

ESTUDIO COMPARATIVO DE DOS MODELOS PARA EL CALCULO DE LA SUBPRESIÓN APLICADO A LA PRESA SANTA CRUZ

Roberto Aguiar Falconí y Edwin Omar Logacho

Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejercito
raquiar@espe.edu.ec

RESUMEN

Se presenta dos modelos para el cálculo de la subpresión, el uno es propuesto por la USACE en el cual se basa en la experiencia de tres Agencias Federales como son Corps, Reclamation y FERC. Dicha propuesta considera que la subpresión actúa el 100% en toda la base de la presa y su cálculo depende a la eficiencia del drenaje, a la longitud de fisuramiento y a la ubicación de la galería de drenaje.

En cambio el segundo modelo se basa en la teoría de los elementos finitos para lo cual se utilizo el software SEEP/W perteneciente al paquete de Geostudio. Para el análisis de la presa Santa Cruz mediante el modelo de elementos finitos se considero un análisis estacionario, un suelo totalmente saturado y isotrópico lo que quiere decir que su permeabilidad es $K_x=K_y$.

ABSTRACT

Two models for uplift calculation on dams are presented, one of them is proposed by USACE, based on the experience of three Federal Agencies, which are Corps, Reclamation and FERC. This proposal considers that 100% of uplift pressure acts on the whole dam base and its calculation depends on the drainage efficiency, the cracking length and the location of the drainage gallery.

On the other hand, the second model is based on the theory of finite elements for which the software SEEP/W was used, it belongs to Geostudio package. In order to analyze Santa Cruz Dam by means of the finite element model, a stationary analysis was taken into account, a completely saturated soil and isotropic, it means that permeability $K_x=K_y$.

1. INTRODUCCIÓN

La subpresión es una presión ascendente, ocasionada por el flujo de agua a este fenómeno también se lo conoce como presión intersticial. En otras palabras en la base de una presa de hormigón la subpresión actúa de abajo hacia arriba, reduciendo el peso efectivo de la estructura y por ende reduciendo la resistencia al corte sobre el macizo rocoso. La subpresión se encuentra presente dentro de juntas, poros y fisuras tanto del suelo como de los cimientos, esto genera en la estructura movimientos diferenciales o totales y por ende un aumento de las infiltraciones. La subpresión varía con el tiempo y está relacionada con condiciones de contorno y permeabilidad del material.

Un modelo representativo de las fuerzas que actúan sobre la base de la presa de hormigón se muestra en la Figura 1

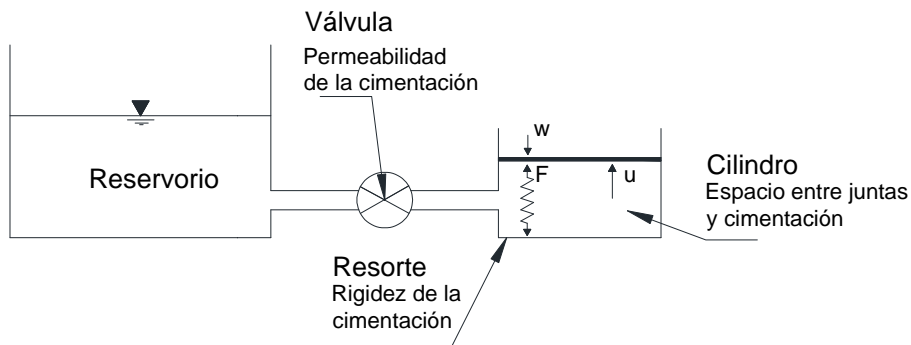


Figura 1 Modelo de subpresión ROGGERI (Fuente: ICOLD EUROPEAN CLUB)

Donde: W = Peso de la Presa, U = Subpresión, F = Reacción de la Cimentación.

1.1. Reducción y Control de la Subpresión

Para la reducción y control de la subpresión hay que tomar en cuenta los siguientes factores.

1.1.1. Pantalla de inyección

Es un elemento el cual no impide que la subpresión se genere, este elemento trata de reducir el caudal de filtración que es generado por el embalse. Es evidente que cuando más impermeable sea la pantalla, menos agua llegará a los drenajes y más fácil será su evacuación. Hay que recordar que la pantalla de inyección se va deteriorando con el transcurso del tiempo esto se debe a que el cemento se va degradando como consecuencia del agua acumulada por CO_2 . El dióxido de carbono se encuentra presente (CO_2) tanto en la atmósfera como en el terreno procedente de la descomposición orgánica, que al mezclarse con el agua forma un ácido carbónico capaz de combatir con el cal del cemento. Por lo tanto cuando mayor sea la superficie de cemento expuesta al agua y cuando mayor sea la capacidad de disolución de esta, más rápida será la degradación de la pantalla.

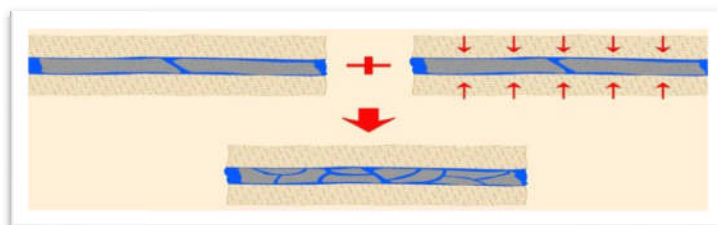


Figura 2 Machaqueo del cemento inyectado y debilitamiento de la pantalla de impermeabilización (Fuente HCC)

1.1.2. Sistema de drenaje

Otro sistema que puede disminuir la subpresión es la red de drenaje. Para ello se considera los siguientes parámetros.

- La profundidad del drenaje debe ser de un tercio de la altura de la presa
- El diámetro debe estar entre 56mm y 200mm.
- El espacio entre un drenaje y otro debe ser 20 veces su diámetro ó 4 metros.

Se recomienda hacer diámetros de 100-120 mm, con estos diámetros se pueden hacer agujeros fácilmente, bien poniendo un tubo como encofrado, ó haciendo por perforaciones posteriores.

Uno de los problemas que trae el sistema de drenaje es la optimización entre la profundidad y la separación para lo cual se ilustra en las siguientes figuras de dos casos en donde los sistemas de drenaje se encuentran muy largos o muy cortos.

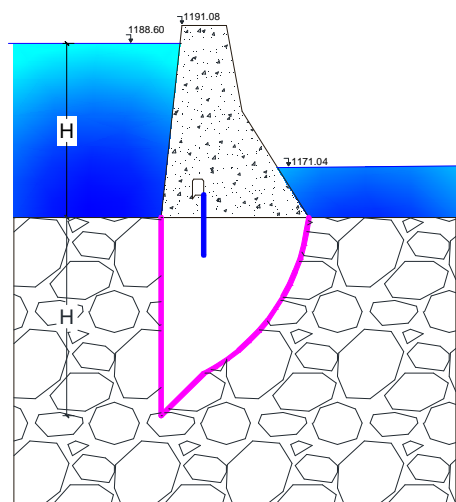


Figura 3 Longitud de drenaje muy corta

Supresión reducida pero con un exceso de perforación.

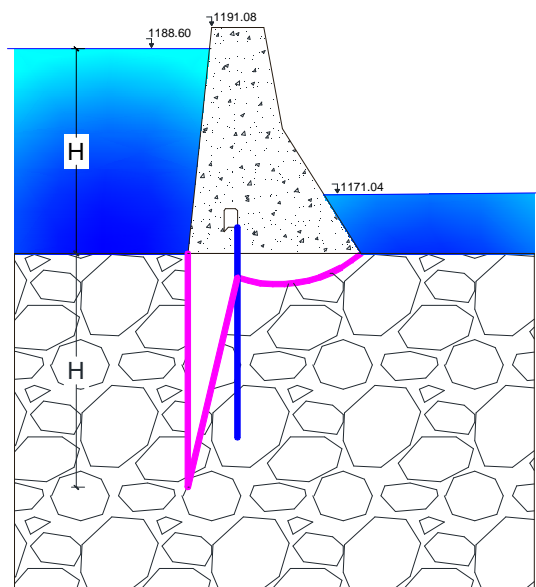


Figura 4 Longitud de drenaje en exceso

1.1.3. Sistema de rehabilitación de drenajes

Un elemento importante para la seguridad y estabilidad de la presa son los drenajes ya que este es el principal responsable del control de la subpresión. El drenaje, además de servir de sistema de control para la estabilidad de la estructura, también deberá impedir la filtración del agua en el cuerpo de la presa, y de esta manera se reduce los valores de subpresión bajo la presa.

Se consideran dos tipos de drenaje:

Dren de pie: está en el cuerpo de la presa, se encuentra comunicado con la galería de drenaje. Su objetivo es mantener la subpresión dentro de los valores admisibles (factor de seguridad a deslizamiento).

Drenaje de cimentación: Se encuentra bajo la cimentación de la presa, tras la pantalla de impermeabilización. Su objetivo es actuar como pozos, capturando el agua que circula en la zona de influencia y para así poder rebajar el valor de la subpresión. Se comprueba que con el transcurso del tiempo los drenajes van perdiendo efectividad pudiendo llegar a resultar total mente inoperables.

