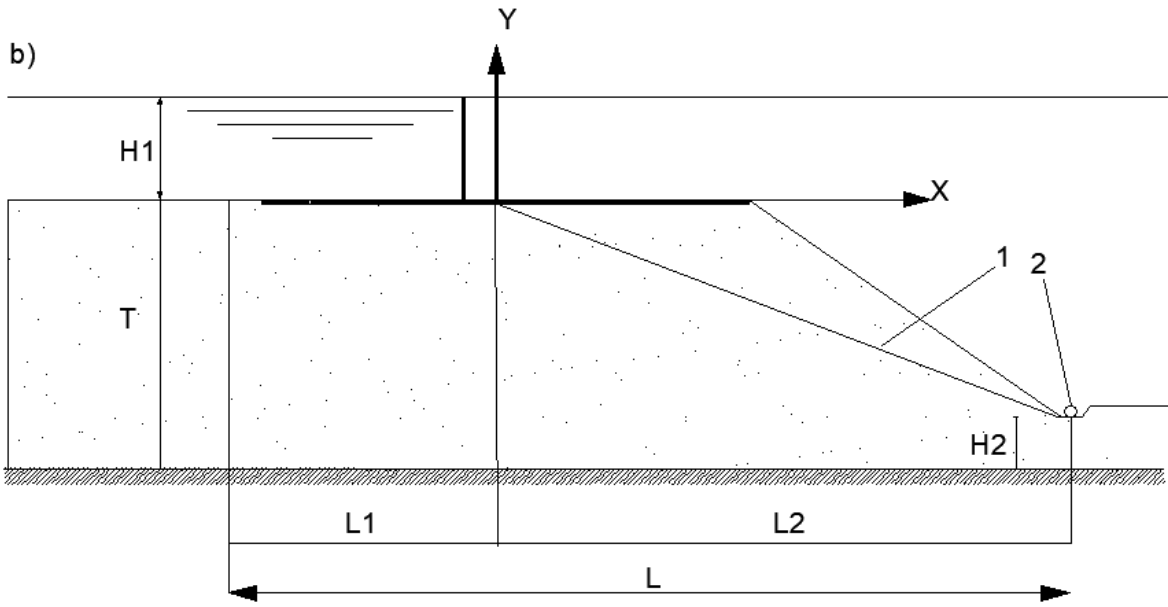
La filtración semi- confinada tiene lugar, generalmente, cuando la base de la estructura se ubica en una cota superior a la cota del nivel de agua aguas abajo. A este tipo de construcciones pertenecen, por ejemplo, las rápidas, rápidas escalonadas, tanques de presión de las centrales hidroeléctricas. (Torres Nicolàs,2010)

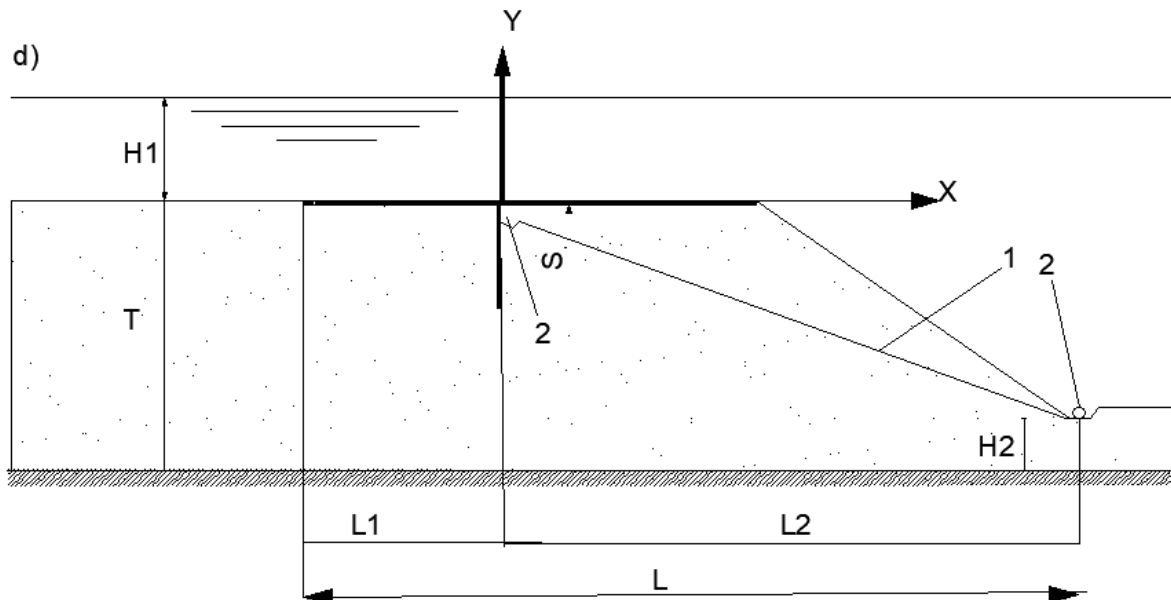
##### 6.1.2 Contorno subterráneo en caso de ausencia de la capa impermeable (figura 27, a)

#### Figura 27.

*Esquemas de análisis de la filtración semiconfinada bajo las estructuras hidráulicas.*







Nota: se muestra la línea piezométrica (1) y a drenaje (2). Elaborado por: Autora

La longitud de la parte del contorno en contacto con el agua:

$$l_1 = 0,44H_1 + \frac{l - 0,733(H - H_1)\log(1 + H/H_1) + 0,733(H - H_1)\log(H/H_1 - 1)}{(H/H_1)^2} \quad (35)$$

Ecuación de la línea piezométrica:

$$\frac{x}{H_1} = \left(\frac{l_1}{H_1} - 0,44\right) \left(1 + \frac{y}{H_1}\right)^2 + 0,733 \left(2 + \frac{y}{H_1}\right) \log \left(2 + \frac{y}{H_1}\right) - \quad (36)$$

$$-0,733 \frac{y}{H_1} \log \frac{y}{H_1}, \quad \text{para } 0 \leq y \leq H - H_1$$

El caudal de filtración a través del fondo del cauce aguas arriba se determina con la siguiente Ecuación 37:

$$\frac{x}{H_1} = -\left(\frac{l_1}{H_1} - 0,44\right) \left(\frac{Q}{K_f H_1}\right)^2 + \frac{2}{\pi} \frac{Q}{K_f H_1} \arctan \frac{Q}{K_f H_1} - 0,733 \log \left[1 + \left(\frac{Q}{K_f H_1}\right)^2\right] \quad (37)$$

Adoptando en la ecuación valores de \$Q\$ o de \$\frac{Q}{K\_f}\$ se determinan las abscisas de los puntos del fondo aguas arriba, correspondientes al caudal dado.

### 6.1.3 Contorno subterráneo en caso de presencia del nivel impermeable (figura 27, b)

La longitud  $l_1$  de la parte del contorno en contacto con el agua:

$$\left((l - l_1)\right) \frac{K'}{K} = \frac{T^2 - H_2^2}{2H_1} \quad (38)$$

Dónde  $\frac{K'}{K}$  – relación de los integrales elípticos completos de primer grado, para un módulo básico:

$$\lambda = th \left( \frac{\pi l_1}{2 T} \right) \quad (39)$$

La ecuación 38 se resuelve por aproximaciones.

El caudal de filtración en bajo la línea del contorno:

$$Q = K_f \frac{T^2 - H_2^2}{2} \quad (40)$$

La ecuación de la línea piezométrica:

$$x = \frac{T^2 - y^2}{2Q/K_f} \quad \text{Para } H_2 \leq y \leq T \quad (41)$$

### 6.1.4 Contorno subterráneo con tablestaca en caso de presencia del nivel impermeable (figura 27, c).

La profundidad del flujo de filtración en la pared inferior de la tablestaca:

$$H_o = \sqrt{H_2^2 2l_2(H_1 + T) K'/K + \left(l_2 K'/K\right)^2} - l_2 K'/K \quad (42)$$

$$\text{para } \lambda = \cos \left( \frac{\pi S}{2 T} \right) * \sqrt{th^2 \left( \frac{\pi l_1}{2 T} \right) + tg^2 \left( \frac{\pi S}{2 T} \right)}$$

El caudal de filtración en el suelo de cimentación de la estructura:

$$Q = K_f \frac{H_o^2 - H_2^2}{2l_2} \quad (43)$$

La ecuación de la línea piezométrica:

$$x = \frac{H_0^2 - y^2}{2Q/K_f} \quad (44)$$

**6.1.5 Contorno subterráneo con tablestaca y drenaje en presencia de nivel impermeable (figura 25, d)**

El caudal total de filtración en el suelo de cimentación de la estructura:

$$Q = \frac{K_f H_1 K'}{K} \quad (45)$$

$$\text{para } \lambda = \cos\left(\frac{\pi l_1}{2 T}\right) * \sqrt{th^2\left(\frac{\pi l_1}{2 T}\right) + tg^2\left(\frac{\pi S}{2 T}\right)}$$

El caudal de agua que ingresa al drenaje:

$$Q_D = Q - K_f \frac{T^2 - H_2^2}{2l_2} \quad (46)$$

En caso de  $Q_D=0$  el análisis lleva al caso del esquema de contorno con tablestaca sin drenaje (figura 1, c).

La ecuación de la línea piezométrica:

$$x = \frac{T^2 - y^2}{2Q/K_f} \quad (47)$$

**6.1.6 Filtración periférica con superficie libre en los tramos de enlace de las estructuras hidráulicas con las laderas, considerando el efecto del flujo de filtración lateral (V.P Nedriga \*\*)**

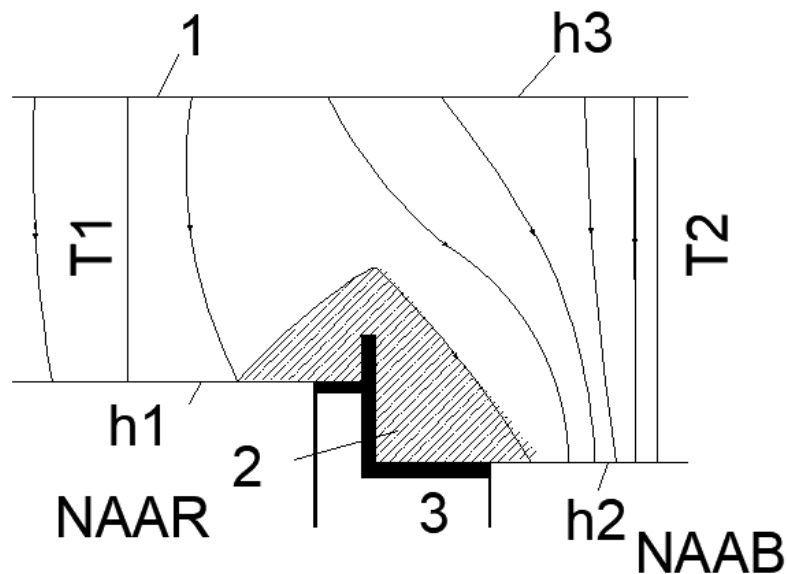
**6.1.6.1 Esquema del flujo de filtración.**

El tramo de enlace de la presa con una ladera, el carácter del flujo de filtración está determinado por la interacción de dos flujos: el flujo de filtración natural del agua bajo nivel freático en la ladera y el flujo del agua que se desplaza desde el tramo aguas arriba de la presa hacia el tramo aguas abajo. Dentro del cuadro general de filtración ejercen influencia los

siguientes factores: las profundidades del agua aguas arriba y aguas abajo,  $h_1$  y  $h_2$ , la profundidad del agua en el tramo alimentador periférico  $h_3$ , la posición del contorno alimentador  $T_1$  y  $T_2$ , las dimensiones y la forma del muro de enlace (figura 2). (Torres Nicolas,2010)

**Figura 28.**

*Esquema de filtración periférica: 1- contorno alimentador; 2- zona de filtración periférica; 3- presa de hormigón.*



*Elaborado por: Autora*

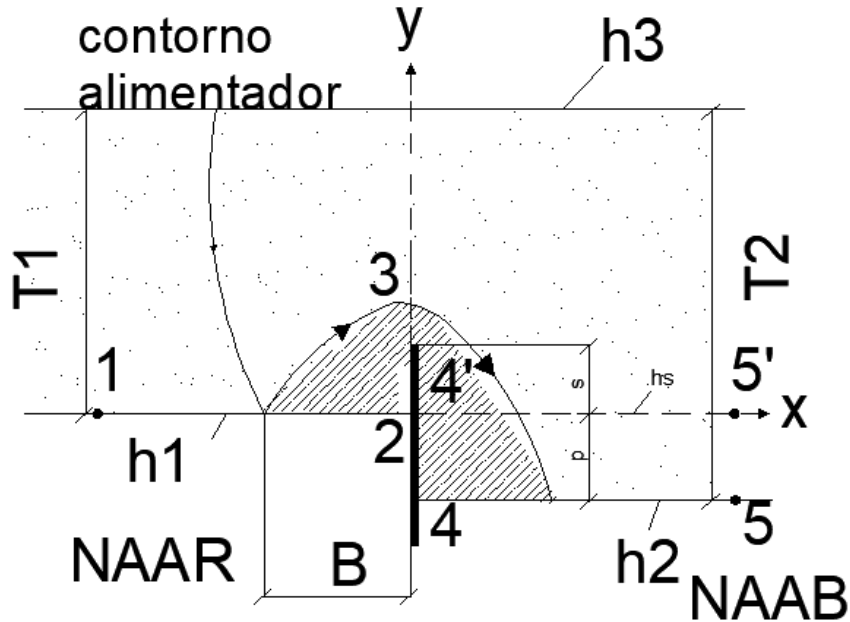
Los métodos de análisis de la filtración en suelos homogéneos en el caso de presencia de nivel impermeable horizontal se formulan a continuación. Condicionalmente se asumen como verticales las laderas aguas arriba y aguas abajo.

