

INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE DISEÑO DEL SISTEMA DE DRENAJE TIPO HORIZONTAL PARA UN MODELAMIENTO FÍSICO BIDIMENSIONAL EN PRESAS DE MATERIAL HOMOGÉNEO NO COHESIVO Y COMPACTADO

INFLUENCE OF THE LENGTH OF DESIGN OF THE DRAINAGE SYSTEM HORIZONTAL TYPE FOR A TWO-DIMENSIONAL PHYSICIST MODELING IN DAMS OF HOMOGENEOUS NOT COHESIVE AND COMPACTED MATERIAL

Emilio Javier Gonzales Guevara ¹
Ricardo Jesús Peláez Cáceres²

Fecha de recepción: 01 marzo 2018
Fecha de aprobación: 22 junio 2018
DOI: <https://doi.org/10.26495/rtzh1810.226923>



Resumen

En la actualidad, es frecuente el uso de presas de material homogéneo, debido al reducido impacto ambiental generado y los menores costos de su construcción. Asimismo, este tipo de estructuras poseen drenajes a fin de mitigar el comportamiento erosivo del fluido; sin embargo, se desconoce los cambios originados por la manipulación de su principal parámetro de diseño. Por esta razón, la presente investigación evaluó la influencia de la longitud de diseño del sistema de drenaje tipo horizontal. Con los avances en ingeniería, se ha demostrado que un mejor estudio se logra a través de un modelamiento físico bidimensional. Por ello, se realizó 30 ensayos en el Equipo de Drenaje para una sección transversal de presa (previamente pre dimensionada); de la cual se obtuvo: caudales de infiltración, lecturas piezométricas y trazo de la línea de saturación (todas ellas contrastadas con principios teóricos o software). Con el conjunto de datos recopilados, se elaboraron gráficas comparativas; con las que se propusieron coeficientes de corrección (teórico / software). Finalmente, se determinó que la influencia de la longitud de diseño del sistema de drenaje tipo horizontal, radica en un aumento de la estabilidad de taludes y caudales de infiltración; asimismo, implica la reducción de lecturas piezométricas y línea de saturación.

Palabras clave: Caudal de infiltración, drenaje horizontal, flujo de agua, modelamiento físico – bidimensional, presa de material homogéneo.

Abstract

At present, there is frequent the use of dams of homogeneous material, due to the limited environmental generated impact and the minor costs of his construction. Likewise, this type of structures possess drainages in order to mitigate the erosive behavior of the fluid; nevertheless, there are not known the changes originated by the manipulation of his principal design parameter. For this reason, the present investigation there evaluated the influence of the length of design of the drainage system horizontal type. With the advances in engineering, there has been demonstrated that a better study is achieved across a two-dimensional physicist modeling. For it, 30 tests were realized in the Equipment of Drainage for a transverse section of dam (before pre measured); of which it was obtained: flows of infiltration, piezometreical readings and outline of the saturation line (all of them confirmed with theoretical beginning or software). With the set of compiled information, comparative graphs were elaborated; with those who proposed themselves coefficients of correction (theoretical / software). Finally, one determined that the influence of the length of design of the drainage system horizontal type, it takes root in an increase of the stability of banks and flows of infiltration; likewise, it implies the reduction of piezometreical readings and saturation line.

Keywords: Flow of infiltration, horizontal drainage, flow of water, two-dimensional physicist modeling, dam of homogeneous material.

¹ Adscrito a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil, Bachiller, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, email: gguevaraemili@crece.uss.edu.pe

² Adscrito a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil, Bachiller, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, email: pcaceresr@crece.uss.edu.pe

1. Introducción

El fenómeno del “Niño Costero”, suscitado a partir del 15 de marzo del 2017, fue la causa directa para el desborde de los ríos La Leche y Motupe (ubicados en la Región Lambayeque) debido al aumento del caudal originado por las fuertes lluvias registradas. (Diario Correo, 2017)

Una de las soluciones contempladas frente a desastres naturales como el antes mencionado, lo constituye la construcción de embalses; dentro de las cuales podemos destacar las de material homogéneo, ya que favorecen el aprovechamiento de los recursos propios de la zona, así como la reducción significativa de los costos. De forma complementaria, su eficacia frente a los efectos del fluido, dependen de la incorporación de sistemas de drenaje (siendo el de mayor simplicidad constructiva el de tipo horizontal).

Las longitudes del sistema de drenaje tipo horizontal pueden ser muy variables, provocando en el ingeniero proyectista cierta incertidumbre acerca de sus consecuencias en la estructura. Por ello, la presente investigación evaluó la influencia de la longitud de diseño del sistema de drenaje tipo horizontal a través de modelamientos físicos bidimensionales, considerando inicialmente un aumento significativo del caudal de infiltración. Para lograr el objetivo trazado, se pusieron en práctica las teorías de Dupuit, Casagrande y Kozeny orientadas al estudio de flujo de agua dentro del cuerpo de la presa.

2. Material y métodos

La presente investigación fue de tipo Cuantitativa - Tecnológica, ya que se orienta a la medición de caudales de infiltración a través de una presa de material homogéneo y compactado. Asimismo, incorpora el uso de software para verificar la estabilidad de taludes, flujo de agua y desplazamientos. Por otra parte, su diseño fue Experimental (Cuasi – Experimental), ya que incorpora el trabajo de campo y gabinete. El primero enfocado en la realización de ensayos en los Laboratorios (Estudio de Materiales, Suelos y Pavimentos e Hidráulica) y el segundo basado en el manejo de software (Slide, Slope/W, Seep/W y Plaxis).

La metodología desarrollada consistió en la realización de ensayos de mecánica de suelos a las muestras adquiridas (las cuales fueron tres: arena sin lavar, arena con lavados continuos y confitillo lavado). Luego se procedió a pre-dimensionar la sección transversal de presa homogénea. Con las dos primeras etapas realizadas, se verificó la estabilidad de los taludes, flujo de agua y deformaciones de la estructura haciendo uso de fórmulas teóricas y/o software. Sin embargo, éstos resultados (teóricos) fueron contrastados con aquellos obtenidos en laboratorio mediante los modelamientos físicos bidimensionales. Finalmente, se propuso factores de corrección necesarios para el cálculo del caudal de infiltración de diseño.

Dentro de la variedad de sistemas de drenaje existentes en presas de material homogéneo (población), se seleccionó el de tipo horizontal para la realización de 30 modelamientos (muestra) en el Equipo de Drenaje.

Las variables independientes en estudio fueron: la presa de material homogéneo y compactado, el sistema de drenaje tipo horizontal y el material granular; asimismo, la variable dependiente lo constituyen los coeficientes de corrección (teórico / software). Lo anteriormente mencionado, pudo ser medido gracias a la aplicación de técnicas de observación y análisis de documentos, y el empleo de instrumentos tales como: guías de observación y documentos.

Cabe resaltar, que los equipos de laboratorio de la USS empleados para la obtención de los datos pertinentes, se encuentran debidamente calibrados (existiendo un certificado que avala dicha afirmación). Además, el procedimiento desarrollado durante los ensayos se rige a normativas vigentes (NTP / ASTM). Todo ello, favorece la recopilación de datos confiables y veraces.