2. MODELOS DE SUPRESIÓN

Se consideran dos modelos de para el análisis de la subpresión descritos a continuación:

2.1. Tradicionales

Para este modelo se considero los criterios publicados por la (USACE 2000), en la cual se basa en la experiencia de tres agencia federales las cuales son encargadas del funcionamiento y control de las presas en Estados Unidos, estas tres agencias son:

- Army Corps of Engineers: Cuyo objetivo principal es la protección frente a crecidas, siendo responsable de 615 grandes presas.
- Bureau of Reclamation: Se encarga del abastecimiento de agua a 17 estados del oeste de los Estados Unidos, es responsable de 350 grandes presas.
- Federal Energy Regulatory Commission: Se encarga de supervisar aquellas presas no estables encaminadas a la generación de energía hidroeléctrica, tiene a su cargo 2.400 grandes presas.

Las tres agencia federales consideran la subpresión como la resultante del nivel de agua arriba y aguas abajo a través de una sección transversal dentro de la presa. Para el cálculo de la subpresión las tres agencias presenta los siguientes modelos.

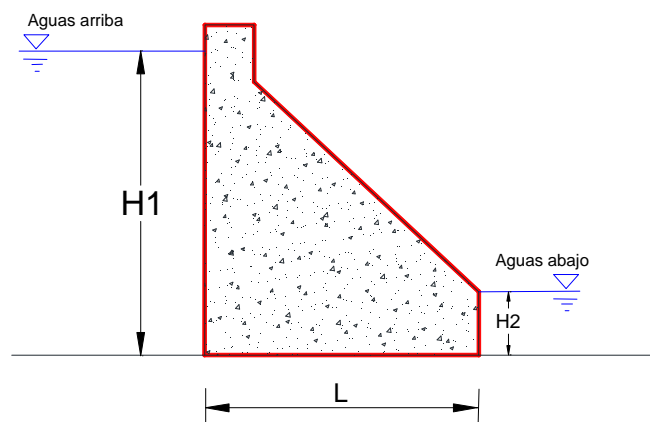


Figura 5 Subpresión sin sistema de desagüe (fuente USACE)

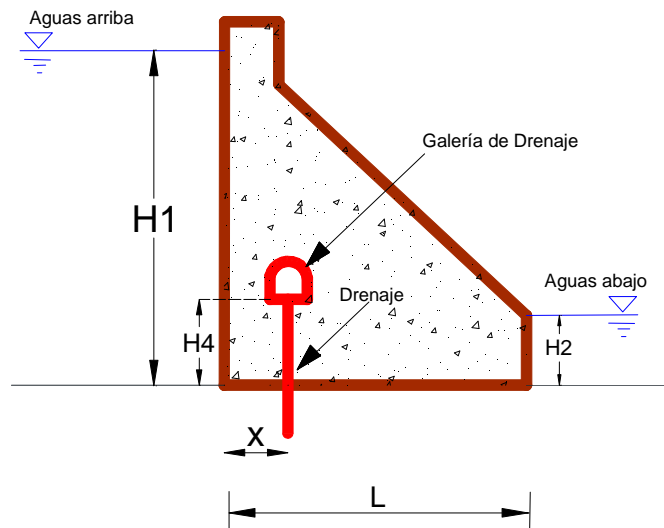


Figura 6 Subpresión con sistema de drenaje (Fuente USACE)

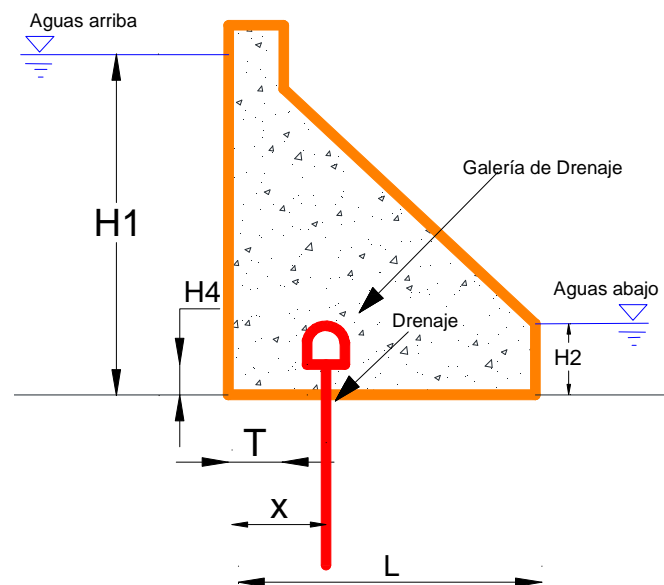


Figura 7 Subpresión con sistema de drenaje y fisuramiento (Fuente USACE)

2.1.1. Criterio propuesto por ARMY CORPS OF ENGINEERS

Corps considera que la subpresión actúa el 100 por ciento en toda la base de la presa. Existe una gradiente hidráulica entre el embalse superior e inferior desarrollándose entre el talón (aguas arriba) y el dedo (aguas abajo). La distribución de la presión del agua ó subpresión depende de algunos factores entre ellos tenemos:

- Eficiencia de los desagües
- Pantalla de inyección
- Características geológicas (permeabilidad, fisuras etc.)

Corps recomienda una eficiencia de drenaje $E=0.50$

2.1.2. Criterio propuesto por RECLAMATION

Reclamation considera el valor de la eficiencia del drenaje (E) entre 0 hasta 0.66, esto se basa en una recopilación de perfiles de muchas presas existentes. Esta fuga se basa en la eficiencia de los drenajes ó

que los drenajes se encuentren en total funcionamiento, las cortinas de drenaje se deben colocar a 3 m cada una, debe tener mínimo un diámetro de 76 mm y ubicado a un 5 por ciento del embalse.

Se presenta los siguientes casos que considera Reclamation

2.1.3. Criterio propuesto por FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION (FERC)

FERC asume la distribución de la subpresión de la misma forma que hace Corps. Sin embargo existe disposiciones especiales con respecto a los desagües estos deben estar al 5 por ciento de la altura del embalse desde la cara de presa aguas arriba.

- Sin desagües

Asume al igual que Corps es decir la subpresión se mantiene con un valor constante y estático.

- Con drenaje

FERC se basa en las medidas piezométrica para la eficiencia del drenaje. La eficiencia del drenaje sobre la base de datos piezométricas en condiciones de carga no necesariamente pueden extrapolarse a otro estado de carga. Es decir la medida de drenaje de una carga efectiva no podría ser asumida por una carga de inundación, si es menor la carga de inundación prevé las fisuras en la base. Además, la formación de los drenajes o galerías deben ser accesibles y fáciles de limpiar para así poder controlar la eficiencia del drenaje.

La siguiente nomenclatura es utilizada por las tres agencias Federadas:

Donde

H_1 =altura del embalse, H_2 = altura aguas abajo, H_4 = altura de la galería medida desde la base de la presa

x = distancia de separación de la galería con respecto a la cara aguas arriba de la presa,

T = longitud de fisuramiento, L = longitud de la base de la presa, E = eficiencia del drenaje para cada uno de las tres agencias federales su valor es diferente, $K= 1-E$.

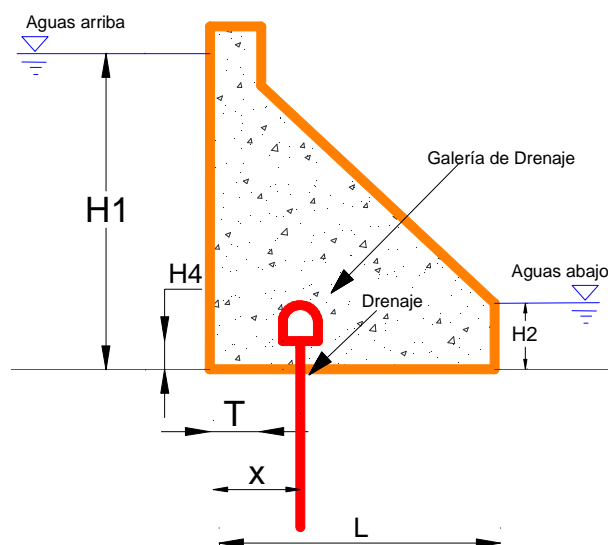


Figura 8 Nomenclatura para el cálculo de la subpresión (Fuente USACE)

En las siguientes tablas se presenta un resumen de los modelos propuestos por la USACE