La profundidad de alimentación freática  $h_3$  a la distancia  $T_1$  desde el embalse es determinada a través de la construcción de la curva de remanso del flujo subterráneo, desde el embalse, y en el análisis se asume igual a la profundidad del agua en el tramo de inflexión de la curva de remanso, donde la diferencia de cotas entre los niveles del remanso y natural no supera la amplitud de la variación estacional de los niveles del flujo.

### 6.1.6.2 Diafragma impermeable independiente.

Figura 29.

Esquema para el análisis de la filtración periférica con presencia de un diafragma impermeable independiente.



Elaborado por: Autora

La profundidad de flujo a lo largo de la línea 4'-5':

$$h_s = \sqrt{(h_3^2 - h_2^2) \rho / T_2 + h_2^2} \quad (48)$$

Profundidad de flujo a lo largo del contorno del diafragma:

$$h = \sqrt{\pm (h_1^2 - h_s^2) \beta_1 + \frac{2h_3^2 - h_1^2 - h_s^2}{2} \frac{y}{T_1} + \frac{h_1^2 + h_s^2}{2}} \quad (49)$$

Dónde,  $h_1$  y  $h_s$ - profundidades del flujo aguas arriba de la estructura y en el límite de cálculo 4' - 5';  $\beta_1$ - variable (ver tabla siguiente);  $h_3$ - profundidad del flujo subterráneo en la zona de ladera a la distancia  $T_1$  desde el corte marginal del embalse;  $y$ - ordenada considerada.



**Tabla 23.***Determinación de la función  $\beta_1$* 

$y/s$	Valores de $\beta_1$ para los siguientes valores de $S/T_1$					
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,1	0,469	0,468	0,467	0,467	0,465	0,464
0,2	0,436	0,435	0,435	0,434	0,432	0,429
0,3	0,404	0,403	0,402	0,399	0,397	0,393
0,4	0,369	0,368	0,367	0,364	0,342	0,356
0,5	0,334	0,333	0,331	0,328	0,324	0,318
0,6	0,295	0,294	0,292	0,289	0,284	0,278
0,7	0,253	0,252	0,25	0,247	0,242	0,235
0,8	0,205	0,204	0,202	0,199	0,194	0,187
0,9	0,144	0,14	0,141	0,139	0,135	0,129
1	0	0	0	0	0	0

*Fuente: Torres.N. Filtraciones (2010).*

El signo positivo antes del primer sumando de la expresión bajo radical, en la ecuación (48), se toma para el lado expuesto hacia aguas arriba, en tanto que el signo negativo para el lado expuesto hacia aguas abajo.

El caudal de filtración total para los niveles de agua, aguas arriba y aguas abajo:

$$Q = K_f \left[ \pm(h_1^2 - h_s^2)\beta_2 + \frac{2h_3^2 - h_1^2 - h_s^2}{4} \right] \frac{x}{T_1} \quad (50)$$

Dónde,  $\beta_2$  depende de las relaciones  $\frac{S}{T_1}$  y  $\frac{x}{T_1}$  (Ver tabla siguiente).

**Tabla 24.**

*Determinación de la función  $\beta_2$*

$\pm \frac{x}{T_1}$	Valores de $\beta_2$ para los siguientes valores de $S/T_1$							
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,231	0,141	0,1	0,0178	0,064	0,055	0,042	0,035
0,2	0,336	0,232	0,173	0,144	0,12	0,102	0,083	0,07
0,4	458	0,344	0,283	0,241	0,213	0,188	0,156	0,135
0,6	0,529	0,42	0,357	0,314	0,282	0,256	0,219	0,194
0,8	0,592	0,482	0,419	0,375	0,34	0,315	0,276	0,249
1	0,648	0,539	0,475	0,43	0,395	0,37	0,33	0,301
1,2	0,701	0,592	0,527	0,484	0,45	0,422	0,382	0,353
1,6	0,803	0,693	0,629	0,585	0,55	0,523	0,483	0,453
2	0,905	0,795	0,73	0,687	0,654	0,625	0,585	0,556

*Fuente: Torres.N. Filtraciones (2010).*

El signo positivo antes del primer sumando en el miembro derecho de la ecuación (49) se toma para el tramo aguas abajo, en tanto que el signo negativo para el tramo aguas arriba.

El caudal unitario, para los niveles del agua, aguas arriba y aguas abajo:

$$q = \frac{K_f(h_1^2 - h_S^2)}{4T_1} * \left[ \pm \frac{ch \frac{\pi x}{2T_1}}{\sqrt{ch^2 \frac{\pi x}{2T_1} - \cos^2 \frac{\pi S}{2T_1}}} - D \right] \quad (51)$$

$$\text{Dónde, } D = \frac{2h_3^2 - h_1^2 - h_S^2}{h_1^2 - h_S^2} \quad (52)$$

El signo positivo antes del primer sumando del miembro derecho de la Ecuación (50) se asume para aguas arriba, en tanto que el signo negativo, para aguas abajo.

El frente de la zona de filtración desde el embalse (Figura 27)

$$B = \frac{2T_1}{\pi} ach \frac{D \cos \frac{\pi S}{2T_1}}{\sqrt{D^2 - 1}} \quad (53)$$

La longitud mínima del diafragma, con la cual no se presenta filtración periférica desde el embalse (para  $D > 1$ ):

$$S_{min} = \frac{2T_1}{\pi} a \cos \sqrt{\frac{D^2 - 1}{D^2}} \quad (54)$$

### 6.1.6.3 Muro de enlace con un diafragma impermeable arbitrariamente ubicado

(figura 28)

Este esquema corresponde al caso de enlace con la ladera de una presa, tanto de hormigón como de tierra con diafragma, núcleo o pantalla.

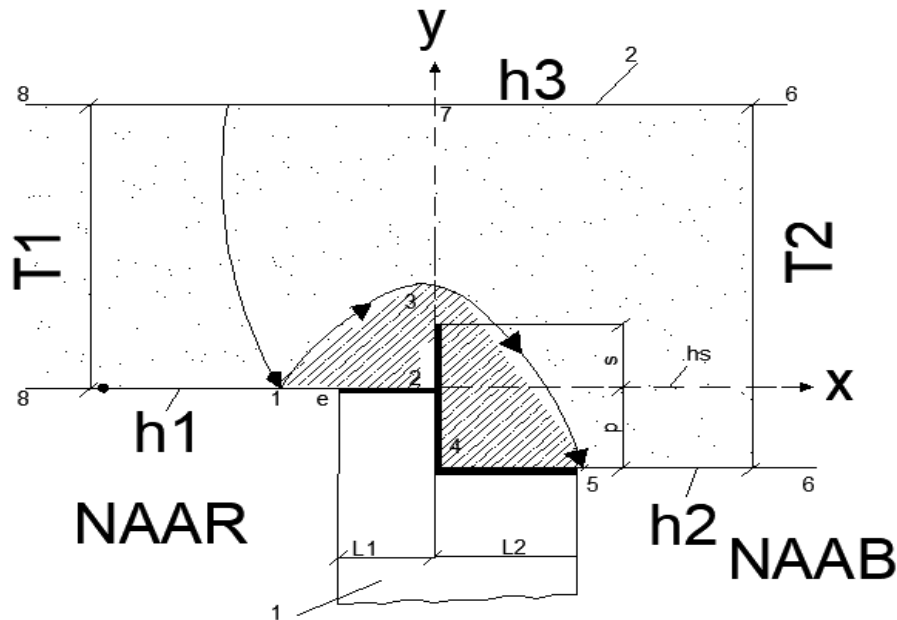
Es útil introducir la siguiente simbología:

$$A_1 = \frac{h_3^2 - h_1^2}{2\pi}; \quad A_2 = \frac{h_3^2 - h_2^2}{2\pi} \quad (55)$$

$$\omega_1 = \frac{2}{n} - 1; \quad \omega_2 = \frac{2}{n} + 1 \quad (56)$$

**Figura 30.**

*Esquema para el análisis de la filtración periférica, en caso de configuración compleja del muro de enlace. 1- presa; 2- contorno alimentador.*



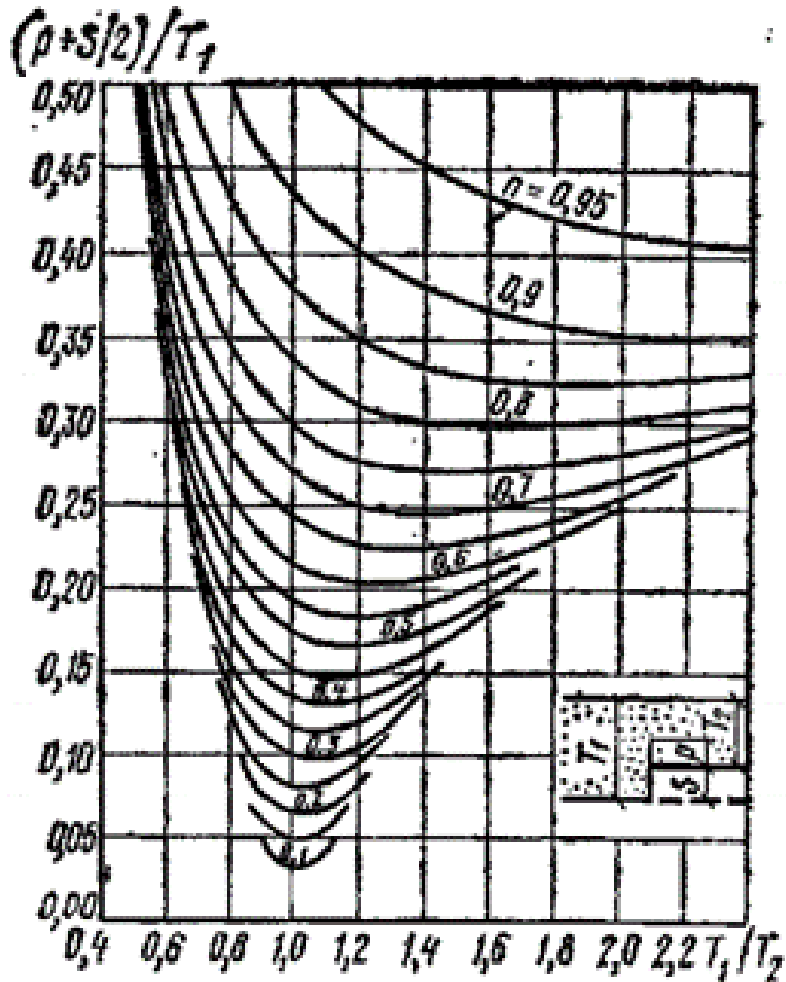
*Elaborado por: Autora*

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{\lambda - \delta - 2\lambda\delta}{\lambda + \delta}; & \alpha_2 &= \frac{2 + \lambda - \delta}{\lambda + \delta} \\ \alpha_3 &= \frac{\delta - \lambda - 2\lambda\delta}{\lambda + \delta}; & \alpha_4 &= \frac{2 + \delta - \lambda}{\lambda + \delta} \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

Dónde,  $n, \lambda, \delta$ - constantes que, en primera instancia, pueden ser determinadas con ayuda de los gráficos de las Figuras (29-31) o, con exactitud, a través de las siguientes ecuaciones, por iteraciones.