3. Resultados

3.1. Ensayos de mecánica de suelos

El análisis que permitió comprender el comportamiento del flujo de agua, que circula a través del cuerpo de la presa de tierra con sistema de drenaje tipo horizontal inicio con conocer las propiedades mecánicas, hidráulicas y geotécnicas, de los materiales que esta posee, para ello se ejecutaron ensayos en los laboratorios de la Universidad Señor de Sipán, siendo las muestras empleadas las siguientes:

Muestra 01. Arena sin lavar.- Arena gruesa sometida a un tamizado previo a través de la malla 1/4", procedente de la cantera natural "La Victoria" – Pátapo.

Muestra 02. Arena lavada.- Arena gruesa sometida a un tamizado previo a través de la malla 1/4" y a lavados continuos a través de la malla N° 40, procedente de la cantera natural "La Victoria" – Pátapo.

Muestra 03. Confitillo lavado.- Confitillo sometido a un tamizado previo a través de la malla N° 04 y luego a lavados continuos, procedente de la cantera natural "Tres Tomas" – Ferreñafe.

El motivo del tamizado previo en cada muestra, corresponde a la existencia de material orgánico (restos de ramas, hojas secas, entre otros) y partículas de mayor tamaño en su composición. Mientras que los lavados continuos se realizaron para reducir la turbidez en el agua.



Figura 1. Apariencia del agua en contacto con la arena, antes (turbia) y después (cristalina) de los lavados sucesivos.

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de estudio de materiales.

3.2. Predimensionamiento de la sección transversal de presa

Los valores del predimensionamiento de la sección transversal de presa están presentados en la tabla 1. Dichos valores dependen de la escala escogida (1:100), la cual permite que el modelo se adecue a las dimensiones del equipo de drenaje además de tener adecuada visualización de la presa de tierra.

En cuanto a la altura y ancho de la presa; ambos se vieron limitados por las dimensiones del equipo de drenaje, el cual solo permitía como ancho máximo 150 cm (distancia existente entre tuberías de rebose).

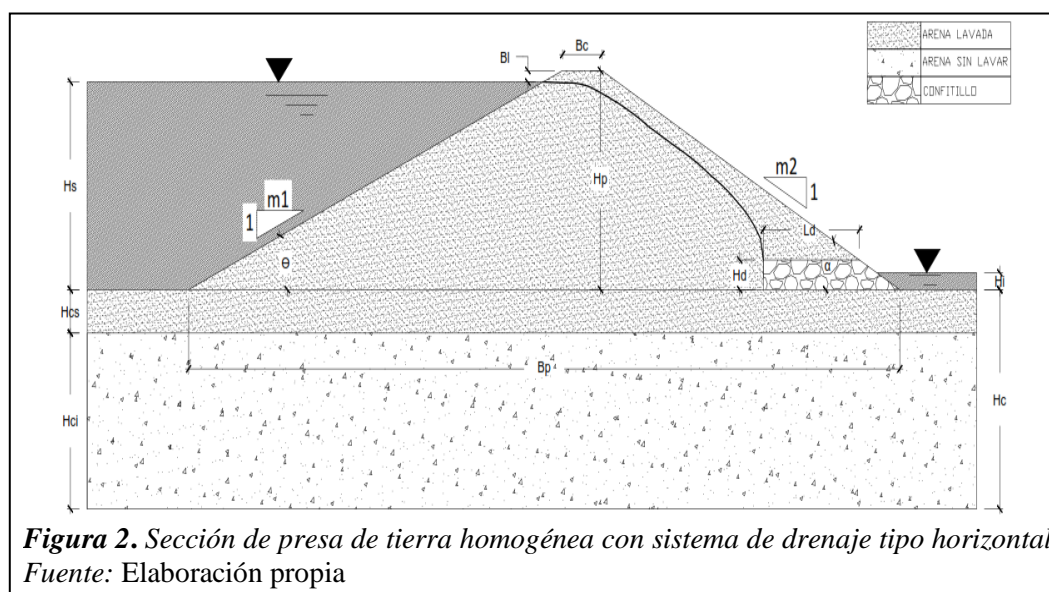
El valor de los taludes (talud aguas arriba y talud aguas abajo), fueron seleccionados a partir de los parámetros establecidos en el manual de pequeñas presas de la Bureau of Reclamation. Mientras que el ancho de la corona, es el resultado de un promedio de ciertos criterios tradicionales tales son: criterio de T. Knappen, criterio de E. T. Preece, criterio del código de Arizona de 1960, criterio del Bureau of Reclamation.

El valor de la altura de borde libre escogido corresponde a una altura adicional de seguridad la cual permite evitar el agrietamiento de la corona por secado, esto es debido a que el modelo de presa no se encuentra sometido a condiciones de arrastre de agua por el viento (olas), efectos de sismo u asentamiento máximo de la corona.

Tabla 1
Predimensionamiento de la sección de presa de tierra homogénea.

DESCRIPCIÓN	VALOR
Factor de Escala (E)	: 1:100
Altura de Presa (Hp)	: 21.00
Altura de Borde Libre (Bl)	: 4.00
Ancho de Presa (Bp)	: 123.00
Ancho de Corona (Bc)	: 7.50
Altura de cimentación (Hc)	: 24.00
Altura de estrato Inferior (Hci)	: 21.00
Altura de estrato Superior (Hcs)	: 3.00
Talud aguas arriba (m1)	: z = 3.00
Tirante aguas arriba (Hs)	: 17.00
Talud aguas abajo (m2)	: z = 2.50
Tirante aguas abajo (Hi)	: 1.70
Altura de drenaje horizontal (Hd)	: 3.00
Longitud de drenaje horizontal (Ld)	: 5, 10, 15, 20, 25

Fuente: Resultados del predimensionamiento



3.3. Verificación de la estabilidad de taludes

La estabilidad de taludes para la sección transversal de presa fue realizada con la ayuda de dos softwares (Slide y Slope/W), de los cuales se seleccionó 3 métodos que permitieron obtener dichos resultados (Bishop / Morgenstern - Price, Spencer, Janbu). Las condiciones analizadas por el software fueron: fase de construcción y funcionamiento; dichos resultados se presentan en la tabla 2 y 3.

Tabla 2

Factores de seguridad críticos durante la fase de construcción.

ESTABILIDAD DE TALUDES (FASE DE CONSTRUCCIÓN)						
SLIDE			SECCIÓN TRANSVERSAL	SLOPE/W		
Bishop	Spencer	Janbu		Morgenstern - Price	Spencer	Janbu
ANÁLISIS AGUAS ABAJO						
1.918410	1.918070	1.877570	Presa Sin Drenaje	2.016	2.016	1.957
1.922910	1.921410	1.883580	Presa con Drenaje 5 m	2.068	2.065	1.996
1.922910	1.921370	1.883580	Presa con Drenaje 10 m	2.143	2.138	2.043
1.922910	1.921370	1.883580	Presa con Drenaje 15 m	2.226	2.220	2.042
1.922910	1.921370	1.883580	Presa con Drenaje 20 m	2.226	2.220	2.041
1.922910	1.921380	1.883580	Presa con Drenaje 25 m	2.226	2.220	2.052
ANÁLISIS AGUAS ARRIBA						
2.290960	2.287420	2.244620	Presa Sin Drenaje			
			Presa con Drenaje: 5, 10, 15, 20 y 25 m	2.420	2.420	2.341

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3

factores de seguridad críticos durante la fase de funcionamiento.

