

**ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE PRESAS CON NÚCLEO DE
ARCILLA Y CARAS EN ENROCADO**

FELIPE SAENZ TORRES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

**ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE PRESAS CON NÚCLEO DE
ARCILLA Y CARAS EN ENROCADO**

FELIPE SÁENZ TORRES

Trabajo de grado realizado en la modalidad de investigación como requisito para
obtener el título de Ingeniero Civil.

DIRECTOR

VLADIMIR ERNESTO MERCHÁN JAIMES

Ingeniero Civil, M.Sc. Eng, Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A mi familia por su apoyo incondicional en el día a día.

*A todas las personas con las que compartí en este proceso
de aprendizaje.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia que me apoya siempre con sus buenos consejos, compañía y recomendaciones y en especial a mi padre por estar siempre pendiente de mí en los últimos años de carrera.

A los profesores de la escuela de ingeniería civil por compartir sus conocimientos sin ningún reparo e impulsar el desarrollo de la sociedad transmitiendo su experiencia.

Al profesor VLADIMIR MERCHÁN que por su compromiso, tiempo y dedicación que contribuyó a la materialización de este proyecto.

Finalmente a mis amigos y compañeros por las jornadas de estudio, viajes y momentos que quedan en la memoria.

CONTENIDO

	pág.
Contenido	
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE FLUJO, PERMEABILIDAD Y PRESAS CON NUCLEO DE ARCILLA Y CARAS EN ENROCADO	16
1.1 Flujo laminar y flujo turbulento	16
1.2 Ecuación de Bernoulli	16
1.3 Ley de Darcy.....	17
1.4 Coeficiente de permeabilidad.....	18
1.4.1 Permeabilidad del Suelo	19
1.5 Relaciones Volumétricas	20
1.5.1 Descripción y clasificación de suelos naturales	22
1.6 Presas y tipos genéricos.....	23
1.6.1 Tipos y características de presas de relleno	23
1.7 Ingeniería de presas de relleno.....	26
1.7.1 Zonificación de los rellenos de los espaldones	26
1.7.2 Materiales de rellenos térreos.....	27
1.7.3 Enrocados y rellenos enrocados.....	28
1.8 Modelos constitutivos.....	28
2. SIMULACIÓN DE LA CONDICIÓN DE FLUJO EN PRESAS DE ENRONCADO CON NÚCLEO DE ARCILLA.	30

3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA SIMULACIÓN NUMERICA.....	41
3.1 Modelo constitutivo	42
3.2 Grado de Saturación.....	46
3.3 Esfuerzos verticales.....	48
3.4 Líneas de Isopresión.....	51
3.5 Influencia del cambio en la geometría del núcleo	53
3.6 Variación de la permeabilidad, k horizontal diferente a k vertical en el núcleo de arcilla.	54
3.7 Construcción de redes de flujo en secciones compuestas.....	56
4. CONCLUSIONES.....	60
5. BIBLIOGRAFIA	62

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
FIGURA 1. Flujo Laminar y Flujo Turbulento.	16
FIGURA 2. Esquema de dispositivo experimental de Darcy.	17
FIGURA 3. Esquema de muestra de suelos.	21
FIGURA 4. Sistemas de clasificación de tamaños de suelos	22
FIGURA 5. Rellenos de tierra y enrocados en la construcción de presas.	24
FIGURA 6. Variantes de presas de relleno de tierra.	25
FIGURA 7. Variantes de presas de enrocado.	26
FIGURA 8. Geometría y dimensiones de la presa.	31
FIGURA 9. Geometría de la presa en Code_Bright.	31
FIGURA 10. Superficies creadas a partir de las líneas.	32
FIGURA 11. Datos generales del problema.	33
FIGURA 12. Equilibrios y balances.	33
FIGURA 13. Estrategia de Solución y salida	34
FIGURA 14. Propiedades del material Arcilla	35
FIGURA 15. Propiedades del material Enrocado.	35
FIGURA 16. Propiedades del material, Agua.	36
FIGURA 17. Materiales Asignados.	37
FIGURA 18. Condiciones de frontera mecánicas y de flujo.	37
FIGURA 18.1 Esquema de condiciones iniciales de esfuerzo y porosidad en Code_Bright.	38
FIGURA 19. Ingreso de parámetros iniciales.	38
FIGURA 20. Intervalos de tiempo.	39
FIGURA 21. Malla generada.	40
FIGURA 22. Ejemplo de Gráficas de Resultados.	41
FIGURA 23. (a) Desplazamientos Verticales [m] , (b) Líneas de Isopresión, (c) Grado de Saturación, $k=1e-15$ [m ²].	43

FIGURA 24. (a) Desplazamientos Verticales [m], (b) Líneas de Isopresión, (c) Grado de Saturación, $k=1e-15$ [m ²].	45
FIGURA 25. Puntos de control.	46
FIGURA 26. Variación del grado de saturación en diferentes puntos del núcleo de arcilla.	46
FIGURA 27. Variación del grado de saturación en diferentes puntos del núcleo de arcilla.	47
FIGURA 28. Gráfica de esfuerzos verticales [MPa] permeabilidad intrínseca $k=1e-13$ [m ²]. (a) Modelo Viscoplastico, (b) Modelo Elástico	48
FIGURA 29. Gráfica de esfuerzos verticales [MPa] permeabilidad intrínseca $k=1e-15$ [m ²]. (a) Modelo Viscoplastico, (b) Modelo Elástico	49
FIGURA 30. Gráfica de esfuerzos verticales [MPa] permeabilidad intrínseca $k=1e-17$ [m ²]. (a) Modelo Viscoplastico, (b) Modelo Elástico	50
FIGURA 31. Grafica de líneas de igual presión para diferentes permeabilidades	51
FIGURA 32. Cambios geométricos en el núcleo de arcilla	53
FIGURA 33. Evolución del grado de saturación, en el eje central de núcleo de arcilla	55
FIGURA 34. Líneas de isopresión en condición de anisotropía	56
FIGURA 35. Método para construir una red de flujo para una sección compuesta-Primera prueba de red de flujo (incorrecta)	57
FIGURA 36. Método para construir una red de flujo para una sección compuesta-Red completa	59

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE PRESAS CON NÚCLEO DE ARCILLA Y CARAS EN ENROCADO.