**Figura 31.**

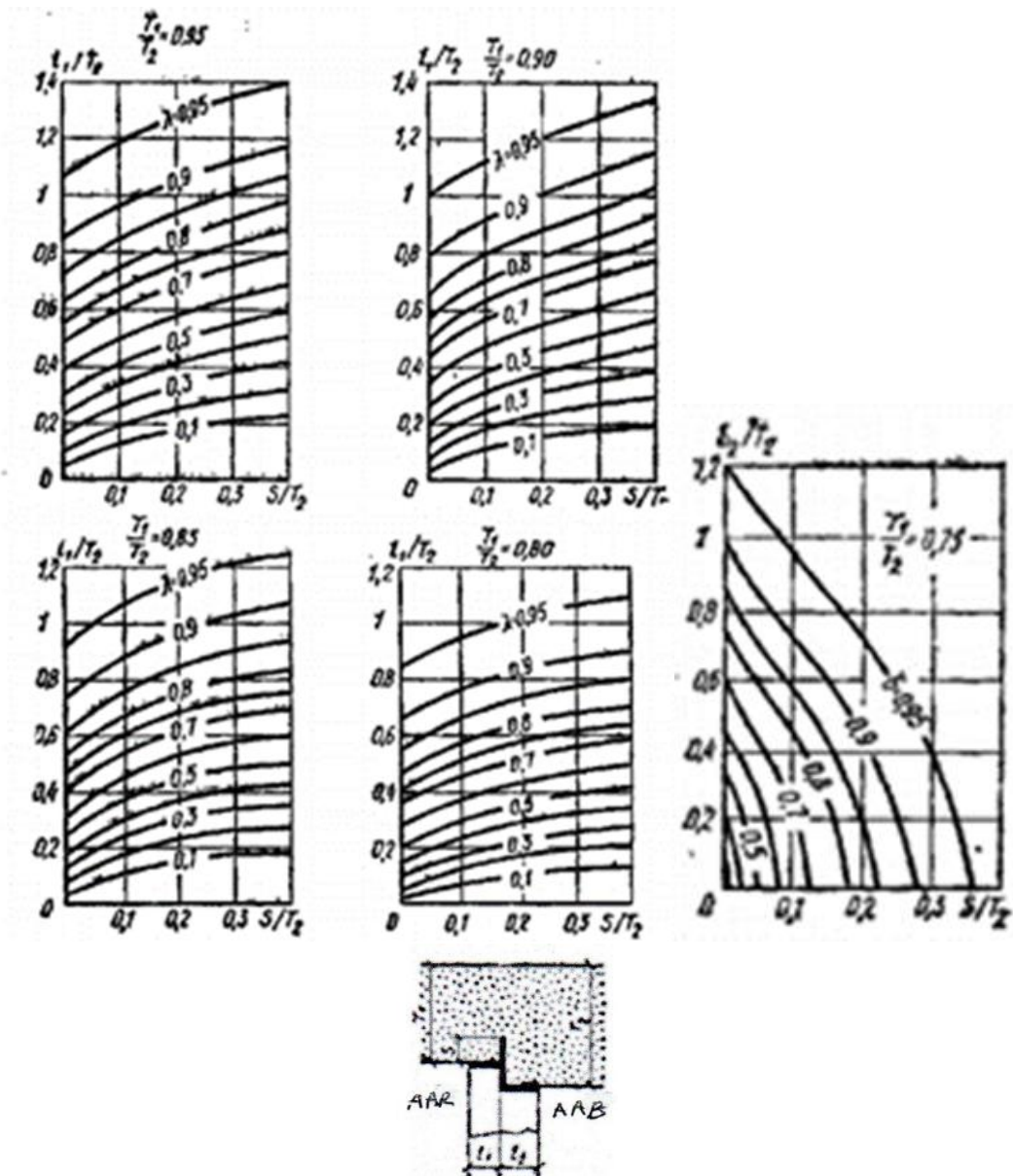
función  $n=f[T_1/T_2, ((p+S/2))/T_1]$



Fuente: Zhernov.E. Modelación de los procesos de filtración (1980)

Figura 32.

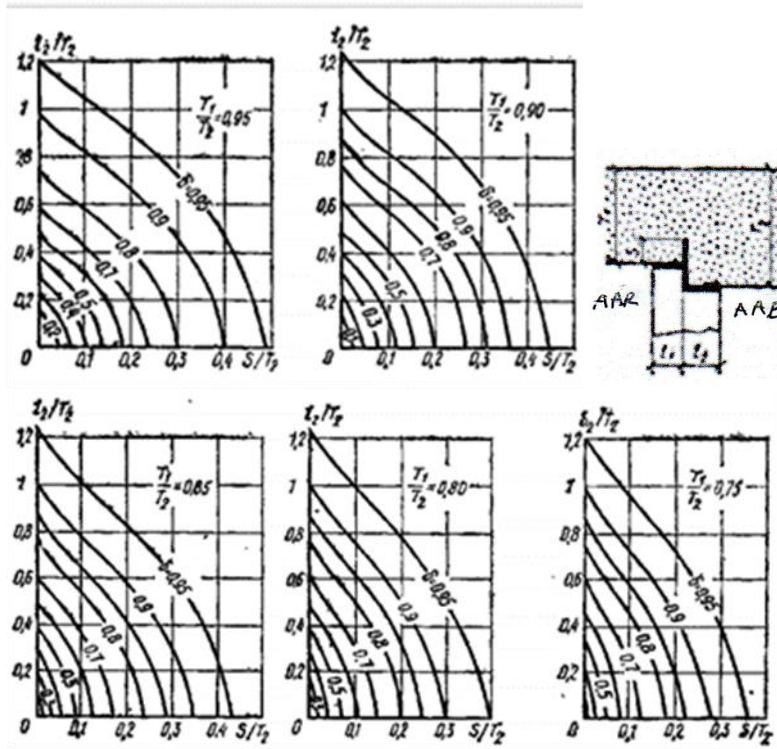
función  $\lambda=(l_1/T_2, S/T_2)$



Fuente: Zhernov.E.Modelación de los procesos de filtración (1980)

**Figura 33.**

función  $\delta=f(l_2/T_2, S/T_2)$



Fuente: Zhernov.E. Modelación de los procesos de filtración (1980)

$$m = \frac{\frac{T_1}{T_2} \sqrt{\frac{1-n}{1+n}}}{\frac{T_1}{T_2} + \sqrt{\frac{1-n}{1+n}}} \quad (58)$$

$$S \pm \frac{p}{2} = -\frac{T_2}{\pi} \operatorname{aseno} \frac{2m-n-mn}{(1-m)n} - \frac{T_1}{\pi} \operatorname{aseno} \frac{n-2m-mn}{(1+m)n} \quad (59)$$

Dónde, antes del segundo sumando del miembro izquierdo de la Ecuación (58) corresponde el signo positivo a la condición  $T_1 < T_2$  y el signo negativo a  $T_1 > T_2$ .

$$l_1 = \frac{T_2}{\pi} \operatorname{ach} \frac{1-\omega_1\lambda}{1-\lambda} - \frac{T_1}{\pi} \operatorname{ach} \frac{1-\omega_2\lambda}{1+\lambda} \quad (60)$$

$$l_2 = \frac{T_2}{\pi} \operatorname{ach} \frac{\omega_1\delta-1}{1-\delta} - \frac{T_1}{\pi} \operatorname{ach} \frac{\omega_2\delta-1}{1+\delta} \quad (61)$$

En las últimas ecuaciones  $\lambda$  y  $\delta$  están dadas dentro de los límites  $-1 < \lambda < 0$  y  $0 < \delta < +1$ .

La profundidad del flujo de filtración a lo largo del contorno mojado del muro  
contorno 1-2-3-4-5 en la Figura 28:

$$h = \sqrt{\frac{h_1^2 + h_2^2}{2} - 2A_2 a \operatorname{seno} \frac{-\alpha_1 - \alpha_2 \xi}{1 - \xi} + 2A_1 a \operatorname{seno} \frac{\alpha_4 \xi - \alpha_3}{1 + \xi}}, \quad (62)$$

para  $\lambda \leq \delta \leq 0$  y  $0 \leq \xi \leq \delta$

El caudal total de filtración:

a) En la línea de borde del nivel de agua aguas arriba (límite 1-8 en la figura 28):

$$Q = K_f A_2 a c h \frac{-\alpha_1 - \alpha_2 \xi}{1 - \xi} - K_f A_1 a c h \frac{\alpha_3 - \alpha_4 \xi}{1 + \xi}, \quad (63)$$

para  $-1 \leq \xi \leq \lambda$ ;

En la línea de borde del nivel de agua aguas abajo (límite 5-6):

$$Q = K_f A_2 a c h \frac{\alpha_1 + \alpha_2 \xi}{1 - \xi} - K_f A_1 a c h \frac{\alpha_3 \xi - \alpha_4}{1 + \xi};$$

para  $\lambda \leq \xi \leq +1$

b) En la línea del contorno alimentador (límite 6-7-8)

$$Q = K_f A_1 a c h \frac{-\alpha_1 - \alpha_2 \xi}{1 - \xi} - K_f A_1 a c h \frac{\alpha_4 \xi - \alpha_3}{1 + \xi}, \quad (64)$$

para  $-\infty \leq \xi \leq -1$  y  $+1 \leq \xi \leq \infty$

El caudal unitario de filtración en las líneas de borde del nivel de agua aguas arriba y  
aguas abajo (límite 1-8 y 5-6 en la Figura 28):

$$q = \frac{K_f M}{2} \sqrt{\frac{\xi^2 - n\xi}{(\xi - \delta)(\xi + \lambda)}} * \frac{(h_3^2 - h_2^2)(1 + \xi)P - (h_3^2 - h_1^2)(1 - \xi)}{T_2(1 + \xi) + T_1(1 - \xi)N} \quad (65)$$

Para  $-1 \leq \xi \leq \lambda$  para el límite 1-8 y  $\delta \leq \xi \leq +1$ , para el límite 5-6.

Dónde,

$$M = \sqrt{\frac{(1 - \lambda)(1 - \delta)}{1 - n}}$$

$$P = \sqrt{\frac{(1 - \lambda)(1 - \delta)}{(1 + \delta)(1 - \lambda)}} \quad (67)$$

$$N = \sqrt{\frac{1+n}{1-n}}$$

Ordenadas y abscisas de los puntos en los límites principales del campo:

a) En el contorno mojado del diafragma (contorno 2-3-4):

$$y = \frac{T_2}{\pi} \operatorname{aseno} \frac{1-\omega_1\xi}{1-\xi} - \frac{T_1}{\pi} \operatorname{aseno} \frac{1-\omega_2\xi}{1+\xi} \pm \frac{p}{2}; \quad (68)$$

para  $0 \leq \xi \leq n$

Antes del tercer sumando del miembro derecho se adopta el signo positivo

cuando  $T_1 > T_2$ , en tanto que el signo negativo cuando  $T_1 < T_2$ ;

b) En el contorno del muro desde aguas arriba (contorno 1-2) y en la línea del contorno del agua en el embalse (línea 1-8):

$$x = \frac{T_2}{\pi} \operatorname{ach} \frac{1-\omega_1\xi}{1-\xi} - \frac{T_1}{\pi} \operatorname{ach} \frac{1-\omega_2\xi}{1+\xi}, \quad (69)$$

cuando  $\lambda \leq \xi \leq 0$  para el contorno 1-2 y  $-1 \leq \xi \leq \lambda$  para el límite 1-8.

c) En el contorno del muro aguas abajo (contorno 4-5) y en la línea de corte del agua aguas abajo (límite 5-6)

$$x = \frac{T_2}{\pi} \operatorname{ach} \frac{\omega_1\xi-1}{1-\xi} - \frac{T_1}{\pi} \operatorname{ach} \frac{\omega_2\xi-1}{1+\xi}, \quad (70)$$

para  $n \leq \xi \leq \delta$ , para el contorno 4-5 y  $\delta \leq \xi \leq +1$  para el límite 5-6.

d) En el contorno alimentador (límite 6-7-8):

$$x = \frac{T_2}{\pi} \operatorname{ach} \frac{1-\omega_1\xi}{1-\xi} - \frac{T_1}{\pi} \operatorname{ach} \frac{\omega_2\xi-1}{1+\xi}; \quad (71)$$

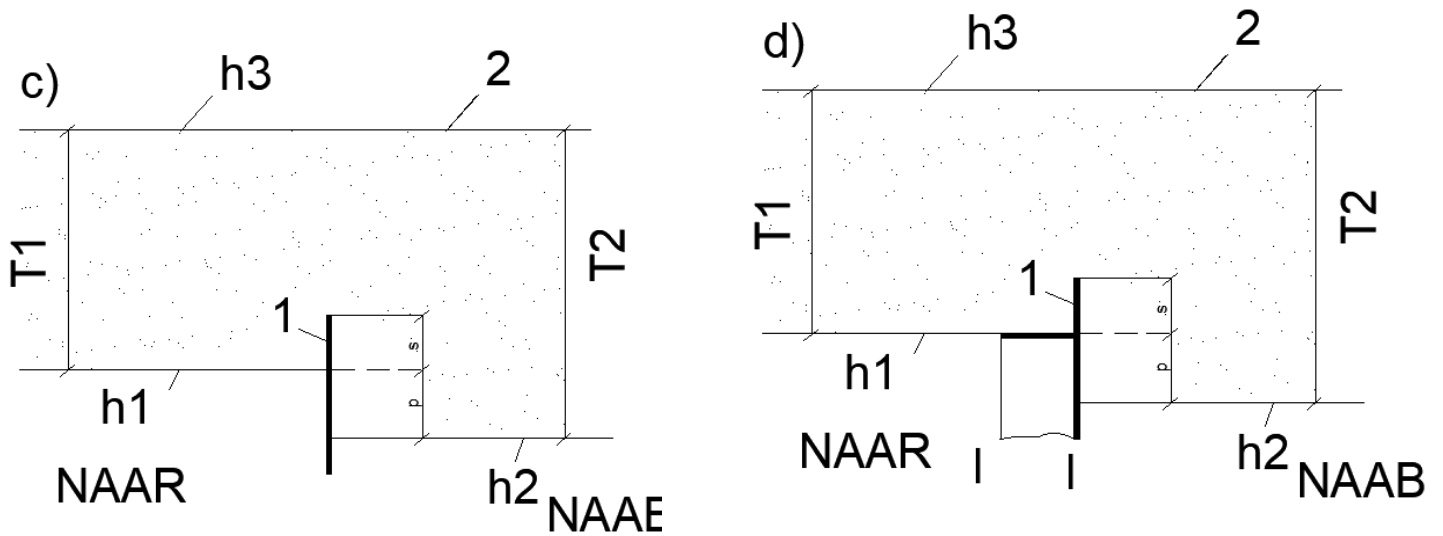
para  $-\infty \leq \xi \leq -1$  y  $+1 \leq \xi \leq +\infty$

e) Abscisa del punto divisorio “e” del flujo de filtración en el límite 1-8:

$$x_e = \frac{T_2}{\pi} \operatorname{ach} \frac{1-\omega_1\gamma}{1-\gamma} - \frac{T_1}{\pi} \operatorname{ach} \frac{1-\omega_2\gamma}{1+\gamma} \quad (72)$$