ESTABILIDAD DE TALUDES (FASE DE FUNCIONAMIENTO)						
SLIDE			SECCIÓN TRANSVERSAL	SLOPE/W		
Bishop	Spencer	Janbu		Morgenstern - Price	Spencer	Janbu
ANÁLISIS AGUAS ABAJO						
1.234930	1.237890	1.211260	Presa Sin Drenaje	1.588	1.588	1.477
1.673510	1.669570	1.504820	Presa con Drenaje 5 m	1.719	1.724	1.583
1.731510	1.726270	1.557430	Presa con Drenaje 10 m	1.766	1.771	1.626
1.786040	1.777940	1.606030	Presa con Drenaje 15 m	1.813	1.818	1.669
1.836030	1.831540	1.646760	Presa con Drenaje 20 m	1.855	1.860	1.709
1.881250	1.874570	1.685970	Presa con Drenaje 25 m	1.901	1.906	1.752
ANÁLISIS AGUAS ARRIBA						
2.251740	2.185570	2.252830	Presa Sin Drenaje	2.377	2.378	2.296
2.263300	2.264080	2.196110	Presa con Drenaje 5 m	2.384	2.384	2.303
2.266920	2.267630	2.201570	Presa con Drenaje 10 m	2.387	2.388	2.306
2.270920	2.271630	2.208140	Presa con Drenaje 15 m	2.391	2.392	2.310

2.273940	2.276530	2.214860	Presas con Drenaje 20 m	2.396	2.396	2.315
2.277720	2.281740	2.219200	Presas con Drenaje 25 m	2.402	2.402	2.321

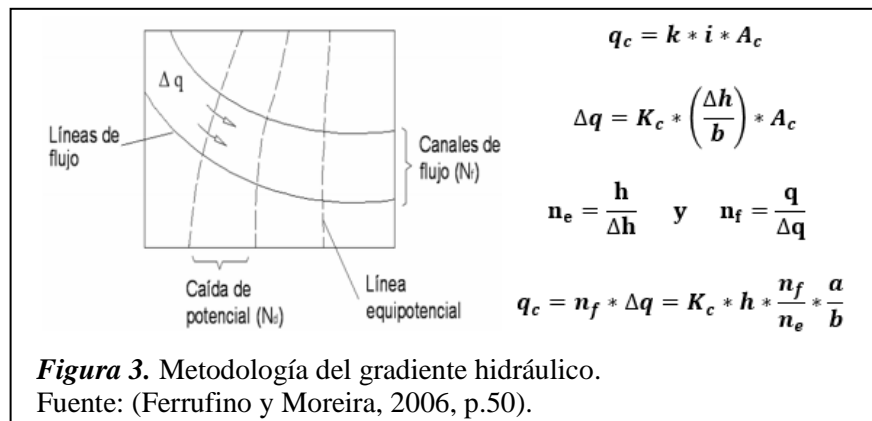
Fuente: Elaboración propia

3.4. Verificación del flujo de agua

Determinación del comportamiento del flujo de agua a través del cuerpo de presa:

Metodología del gradiente hidráulico

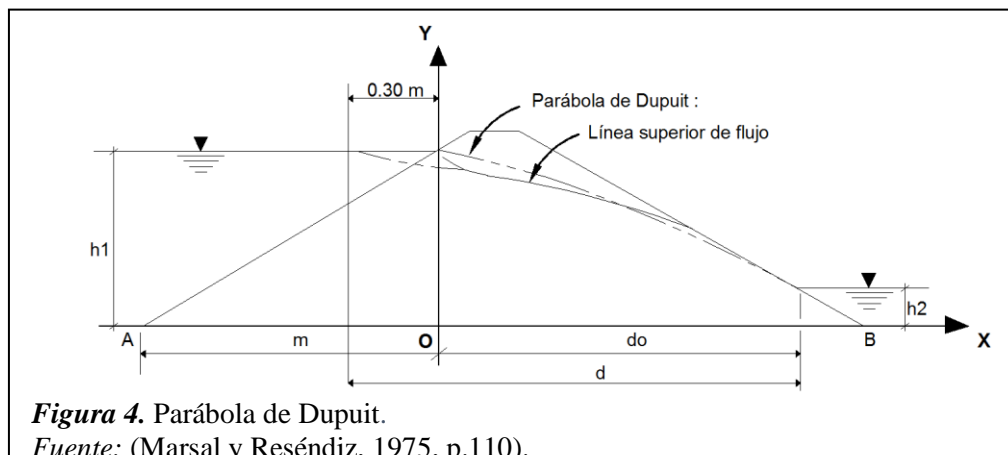
Esta metodología parte del principio que Henri Philibert Gaspar Darcy (1856) propuso para calcular el caudal pasante a través de un suelo, para ello incluye parámetros como: la permeabilidad hidráulica del suelo (k), el gradiente hidráulico (i) y la región de estudio (A). Si a dicho postulado se lo adecua lo establecido en la teoría de Laplace (flujo bidimensional en un medio isotrópico compuesto por dos familias ortogonales de curvas); se encontrará en función a los canales de flujo (N_f) y las caídas de potencia (N_e) que en combinación reciben el nombre de “Red de flujo”, lo cual permite calcular el gasto que pasa a través de un canal de flujo.



Teoría de Dupuit

En 1863 Dupuit propuso para la solución de problemas de flujo no confinado, la cual otorga la ecuación que permite obtener la línea superior de flujo llamada parábola de Dupuit, y el valor del caudal de infiltración a través del cuerpo de presa, ver figura N° 4.

$$y^2 - h_1^2 = \frac{h_2^2 - h_1^2}{d_0} x \qquad q_c = K_c * \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{2 * d_0}\right)$$