Tabla 1 Modelos propuestos por Corps

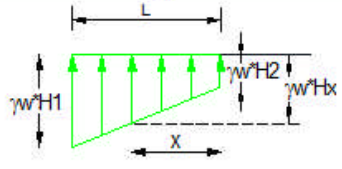
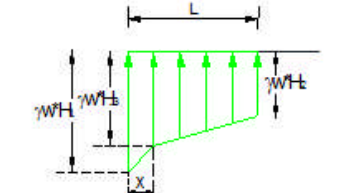
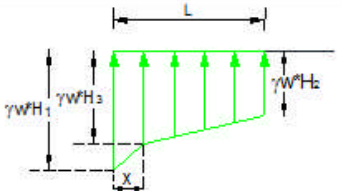
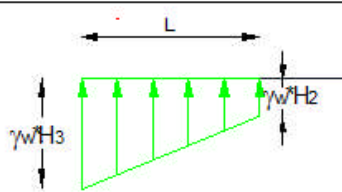
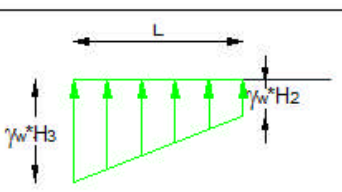
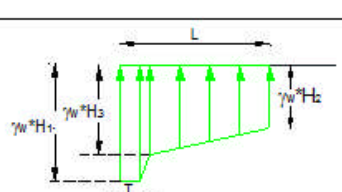
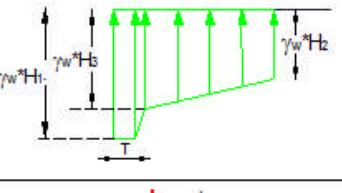
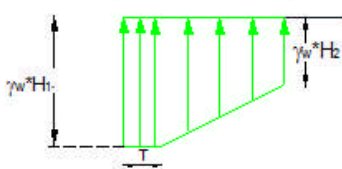
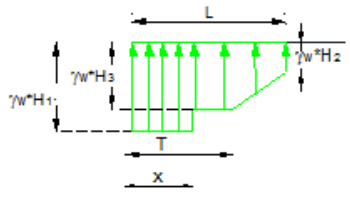
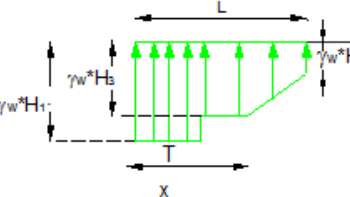
	Cod	Condición	Figura	Formula
Corps	1	Sin sistema de drenaje		$H_x = H_2 + \frac{x}{L}(H_1 - H_2)$
	2	Con sistema de drenaje $H_4 > H_2$		$H_3 = K \left[(H_1 - H_2) \frac{(L-x)}{L} + H_2 - H_4 \right] + H_4$
	3	Con sistema de drenaje $H_4 < H_2$		$H_3 = K(H_1 - H_2) \frac{(L-x)}{L} + H_2$
	4	Con sistema de drenaje $x \leq 0.05 * H_1$ & $H_4 > H_2$		$H_3 = K(H_1 - H_4) + H_4$
	5	Con sistema de drenaje $x \leq 0.05 * H_1$ & $H_4 < H_2$		$H_3 = K(H_1 - H_2) + H_2$
	6	Con sistema de drenaje $H_4 > H_2$ y $T < X$		$H_3 = K \left[(H_1 - H_2) \frac{L-x}{L-T} + H_2 - H_4 \right] + H_4$
	7	Con sistema de drenaje $H_4 < H_2$ y $T < X$		$H_3 = K \left[(H_1 - H_2) \frac{L-x}{L-T} \right] + H_2$
	8	Con sistema de drenaje $H_4 > H_2$ y $T > X$		-

Tabla 2 Modelos propuestos por Reclamation

	Cod	Condición	Figura	Formula
Reclamation	A	Con sistema de drenaje $H_2 > H_4$		$H_3 = (H_1 - H_2)K + H_2$
	B	Con sistema de drenaje $H_2 > H_4$ & H_3 max		$H_{3MAX} = \frac{(L - X)}{L} (H_1 - H_2) + H_2$
	C	Con sistema de drenaje $H_4 > H_2$		$H_3 = (H_1 - H_4) * K + H_4$
	D	Con sistema de drenaje $H_4 > H_2$ & H_3 max		$H_{3MAX} = \frac{(L - X)}{L} (H_1 - H_2) + H_2$
	E	Con sistema de de drenaje $H_2 > H_4$ y $T < X$		$H_3 = \frac{(L - X)}{(L - T)} (H_1 - H_2) + H_2$
	F	Con sistema de de drenaje $H_2 > H_4$ y $T > X$		-
	G	Con sistema de de drenaje $H_4 > H_2$ y $T < X$		$H_3 = \frac{(L - X)}{(L - T)} (H_1 - H_2) + H_2$
	H	Con sistema de de drenaje $H_4 > H_2$ y $T > X$		-

Tabla 3 Modelos propuestos por FERC

	Cod	Condición	Figura	Formula
FERC	i	Con sistema de drenaje $H_4 > H_2$ & $T > X$		$H_3 = K(H_1 - H_4) + H_4$
	ii	Con sistema de drenaje $H_4 < H_2$ & $T > X$		$H_3 = K(H_1 - H_2) + H_2$

2.2. Elementos Finitos

Muchos de los problemas geotécnicos se presentan en el movimiento del agua que llena los poros y diaclasas del terreno, los cuales presenta ciertas características.

- Primero: Se refiere al caudal de agua que circula.
- Segundo: Se refiere a la variación del estado tensional del suelo, esto se refiere a que el agua que circula genera una presión intersticial lo cual genera tensiones en el terreno y por tanto afecta su deformación y estabilidad.
- Tercero: Alteraciones por el paso del agua, los cuales pueden ser físicas, químicas y biológicas. Como el producto de esto se puede citar la erosión que es el arrastre de partículas del suelo.

La presión intersticial que existe en un punto del suelo con el agua, con frecuencia no es la que corresponde a las condiciones hidrostáticas, que también se considera el flujo de la misma a través de los poros.

2.2.1. Software SEEP/W

Es un programa capaz de modelar geometrías bidimensionales para problemas que van desde casos simples de flujo en medios porosos saturados para un régimen estacionario a análisis más sofisticados de flujo saturado-no saturado.

SEEP/W es parte de Geostudio de la empresa Geoslope Internacional Ltd., dentro de Geostudio existen varios programas orientados a la solución de la ingeniería geotécnica. En este trabajo se utilizó la versión 2007 de SEEP/W. El programa resuelve la ecuación de Richard mediante el método de Galerkin de residuos ponderados generando una malla de elementos finitos que estos pueden ser 4 lados ó triangulares.

Ecuación del elemento finito

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0$$

1

La ecuación de elementos finitos que resulta de la aplicación de método de Galerkin de peso residual de la ecuación diferencial 16 se convierte en:

$$\tau \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \{H\} + \tau \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \{H\}, t = q\tau \int_L (\langle N \rangle^T) dL \quad 2$$

Donde: τ = espesor del elemento, $[B]$ = Matriz de la gradiente, $[C]$ = Elemento de la matriz de conductividad hidráulica, $\{H\}$ = vector nodal en la cabeza, $\langle N \rangle$ =vector de la función de la interpolación o la forma, q = flujo de la unidad a través del borde del elemento, t =tiempo, λ = plazo de almacenamiento de una filtración transitoria es igual a $m_w \gamma_w$, m_w = pendiente de la curva de almacenamiento, A = designación para la sumatoria del área de un elemento L = denominación para la suma sobre el borde de un elemento.

En forma abreviada, la ecuación de elementos finitos se expresa como:

$$[K]\{H\} + [M]\{H\}, t = \{Q\} \quad 3$$

Donde: K =Matriz Característico del elemento, $[M]$ =matriz de masa del elemento, $\{Q\}$ = vector de flujo aplicado al elemento.

La ecuación 17 es la ecuación general de elementos finitos para un análisis de filtración transitoria. Para un análisis de estado estacionario, el cual se considera en este artículo $\{H\}t = 0$, lo que quiere decir que no es un función del tiempo, dada así la ecuación de elementos finitos.

$$[K]\{H\} = \{Q\} \quad 4$$

Donde: K = matriz de rigidez del suelo, H =vector nodal (valor desconosido), Q =vector de flujo aplicado al elemento depende de las condiciones de borde.

De esta manera el software SEEP/W cálculo de las presiones en los elementos finitos.

3. APLICACIÓN A LA PRESA SANTA CRUZ

Para el cálculo de la subpresión mediante los modelos tradicionales y de elementos finitos se considera las siguientes dimensiones y características de la presa.

3.1. Modelo tradicional

Para la aplicación de la subpresión en la presa Santa Cruz, considerando los diferentes casos que propone la USACE. Se realizo el cálculo de la subpresión tomando en cuenta el nivel máximo normal de operación cuya cota es 1188.60 aguas arriba y 1171.02 aguas abajo, esta consideración se basa en que existe mayor presión en el embalse al inicio de la vida útil de la presa. Se asume una efectividad del drenaje $E=0.50$ que es lo que recomienda Corps. En la figura 22 se indica las dimensiones de la Presa Santa Cruz.