*Elaborado por: Autora*

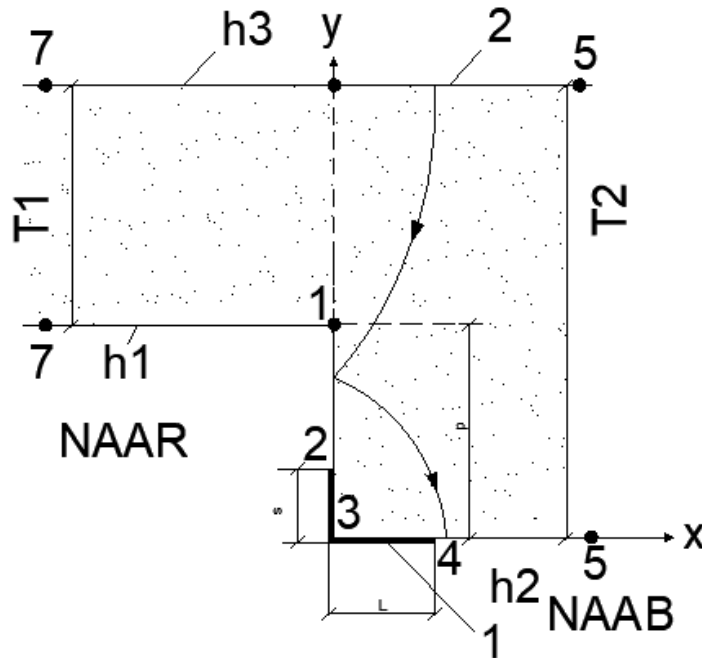
De alguna manera se simplifica también la determinación de las constantes  $\lambda$  y  $\delta$ . En el esquema b), el valor  $\lambda=0$ ; en el esquema c) los valores  $\lambda = 0$ ,  $\delta = n$ ; en el esquema d),  $\delta = n$ .

#### **6.1.6.4 Muro de enlace con un diafragma impermeable aguas arriba, en el caso de línea quebrada del nivel de agua en el embalse**

Este esquema corresponde al caso del enlace de una presa de tierra con una margen del sitio de presa. Las constantes  $A_1, A_2, \omega_1, \omega_2, \alpha_1- \alpha_4$  se determinan con las Ecuaciones (67)-(69), introduciendo en ellas los valores  $n, \delta, \lambda$  obtenidos con las siguientes Ecuaciones:

**Figura 35.**

*Análisis de la filtración perimetral en el caso de un muro con diafragma. 1-presa; 2-contorno alimentador.*



*Elaborado por: Autora*

$$n = -\frac{1-(T_1/T_2)^2}{1+(T_1/T_2)^2} \quad (76)$$

$$S = \frac{T_2}{\pi} \operatorname{aseno} \frac{\omega_1 \lambda - 1}{1 - \lambda} + \frac{T_1}{\pi} \operatorname{aseno} \frac{1 - \omega_2 \lambda}{1 + \lambda} + \frac{p}{2} \quad (77)$$

$$l = \frac{T_2}{\pi} \operatorname{ach} \frac{1 - \omega_1 \delta}{1 - \delta} - \frac{T_1}{\pi} \operatorname{ach} \frac{1 - \omega_2 \delta}{1 + \delta} \quad (78)$$

En las últimas ecuaciones las constantes  $\lambda$  y  $\delta$  se determinan por aproximaciones asumiendo sus valores dentro de los límites  $n < \lambda < 0$  y  $0 < \delta < +1$ . Estas magnitudes pueden ser también determinadas con ayuda de los gráficos de las figuras 10 y 11. (Zhernov.E,1980)

La profundidad de flujo a lo largo del contorno impermeable 2-3-4 (ver Figura 33) se obtiene con la Ecuación (71). El caudal total de filtración en el límite 2-1-7 se determina con la Ecuación (72), en el límite 4-5 con la Ecuación (73) y en el límite 5-6-7 con la Ecuación (74).

El caudal unitario de filtración, en la línea de corte del nivel de agua aguas arriba y aguas abajo (límites 2-1-7 y 4-5):

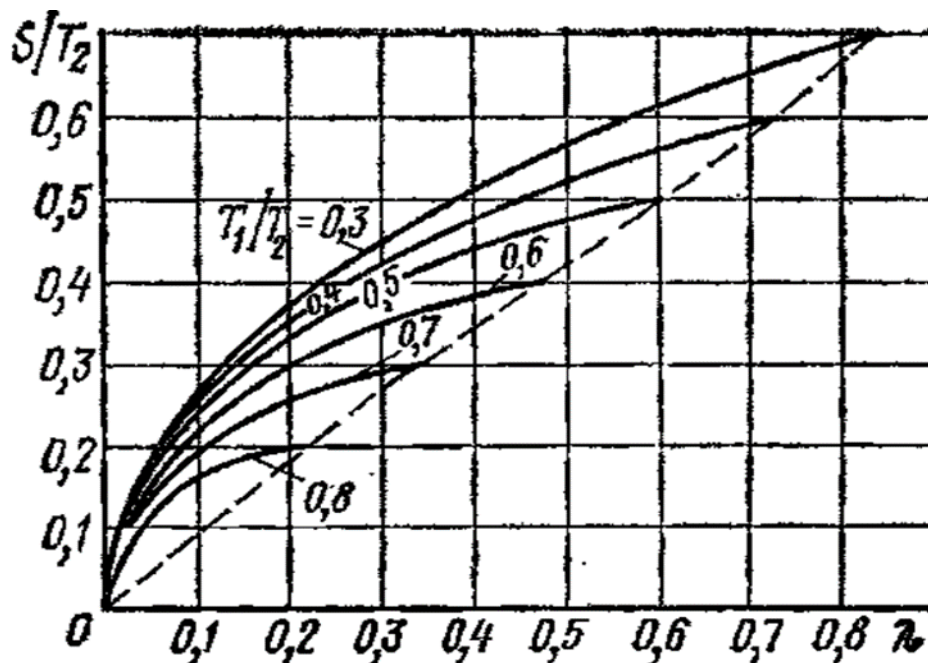
$$q = -\frac{K_f M}{2} \sqrt{\frac{\xi^2 - n\xi}{(\delta - \xi)(\lambda + \xi)}} \frac{(h_3^2 - h_2^2)(1 + \xi)P - (h_3^2 - h_1^2)(1 - \xi)}{T_2(1 + \xi) \pm T_1(1 - \xi)N} \quad (79)$$

Cuando  $n \leq \xi \leq \lambda$  para el límite 2-1;  $-1 \leq \xi \leq n$  para el límite 1-7; y,  $\delta \leq \xi \leq 1$  para el límite 4-5.

Antes del segundo sumando del denominador se toma el signo negativo para el límite 1-2 y el signo positivo para los límites 1-7 y 4-5;  $M$ ,  $P$  y  $N$  se determinan con la Ecuación (66).

**Figura 36.**

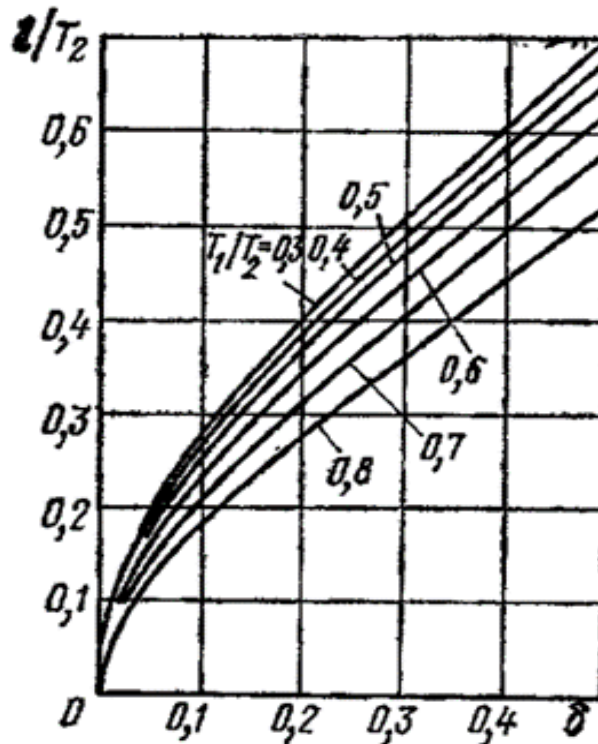
*función  $\lambda = f(T_1/T_2, S/T_2)$*



Fuente: Zhernov.E. Modelación de los procesos de filtración (1980)

**Figura 37.**

Gráfico de la función  $\delta=(T_1/T_2 ; \omega T_2)$



Fuente: Modelación de los procesos de filtración (1980)

Las abscisas y ordenadas en los puntos de los límites principales del campo:

a) En el contorno del diafragma y en la línea de corte del nivel de agua en el embalse

(límite 1-2-3):

$$y = \frac{T_2}{\pi} \operatorname{aseno} \frac{\omega_1 \xi - 1}{1 - \xi} + \frac{T}{\pi} \operatorname{aseno} \frac{1 - \omega_2 \xi}{1 + \xi} + \frac{p}{2} \quad (80)$$

Para  $n \leq \xi \leq 0$

b) En la línea e corte del nivel de agua en el embalse, en el límite 1-7:

$$x = \frac{T_3}{\pi} \operatorname{ach} \frac{\omega_1 \xi - 1}{1 - \xi} - \frac{T_1}{\pi} \operatorname{ach} \frac{\omega_2 \xi - 1}{1 + \xi}$$

Para  $-1 \leq \xi \leq n$

En el contorno del muro y en la línea de corte del nivel de agua aguas abajo (límite 3-

4-5):

$$x = \frac{T_2}{\pi} ach \frac{1-\omega_1\xi}{1-\xi} - \frac{T_1}{\pi} ach \frac{1-\omega_2}{1+\xi} \quad (81)$$

Para  $0 \leq \xi \leq +1$

c) En el contorno alimentador (límite 5-6-7)

$$x = \frac{T_2}{\pi} ach \frac{\omega_1\xi-1}{1-\xi} - \frac{T_1}{\pi} ach \frac{1-\omega_2\xi}{1+\xi} \quad (82)$$

Para  $\infty \leq \xi \leq -1$  y  $+1 \leq \xi \leq +\infty$

El punto divisorio  $e$  del flujo de filtración, en la línea de corte del nivel de agua aguas arriba, puede ubicarse sea en el límite 1-2 o en el límite 1-7 dependiendo del valor de  $\gamma$ , determinado con la ecuación:

$$\gamma = -\frac{(h_3^2-h_2^2)P-(h_3^2-h_1^2)}{(h_3^2-h_2^2)P+(h_3^2-h_1^2)} \quad (83)$$

Cuando  $\gamma > n$  el punto  $e$  se encuentra en el límite 1-2 y su ordenada se determina con la siguiente ecuación:

$$y_e = \frac{T_2}{\pi} aseno \frac{\omega_1\gamma-1}{1-\gamma} + \frac{T_1}{\pi} aseno \frac{1-\omega_2\gamma}{1+\gamma} + \frac{p}{2} \quad (84)$$

Cuando  $\gamma < n$  el punto  $e$  se encuentra en el límite 1-7 y su abscisa se determina con la siguiente ecuación:

$$x_e = \frac{T_2}{\pi} ach \frac{\omega_1\gamma-1}{1-\gamma} - \frac{T_1}{\pi} ach \frac{\omega_2\gamma-1}{1+\gamma} \quad (85)$$

La pérdida de agua por filtración en la periferia de la estructura se determina con la ecuación (62), asumiendo  $\xi = \gamma$ .

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1. CONCLUSIONES

- En la elaboración del proyecto se logró obtener el algoritmo de cálculo para los diferentes métodos para el análisis del contorno subterráneo en presas de hormigón cimentadas en suelo, este algoritmo se logró desarrollar en varios módulos para el caso del método de los coeficientes respetando cada paso para la obtención de cada componente que intervenía en las variables. Para los algoritmos de los demás métodos se desarrolló en base a un solo módulo debido a su rápido procedimiento.
- El análisis realizado se hizo para un rango proporcional a la altura de la presa que es de 5m-20m, los elementos del contorno subterráneo fueron determinados en función de la altura de la presa como de la base de la presa. El coeficiente de fricción usado en este análisis es de 0,20.
- Mientras menor sea el valor de la subpresión menor riesgo de inestabilidad va a tener la presa de hormigón sin embargo a pesar de que el método de coeficientes no es el de menor cálculo al desarrollarlo este involucra en el análisis de la variable todos los aspectos de entrada y salida correspondientes a los giros.
- Los esquemas establecidos proporcionan gran información para escoger el más adecuado y seguro y su vez económico debido a su forma de reaccionar a la presencia de filtración.
- Usando el método de los coeficientes se debe tener en cuenta que actúa bajo la determinación del espesor capa activa y el espesor de la capa real para poder determinar los coeficientes para la obtención de cada variable.