Teoría de A. Casagrande

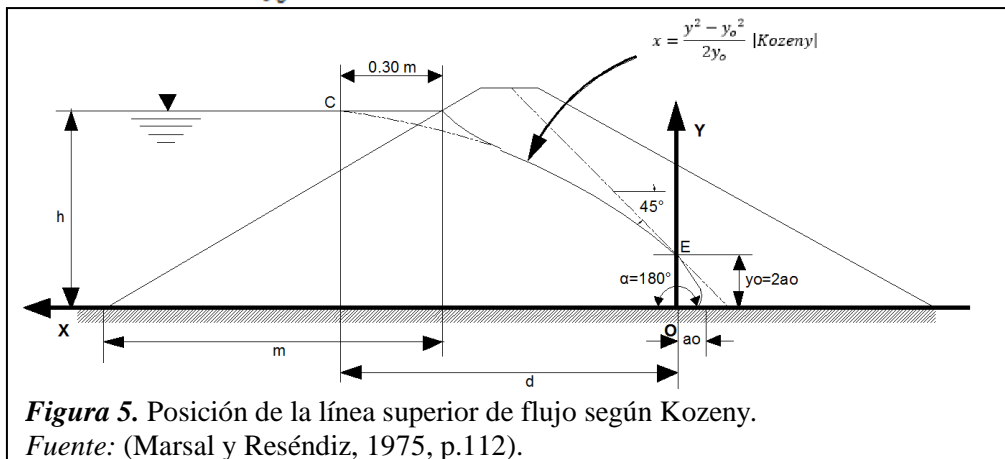
Durante 1925 a 1940, A. Casagrande sugiere que, a fin de satisfacer la condición de entrada, el punto de inicio de la parábola se tome a una distancia 0.3m aguas arriba de la presa (figura N° 4), corrigiendo después localmente el comportamiento de la parábola según esta condición de entrada. Debido a esto las ecuaciones anteriores se expresan de la siguiente manera.

$$y^2 - h_1^2 = \frac{h_2^2 - h_1^2}{d} x \qquad q_c = K_c * \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{2*d} \right)$$

Teoría de Kozeny

En 1931 Kozeny, establece que para una cara horizontal de descarga existe una solución, en la cual las líneas de flujo y las equipotenciales son parábolas con foco común en el punto O (figura N° 5), lo cual establece que las ecuaciones para dibujar la línea superior de flujo y el cálculo del caudal de infiltración a través del cuerpo de presa se estimen según las siguientes ecuaciones. Donde el valor $y_o = 2a_o = \sqrt{d^2 + h^2} - d$.

$$x = \frac{y^2 - y_o^2}{2y_o} \qquad q = ky_o = 2ka_o$$



Los resultados obtenidos según principios teóricos y software Seep/W 2016 son:

Tabla 4
Caudal de infiltración según los principios teóricos.

Observación	Métodos de Análisis	Caudal Unitario	Caudal Unitario	Factor de Conversión	Caudal Unitario	Longitud de Corona	Q Infiltración Total
	Teorías	m ³ /s/m	cm ³ /s/m	Escala 1:100	cm ³ /s/m	cm	cm ³ /s
Sin Drenaje	Gradiente Hidráulico	3.3139E-05	33.14	1.00E-02	0.33	30.00	9.94
	Dupuit	3.8167E-05	38.17		0.38	30.00	11.45
	A. Casagrande	3.5066E-05	35.07		0.35	30.00	10.52
LD = 05 M	Kozeny (α=180°)	3.6541E-05	36.54		0.37	30.00	10.96
LD = 10 M	Kozeny (α=180°)	3.7600E-05	37.60		0.38	30.00	11.28
LD = 15 M	Kozeny (α=180°)	3.8815E-05	38.82		0.39	30.00	11.64
LD = 20 M	Kozeny (α=180°)	4.0222E-05	40.22		0.40	30.00	12.07
LD = 25 M	Kozeny (α=180°)	4.1871E-05	41.87		0.42	30.00	12.56

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5
Caudal de infiltración según GeoStudio (Seep/W).

Observación	Métodos de Análisis	Caudal Unitario	Caudal Unitario	Factor de Conversión	Caudal Unitario	Longitud de Corona	Q Infiltración Total
	GeoStudio	m ³ /s/m	cm ³ /s/m	Escala 1:100	cm ³ /s/m	cm	cm ³ /s
Sin Drenaje	Seep / W	4.1247E-05	41.25	1.00E-02	0.41	30.00	12.37
LD = 5 M	Seep / W	4.6020E-05	46.02		0.46	30.00	13.81
LD = 10 M	Seep / W	4.7544E-05	47.54		0.48	30.00	14.26
LD = 15 M	Seep / W	4.9755E-05	49.76		0.50	30.00	14.93
LD = 20 M	Seep / W	5.2422E-05	52.42		0.52	30.00	15.73
LD = 25 M	Seep / W	5.6503E-05	56.50		0.57	30.00	16.95

Fuente: Elaboración propia

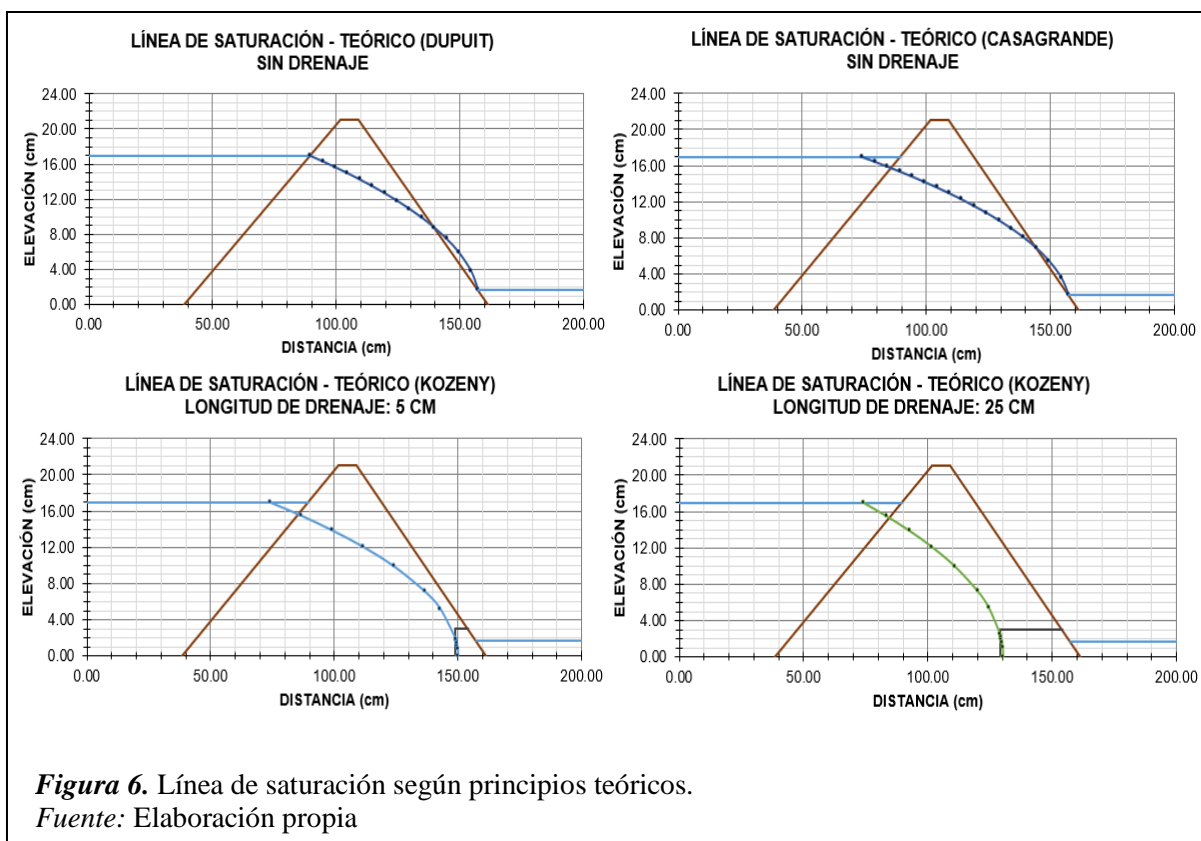


Figura 6. Línea de saturación según principios teóricos.