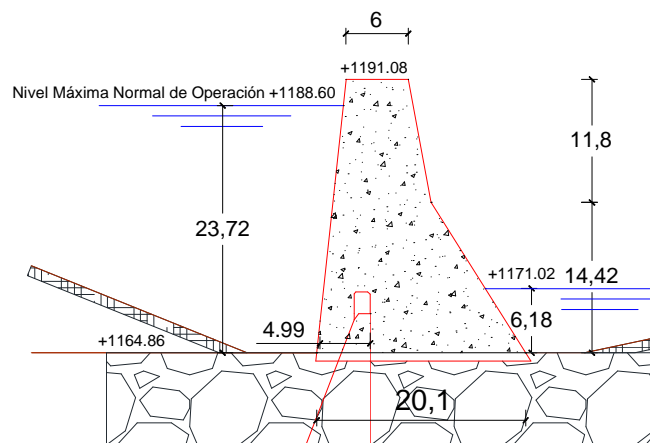


Figura 9 Dimensiones de la Presa Santa Cruz

3.1.1. Modelos propuestos por Corps

a) Sin sistema de drenaje

Se aplica la cod 1 para determinar la profundidad del agua con la cual afecta en la base de la presa. En donde el valor de X indica el lugar en donde afecta el valor de la subpresión.

La fuerza de la subpresión que afecta a la base de la presa sin sistema de drenaje es $F_{sub} = 302.8 \text{ Tn}$, esta fuerza actúa en el centro de gravedad de la figura 23.

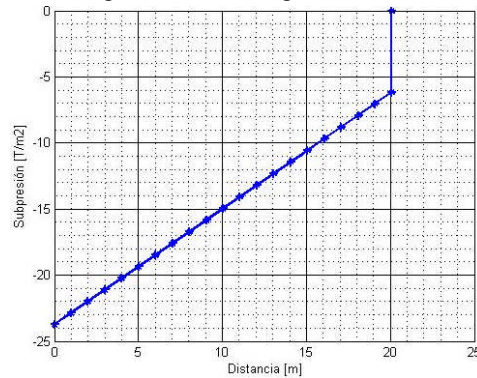


Figura 10 Subpresión sin sistema de drenaje

- Con sistema de drenaje

b) Cuando $H_4 > H_2$

Aplicamos la cod 2 considerando el valor de $E = 0.50$ y $x = 4.99 \text{ m}$

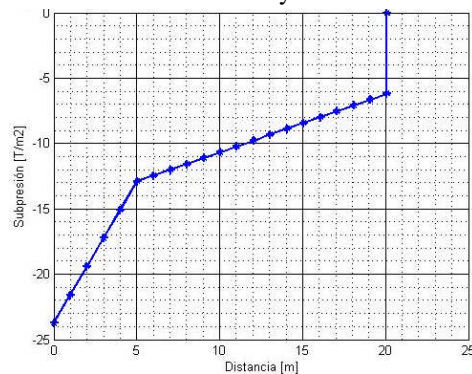


Figura 11 Subpresión con sistema de drenaje cuando $H_4 > H_2$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es $F_{sub} = 240.9 \text{ Tn}$

c) Cuando $H_4 < H_2$

Aplicamos la cod 3 considerando el valor de $E = 0.50$ y $x = 4.99 \text{ m}$

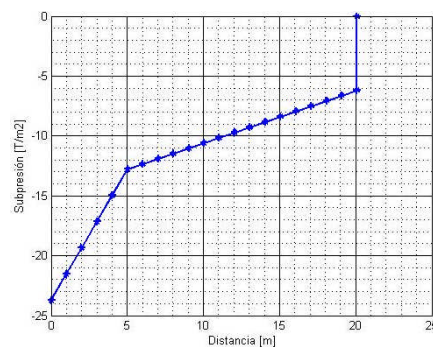


Figura 12 Subpresión con sistema de drenaje cuando $H_4 < H_2$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es $F_{sub} = 238.9 \text{ Tn}$

- Con sistema de drenaje y la galería de drenaje no debe sobrepasar la distancia $X \leq 0.05H_1$
- d) Cuando $X \leq 0.05H_1$ & $H_4 > H_2$

En donde $X= 5.46$ m y $0.05*23.72=1.20$ m

$$5.46 \leq 1.20$$

Por lo tanto no cumple la condición pero a manera de ejemplo se modifica la longitud de $X=1.20$ m como se indica en la siguiente figura 26.

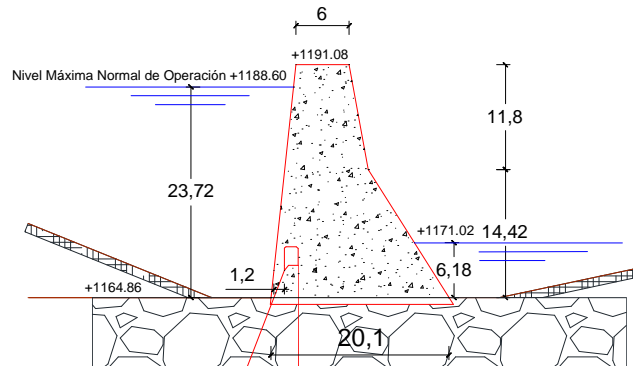


Figura 13 Subpresión con sistema de drenaje cuando $X < 0.05 * H_1$

Con las nuevas dimensiones aplicamos la cod 4 donde $E=0.50$ y $X=1.20$ m

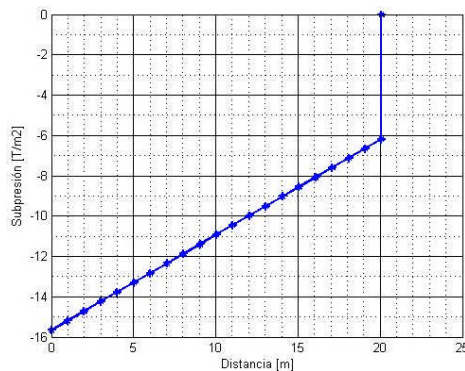


Figura 14 Subpresión con sistema de drenaje cuando $X \leq 0.05 * H_1$ & $H_4 > H_2$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es $F_{sub} = 220.0$ Tn

- e) Cuando $X \leq 0.05H_1$ & $H_4 < H_2$

Aplicamos la cod 5 en donde $E=0.50$ y $X=1.20$ m

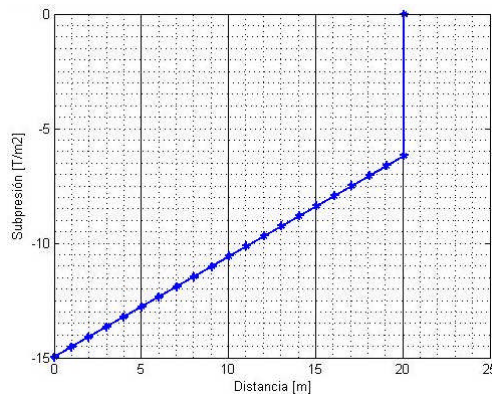


Figura 15 Subpresión con sistema de drenaje cuando $X \leq 0.05 * H_1$ & $H_4 < H_2$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es $F_{sub} = 211.9$ Tn

- Con sistema de drenaje y se considera que existe fisuramiento (T)
- f) Cuando $H_4 > H_2$ & $T < X$

Calculo de la longitud de agrietamiento T

Para lo cual es necesario saber si existe fisuramiento en la base de la presa y para ello se aplica la ecuación 5.10.

$$e \leq \frac{B}{6}$$

$$e = \frac{M}{N} \quad 5$$

Donde: B=base de la presa, e= excentricidad, M=Momento, N=Normal

Para la presa Santa Cruz se tienen los siguientes datos

$$4.52 \leq \frac{20.1}{6}$$

$$4.52 \leq 3.35$$

Por lo tanto existe fisuramiento

Calculo de valor de T

Determinamos la longitud sin fisuramiento

$$Bf = (d - L) * \frac{H_2}{H_1} + L \quad 6$$

Donde: d= longitud de la cresta de la presa, L=base de la presa, H1 y H2= altura del embalse aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

$$Bf = (6 - 20.1) * \frac{6.18}{23.74} + 20.1$$

$$Bf = 16.42$$

Aplicamos la ecuación 5.13

$$X'_0 = -\frac{Bf^2}{12 * e} \quad 7$$

$$X'_0 = -\frac{(16.42)^2}{12 * 4.52}$$

$$X'_0 = -4.97$$

Determinamos el nuevo valor de B_{new}

$$B_{new} = \frac{1}{2} * B - X'_0 \quad 8$$

$$B_{new} = \frac{1}{2} * 20.1 - (-4.97)$$

$$B_{new} = 15.02$$

Y por ultimo determinamos el valor de T

$$T_{new} = B - B_{new}$$

$$T_{new} = 5.08 \quad 9$$

Por lo tanto el valor de T_{new} es mayor que $X=4.99$ m.

Para algunos casos de Corps se asume el valor de $T_{asumida} = 1.69$ como manera de ejemplo.