AUTOR: FELIPE SAENZ TORRES**

PALABRAS CLAVE: Permeabilidad, Flujo, Arcilla, Presas en Enrocado, Desplazamientos, Deformaciones, Grado de Saturación.

DESCRIPCIÓN:

El presente documento contiene análisis realizados por medio de simulaciones numéricas con elementos finitos, en cuanto a flujo de agua en presas con núcleo de arcilla y caras en enrocado, iniciando con modelos cuyos materiales tienen propiedades viscoplásticas y a los cuales se les varía la permeabilidad en el núcleo de arcilla, igualmente se consideran estos mismo modelos pero trabajando en el rango elástico de los materiales. Se varía también la geometría de los modelos en cuanto a pendiente de los núcleos y enrocados.

Para el análisis fue utilizado el código de elementos finitos acoplados térmicamente, e hidromecánicamente CODE_BRIGHT, el cual nos permite observar como varían a través del tiempo las condiciones de flujo de la presa, así como las deformaciones y saturación de los materiales, esfuerzos y desplazamientos de diferentes puntos de interés de la presa.

Finalmente, se comparan los resultados de las simulaciones entre el modelo elástico y el modelo viscoplástico, se presenta también un ejercicio resuelto de redes de flujo en presas con sección compuesta con el fin de hallar el caudal de infiltración.

Se presentan los resultados de desplazamiento, esfuerzos y líneas de igual presión gráficamente mediante escalas de colores y evolución de propiedades en puntos a lo largo del tiempo de llenado de la presa.

(*) Proyecto de grado. Modalidad Investigación

(**) Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes.

ABSTRACT

TITLE: FINITES ELEMENTS ANALYSIS IN DAMS WITH CLAY CORE AND ROCKFILL FACES.

AUTHOR: FELIPE SAENZ TORRES**

KEY WORDS: Permeability, Steady flow, Clay, Rockfill Dams, Displacements, Strains, Saturation Degree.

DESCRIPTION:

This document contains analyzes by of numerical simulations with finite elements in terms of flow of water in dams and clay core rockfill faces, starting with models whose materials has viscoplastic properties and its clay core permeability varies, also is considered the same model but working in the elastic range of the materials. It also varies the geometry of the models in terms of the slope of the core and the rockfill.

For the analysis is used the finite element code coupled thermic, hydric and mechanically known as CODE_BRIGHT from the Polytechnic University of Catalunya, which allow users to see how the conditions of flow through the dam, strains, stresses and degree saturation change with the time that takes the filling of a dam.

Finally, the results are compared between the elastic and viscoplastic models generated for the simulation; also an exercise of flow net is presented in order to calculate the leakage rate in dam with composed section.

The results of displacements, strains, liquid pressure lines and degree saturation are contour fill graphics and point evolutions of the properties during the filling of the dam, for this project the points are along the central axis of the clay core.

(*) Degree work. Modality: Investigation

(**) Phisycs-Mechanics Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes.

INTRODUCCIÓN

En el amplio campo de acción de la ingeniería civil se destaca la geotecnia como rama encargada estudiar las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles del suelo con el fin de determinar sus propiedades y conocer su comportamiento en la construcción y vida útil de las obras civiles.

La construcción de represas ha sido una de las actividades de la ingeniería civil llevadas a cabo con más antigüedad. La civilización se ha identificado con la construcción de reservorios acorde a sus necesidades, en un principio para riego de cultivos agrícolas, y consecutivamente para control de inundaciones, suministro de agua, generación de energía, navegación, diversión entre otros.

La ingeniería en presas de núcleo impermeable con enrocado ha experimentado un rápido desarrollo en los últimos años y han dejado de ser una “tendencia” para convertirse en una alternativa adecuada técnica y económicamente viable. Gracias a la experiencia obtenida en presas puestas en servicio, las mejoras en las pruebas técnicas y el desarrollo de nuevas herramientas analíticas se han logrado avances notables en los métodos de diseño, dando como resultado una mayor correspondencia entre los resultados de análisis teórico y los obtenidos en medidas tomadas en campo.

Se plantea entonces una modelación numérica de presas con núcleo de arcilla y caras en enrocado en un software de elementos finitos, evaluando las condiciones de borde y las leyes constitutivas que rigen el comportamiento mecánico e hidráulico del enrocado y el núcleo de arcilla. Así mismo se pretende analizar el comportamiento de la estructura para diferentes condiciones de permeabilidad de los materiales a medida que transcurre el tiempo de llenado de la presa.

En el primer capítulo se presenta un marco teórico referente al flujo de agua en presas, estudio de presiones de agua en el suelo, flujo de agua en presas con enrocado y núcleo de arcilla y una breve descripción de la metodología numérica que usa el software a utilizar.

En el segundo capítulo, se ilustra el proceso necesario para realizar las simulaciones numéricas con el programa de código de elementos finitos acoplados termo-hidromecánicamente CODE_BRIGHT, teniendo en cuenta dos tipos de modelos, el primero que es elástico lineal y el segundo que es viscoplástico a los cuales se le varían diferentes parámetros.