Fuente: Elaboración propia

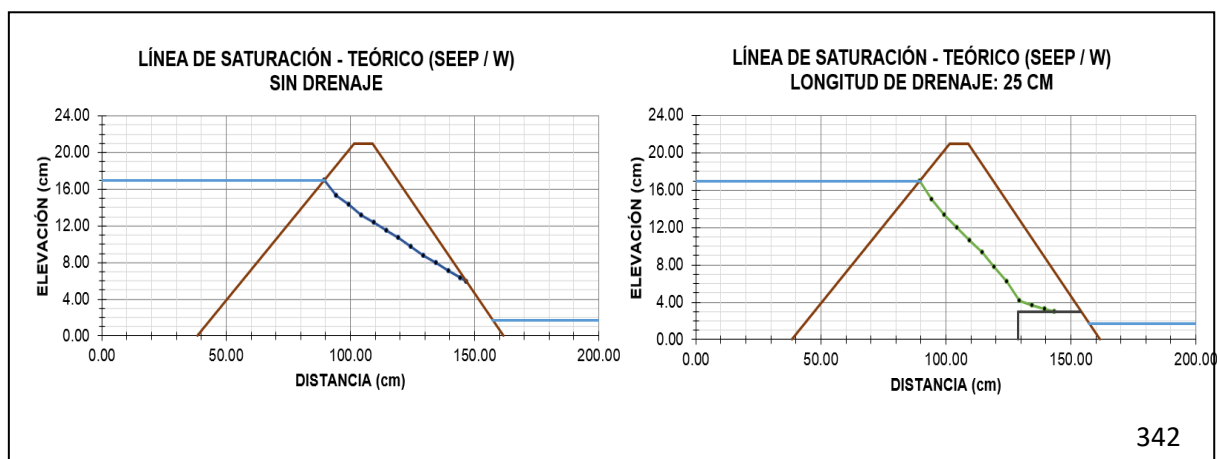


Figura 7. Línea de saturación según GeoStudio (Seep/W).

Fuente: Elaboración propia

En tanto el software Plaxis v.8.6, permitió conocer las deformaciones de la sección en análisis en etapa de construcción como en etapa de funcionamiento.

Tabla 6

Desplazamientos de la presa de material homogéneo en su fase de construcción.

LONG. DE DRENAJE	DESPLAZAMIENTOS (m)		
	TOTAL	HORIZONTAL	VERTICAL
SD	1.56	1.09	1.54
LD = 5 M	1.44	1.08	1.43
LD = 10 M	1.53	1.08	1.52
LD = 15 M	1.47	1.08	1.45
LD = 20 M	1.45	1.07	1.44
LD = 25 M	1.50	1.08	1.49

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7

Desplazamientos de la presa de material homogéneo en su fase de funcionamiento.

LONG. DE DRENAJE	DESPLAZAMIENTOS (m)		
	TOTAL	HORIZONTAL	VERTICAL
SD	1.99	1.98	1.42
LD = 5 M	2.02	2.01	1.47
LD = 10 M	1.96	1.96	1.35
LD = 15 M	1.97	1.96	1.41
LD = 20 M	1.89	1.88	1.26
LD = 25 M	1.85	1.85	1.23

Fuente: Elaboración propia

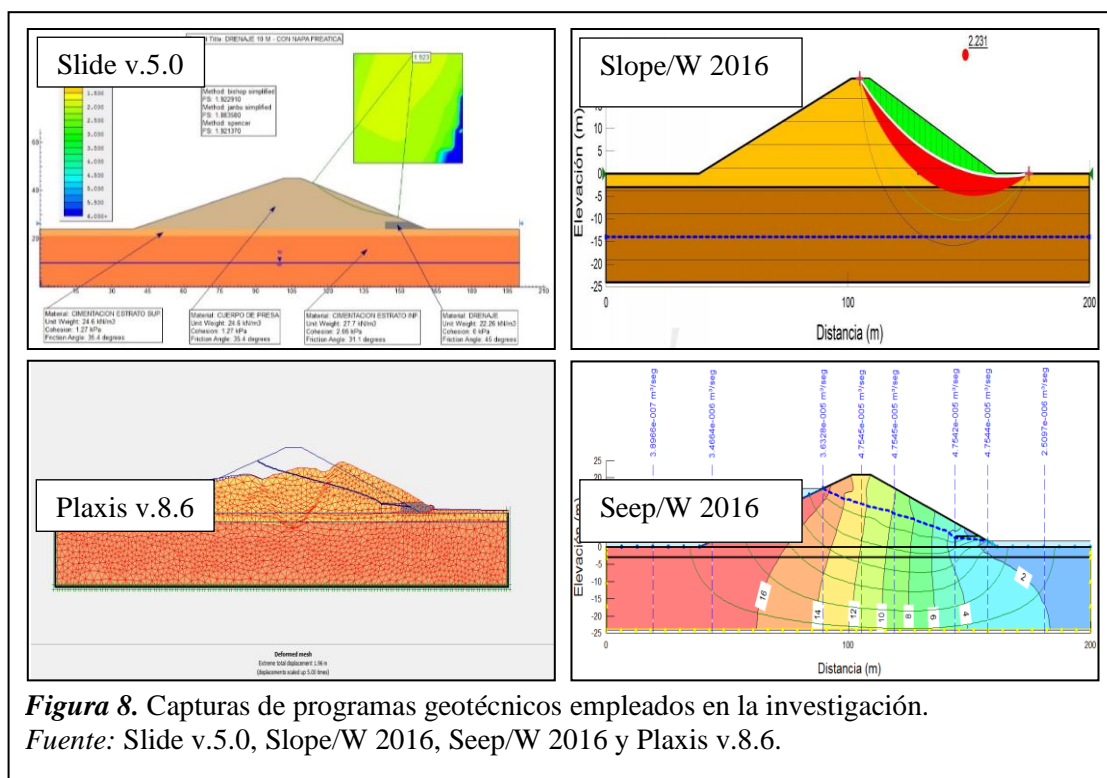


Figura 8. Capturas de programas geotécnicos empleados en la investigación.

Fuente: Slide v.5.0, Slope/W 2016, Seep/W 2016 y Plaxis v.8.6.

Modelamiento hidráulico

El modelamiento físico bidimensional, fue realizado teniendo en cuenta los parámetros del predimensionamiento, logrando obtener los datos que permitieron contrastar los registros obtenidos por principios teóricos y software.