Aplicamos la cod 6 en donde $E=0.50$, $X=4.99$ m y $T_{asumida} = 1.69$

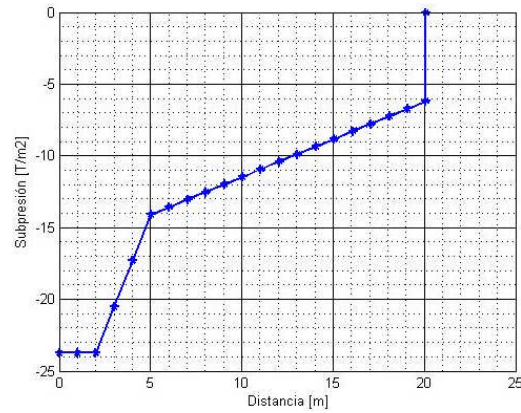


Figura 16 Subpresión con sistema de drenaje cuando $H_4 > H_2$ & $T < X$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es **$F_{sub} = 261$ Tn**

g) Cuando $H_4 < H_2$ & $T < X$

Aplicamos la cod 7 en donde $E=0.50$, $X=4.99$ m y $T_{asumida} = 1.69$

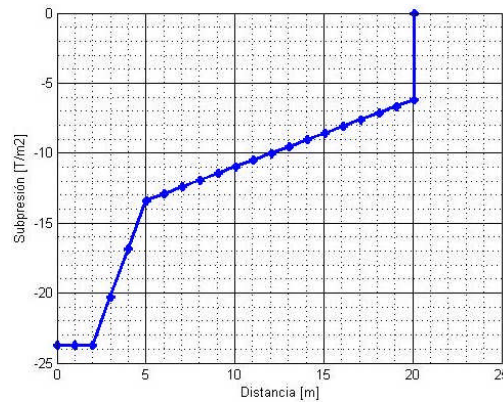


Figura 17 Subpresión con sistema de drenaje cuando $H_4 < H_2$ & $T < X$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es **$F_{sub} = 252$ Tn**

h) Cuando $H_4 > H_2$ & $T > X$

Donde $E=0.50$, $X=4.99$ m y $T_{new} = 5.08$

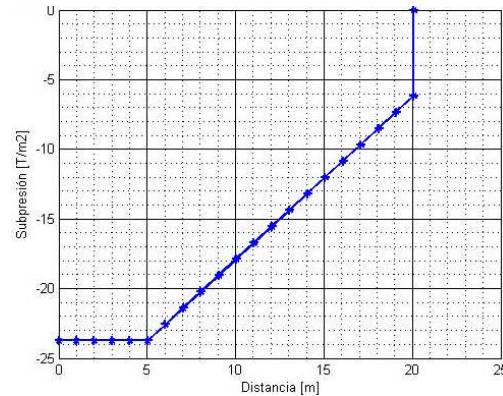


Figura 18 Subpresión con sistema de drenaje cuando $H_4 > H_2$ & $T > X$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es **$F_{sub} = 347.8$ Tn**

3.1.2. Modelos propuestos por RECLAMATION

- Con sistema de drenaje
 - i) Cuando $H_2 > H_4$

Aplicamos la cod A considerando el valor de $E=0.66$ y $x=4.99$ m

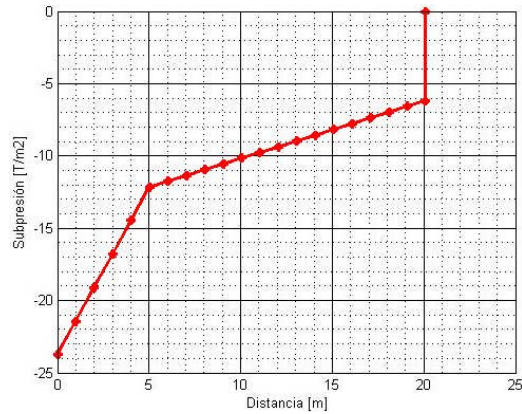


Figura 19 Reclamation con sistema de drenaje cuando $H_2 > H_4$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es **$F_{sub} = 230.8$ Tn**

- j) Cuando $H_2 > H_4$ & H_{3max}

Aplicamos la cod B considerando el valor $x=4.99$ m

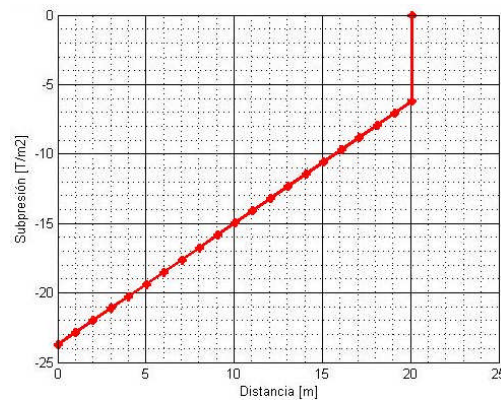


Figura 20 Reclamation con sistema de drenaje cuando $H_2 > H_4$ & H_{3max}

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es **$F_{sub} = 302.8$ Tn**

- k) Cuando $H_4 > H_2$

Aplicamos la cod C considerando el valor $E=0.66$ y $x=4.99$ m

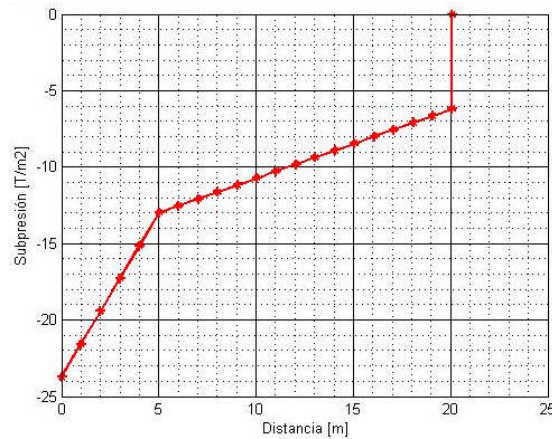


Figura 21 Reclamation con sistema de drenaje cuando $H_4 > H_2$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es **$F_{sub} = 240.9$ Tn**

l) Cuando $H_4 > H_2$ & H_{3max}

Aplicamos la cod D considerando el valor $E=0.66$ y $x=4.99$ m

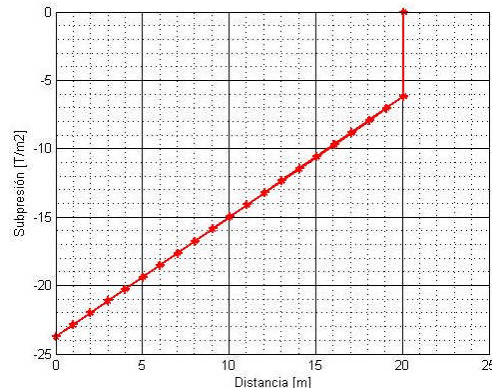


Figura 22 Reclamation con sistema de drenaje cuando $H_4 > H_2$ & H_{3max}

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es $F_{sub} = 302.8$ Tn

- Con sistema de drenaje y se asume que existe fisuramiento (T)

m) Cuando $H_2 > H_4$ & $T \geq X$

Desarrollamos la figura cod F

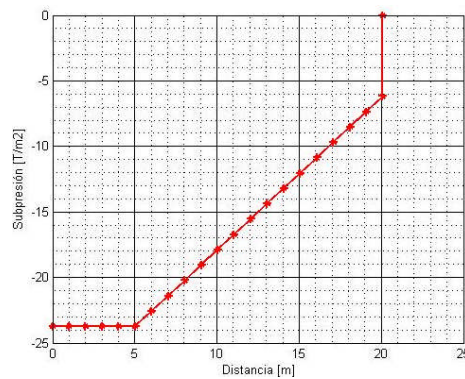


Figura 23 Reclamation con sistema de drenaje cuando $H_2 > H_4$ & $T > X$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es $F_{sub} = 347.8$ Tn

n) Cuando $H_4 > H_2$ & $T < X$

Aplicamos la cod G considerando el valor $X_{asumido}=4.99$ m y $T_{asumido}= 1.69$ m

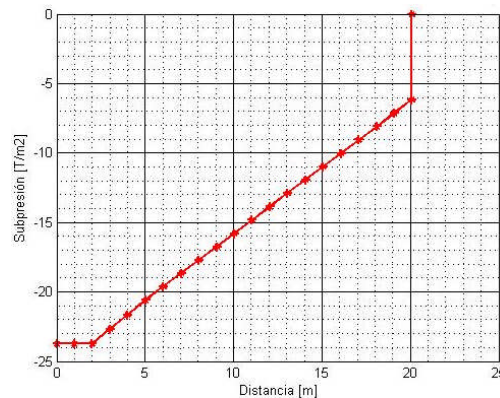


Figura 24 Reclamation con sistema de drenaje cuando $H_4 > H_2$ & $T < X$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es $F_{sub} = 320.8$ Tn

3.1.3. Modelo propuesto por FERC

Los cálculos son idénticos a los generados por Corps, la única diferencia es que cuando existe fisuramiento el cálculo de la subpresión lo considera de la siguiente manera.