En el tercer capítulo se hace el análisis de sensibilidad de los parámetros de permeabilidad, grado de saturación y cambios debidos a la geometría de la presa, y aplicación de teoría actual de los suelos.

Para finalizar, en el cuarto capítulo, se presentan las conclusiones de este estudio y en el quinto capítulo la bibliografía consultada.

OBJETIVO GENERAL

Estudiar, analizar e interpretar el comportamiento mecánico e hidráulico en términos de flujo de presas con núcleo de arcilla y caras en enrocado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

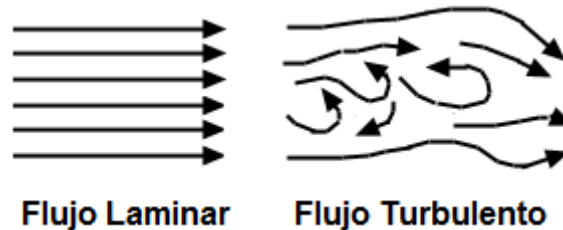
- Estudiar la evolución del grado de saturación S_r en el núcleo de arcilla a través del tiempo de llenado de la presa como función de la permeabilidad del núcleo de arcilla.
- Estudiar los incrementos de esfuerzos y las deformaciones volumétricas durante el proceso de llenado y a nivel de servicio de la presa en función de la permeabilidad del núcleo de arcilla.
- Evaluar las presiones de líquido para diferentes condiciones de permeabilidad en el núcleo de arcilla.
- Analizar el caudal de infiltración para presas de secciones compuestas.
- Comparar los resultados del software con otras metodologías utilizadas en la práctica para la evaluación del comportamiento mecánico e hidráulico del suelo.

1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE FLUJO, PERMEABILIDAD Y PRESAS CON NUCLEO DE ARCILLA Y CARAS EN ENROCADO.

1.1 Flujo laminar y flujo turbulento

Los problemas relacionados con el flujo de líquidos generalmente pueden dividirse en dos grupos principales, *flujo laminar* y *flujo turbulento*. Se define el flujo como laminar cuando el movimiento es ordenado y las líneas de flujo no se juntan entre sí en toda su longitud, exceptuando el efecto microscópico de mezcla molecular. El flujo turbulento es aquel que se da en forma caótica, se caracteriza por trayectorias circulares erráticas y ocurre cuando las velocidades de flujo son generalmente muy altas y las fuerzas viscosas son muy pequeñas.

FIGURA 1. Flujo Laminar y Flujo Turbulento.



Fuente: *El autor.*

1.2 Ecuación de Bernoulli

Según la ecuación de Bernoulli, la carga total en un punto en agua en movimiento se da como la suma de las cargas de presión, de velocidad y de elevación.

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (1.1)$$

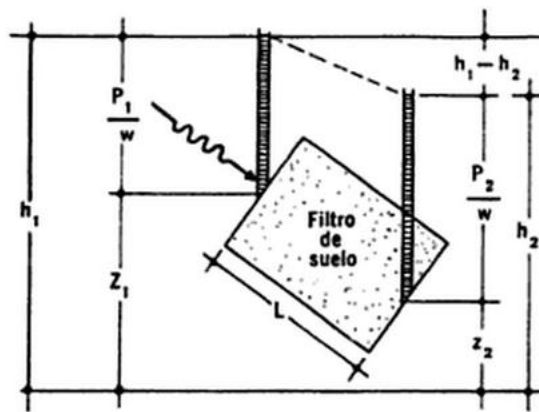
Donde h = carga total, p = presión, v = velocidad. g = aceleración de la gravedad, γ_w = peso específico del agua.

La carga de altura Z es la distancia vertical de un punto dado arriba o debajo de un plano de referencia. La carga de presión es la presión u del agua en ese punto dividida entre el peso específico γ_w del agua.

Al aplicar la ecuación de Bernoulli al flujo de agua a través de un medio poroso, la carga de velocidad se desprecia porque la velocidad de infiltración es pequeña. La carga total en cualquier punto se representa adecuadamente por

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + Z \quad (1.2)$$

FIGURA 2. Esquema de dispositivo experimental de Darcy.



Fuente: Juárez Badillo (2000).

1.3 Ley de Darcy

El flujo de agua a través de medios porosos, está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Henri Darcy en 1856, quien investigó las características del flujo de agua a través de filtros formados por materiales térreos. Según Darcy para velocidades suficientemente pequeñas el caudal es expresado por:

$$Q = \frac{dV}{dt} = kAi \left(\frac{cm^3}{seg} \right) \quad (1.3)$$

A es el área total de la sección transversal del filtro e i el gradiente hidráulico del flujo, medido con la expresión $i = \frac{h_1 - h_2}{L}$. En cualquier punto del flujo la altura piezométrica h es la carga de elevación z del punto, más la carga de presión en dicho punto (p/γ_w). La carga de velocidad se desprecia por los valores mínimos que el agua tiene a través de un medio poroso.

La ecuación de continuidad de caudal establece que $Q = Av$, siendo A el área del conducto y v la velocidad de flujo. Llevando esta expresión a la ecuación de caudal, se deduce que $v = ki$, siendo v la velocidad de descarga. En la aplicabilidad de la Ley de Darcy el flujo en el suelo es laminar, siendo esta ley aplicable a suelos finos como mezclas de limos y arcillas o arcillas puras en los cuales el agua circula a velocidades menores que en las arenas.

En las ecuaciones aparece una constante física de proporcionalidad, k , llamada Coeficiente de Permeabilidad del Suelo, sus unidades son correspondientes a una velocidad, es necesario tener en cuenta que i es un concepto adimensional. En términos simples se define como la velocidad del agua a través del mismo, cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario. En el valor numérico de k se reflejan propiedades físicas del suelo e indica la facilidad con que el agua fluye a través del suelo cuando está sujeta a un gradiente hidráulico.