Caudales de infiltración

Se registraron dos caudales, uno excedente en el Rebose N° 1 (para mantener el nivel del tirante aguas arriba) y otro de infiltración en el Rebose N° 2. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

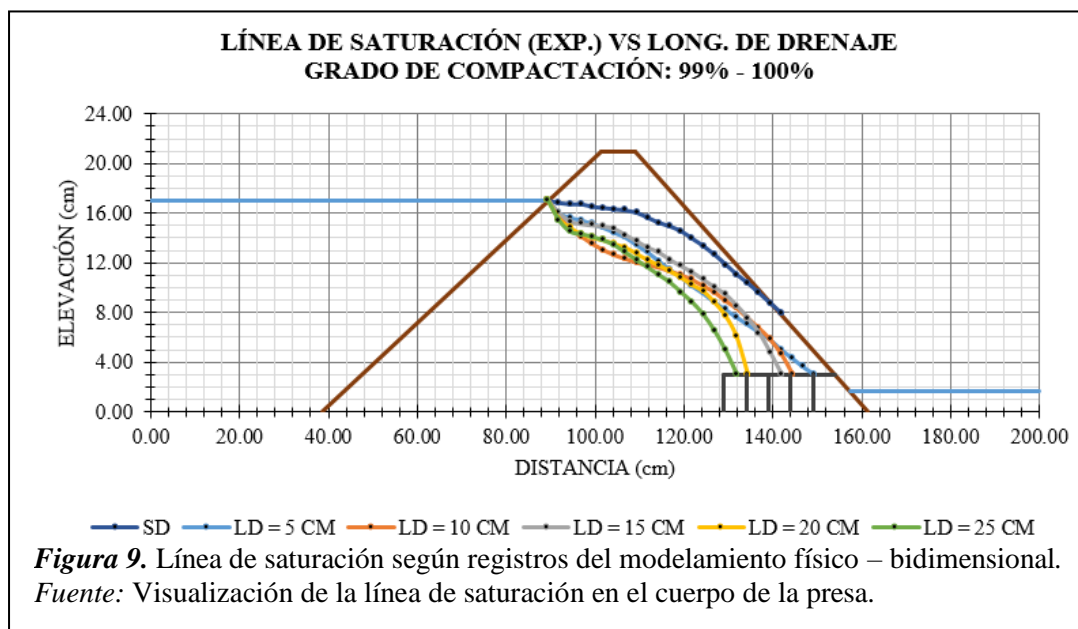
Caudales de infiltración según el modelamiento físico – bidimensional.

LONG. DE DRENAJE	GRADO DE COMPACTACIÓN		CAUDAL EXPERIMENTAL		CAUDAL TOTAL
	ASUMIDO	REAL	REB. N° 1 (EXCEDENTE)	REB. N° 2 (INFILTRACIÓN)	
SIN DRENAJE	100.00%	99.35%	21.08	6.95	28.03
	99.00%	98.50%	20.79	7.02	27.81
	98.00%	97.83%	20.50	7.14	27.64
	97.00%	96.70%	20.47	7.29	27.76
	96.00%	95.83%	19.83	7.32	27.15
LD = 5 CM	100.00%	99.07%	19.38	8.08	27.46
	99.00%	98.54%	19.49	8.26	27.75
	98.00%	97.87%	19.01	8.49	27.50
	97.00%	96.37%	19.24	8.66	27.90
	96.00%	95.69%	19.35	8.72	28.07
LD = 10 CM	100.00%	99.50%	18.40	9.46	27.86
	99.00%	98.70%	17.90	9.69	27.59
	98.00%	97.69%	17.81	9.70	27.51
	97.00%	96.87%	18.13	9.92	28.05
	96.00%	95.52%	17.70	10.13	27.83
LD = 15 CM	100.00%	99.39%	17.21	10.78	27.99
	99.00%	98.44%	17.13	10.87	28.00
	98.00%	97.23%	16.11	11.35	27.46
	97.00%	96.24%	16.30	11.38	27.68
	96.00%	95.65%	15.64	11.77	27.41
LD = 20 CM	100.00%	99.13%	16.79	11.10	27.89
	99.00%	98.10%	16.59	11.26	27.85
	98.00%	97.51%	15.69	11.44	27.13
	97.00%	96.09%	15.83	11.78	27.61
	96.00%	95.38%	15.59	12.09	27.68
LD = 25 CM	100.00%	99.22%	16.50	11.50	28.00
	99.00%	98.37%	16.43	11.62	28.05
	98.00%	97.38%	15.58	11.69	27.27
	97.00%	96.56%	15.51	12.20	27.71
	96.00%	95.70%	15.05	12.38	27.43

Fuente: Elaboración propia

Línea de saturación

En la figura 9 se presenta el trazo de las lecturas piezométricas registradas, para cada condición propuesta en esta investigación: Presa de tierra homogénea sin sistema de drenaje y presa de tierra homogénea con sistema de drenaje de longitud variable (Ld= 5 cm, 10cm, 15cm, 20cm y 25cm).



3.6. Comparativa de resultados

Al tener los registros del modelamiento físico – bidimensional, cálculo teórico y software se logró las siguientes comparativas:

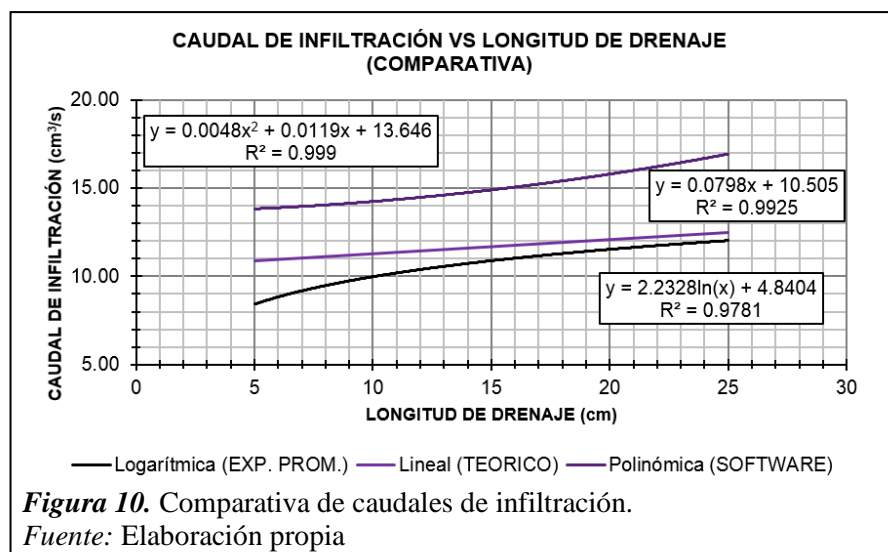
Caudales de infiltración

Tabla 9.