- El tipo de esquema en el que se trabaja también es imprescindible para el cálculo, identificar si es profundo, muy profundo, ensanchado o intermedio influye en las variables de filtración.
- Los elementos del contorno subterráneo como la tablaestaca influyen para amortiguar el flujo de filtración disminuyéndolo drásticamente. Sin embargo, se debe establecer la posición adecuando a lo largo del contorno subterráneo, la tablaestaca puesta aguas abajo contribuye sustancialmente con la disminución de la subpresión, pero a su vez hace que aparezca una zona de presión bastante aumentada delante de la misma.
- En los elementos longitudinales que se encuentran rodeados por tablaestaca aguas arriba ya aguas abajo como es el esquema 5 planteado la distancia existente entre dichos elementos debe ser la suficiente para no obtener un coeficiente de resistencia negativo ya que esto vendrá anular el efecto del elemento longitudinal  $hL1$ .
- La presencia del escalón aguas abajo muestra que al desarrollar todos los métodos tendrá impacto significativo para el comportamiento de filtración ya que sin este se puede existir deformaciones representativas en el suelo por la presencia de la filtración y su a vez una gradiente máxima infinita.



## 7.2 RECOMENDACIONES

- La elección del esquema que se va a adoptar para el análisis de filtración en el contorno subterránea debe ser tomado con las precauciones debidas de estabilidad y deslizamiento, pero a su vez esto debe ir de la mano con la economía., siempre comparar de dos a tres alternativas.
- Es indispensable la colocación de un escalón agua abajo ya que con esto se puede evitar que la gradiente de salida del flujo de filtración tienda al infinito y si esto se diera dicha variable tiene alta capacidad destructiva.
- El método más recomendable en la actualidad es el de los coeficientes de resistencia por su desarrollo y el menos conservador lo que significa que le da menos amplitud en el margen de error en los resultados obtenidos.
- Las dimensiones de los elementos verticales deben ser los más óptimos sin salirse de la parte lógica los mismos que deben ser los suficientes para poder aportar en los valores a obtener de las variables que influyen en el análisis de filtración.

## BIBLIOGRAFÍA

Dr. Raúl Flores Berrones “FLUJO A TRAVÉS DE SUELOS” México, 4ta edición, asociación Mexicano de Hidráulica, (2000).

E. Zhernov, i.n. Pavlovetz “MODELACIÓN DE LOS PROCESOS DE FILTRACIÓN”. Edit. Escuela superior. Kiev.1980.

Ishenko Novocherkask. “INCREMENTO DE LA EFICIENCIA Y CONFIABILIDAD DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL DE LA FILTRACIONES HIDRAÚLICAS A.V”.2008.

Nizhny Novgorod. “BASES TEÒRICAS DE LOS ELEMENTOS HIDROMECÀNICOS E HIDRAÚLICOS PARA EL ANÀLISIS DE FILTRACIÒN “,(2011).

Nicolás Alejandro Torres. Universidad Nacional de Rosario,” FILTRACIONES”, octubre 2010.

Roanova N.N. “PRESAS DE GRAVEDAD DE HORMIGÓN NO ROCOSO. M”. Editorial de la RUDN., (1994.)

Volkov I.M., Kononenko P.F. y Fedichkin I.K. “ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS” Moscú: Kolos, 1968

## SITIOS WEB

Cálculo de flutbet de estructuras hidrotécnicas. I.V. Zavgorodnyaya, I.V. Ivanova, V.T. Ostrovsky. Krasnodar2013

[https://kubsau.ru/upload/iblock/2aa/2aa0b54c6ef248494aa535d6e717e153.pdf?fbclid=](https://kubsau.ru/upload/iblock/2aa/2aa0b54c6ef248494aa535d6e717e153.pdf?fbclid=IwAR2ohIR1sZKIjJTNY-dbWsI_E405wPAGOkyzwkm7Wj6Mmqoq8hCbhvvsrY0)

[IwAR2ohIR1sZKIjJTNY-dbWsI\\_E405wPAGOkyzwkm7Wj6Mmqoq8hCbhvvsrY0](https://kubsau.ru/upload/iblock/2aa/2aa0b54c6ef248494aa535d6e717e153.pdf?fbclid=IwAR2ohIR1sZKIjJTNY-dbWsI_E405wPAGOkyzwkm7Wj6Mmqoq8hCbhvvsrY0)

Estructuras Hidráulicas. Libro de texto. manual para montante. Ingeniería hidráulica especialista. Universidades. 2da ed., Revisada. y añadir. Parte II. Presas de aliviadero. - M.: Agropromizdat, 1985

<http://www.alobuild.ru/gidrotehicheskiye-sooruzheniya-vodoslivniye-plotini/filtracionniy-raschet.php>

Estructuras de retención de agua y eludir las. Publicado 15 de julio de 2013

[https://kubsau.ru/upload/iblock/2aa/2aa0b54c6ef248494aa535d6e717e153.pdf?fbclid=](https://kubsau.ru/upload/iblock/2aa/2aa0b54c6ef248494aa535d6e717e153.pdf?fbclid=IwAR2ohIR1sZKIjJTNY-dbWsI_E405wPAGOkyzwkm7Wj6Mmqoq8hCbhvvsrY0)

[IwAR2ohIR1sZKIjJTNY-dbWsI\\_E405wPAGOkyzwkm7Wj6Mmqoq8hCbhvvsrY0](https://kubsau.ru/upload/iblock/2aa/2aa0b54c6ef248494aa535d6e717e153.pdf?fbclid=IwAR2ohIR1sZKIjJTNY-dbWsI_E405wPAGOkyzwkm7Wj6Mmqoq8hCbhvvsrY0)

Y EN. Elfimov, D.E. Kumerov Instrucciones metódicas en el diseño del curso en el marco del programa "Estructuras hidráulicas".

<https://mydocx.ru/8-68825.html>

(<https://kubsau.ru/upload/iblock/2aa/2aa0b54c6ef248494aa535d6e717e153.pdf?fbclid=IwAR3WBPTcwdkRvy9KfDwHMMFCzBKCr10TbQJC lnD5Gag01cBzUD6rI1ZZuo>)

**ANEXOS**

**TABLA DE RESULTADOS**

- Para altura de presa  $H1=5\text{m}$ ;  $T_{\text{real}}=\text{infinito}$

Método de los coeficientes de resistencia

**Esquema 1**

**Tabla 24.**

*Determinación del tipo de contorno subterráneo para Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

$z(\text{m})$	2,5
$Lo(\text{m})$	24,50
$So(\text{m})$	9,0
$Lo/So$	2,72
CONTORNO SUBTERRÁNEO PROFUNDO	

**Tabla 25.**

*Determinación del espesor de cálculo  $T'_{\text{cal}}$  para Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de $T'_{\text{act}}$	
$T'_{\text{act}}(\text{m})$	19,45
Determinación de $T'_{\text{cal}}$	
$T'_{\text{cal}}(\text{m})$	19,45

**Tabla 26.**

*Determinación del espesor de cálculo  $T''_{\text{cal}}$  para Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de $T''_{\text{act}}$	
$T''_{\text{act}}(\text{m})$	38,90
Determinación de $T''_{\text{cal}}$	
$T''_{\text{cal}}(\text{m})$	38,90

**Tabla 27.**

*Determinación del espesor de cálculo  $T''''cal$  Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de $T''''act$	
$T''''act(m)$	MLD
Determinación $T''''cal$	
$T''''cal(m)$	fin

**Tabla 28.**

*Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la subpresión Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de los coeficientes de resistencia			
T1(entrada)		19,45	
T2(entrada)		15,45	
T1(salida)		17,45	
T2(salida)		14,45	
$\zeta_{entrada}=\zeta_{salida}$	0,44	$\zeta_{L1}$	0,03
$\zeta_{a1}$	0,21	$\zeta_{L2}$	1,25
$\zeta_{a2}$	0,06	$\zeta_{s1}$	0,55
$\zeta_{a3}$	0,17	$\zeta_{s2}$	0,59

**Tabla 29.**

*Determinación de las pérdidas de carga para elemento del contorno subterráneo Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de las pérdidas de carga (hj)			
$\Sigma\zeta_j$		3,739	
$h_{entrada}=h_{salid}$	0,29	$h_{L1}$	0,02
$h_{a1}$	0,14	$h_{L2}$	0,83
$h_{a2}$	0,04	$h_{s1}$	0,37
$h_{a3}$	0,11	$h_{s2}$	0,39
$\Sigma h$		2,50	

**Tabla 30.***Determinación de la subpresión Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de la supresión (W)	
Wexcedentes(KN/m)	241,18
Wsumersión(Kn/m)	1286,25
Wtotal(Kn/m)	1527,43

**Tabla 31.**

*Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la gradiente máxima de salida Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de Jmàxsalida			
T1(entrada)	38,90		
T2(entrada)	34,90		
T1(salida)	36,90		
T2(salida)	33,90		
$\zeta_{entrada}=\zeta_{salida}$	0,44	$\zeta_{L1}$	0,07
$\zeta_{esc1}$	0,10	$\zeta_{L2}$	0,47
$\zeta_{esc2}$	0,029	$\zeta_{tab1}$	0,23
$\zeta_{esc3}$	0,088	$\zeta_{tab2}$	0,24

**Tabla 32.**

*Determinación de la gradiente máxima de salida Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

$\Sigma\zeta_j$	2,12
$\alpha$	0,39
Jsalmax	0,078

**Tabla 33.**

*Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener el caudal de filtración*

*Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación del caudal de filtración (q)			
Treal $\leq$ 0,5*lo	MLD		
T1(entrada)	findemetodo		
T2(entrada)	findemetodo		
T1(salida)	findemetodo		
T2(salida)	findemetodo		
$\zeta_{entrada}=\zeta_{salida}$	0	$\zeta_{L1}$	0,00
$\zeta_{a1}$	0	$\zeta_{L2}$	0,00
$\zeta_{a2}$	0,000	$\zeta_{s1}$	0,00
$\zeta_{a3}$	0,000	$\zeta_{s2}$	0,00

**Tabla 34.**

*Determinación del caudal de filtración Esquema 1 (M. Coeficientes de resistencia)*

$\Sigma\zeta_j$	0,00
kc(m/día)	0,3
q(m <sup>3</sup> /día*m)	0,14

*Nota. Los datos son tomados del método de la Línea de contorno desarrollada debido a que usando el Coeficientes de resistencia no cumple la condición de aplicación revisar ejemplo de cálculo capítulo V.*

## Esquema 2

**Tabla 35.**

*Determinación del tipo de contorno subterráneo para Esquema2 (M. Coeficientes de resistencia)*

z(m)	2,5
Lo(m)	20,00
So(m)	9,75
Lo/So	2,05
profundo	



**Tabla 36.**

*Determinación del espesor de cálculo T'cal para Esquema 2(M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de T'act	
T'act(m)	17,80
Determinación de T'cal	
T'cal(m)	17,80

**Tabla 37.**

*Determinación del espesor de cálculo T''cal para Esquema 2(M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de T''act	
T''act(m)	35,6
Determinación de T''cal	
T''cal(m)	35,6

**Tabla 38.**

*Determinación del espesor de cálculo T'''cal Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de T'''act	
T'''act(m)	MLD
Determinación T'''cal	
T'''cal(m)	fin

**Tabla 39.***Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la subpresión Esquema 2**(M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de los coeficientes de resistencia(W)			
T1(entrada)		17,80	
T2(entrada)		12,05	
T1(salida)		15,1	
T2(salida)		12,1	
$\zeta_{\text{entrada}} = \zeta_{\text{salida}}$		0,44	
$\zeta_{a1}$	0,32	$\zeta_{L1}$	1,5
$\zeta_{a2}$	0,20	$\zeta_{s1}$	0,72

**Tabla 40.***Determinación de las pérdidas de carga para elemento del contorno subterráneo**Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de las pérdidas de carga (hj)			
$\Sigma \zeta_j$		3,6	
$h_{\text{entrada}} = h_{\text{salida}}$	0,30	$h_{L1}$	1,03
$h_{a1}$	0,22	$h_{s1}$	0,50
$h_{a2}$		0,14	
$\Sigma h(m)$		2,50	

**Tabla 41.***Determinación de la subpresión Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de la subpresión (W)	
$W_{\text{excedentes}}(Kn/m)$	191,73
$W_{\text{sumersión}}(Kn/m)$	1050,00
$W_{\text{total}}(Kn/m)$	1241,73

**Tabla 42.**

*Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la gradiente máxima de salida Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de $J_{m\grave{a}x}$ salida			
T1(entrada)	35,6		
T2(entrada)	29,85		
T1(salida)	32,85		
T2(salida)	29,85		
$\zeta_{entrada}=\zeta_{salida}$	0,44		
$\zeta_{a1}$	0,16	$\zeta_{L1}$	0,60
$\zeta_{a2}$	0,10	$\zeta_{s1}$	0,28

**Tabla 43.**

*Determinación de la gradiente máxima de salida Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia)*