1.4 Coeficiente de permeabilidad

La permeabilidad de los suelos depende de varios factores tales como la viscosidad del fluido, granulometría, relación de vacíos, rugosidad de las partículas y el grado de saturación del suelo. Para suelos arcillosos, la estructura, la concentración iónica y el espesor de las capas de agua adheridas a las partículas de arcilla son de gran importancia para la permeabilidad.

Un análisis mas completo indica que el coeficiente de permeabilidad depende de las características del medio y del fluido. Nutting (1930) establece la hipótesis de que la velocidad de descarga es inversamente proporcional al coeficiente de viscosidad (η), se define entonces un nuevo coeficiente $k' = \frac{\eta}{\gamma_w} k$, el cual depende únicamente de las características del medio permeable, las dimensiones de k' son $[k'] = [L^{-2}FT] [L^3F^{-1}T^0] [LF^0T^{-1}] = [L^2F^0T^0]$.

k' se denomina “permeabilidad específica” o “permeabilidad intrínseca” ya que tiene la dimensión del cuadrado de una longitud (cm^2), para cada medio poroso es posible encontrar una longitud que caracterice su permeabilidad; esta longitud se denomina radio hidráulico del medio poroso.

Kozeny expresó el valor k' como $k' = c \frac{n^3}{s^2}$, donde n es la porosidad del medio, s , superficie interior específica, que es la relación entre la superficie libre total ofrecida por las partículas sólidas en un determinado volumen de material poroso y el valor de ese volumen; c es una constante apropiada de proporcionalidad.

Al relacionar k' se obtiene que $k = c \frac{n^3 \gamma_w}{s^2 \eta}$, la cual es un modo de expresar la permeabilidad en términos de las propiedades físicas que intervienen en ella.

1.4.1 Permeabilidad del Suelo

Las permeabilidades del suelo son anisotrópicas, con k_h , el coeficiente de permeabilidad horizontal, varias veces más grande que k_v , el coeficiente de permeabilidad vertical. En rellenos compactados la relación k_h/k_v puede exceder de 20. El coeficiente de permeabilidad horizontal se determina con más confiabilidad *in situ*, es decir, mediante ensayos de bombeo de campo en agujeros de sondeo. De igual manera existen técnicas de laboratorio, pero la

reproducción de los resultados es pobre, debiéndose considerar más como un indicativo de órdenes relativos de la magnitud que de valores absolutos.

Tabla 1. Características de suelos para núcleos.

<i>Descripción del suelo (BS 5930)</i>	<i>Resistencia al agrietamiento</i>	<i>Resistencia a la erosión y canalización</i>	<i>Rodillo de compactación óptimo</i>	<i>Sensibilidad al control de contenido de agua en la compactación</i>
Arenas muy limosas o gravas; 6% arcilla (GM-SM)	Baja; incrementos con $<\rho_d$ y $>I_p$	Baja; incrementos con $<\rho_d$ y $>I_p$	Banda de rodadura neumática (20-80 t)	Alta para evitar fragilidad
Arenas muy arcillosas o gravas; 20% arcilla (GC-SC)	Intermedia con un ρ_d representativo	Intermedia	Banda de rodadura neumática (20-80 t)	Baja para controlar u_w
Arcillas con baja plasticidad (CL)	Relativamente flexible	Alta; incrementa con $>\rho_d$	Banda de rodadura neumática o de pata de cabra	Intermedia a alta para controlar u_w
Arcillas con alta plasticidad (CH)	Flexible; puede resistir grandes deformaciones	Alta; incrementa con ρ_d	De pata de cabra	Alta para controlar u_w

Fuente: P. Novak et al (2001).

Tabla 2. Propiedades mecánicas para rellenos de tierra compactada.

<i>Tipo de relleno</i>	<i>Características de compactación</i>		<i>Resistencia al corte (esfuerzos efectivos)</i>		<i>Coficiente de compresibilidad $m_v (\times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ kN}^{-1})$</i>	<i>Coficiente de permeabilidad horizontal, $k_h (\text{m s}^{-1})$</i>
	<i>Peso unitario $\gamma_d \text{ máx} (\text{kN m}^{-3})$</i>	<i>Agua $w_{\text{opt}} (\%)$</i>	<i>Cohesión, $c' (\text{kN m}^{-2})$</i>	<i>Ángulo de fricción $\phi' (\text{grados})$</i>		
Gravas (GW-GC)	18-22	5-10	0	35-40	0.1-1.0	10^{-3} - 10^{-5}
Arenas (SW-SP)	16-20	10-20	0	35-40	0.5-1.5	10^{-4} - 10^{-6}
Limos (ML-MH)	16-20	15-30	<10	25-35	0.5-2.5	10^{-5} - 10^{-8}
Arcillas (CL-CH)	16-21	15-30	<20	20-30	0.5-3.0	10^{-7} - 10^{-10}
Roca triturada (tamaños entre 2-600 mm)	17-21	N/A	0	40-55	N/A	10^{-1} - 10^{-2}

Fuente: P. Novak et al (2001).