o) Cuando $H_4 > H_2$ & $T \geq X$

Aplicamos la cod i considerando el valor $T = 5.08$ m

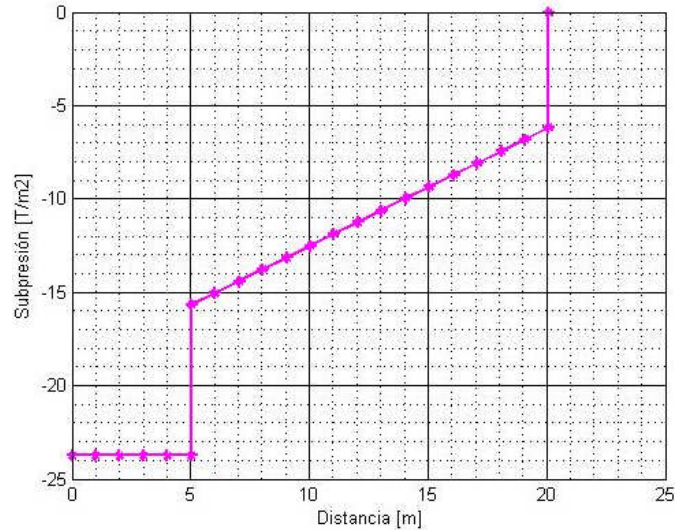


Figura 25 Subpresión con sistema de drenaje cuando $H_4 > H_2$ & $T \geq X$

p) Cuando $H_2 > H_4$ & $T \geq X$

Aplicamos la cod ii considerando el valor $T = 5.08$ m

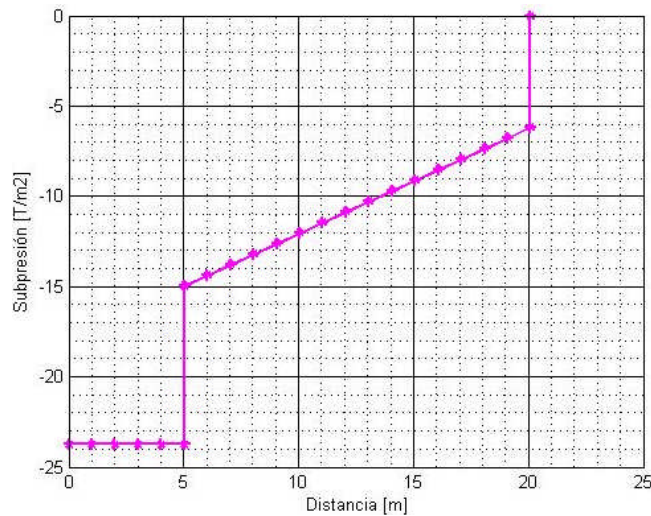


Figura 26 Subpresión con sistema de drenaje cuando $H_2 > H_4$ & $T \geq X$

La fuerza de subpresión que afecta a la base de la presa es $F_{sub} = 285.6 Tn$

3.2. Modelo mediante elementos finitos

En cambio para el análisis mediante elementos finitos se considera los siguientes parámetros.

- Es un suelo totalmente saturado
- Se considera un suelo isotrópico es decir la permeabilidad $K_x = K_y = K$
- Se asume que solo existe un solo estrato es decir un solo tipo de suelo
- El valor de la permeabilidad $K = 1e^{-9}$ m/seg.

Para el modelo de elementos finitos realizamos tres modelos los cuales se describen a continuación

3.2.1. Modelo 1 (Sin sistema de drenaje)

En el presente modelo se realiza un análisis de la subpresión sin considerar la cortina de inyección y la cortina de drenaje.

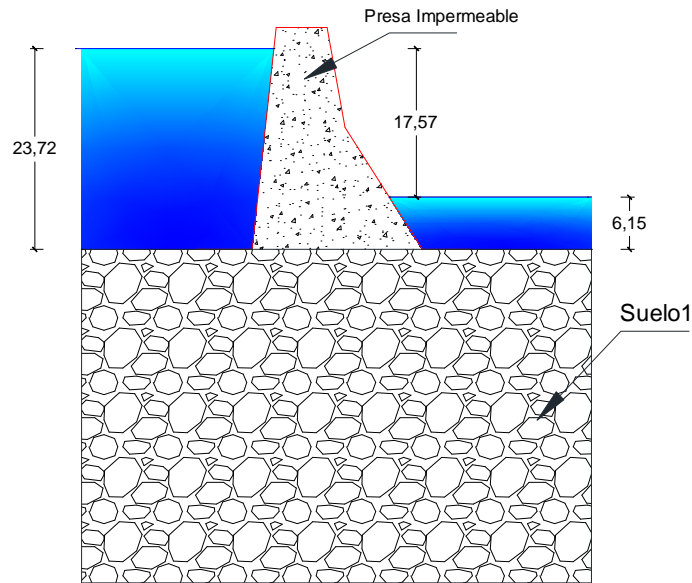


Figura 27 Modelo 1 (flujo libre)

Para el análisis del modelo 1 se considera elementos finitos cuadriláteros, el número de elementos finitos que ingreso en la malla es de 294 elementos finitos y 330 nodos. Se asumieron 3 condiciones de borde descritas a continuación.

- Presión del embalse Head (H)= 63.05 m
- Aguas Abajo Head(H)=45.48 m
- Impermeable Total Flux (Q) = 0 $\frac{m^3}{seg}$

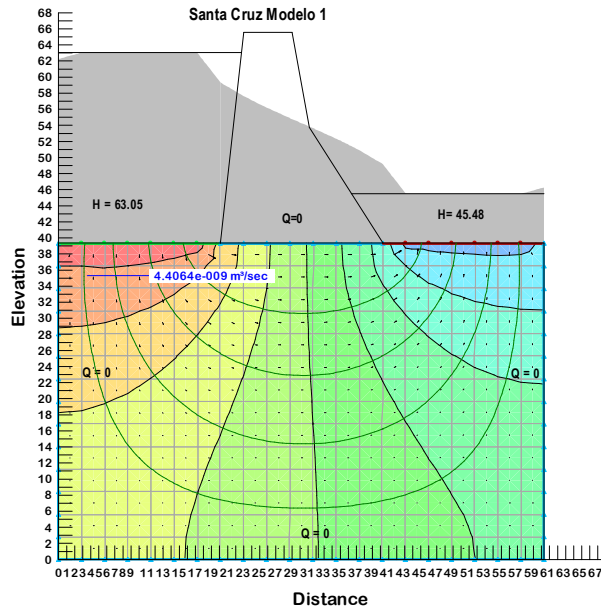


Figura 28 Solución del modelo 1

En la figura 6.36 se presenta las líneas equipotenciales y las líneas de flujo, también se calculo el caudal que transcurre baja la presa $Q = 4.4064 \times 10^{-9} \frac{m^3}{seg}$, también se indica las condiciones de borde.

En la figura 42 se presenta la subpresión que afecta en la base de la presa del modelo 1 en KPa vs m.

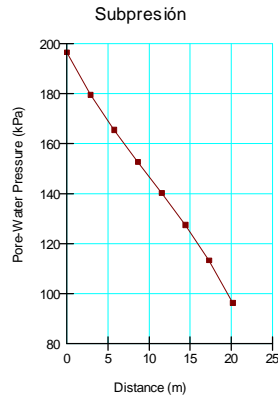


Figura 29 Subpresión del modelo 1 [KPa vs m]

El modelo 1 presenta una fuerza de Supresión de **301.32 Tn**

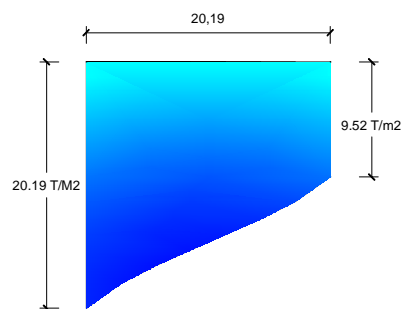


Figura 30 Subpresión del modelo 1 $\left[\frac{Tn}{m^2} \text{ vs } m \right]$

3.2.2. Modelo 2 (con cortina de inyección)

Para el análisis de la subpresión se considera que existe la cortina de inyección.

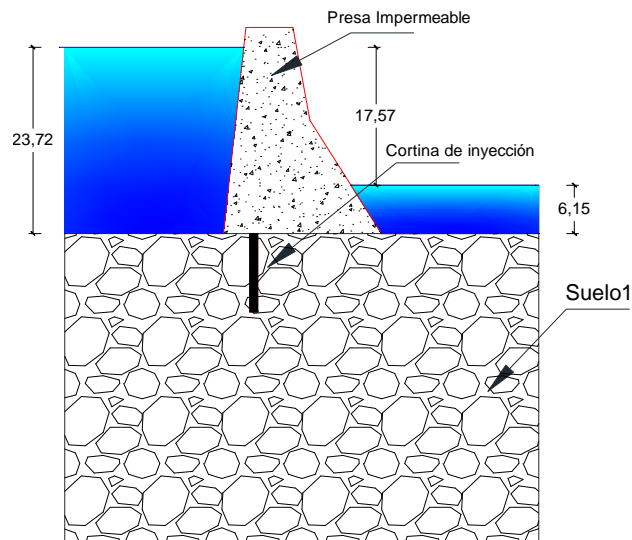


Figura 31 Modelo 2 (con cortina de drenaje)

Para el análisis del modelo 2 se considera elementos finitos triangulares, el número de elementos finitos que ingreso en la malla es de 359 elementos finitos y 209 nodos. Se asumieron 3 condiciones de borde descritas a continuación.