$\Sigma\zeta_j$	2,02
$\alpha$	0,38
$J_{salm\grave{a}x}$	0,09

**Tabla 44.**

*Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener el caudal de filtración Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación del caudal de filtración (q)			
$T_{real} \leq 0,5 \cdot I_0$	MLD		
T1(entrada)	findemetodo		
T2(entrada)	findemetodo		
T1(salida)	findemetodo		
T2(salida)	findemetodo		
$\zeta_{entrada}=\zeta_{salida}$	0		
$\zeta_{esc1}$	0	$\zeta_{L1}$	0,000
$\zeta_{esc2}$	0,000	$\zeta_{tab1}$	0,000

**Tabla 45.***Determinación del caudal de filtración Esquema 2 (M. Coeficientes de resistencia)*

$\Sigma \zeta_j$	0,000
$kc(m/d\grave{a}ia)$	0,3
$q(m^3/d\grave{a}ia*m)$	0,146

**Esquema 3****Tabla 46.***Determinación del tipo de contorno subterráneo para Esquema3 (M. Coeficientes de resistencia)*

$z(m)$	2,5
$Lo(m)$	20,00
$So(m)$	5,75
$Lo/So$	3,48
intermedio	

**Tabla 47.***Determinación del espesor de cálculo  $T'cal$  para Esquema 3(M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de $T'act$	
$T'act(m)$	14,38
Determinación de $T'cal$	
$T'cal(m)$	14,38

**Tabla 48.**

*Determinación del espesor de cálculo  $T''_{cal}$  para Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de $T''_{act}$	
$T''_{act}(m)$	28,75
Determinación de $T''_{cal}$	
$T''_{cal}(m)$	28,75

**Tabla 49.**

*Determinación del espesor de cálculo Esquema 2  $T'''_{cal}$  Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de $T'''_{act}$	
$T'''_{act}(m)$	MLD
Determinación $T'''_{cal}$	
$T'''_{cal}(m)$	fin

**Tabla 50.**

*Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la subpresión Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de los coeficientes de resistencia(W)			
T1(entrada)	14,38		
T2(entrada)	8,63		
T1(salida)	12		
T2(salida)	9		
$\zeta_{entrada}=\zeta_{salida}$	0,44		
$\zeta_{a1}$	0,40	$\zeta_{L1}$	2,3
$\zeta_{a2}$	0,26	$\zeta_{s1}$	0,00

**Tabla 51.***Determinación de las pérdidas de carga para elemento del contorno subterráneo**Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de las pérdidas de carga (h <sub>j</sub> )			
$\Sigma \zeta_j$			3,86
h <sub>entrada</sub> =h <sub>salid</sub>	0,29	hL1	1,50
h <sub>a1</sub>	0,26	h <sub>s1</sub>	0,00
h <sub>a2</sub>			0,17
$\Sigma h(m)$			2,50

**Tabla 52.***Determinación de la subpresión Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de la subpresión (W)	
W(Kn/m)	240,80
W <sub>sumersión</sub> (Kn/m)	1050,00
W <sub>total</sub> (Kn/m)	1290,80

**Tabla 53.***Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la gradiente máxima de**salida Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de J <sub>máx</sub> salida			
T1(entrada)			28,75
T2(entrada)			23
T1(salida)			26
T2(salida)			23
$\zeta_{entrada}=\zeta_{salida}$			0,44
$\zeta_{esc1}$	0,20	$\zeta_{L1}$	0,87
$\zeta_{esc2}$	0,13	$\zeta_{tab1}$	0,00

**Tabla 54.**

*Determinación de la gradiente máxima de salida Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia)*

$\Sigma\zeta_j$	2,08
$\alpha$	0,42
$J_{salm\grave{a}x}$	0,10

**Tabla 55.**

*Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener el caudal de filtración Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación del caudal de filtración (q)			
$T_{real} \leq 0,5 \cdot t_0$	MLD		
T1(entrada)	findemetodo		
T2(entrada)	findemetodo		
T1(salida)	findemetodo		
T2(salida)	findemetodo		
$\zeta_{entrada} = \zeta_{salida}$	0		
$\zeta_{esc1}$	0	$\zeta_{L1}$	0
$\zeta_{esc2}$	0	$\zeta_{tab1}$	0

**Tabla 56.**

*Determinación del caudal de filtración Esquema 3 (M. Coeficientes de resistencia)*

$\Sigma\zeta_j$	0
$k_c(\text{m/día})$	0,3
$q(\text{m}^3/\text{día} \cdot \text{m})$	0,16

## Esquema 5

**Tabla 57**

*Determinación del tipo de contorno subterráneo para Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)*

z(m)	2,5
Lo(m)	20,00
So(m)	10,25
Lo/So	1,95
PROFUNDO	

**Tabla 58.**

*Determinación del espesor de cálculo T'cal para Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia).*

Determinación de T'act	
T'act(m)	18,20
Determinación de T'cal	
T'cal(m)	18,20

**Tabla 59.**

*Determinación del espesor de cálculo T''cal para Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de T''act	
T''act(m)	36,4
Determinación de T''cal	
T''cal(m)	36,4



**Tabla 60.**

*Determinación del espesor de cálculo Esquema 2 T''cal Esquema 4 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de T''act	
T''act(m)	MLD
Determinación T''cal	
T''cal(m)	fin

**Tabla 61.**

*Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la subpresión Esquema 4 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de los coeficientes de resistencia(W)			
T1(entrada)		18,20	
T2(entrada)		12,45	
T1(salida)	15,45	T2(salida)	12,45
$\zeta_{L1}$	0,3	$\zeta_{L2}$	0,7
$\zeta_{entrada}=\zeta_{salida}$	0,44	$\zeta_{s2}$	0,69
$\zeta_{esc1}$	0,32	$\zeta_{s1}$	0,79
$\zeta_{esc2}$	0,19	$\zeta_{s3}$	0,60

**Tabla 62.**

*Determinación de las pérdidas de carga para elemento del contorno subterráneo Esquema 4 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de las pérdidas de carga (hj)			
$\Sigma \zeta_j$	4,44	hL1	0,17
hentrada=hsalid	0,25	hL2	0,373
hesc1	0,18	hs1	0,45
hesc2	0,11	hs2	0,39
$\Sigma h(m)$	2,50	hs3	0,34

**Tabla 63.***Determinación de la subpresión Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de la subpresión (W)	
W(Kn/m)	222,57
Wsumersión(Kn/m)	1050,00
Wtotal(Kn/m)	1272,57

**Tabla 64.**

*Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener la gradiente máxima de salida Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación de $J_{m\grave{a}x}$ salida			
T1(entrada)	36,4		
T2(entrada)	30,65		
T1(salida)	33,65		
T2(salida)	30,65	$\zeta_{L1}$	0,12
$\zeta_{entrada}=\zeta_{salida}$	0,44	$\zeta_{s1}$	0,30
$\zeta_{a1}$	0,16	$\zeta_{s2}$	0,24
$\zeta_{a2}$	0,10	$\zeta_{s3}$	0,21

**Tabla 65.**

*Determinación de la gradiente máxima de salida Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)*

$\Sigma\zeta_j$	2,02
$\alpha$	0,37
$J_{salm\grave{a}x}$	0,09

**Tabla 66.***Determinación de los coeficientes de resistencia para obtener el caudal de filtración**Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)*

Determinación del caudal de filtración (q)			
Treal $\leq$ 0,5*lo	MLD		
T1(entrada)	findemetodo		
T2(entrada)	findemetodo		
T1(salida)	findemetodo		
T2(salida)	findemetodo		
$\zeta_{entrada}=\zeta_{salida}$	0		
$\zeta_{esc1}$	0	$\zeta_{L1}$	0,000
$\zeta_{esc2}$	0,000	$\zeta_{tab1}$	0,000

**Tabla 67.***Determinación del caudal de filtración Esquema 5 (M. Coeficientes de resistencia)*

$\Sigma\zeta_j$	0,000
kc(m/día)	0,3
q(m <sup>3</sup> /día*m)	0,12

Método de Bligh**Tabla 68.***Determinación de la subpresión para todos los esquemas (M. Bligh)*

Método	Subpresión W (Kn/m)				
	ESQUEMA1 W	ESQUEMA2 W	ESQUEMA3 W	ESQUEMA4 W	ESQUEMA5 W
M.Bligh	1530.77	1248.47	1276.09	1278.19	1272.09

**Tabla 69.***Determinación de la gradiente de control de salida para todos los esquemas (M. Bligh)*

Método	Gradiente máxima de salida Jmàx				
	ESQUEMA1 Jmàx	ESQUEMA2 Jmàx	ESQUEMA3 Jmàx	ESQUEMA4 Jmàx	ESQUEMA5 Jmàx
M.Bligh	0.062	0.076	0.087	0.067	0.061

**Tabla 70.***Determinación del caudal de filtración para todos los esquemas (M. Bligh)*

Método	Caudal de filtración q (m <sup>3</sup> /día*m)				
	ESQUEMA1	ESQUEMA2	ESQUEMA3	ESQUEMA4	ESQUEMA5
	q	q	q	q	q
M.Bligh	0.3750	0.3750	0.3750	0.3750	0.3750

Método de Línea de contorno desarrollada**Tabla 71.***Determinación de la subpresión para todos los esquemas (M. Línea de contorno desarrollada)*

Método	Subpresión W (Kn/m)				
	ESQUEMA1	ESQUEMA2	ESQUEMA3	ESQUEMA4	ESQUEMA5
	W	W	W	W	W
Línea d	1518.18	1219.59	1267.60	1255.73	1245.89

**Tabla 72.***Determinación de la gradiente de control de salida para todos los esquemas (M. Línea de contorno desarrollada)*

Método	Gradiente máxima de salida J <sub>màx</sub>				
	ESQUEMA1	ESQUEMA2	ESQUEMA3	ESQUEMA4	ESQUEMA5
	J <sub>màx</sub>	J <sub>màx</sub>	J <sub>màx</sub>	J <sub>màx</sub>	J <sub>màx</sub>
Gradiente de de control a la salida J <sub>c</sub>					
Línea d.	0.037	0.049	0.054	0.042	0.039

**Tabla 73.***Determinación del caudal de filtración para todos los esquemas (M. Línea de contorno desarrollada)*

Método	Caudal de filtración q (m <sup>3</sup> /día*m)				
	ESQUEMA1	ESQUEMA2	ESQUEMA3	ESQUEMA4	ESQUEMA5
	q	q	q	q	q
M.coeficientes	0.1366	0.1462	0.1620	0.1265	0.1185
Línea d	0.1366	0.1462	0.1620	0.1265	0.1185

## Método Red hidrodinámica

**Tabla 74.**

*Determinación de la subpresión para todos los esquemas (M. Red hidrodinámica)*

Método	Subpresión W (Kn/m)				
	ESQUEMA1	ESQUEMA2	ESQUEMA3	ESQUEMA4	ESQUEMA5
	W	W	W	W	W
M.Red hidro	1456.48	1225.00	1228.57	1300.00	1187.50

**Tabla 75.**

*Determinación de la gradiente de control de salida para todos los esquemas (M. Red hidrodinámica)*

Método	Gradiente máxima de salida Jmàx				
	ESQUEMA1	ESQUEMA2	ESQUEMA3	ESQUEMA4	ESQUEMA5
	Jmàx	Jmàx	Jmàx	Jmàx	Jmàx
M.Red hidro	0.10417	0.076	0.087	0.069	0.119

**Tabla 76.**

*Determinación del caudal de filtración para todos los esquemas (M. Red hidrodinámica)*

Método	Caudal de filtración q (m <sup>3</sup> /día*m)				
	ESQUEMA1	ESQUEMA2	ESQUEMA3	ESQUEMA4	ESQUEMA5
	q	q	q	q	q
M.red hidro	0.2500	0.3000	0.4286	0.3333	0.2500

## Método de Filtración Lineal

**Tabla 77.**

*Determinación de la subpresión para todos los esquemas (M. Filtración Lineal)*

Método	Subpresión W (Kn/m)				
	ESQUEMA1	ESQUEMA2	ESQUEMA3	ESQUEMA4	ESQUEMA5
	W	W	W	W	W
M.Filtración L	1530.77	1248.47	1276.09	1278.19	1279.45

**Tabla 78.**

*Determinación de la gradiente de control de salida para todos los esquemas (M. Filtración Lineal)*

Método	Gradiente máxima de salida $J_{m\grave{a}x}$				
	ESQUEMA1	ESQUEMA2	ESQUEMA3	ESQUEMA4	ESQUEMA5
	$J_{m\grave{a}x}$	$J_{m\grave{a}x}$	$J_{m\grave{a}x}$	$J_{m\grave{a}x}$	$J_{m\grave{a}x}$
Gradiente de control a la salida $J_c$					
M.Filtraciòn L	0.062	0.076	0.087	0.067	0.061

**Tabla 79.**

*Determinación del caudal de filtración para todos los esquemas (M. Filtración Lineal)*

Mètodo	Caudal de filtración $q$ (m <sup>3</sup> /día*m)				
	ESQUEMA1	ESQUEMA2	ESQUEMA3	ESQUEMA4	ESQUEMA5
	$q$	$q$	$q$	$q$	$q$
M.Filtraciòn L	0.3750	0.3750	0.3750	0.3750	0.3750