1.5 Relaciones Volumétricas

Para desarrollar relaciones volumétricas y gravimétricas, separamos las fases de sólido, agua y aire. El volumen total de una muestra de suelo se expresa como

$$V = V_S + V_V = V_S + V_W + V_a \quad (1.4)$$

donde V_S = volumen de sólidos de suelo

V_V = volumen de vacíos

V_W = volumen de agua en los vacíos

V_a = volumen de aire en los vacíos

Suponiendo el peso del aire despreciable, el peso total de una muestra es

$$W = W_S + W_W \quad (1.5)$$

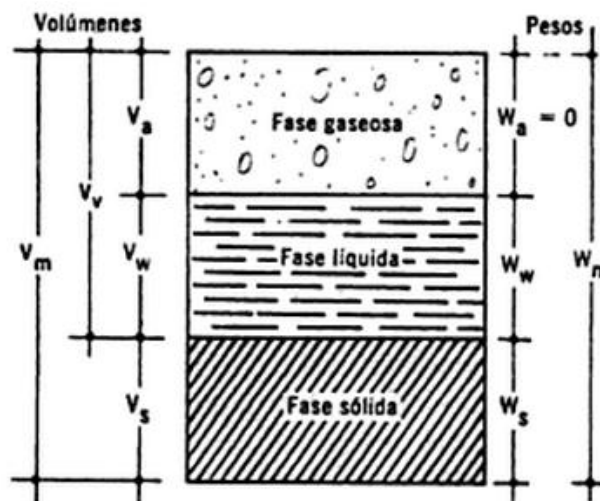
donde W_S = peso de los sólidos de suelo

W_W = peso del agua

Usualmente las relaciones volumétricas usadas para una muestra de suelo son:

- La *relación de vacíos* (e), se define como la razón de volumen de vacíos al volumen de sólidos $e = \frac{V_V}{V_S}$
- La *porosidad* (n), se define como la razón de volumen de agua al volumen total $n = \frac{V_W}{V}$
- El *grado de saturación* (s), se define como la razón de volumen de agua al volumen de vacíos $S = \frac{V_W}{V_V}$

FIGURA 3. Esquema de muestra de suelos.



Fuente: Juárez Badillo (2000).

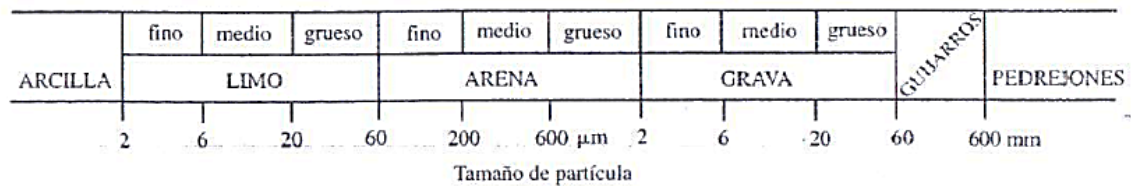
1.5.1 Descripción y clasificación de suelos naturales

Las partículas de suelo varían de tamaño desde más de 100 mm (guijarros), pasando por gravas, arenas y limos, hasta arcillas de menos de 0.002 mm. Los suelos se denominan de acuerdo a con el comportamiento del tipo de partícula que los caracteriza como un todo. El suelo arcilloso se denomina así porque muestra la plasticidad y la cohesión propia de los materiales basados en minerales arcillosos, aun así la matriz mineral contenga diferentes tamaños de partículas, y aunque sólo una proporción menor de la matriz sea del tamaño de una arcilla, es decir < 0.002 mm.

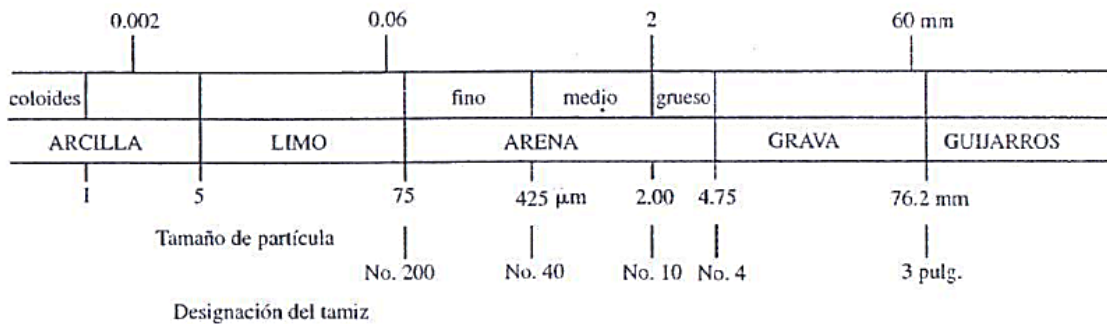
El análisis de los tamaños de partículas es insuficiente para una clasificación completa de los suelos, es por eso necesaria una clasificación secundaria basada en el grado de plasticidad, utilizando los límites de consistencia expresados en función del porcentaje de contenido de la masa de agua, w .

FIGURA 4. Sistemas de clasificación de tamaños de suelos

(a) Reino Unido (BS1377 1975)



(b) Estados Unidos (ASTM D422)



Fuente: Head (1980).

1.6 Presas y tipos genéricos

El propósito principal de una presa es retener y almacenar agua de una manera segura, cualquier presa debe representar una solución de diseño específica para las circunstancias del lugar. En consecuencia su diseño es un equilibrio entre las consideraciones técnicas locales y económicas del momento en que se construye.

Los embalses se pueden clasificar de acuerdo a su propósito principal, ya sea irrigación, suministro de agua, generación hidroeléctrica, regulación de ríos o control de inundaciones. Según los materiales de construcción utilizados, se hace posible una amplia clasificación inicial en dos grupos.