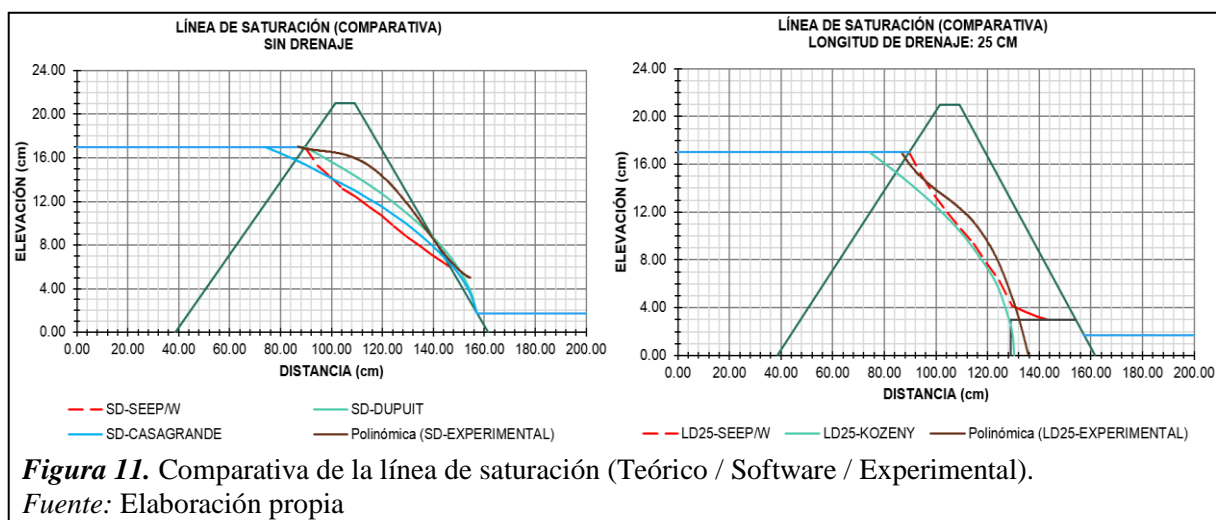
Cuadro comparativo de caudales de infiltración.

LONGITUD DE DRENAJE	CAUDAL DE INFILTRACIÓN (cm ³ /s)		
	EXPERIM. PROMEDIO	TEÓRICO (FÓRMULA)	SOFTWARE (SEEP/W)
SIN DRENAJE	7.14	10.64	12.37
LD = 5CM	8.44	10.96	13.81
LD = 10CM	9.78	11.28	14.26
LD = 15CM	11.23	11.64	14.93
LD = 20CM	11.53	12.07	15.73
LD = 25CM	11.88	12.56	16.95

Fuente: Elaboración propia



Línea de saturación



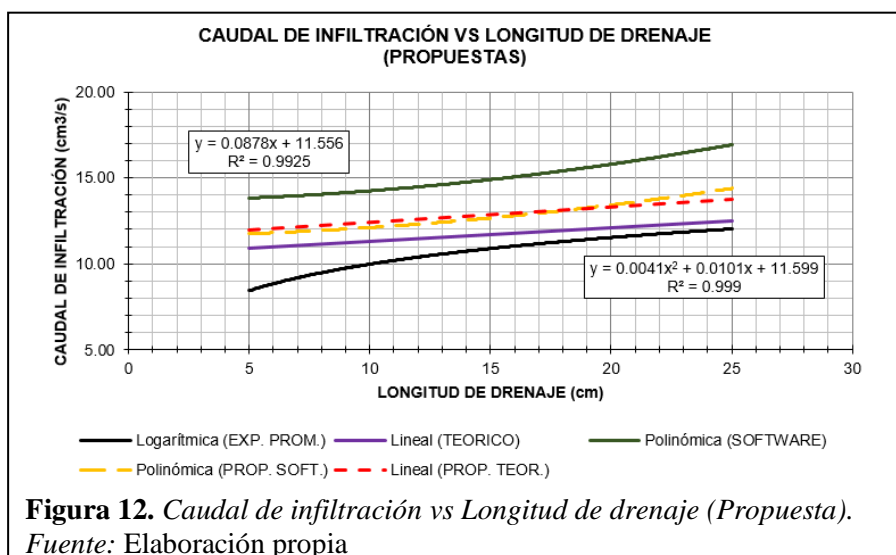
3.7. Propuesta de investigación

Finalmente se presenta a manera de propuesta unos coeficientes de corrección para el resultado del caudal de infiltración obtenido por formulas teóricas y software, tomando como base los datos experimentales. El coeficiente tomado para las fórmulas teóricas es de 1.10, siendo elegido por la proximidad existente con los resultados experimentales y con cierto grado de seguridad para su diseño; mientras que el coeficiente adoptado para el Seep/W es de 0.85 elegido por los valores conservadores arrojados por el software con respecto a los experimentales, lo cual evita el sobredimensionamiento del sistema de drenaje. Los valores afectados por dichos coeficientes varían +/- 4% entre ellos.

Tabla 10
Caudales de infiltración (Propuesta: Teórica / Software).

LONGITUD DE DRENAJE	EXPERIM. PROMEDIO	CAUDAL DE INFILTRACIÓN			
		TEÓRICO	PROP. TEÓRICA (F: 1.10)	SOFTWARE (SEEP/W)	PROP. SOFTWARE (F: 0.85)
5	8.44	10.96	12.06	13.81	11.74
10	9.78	11.28	12.41	14.26	12.12
15	11.23	11.64	12.80	14.93	12.69
20	11.53	12.07	13.28	15.73	13.37
25	11.88	12.56	13.82	16.95	14.41

Fuente: Elaboración propia



4. Discusión

En cuanto al predimensionamiento, la altura de presa estudiada es clasificada como “grande” ($H_t > 15.00$ m.), según lo estipulado por la Dirección General de Obras Hidráulicas (1967), en tanto por su sección se clasifica como presa de “material homogéneo” ya que presenta una muestra de suelo predominante en un porcentaje que oscila entre 93.71% a 98.08% (> 50.00 %) con respecto a la totalidad del cuerpo de presa con presencia de drenaje horizontal.

De los resultados del análisis de estabilidad de taludes, el mayor factor de seguridad crítico le corresponde a la dirección aguas arriba (con valores superiores a 2.24) en comparación con la dirección aguas abajo (cuyos resultados superan el 1.87 pero están por debajo del 2.26). Asimismo, cabe destacar que, en ambos casos, se supera el mínimo factor de seguridad establecido para presas, el cual es 1.50. Los valores obtenidos por el software “Slope/W” son más conservadores que aquellos provenientes del software “Slide”.

Los resultados del comportamiento del flujo de agua, tomo en consideración el caudal de infiltración, la medición piezométrica y el trazo de la línea de saturación, para el caso de presa carente de drenaje y aquella con longitudes variables de drenaje tipo horizontal.

Los valores del caudal de infiltración, indican que este parámetro es directamente proporcional a la longitud de drenaje horizontal. Los resultados teóricos (fórmulas) poseen una mayor aproximación con los datos experimentales del modelamiento hidráulico. Los mayores caudales de infiltración son aquellos proporcionados por el software Seep/W. La presa de material homogéneo, no colapsa en su condición sin drenaje; sin embargo, presenta una considerable altura inestable en el talud aguas abajo (entre 8 – 11 cm desde la superficie de la cimentación), la cual se reduce de forma significativa hasta el drenaje de 5 cm y desaparece totalmente en el drenaje de 10 cm.