**Tabla 80.**

*Determinación de la gradiente de control de salida para todos los esquemas (M.*

*Filtración Lineal)*

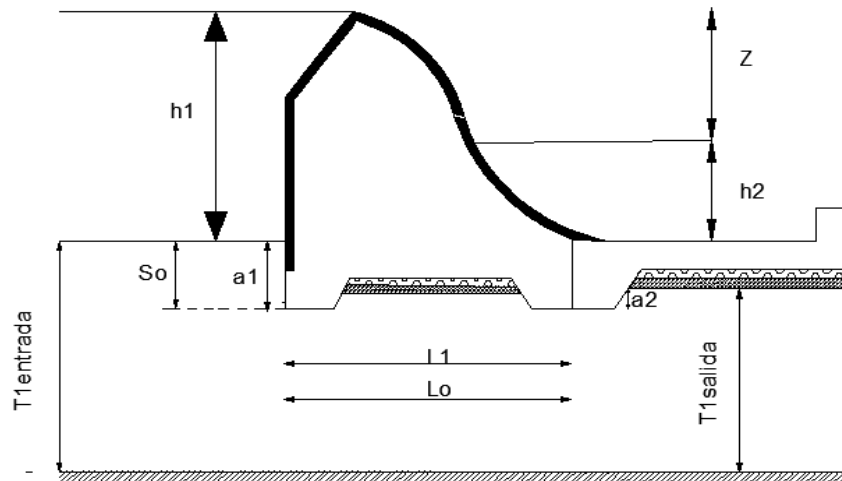
H1=5M															
Método	ESQUEMA1			ESQUEMA2			ESQUEMA3			ESQUEMA4			ESQUEMA 5		
	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q
M.coeficientes	1527,43	0,078	0,1366	1241,73	0,092	0,1620	1290,80	0,098	0,1265	1286,81	0,081	0,1185	1272,57	0,091	0,1462
M.Bligh	1530,77	0,062	0,3750	1248,47	0,076	0,3750	1276,09	0,087	0,3750	1278,19	0,067	0,3750	1272,09	0,061	0,3750
M.Linea d	1518,18	0,037	0,1366	1219,59	0,049	0,1620	1267,60	0,054	0,1265	1255,73	0,042	0,1185	1245,89	0,039	0,1462
M.red hidro	1456,48	0,104	0,2500	1225,00	0,076	0,4286	1228,57	0,087	0,3333	1300,00	0,069	0,2500	1187,50	0,119	0,3000
M.Filtración L	1530,77	0,062	0,3750	1248,47	0,076	0,3750	1276,09	0,087	0,3750	1278,19	0,067	0,3750	1279,45	0,061	0,3750
H1=10M															
Método	ESQUEMA1			ESQUEMA2			ESQUEMA3			ESQUEMA4			ESQUEMA 5		
	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q
M.coeficientes	4748,60	0,118	0,3100	3867,62	0,146	0,3405	4072,62	0,154	0,3995	4067,17	0,127	0,2997	4014,25	0,142	0,2775
M.Bligh	4775,92	0,068	0,7500	3910,57	0,088	0,7500	4043,59	0,103	0,7500	4050,19	0,077	0,7500	4026,46	0,069	0,7500
M.Linea d	4718,86	0,042	0,3100	3821,91	0,057	0,3405	4020,11	0,067	0,3995	3955,14	0,050	0,2997	3906,66	0,046	0,2775
M.red hidro	4478,40	0,104	0,5000	3800,00	0,088	0,6000	3814,29	0,103	0,8571	4100,00	0,069	0,6667	3650,00	0,111	0,5000
M.Filtración L	4775,92	0,068	0,7500	3910,57	0,088	0,7500	4043,59	0,103	0,7500	4050,19	0,077	0,7500	4108,93	0,069	0,7500
H1=15M															
Método	ESQUEMA1			ESQUEMA2			ESQUEMA3			ESQUEMA4			ESQUEMA 5		
	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q
M.coeficientes	9648,16	0,146	0,4869	7880,31	0,187	0,5404	8349,80	0,204	0,6497	8346,29	0,162	0,4791	8229,42	0,181	0,4415
M.Bligh	9735,50	0,071	1,1250	7989	0,093	1,1250	8310,00	0,109	1,1250	8321,58	0,080	1,1250	8267,90	0,072	1,1250
M.Linea d	9601,12	0,044	0,4869	7814,53	0,060	0,5404	8270,07	0,072	0,6497	8104,58	0,053	0,4791	7986,49	0,049	0,4415
M.red hidro	9065,78	0,10417	0,7500	7725,00	0,093	0,9000	7757,14	0,109	1,2857	8400,00	0,069	1,0000	7387,50	0,109	0,7500
M.Filtración L	9735,50	0,071	1,1250	7989,01	0,093	1,1250	8310,00	0,109	1,1250	8321,58	0,080	1,1250	8499,88	0,072	1,1250
H1=20M															
Método	ESQUEMA1			ESQUEMA2			ESQUEMA3			ESQUEMA4			ESQUEMA 5		
	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q	W	Jc	q
M.coeficientes	16228,42	0,170	0,6648	13261,18	0,220	0,7421	14126,50	0,245	0,9043	14124,39	0,190	0,6604	13915,96	0,212	0,6070
M.Bligh	16409,49	0,072	1,5000	13484	0,095	1,5000	14076,06	0,113	1,5000	14092,78	0,082	1,5000	13996,71	0,073	1,5000
M.Linea d	16164,90	0,045	0,6648	13198,14	0,062	0,7421	14019,14	0,075	0,9043	13704,68	0,055	0,6604	13485,79	0,051	0,6070
M.red hidro	15218,61	0,10417	1,0000	13000,00	0,095	1,2000	13057,14	0,113	1,7143	14200,00	0,069	1,3333	12400,00	0,108	1,0000
M.Filtración L	16409,49	0,072	1,5000	13484,01	0,095	1,5000	14076,06	0,113	1,5000	14092,78	0,082	1,5000	14453,02	0,073	1,5000





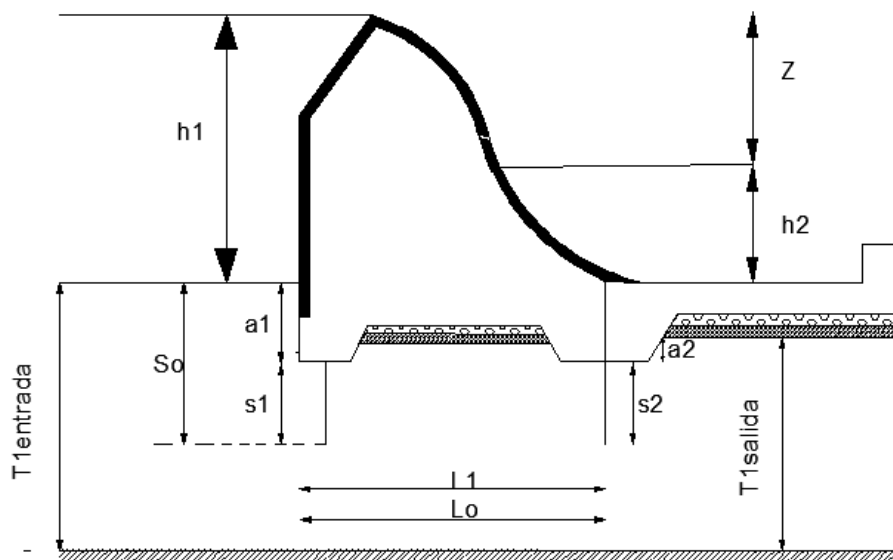
### Esquema 3.

*Contorno subterráneo únicamente con escalones a1, a2*



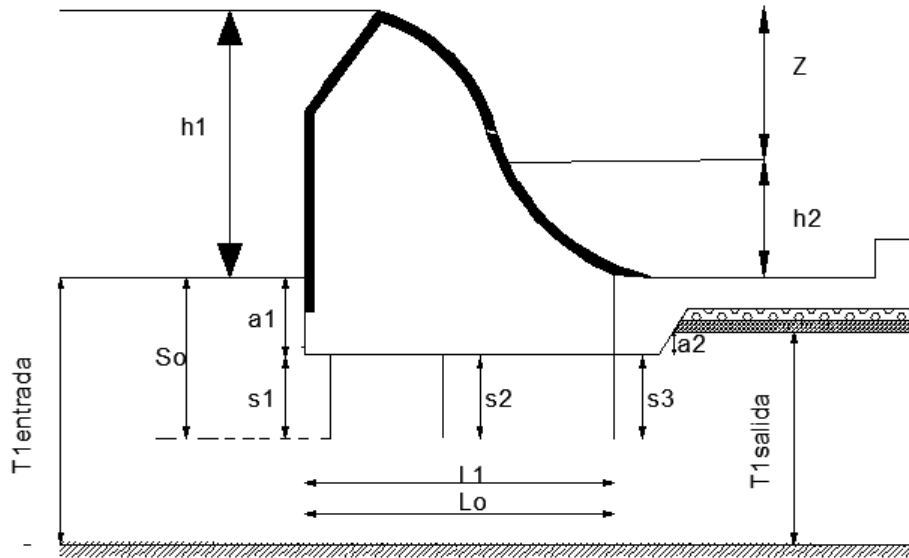
### Esquema 4.

*Contorno subterráneo con presencia de tablaestaca aguas arriba y aguas abajo*



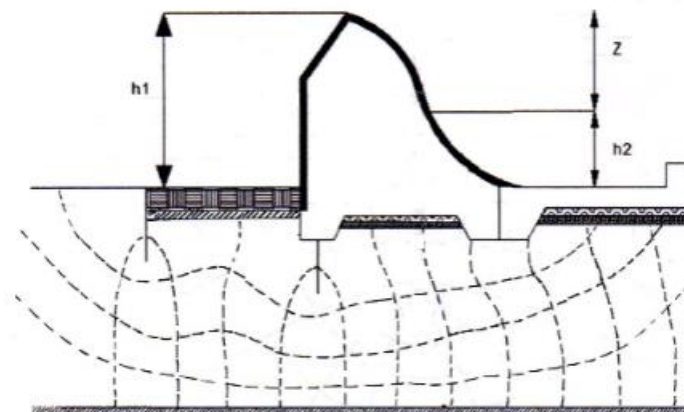
### Esquema 5.

*Contorno subterráneo con presencia de tablaestaca aguas arriba, mitad de la presa y aguas abajo*



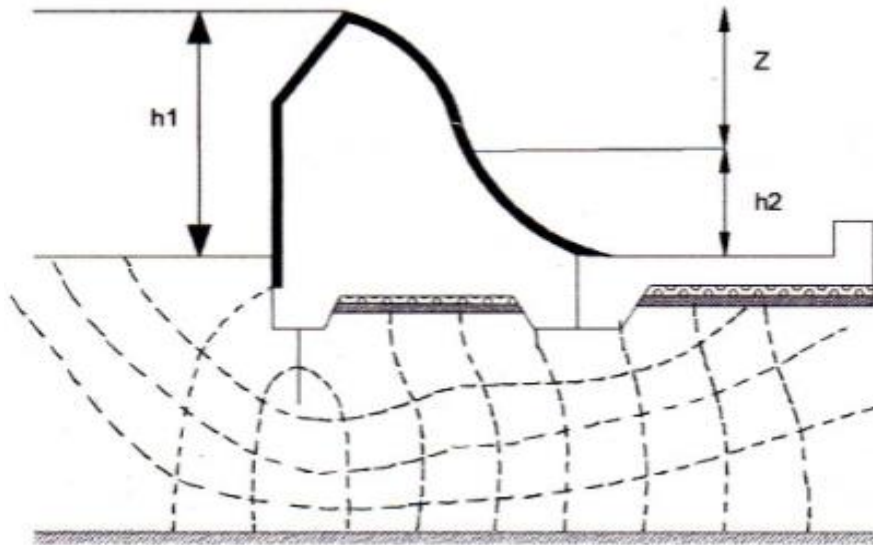
### Esquema 6.