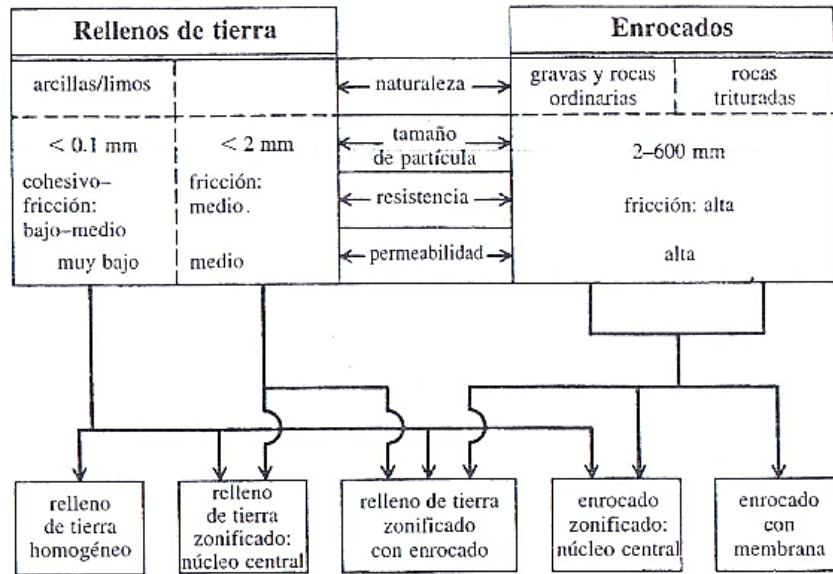
1. Presas de relleno construidas con terraplenes de suelos o enrocados, con pendientes similares en los paramentos aguas arriba y aguas abajo. De ángulo moderado que producen una sección ancha y un volumen de construcción grande con respecto a su altura.
2. Presas de concreto que se construyen con concreto macizo. Los taludes de los paramentos son diferentes, muy fuertes aguas abajo y casi verticales aguas arriba.

1.6.1 Tipos y características de presas de relleno

Las presas de relleno las podemos definir como presas construidas a partir de materiales naturales excavados u obtenidos en los alrededores. Estos materiales disponibles se utilizan para sacar el mejor provecho de sus características como volumen de relleno de ingeniería en las diferentes zonas dentro de la sección de la presa. Los materiales naturales de rellenos son colocados y compactados sin adición de ligantes usando plantas mecánicas de gran capacidad. La construcción de terraplenes es un proceso casi continuo y mecanizado.

Para mostrar la relación conceptual entre materiales de relleno de tierra y de enrocado, empleada en presas de relleno se muestra en la siguiente figura.

FIGURA 5. Rellenos de tierra y enrocados en la construcción de presas.



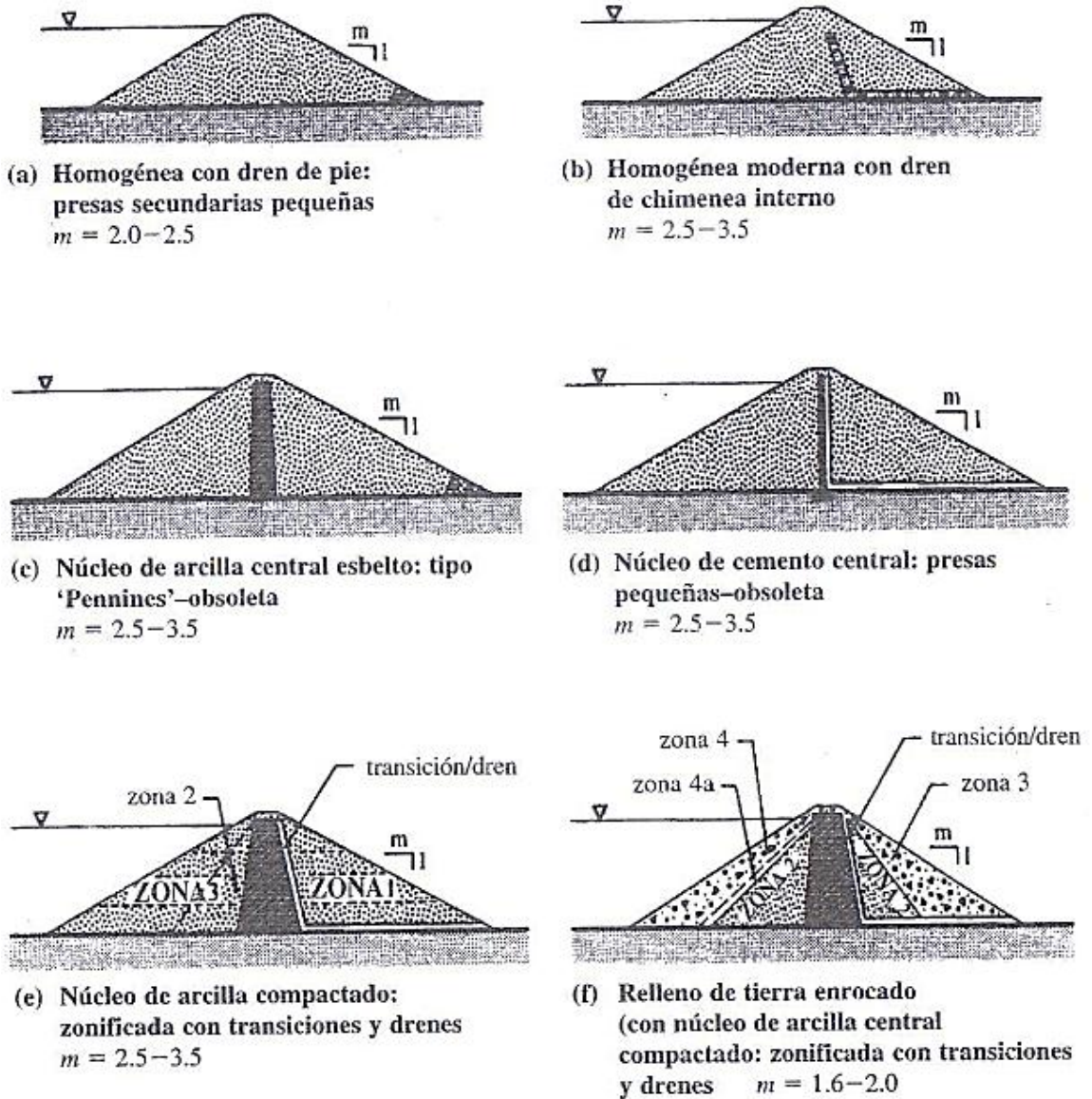
Fuente: P. Novak et al (2001).