- Presión del embalse Head (H)= 63.05 m
- Aguas Abajo Head(H)=45.48 m
- Impermeable Total Flux (Q) = 0 $\frac{m^3}{seg}$

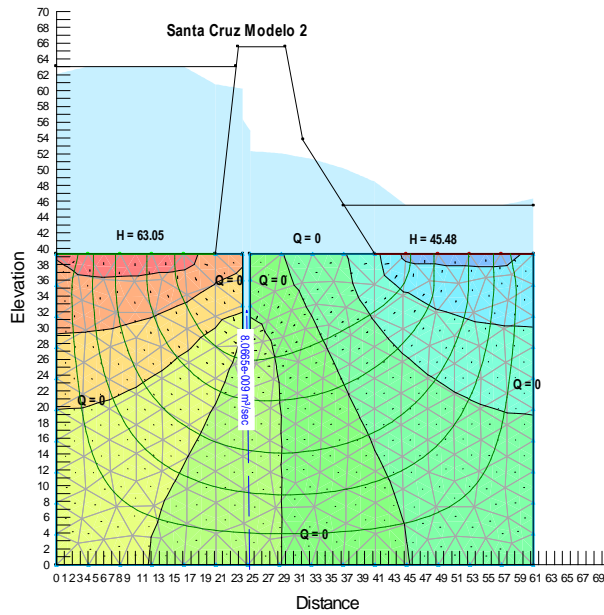


Figura 32 Solución del modelo 2

En la figura 6.40 se presenta las líneas equipotenciales y las líneas de flujo, también se calculo el caudal que transcurre baja la presa $Q = 8.0665 \text{ e}^{-9} \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$, también se indica las condiciones de borde.

En la figura 6.41 se presenta la subpresión que afecta en la base de la presa del modelo 1 en KPa vs m.

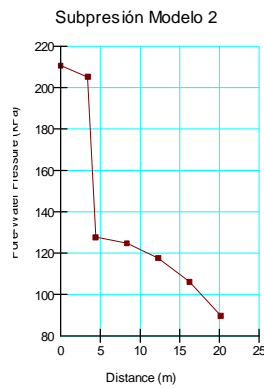


Figura 33 Subpresión del modelo 2 [KPa vs m]

El modelo 2 presenta una fuerza de Supresión de **272.11 Tn**

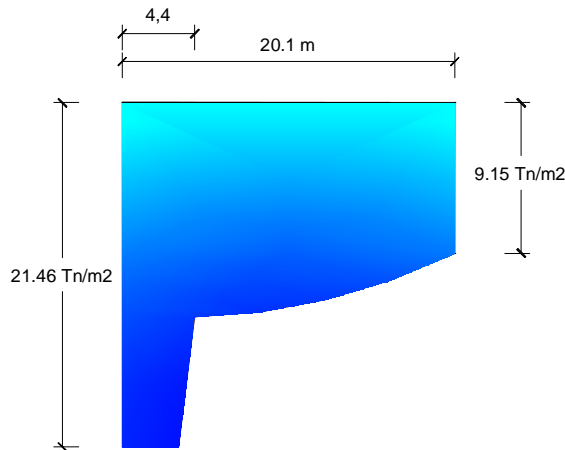


Figura 34 Subpresión del modelo 2 $\left[\frac{\text{Tn}}{\text{m}^2} \text{ vs } \text{m} \right]$

3.2.3. Modelo 3 (Con sistema de drenaje)

Para el cálculo de la subpresión se considera que existe un sistema de drenaje

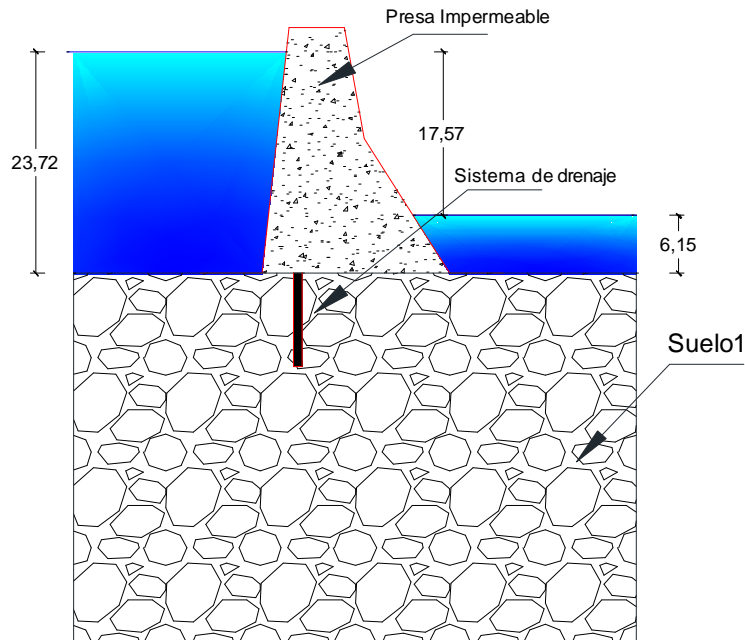


Figura 35 Modelo 3 (con sistema de drenaje)

Para el análisis del modelo 3 se considera elementos finitos rectangulares, el número de elementos finitos que ingreso en la malla es de 353 elementos finitos y 203 nodos. Se asumieron 4 condiciones de borde descritas a continuación.

- Presión del embalse Head (H)= 63.05 m
- Aguas Abajo Head(H)=45.48 m
- Impermeable Total Flux (Q) = $0 \frac{m^3}{seg}$
- Drenaje Press. Head (P)=0, esto indica que la presión vale cero.

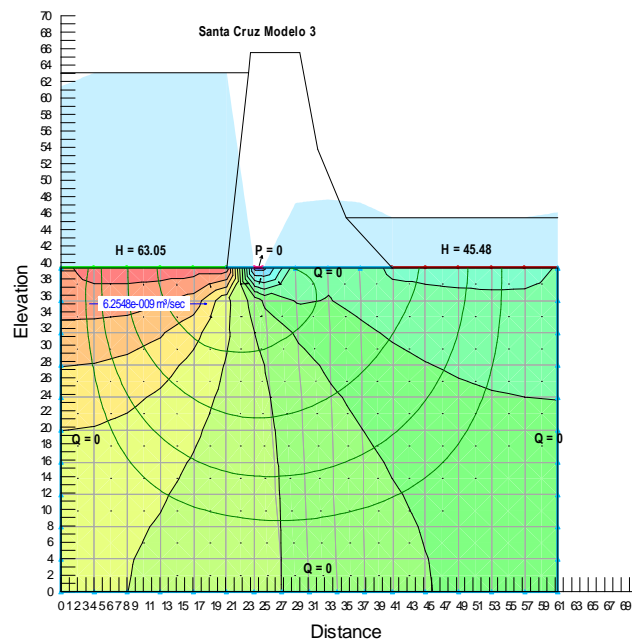


Figura 36 Solución del modelo 3

En la figura 6.44 se presenta las líneas equipotenciales y las líneas de flujo, también se calculo el caudal que transcurre baja la presa $Q= 6.25 \text{ e}^{-9} \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$, también se indica las condiciones de borde.

En la figura 6.45 se presenta la subpresión que afecta en la base de la presa del modelo 1 en KPa vs m.

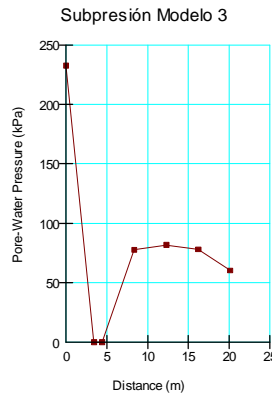


Figura 37 Subpresión del modelo 3 [KPa vs m]

El modelo 3 presenta una fuerza de Supresión de **155.86 Tn**

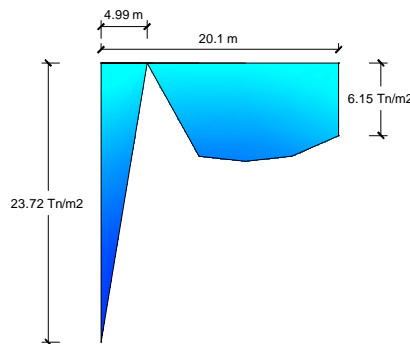


Figura 38 Subpresión del modelo 3 $\left[\frac{\text{Tn}}{\text{m}^2} \text{ vs } \text{m}\right]$

Como se puede observar el valor de la subpresión mas critico es el del modelo 1 con un fuerza de subpresión de $F_{sub}=177.64 \text{ Tn}$

4. COMPARACIÓN

Se realizo la siguiente comparación entre los modelos calculados anterior mente, los cuales se indican a continuación.