Los registros de la línea de saturación para el caso de la presa sin drenaje, tienden a intersectar el talud aguas abajo, generando el reblandecimiento de la cortina lo que conlleva a la falla. Las líneas de saturación experimentales muestran ligeros cambios para una misma longitud de drenaje con respecto a sus diferentes grados de compactación alcanzados.

Los resultados mostrados en las Tablas 6 y 7, evidencian que durante la etapa de construcción, los desplazamientos verticales son superiores frente a los horizontales; sin embargo, en la etapa de funcionamiento ocurre lo contrario. De ambas fases analizadas, los mayores desplazamientos se presentan en la etapa de operación, con valores que oscilan entre los siguientes intervalos: horizontal (1.85 m a 2.01 m) y vertical (1.23 m a 1.47 m). Sin embargo, en los 30 ensayos llevados a cabo en el Laboratorio de Hidráulica USS, no se apreciaron desplazamientos de ningún tipo en la sección transversal de presa estudiada. Lo que confirma que los valores arrojados por el software (Plaxis), representan los desplazamientos críticos a presentarse en la sección analizada; mas no implica que deban apreciarse obligatoriamente durante el modelamiento físico.

5. Conclusiones

La influencia de la longitud de diseño del sistema de drenaje tipo horizontal, radica en un aumento de la estabilidad de taludes (en la sección aguas abajo de la presa durante su etapa de construcción) y caudales de infiltración; asimismo, la reducción de las lecturas piezométricas y línea de saturación. Lo mencionado, fue constatado en el modelamiento físico – bidimensional desarrollado para una presa de material homogéneo no cohesivo y compactado.

Los suelos granulares, procedentes de las canteras La Victoria y Tres Tomas fueron sometidos a un proceso de tamizado y lavado antes de determinar sus propiedades. Finalizados los ensayos, se logró apreciar que a mayor presencia de finos, las muestras aumentan su contenido de humedad (natural y saturado), peso específico, peso unitario (suelto y compactado), máxima densidad seca, cohesión interna y coeficiente de Poisson; y paralelamente disminuyen su porcentaje de absorción, coeficiente de permeabilidad, ángulo de fricción y módulo de elasticidad (propriadamente dicho y edométrico).

La sección transversal de la presa predimensionada bajo los parámetros otorgados por el Manual de la Bureau of Reclamation, tuvo las siguientes características: altura de 21.00 m, ancho de corona de 7.50 m, en la sección aguas arriba el talud es de 1/3.0 y tirante de 17.00 m, mientras que aguas abajo el talud es de 1/2.5 y tirante de 1.70 m. Por otra parte, el drenaje horizontal posee una altura de 3.00 m y longitud variable (5, 10, 15, 20 y 25 m). Según lo anterior, la presa se clasifica como “Grande” por superar los 15.00 m, y de “Material Homogéneo” por presentar una misma muestra de suelo en un porcentaje que oscila entre 93.71% a 98.08% (> 50.00 %) con respecto a la totalidad del cuerpo de presa con presencia de drenaje horizontal.

Los principios teóricos y/o software utilizados para verificar la estabilidad de taludes, flujo de agua y desplazamientos, proporcionaron resultados para la sección transversal de presa en su dimensión real. Con respecto a la estabilidad de taludes, los software (Slide y Slope/W) proporcionaron resultados superiores al mínimo factor de seguridad establecido (1.50) para presas

con drenaje horizontal. En el flujo de agua, los caudales de infiltración obtenidos por fórmulas y software (los cuales son más elevados) resultan ser directamente proporcionales a la longitud de diseño del drenaje horizontal. Finalmente, los desplazamientos evaluados por el software Plaxis se encuentran entre 1.00 a 2.00 m.

La sección de presa modelada en el Equipo de Drenaje, otorgó: caudal de infiltración, lectura piezométrica y trazo de línea de saturación; todas ellas considerando el grado de compactación alcanzado en cada ensayo. El caudal de infiltración es inversamente proporcional al grado de compactación y directamente proporcional a la longitud de drenaje horizontal. Las lecturas piezométricas son inversamente proporcionales con la longitud de drenaje y el grado de compactación. Por último, el trazo de la línea de saturación según los datos recopilados en cada punto de control, define una mejor trayectoria de la línea de tendencia con una condición de entrada de "0.05m" (Grado de aceptación: 70%).

Los caudales de infiltración teóricos (fórmulas) poseen una mayor aproximación con los datos experimentales del modelamiento hidráulico, mientras que los mayores son aquellos proporcionados por el software (Seep/W). Con respecto a las líneas de saturación experimentales, se aprecian ligeros cambios para una misma longitud de drenaje (a diferentes grados de compactación) y un mayor desplazamiento horizontal en el punto de intersección con el drenaje, a comparación de lo obtenido por las fórmulas teóricas y el software (Seep/W); siendo la probable causa de lo mencionado, el ingreso de ciertas partículas finas del cuerpo de la presa en el drenaje.

Los coeficientes de corrección para las fórmulas teóricas y software se basan en los datos experimentales, justificándose en el empleo mayoritario de los mismos frente a los modelos físicos utilizados para el diseño de este tipo de estructuras hidráulicas. Por tal motivo, el coeficiente adoptado para las fórmulas teóricas es de 1.10 y para el Seep/W es de 0.85; a fin de brindar cierta brecha de seguridad sin caer en el sobredimensionamiento del sistema de drenaje (traducido en costos excesivos e innecesarios). Los valores afectados por el coeficiente de corrección (teórico, software), muestran un porcentaje de variación de +/- 4% entre ellos.

6. Referencias

- Cánovas, E. (2014). *Tratado básico de presas*. (7ª edición). Madrid: Garceta. Consultado en: <http://lecturascomplementarias.com/descargar-tratado-basico-de-presas/>.
- Ferrufino, J. y Moreira, S. (2006). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y el aprendizaje de la asignatura de obras hidráulicas II*. Diploma (Licenciatura en Ingeniería Civil). Cochabamba, Bolivia, Universidad Mayor de San Simón.
- Jiménez, J. y De Justo, J. (1975). *Geotecnia y Cimientos I: Propiedades de los suelos y de las rocas*. (2ª edición). Madrid (España): Rueda.
- Juárez, E. y Rico, A. (2011). *Mecánica de Suelos* (Tomo II). México: Limusa.
- Juárez, E. y Rico, A. (1974). *Mecánica de Suelos* (Tomo III). México: Limusa.
- M. Das, B. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (7ª edición). México: Cengage.
- Marsal, R. y Reséndiz, D. (1975). *Presas de tierra y enrocamiento*. (1ª edición). México: Limusa.
- Martínez et al. (2007). *Diseño de pequeñas presas*. (Traducción de la 3ª edición americana). Madrid: Bellisco.
- Terzaghi, K. & Peck, R. (1973). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica* (2ª edición – Versión Española). Barcelona (España): El Ateneo.