Según como se utilicen los materiales disponibles las presas de relleno tienen la siguiente clasificación inicial.

1. *Presas de relleno de tierra.* Son aquellas en que los suelos compactados representan más de 50% del volumen colocado de material, construida con suelos seleccionados, de compactación uniforme e intensiva en capas más o menos delgadas y de humedad controlada.
2. *Presas de enrocado.* La sección de estas presas incluye un elemento impermeable discreto de relleno de tierra compactada, concreto esbelto o una membrana bituminosa. Se dice que es “presa de enrocado” cuando más de 50% del material de relleno se pueda clasificar como roca (material de granulometría gruesa)

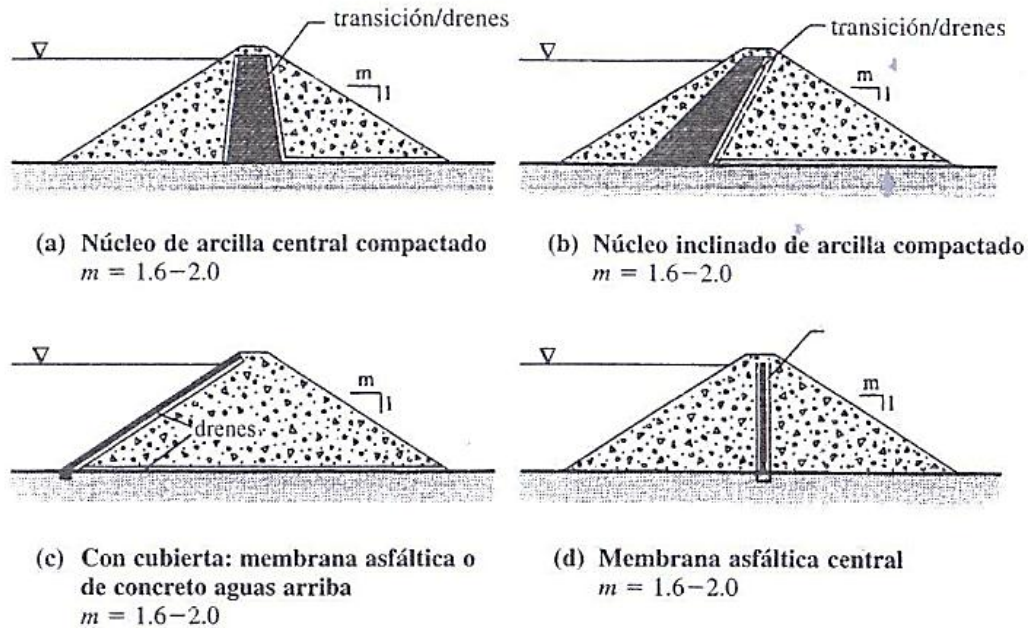
Secciones esquemáticas de algunas de las variantes más comunes de presas de rellenos de tierra se muestran a continuación.

FIGURA 6. Variantes de presas de relleno de tierra.



Fuente: P. Novak et al (2001).

FIGURA 7. Variantes de presas de enrocado



Fuente: P. Novak et al (2001).

El ahorro en la cantidad de relleno enrocado por utilizar en una presa de altura dada es considerable, debido a la naturaleza de fricción del enrocado que causa una resistencia al corte relativamente grande y por la alta permeabilidad, que implica, la virtual eliminación de problemas de presión de agua en los poros.

1.7 Ingeniería de presas de relleno

Responde a la necesidad de introducir los elementos básicos de la mecánica de suelos y de la geología aplicada a la naturaleza, clasificación, y característica de los suelos par la ingeniería.

1.7.1 Zonificación de los rellenos de los espaldones

La zonificación correcta de los materiales es un punto clave en el diseño de presas de relleno. Se deben tener en cuenta los siguientes principios:

- El núcleo debe ser tan ancho como sea viable desde el punto de vista económico.
- El material más fino del espaldón debe ser zonificado adyacente al núcleo.
- Las zonas de los espaldones deben ser de material progresivamente más grueso a medida que se aproxima a las caras de los paramentos.

1.7.2 Materiales de rellenos térreos

Tres categorías de material de relleno se necesitan en relación a las presas de relleno térreo para cumplir los requerimientos del núcleo, espaldones capas de drenaje, filtros, etc.

Los rellenos del núcleo deben tener permeabilidad baja y de forma ideal deben ser de plasticidad intermedia a alta para acomodar la deformación sin arriesgar el agrietamiento. Los suelos más apropiados tienen contenidos de arcilla de más de 25-30%, aunque también pueden utilizarse arenas arcillosas y limos. El núcleo es el elemento principal de un relleno y es el más exigente respecto a las características de uniformidad del material.

El relleno del espaldón requiere tener una resistencia al corte bastante grande para permitir una construcción económica de taludes estables con el ángulo más alto posible del talud. Se prefiere que el relleno tenga una permeabilidad relativamente alta para ayudar a la disipación de la presión del agua en los poros. Los materiales apropiados varían a lo largo de un espectro que cubre materiales granulares gruesos hasta rellenos que difieren muy poco de los materiales del núcleo.