4.1. Modelo propuesto por Corps vs Elementos Finitos

- Sin sistema de drenaje

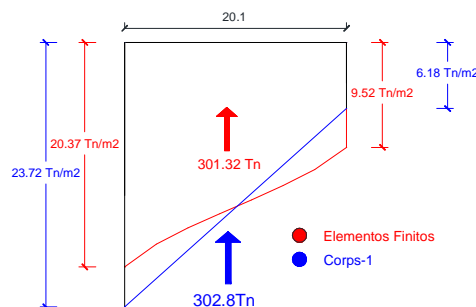


Figura 39 Subpresión Corps vs Elementos finitos (sin sistema de drenaje)

- Con Sistema de drenaje

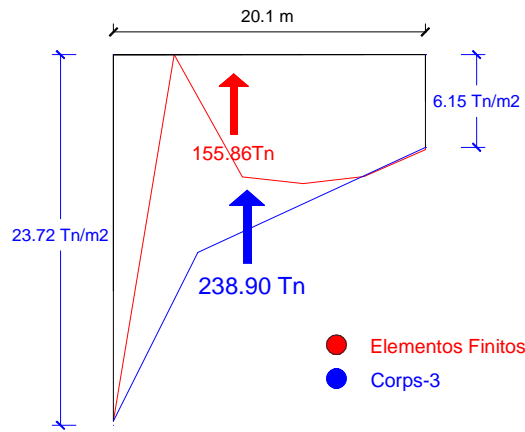


Figura 40 Subpresión Corps vs Elementos finitos (con sistema de drenaje)

- Con sistema de drenaje y se asume que existe fisuramiento (T)

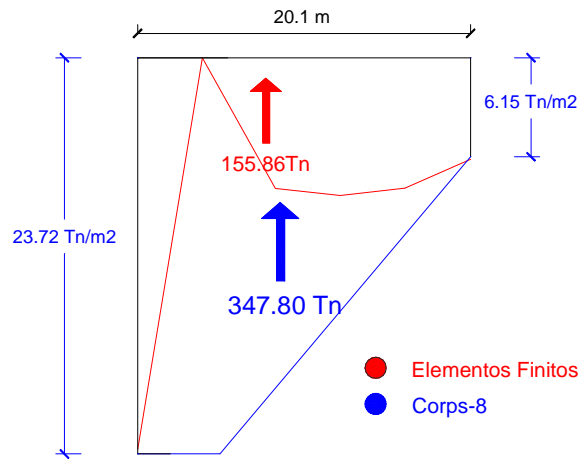


Figura 41 Subpresión Corps vs Elementos finitos (con sistema de drenaje y fisuramiento T)

4.2. Modelo propuesto por Reclamation vs Elementos Finitos

- Con Sistema de drenaje

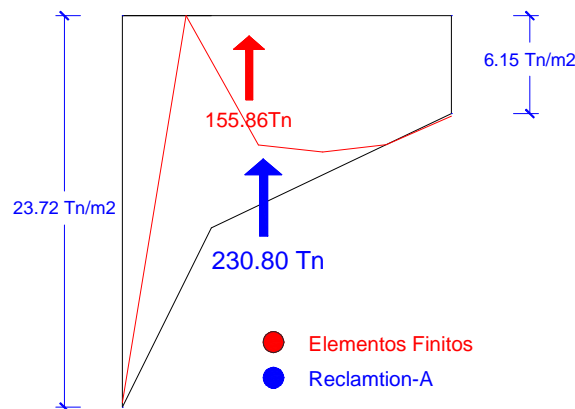


Figura 42 Subpresión Reclamation vs Elementos finitos (con sistema de drenaje)

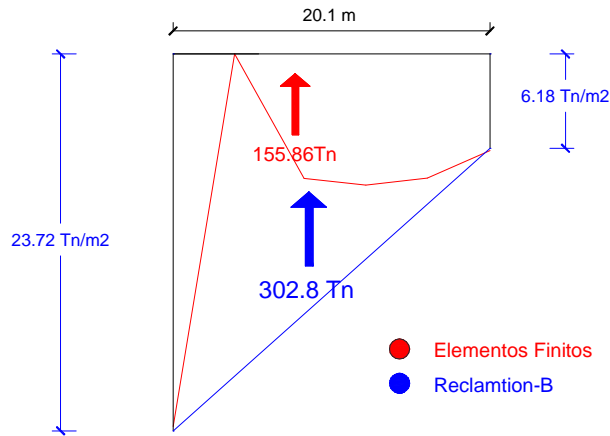


Figura 43 Subpresión Reclamation vs Elementos finitos (con sistema de drenaje & H3 max)

- Con sistema de drenaje y se asume que existe fisuramiento (T)

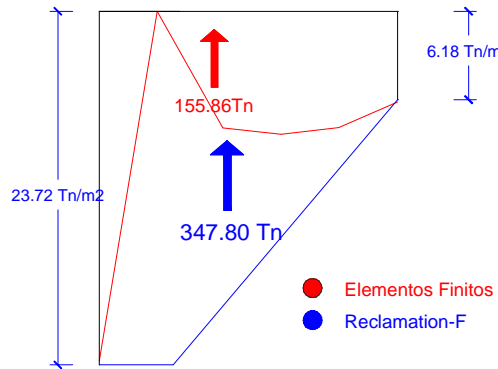


Figura 44 Subpresión Reclamation vs Elementos finitos (con sistema de drenaje y fisuramiento)

4.3. Modelo propuesto por FERC vs Elementos Finitos

- Con sistema de drenaje y se asume que existe fisuramiento (T)

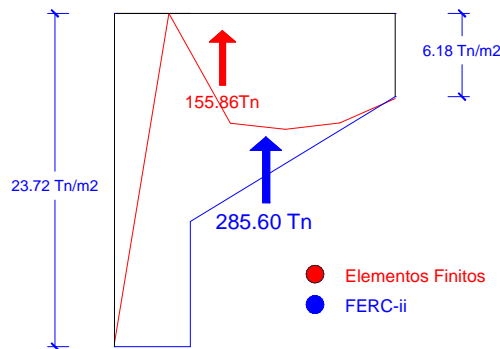


Figura 45 Subpresión FERC vs Elementos finitos (con sistema de drenaje y fisuramiento)

5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Los modelos propuestos por la USACE para el calcula la subpresión se basan en la experiencia de las tres agencias federales, las cuales tienen un largo trayecto en control y mantenimiento de grandes presas. Los modelos propuestos por la USACE consideran varios factores entre ellos tenemos modelos en donde se asume un sistema de drenaje, fisuramiento y también se toma en cuenta la longitud de la galería con respecto a la cara aguas arriba.

El modelo de elementos finitos generado por el software SEEP/W nos permite realizar un análisis estacionario, considerando un suelo isotrópico lo que significa que la permeabilidad del suelo en las direcciones "x" y "y" son iguales. Para el diseño se considero un solo estrato del suelo y su $K=1 \text{ e-9 m/seg}$. Una de las aplicaciones del software es generación de las presiones en la base de la presa que común mente se les conoce como subpresión.

Al momento de comparar los dos modelos podemos observar que el modelo propuesto por la USACE cuya fuerza de subpresión superan al modelo generado por los elementos finitos. Esta reducción de la fuerza de subpresión se debe a que en el análisis propuesto por los elementos finitos se incluye las características del suelo y las condiciones de borde de la sección analizada.

REFERENCIAS

- 1) Aguiar R.,(2004,1), "Análisis Matricial de Estructuras", Capitulo 13., Quito
- 2) Aguiar R., (2010,1), "Estudio de Peligrosidad sísmica y espectro de diseño de la Presa: Minas-La UniOn-Pitahuiria", ASTEC, 32 p., Quito.
- 3) Reyna & Lábaque., (2010), Solución de la Ecuación de la Place, Universidad Nacional de Córdoba., Argentina.
- 4) Toro M., (2009, 7), EVALUACIÓN DE FILTRACIÓN EN PRESAS MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO EN MEDIOS POROSOS SATURADOS Y NO SATURADOS, Universidad de Chile, 23 p., Chile.
- 5) Torres N., (2010, 10), FILTRACIONES, Universidad Nacional de Rosario, 45 p., Argentina.
- 6) Universidad de Córdoba., (2010, 11)., INTRODUCCIÓN A LA MODELIZACIÓN DE REDES DE FLUJO MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA SEEP/W 2007, Argentina.
- 7) USACE, (2000,1), Evaluation and Comparison of Stability Analysis and Uplift Criteria for Concrete Gravity Dams by Three Federal Agencies, EE.UU
- 8) www.geo-slope.com/products/seepw2007.aspx