*Contorno subterráneo con presencia de carpeta y dos tablaestacas aguas arriba (M.red hidrodinámica)*



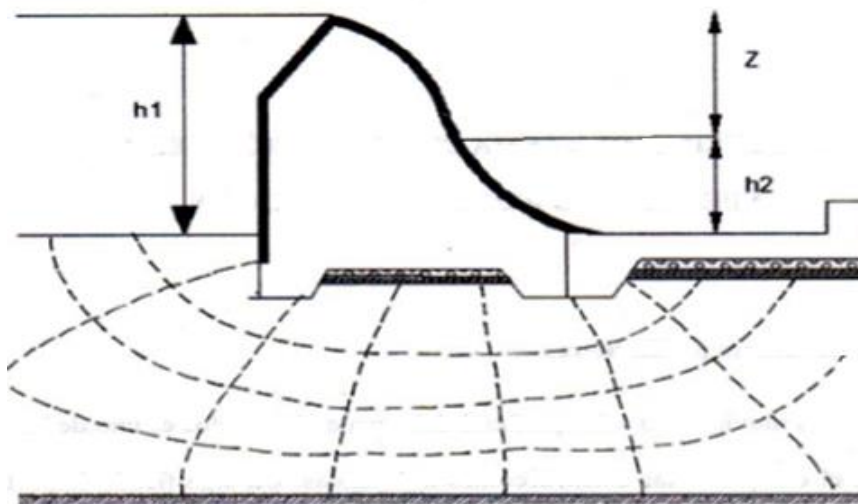
**Esquema 7.**

*Contorno subterráneo tablaestaca aguas arriba (M.red hidrodinàmica)*



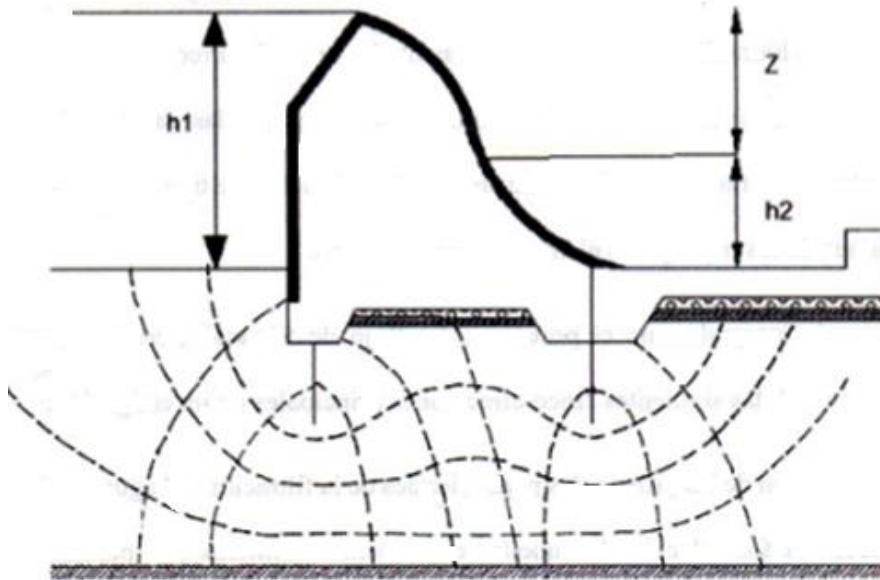
**Esquema 8.**

*Contorno subterráneo únicamente con escalones a1, a2 (M.red hidrodinámica)*



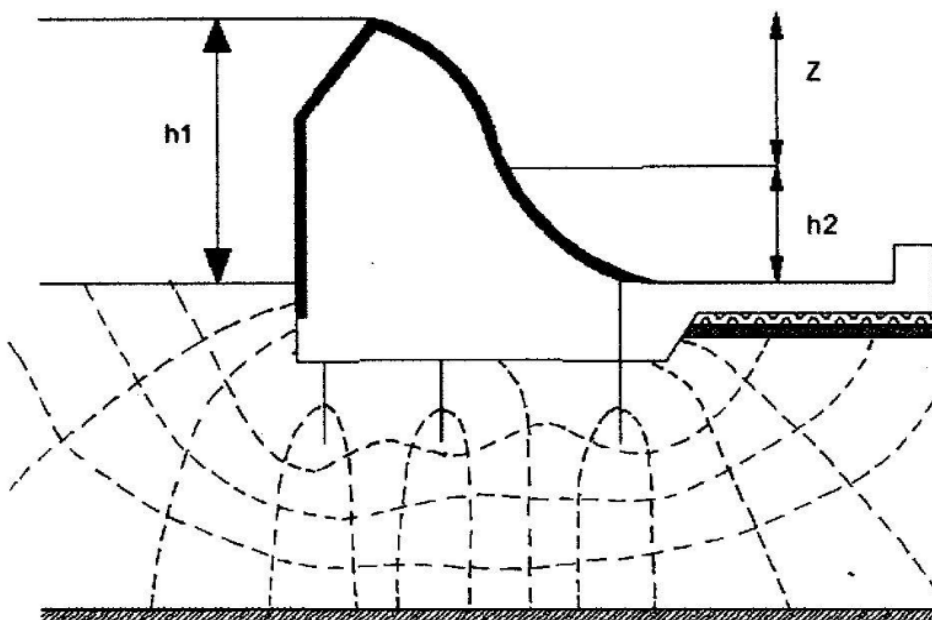
**Esquema 9.**

*Contorno subterráneo con presencia de tablaestaca aguas arriba y aguas abajo  
(M.red hidrodinámica)*



**Esquema 10.**

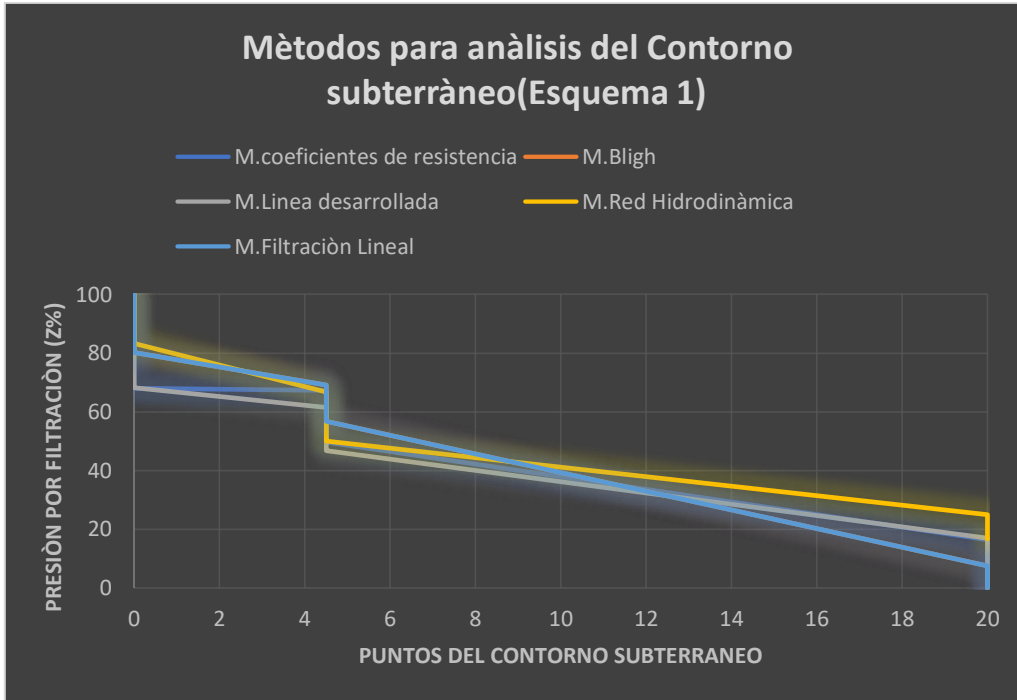
*Contorno subterráneo con presencia de tablaestaca aguas arriba, mitad de la  
presa y aguas abajo (M.red hidrodinámica)*



### Gráfico 7.

Línea piezométrica empleando todos los métodos de análisis para Esquema1

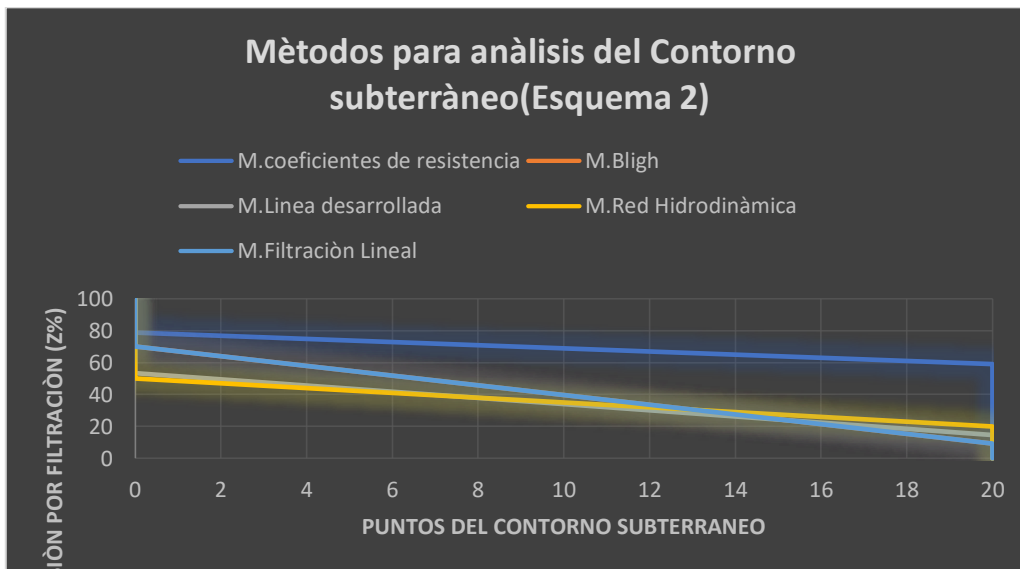
$B=15m$



### Gráfico 8.

Línea piezométrica empleando todos los métodos de análisis para Esquema2

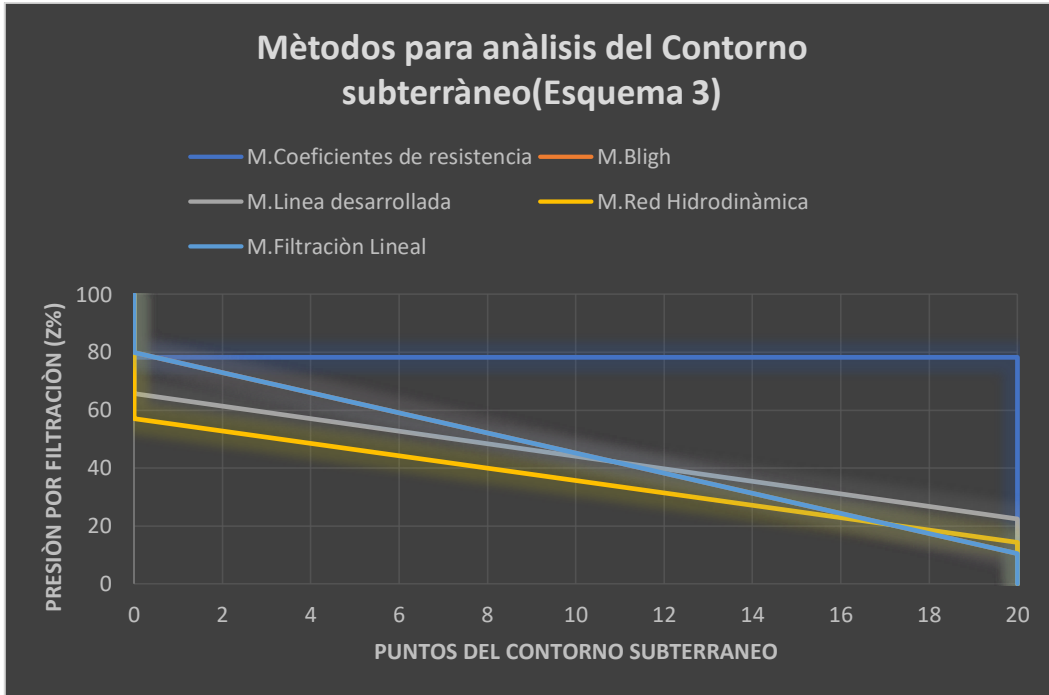
$B=15m$



**Gráfico 9.**

*Línea piezométrica empleando todos los métodos de análisis para Esquema3*

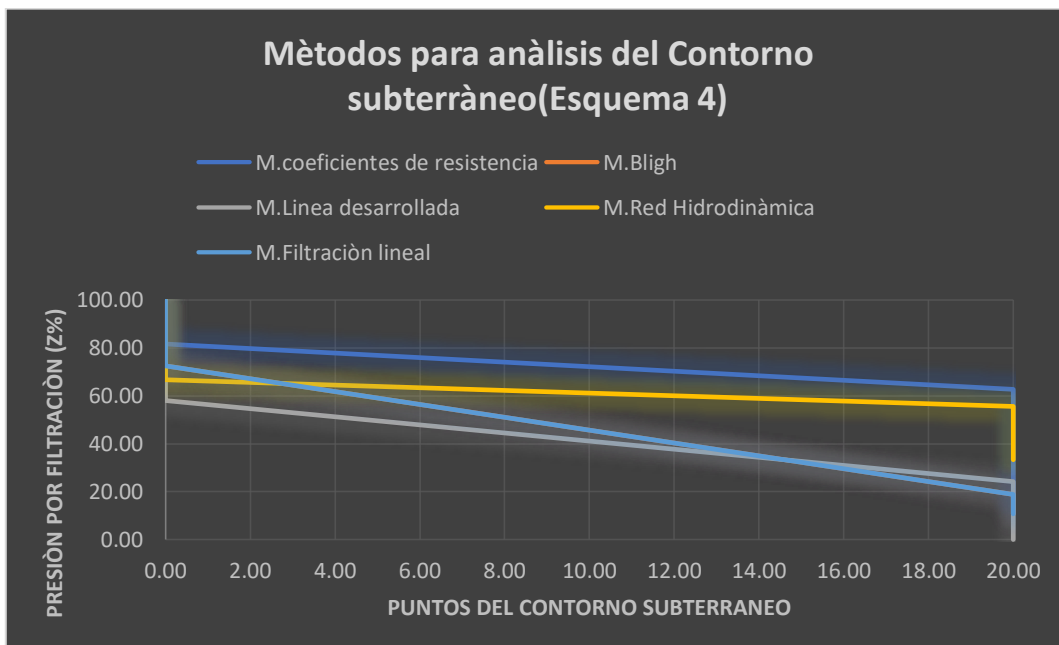
*B=15m*



**Gráfico 10.**

*Línea piezométrica empleando todos los métodos de análisis para Esquema4*

*B=15m*



### Gráfico 11.

Línea piezométrica empleando todos los métodos de análisis para Esquema 5

$B=15m$