El material de drenaje del filtro debe ser limpio, permitir el drenaje libre y no ser propenso a degradación química. EL costo de los materiales procesados de filtro es relativamente alto, y su requerimiento, por tanto, debe restringirse al mínimo.

1.7.3 Enrocados y rellenos enrocados

Las principales ventajas del enrocado como material de construcción de rellenos son su resistencia al corte en fricción alta, lo que permite la construcción de pendientes mas empinadas que los rellenos de tierra, y una permeabilidad que es relativamente alta eliminando problemas asociados con la construcción o con presiones de agua en los poros de infiltración.

Su principal desventaja radica en la dificultad del control de la granulometría de la roca triturada y los asentamientos durante y después de la construcción, que son relativamente altos.

La estabilidad de los taludes en enrocado se puede determinar utilizando métodos de equilibrio límite y análisis comparables para superficies de falla tipo cuña. Es posible hacer estudios paramétricos utilizando los números adimensionales de estabilidad Γ_F (análisis de Fellenius) Γ_B (análisis de Bishop).

1.8 Modelos constitutivos

El modelo elástico lineal, es el modelo más simple para un suelo o una roca, se supone un material continuo, homogéneo, isótropo, lineal y elástico, el cual requiere solo dos parámetros para su definición el modulo de elasticidad E , y el coeficiente de Poisson.

El módulo de elasticidad es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza, depende de la

naturaleza del material, para un material elástico lineal e isótropo, es una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda el límite elástico.

El coeficiente de Poisson es la razón que hay entre el alargamiento longitudinal producido dividido por el acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada.

El modelo viscoplástico, sigue el modelo propuesto basado en la teoría de Desai y Perzyna, el cual es un fenómeno tiempo-dependiente, donde las deformaciones plásticas dependen del tiempo y de la frecuencia de la carga. El modelo está concebido para laderas en reptación, y considera que el movimiento del suelo sucede tanto en profundidad como a lo largo de la ladera.

Asumiendo pequeñas deformaciones, el tensor de las tasas de deformación total se descompone en su parte elástica y viscoplástica

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^{vp} \quad (1.6)$$

En el modelo, el flujo de deformación viscoplástica está dado por:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \frac{\partial \varepsilon_{ij}^{vp}}{\partial t} = \Gamma \langle \phi(F) \rangle \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \quad \phi(F) = \left(\frac{F}{F_0} \right)^N \quad (1.7)$$

Donde σ_{ij} es el tensor de esfuerzos efectivos, ϕ es una función escalar del flujo de fluencia F , y F_0 es una función que se usa para normalizar, G es la función del potencial viscoplástico y Γ es un parámetro que tiene que ver con la fluidez del material. La relación (F/F_0) se asocia a la iniciación de las deformaciones viscoplásticas, si $(F/F_0) > 0$ entonces $\langle \phi(F/F_0) \rangle = \phi(F/F_0)$ y cuando $(F/F_0) \leq 0$ entonces $\langle \phi(F/F_0) \rangle = 0$. A partir de ensayos de laboratorio se encontró la

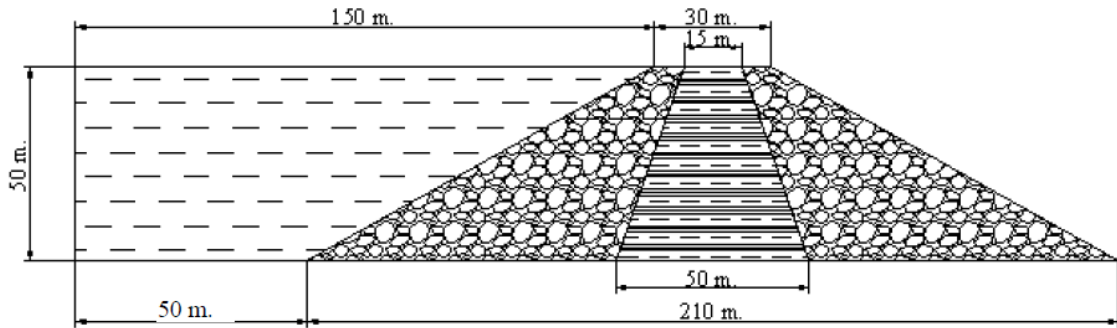
relación $\phi(F) = \left(\frac{F}{F_0}\right)^N$. Un análisis mas detallado se puede encontrar en *CODE_BRIGTH user's guide*.

2. SIMULACIÓN DE LA CONDICIÓN DE FLUJO EN PRESAS DE ENRONCADO CON NÚCLEO DE ARCILLA.

Code_Bright es un software que permite un análisis termo-hidro-mecánico en medios porosos (suelos). Consiste en un programa de elementos finitos desarrollado en el Departamento de Ingeniería Geotécnica y Geociencias de la Universidad de la Universidad Politécnica de Cataluña, este programa se combina con el pre/post procesador desarrollado en el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), GiD. En el pre-proceso se define la geometría, condiciones de contorno, propiedades de los materiales y las etapas de trabajo. GiD traduce estas entradas y las transforma en archivos de texto para el Code_Bright. Posteriormente GiD activa el cálculo y permite ver los resultados en un ambiente gráfico que se denomina el post-proceso. El proceso para llevar a cabo la simulación es: geometría, información del problema, materiales, condiciones de contorno, intervalos de tiempo, generación de la malla, proceso y post-proceso.

En la figura se muestra la geometría de la presa a simular en Code_Bright y sus dimensiones.

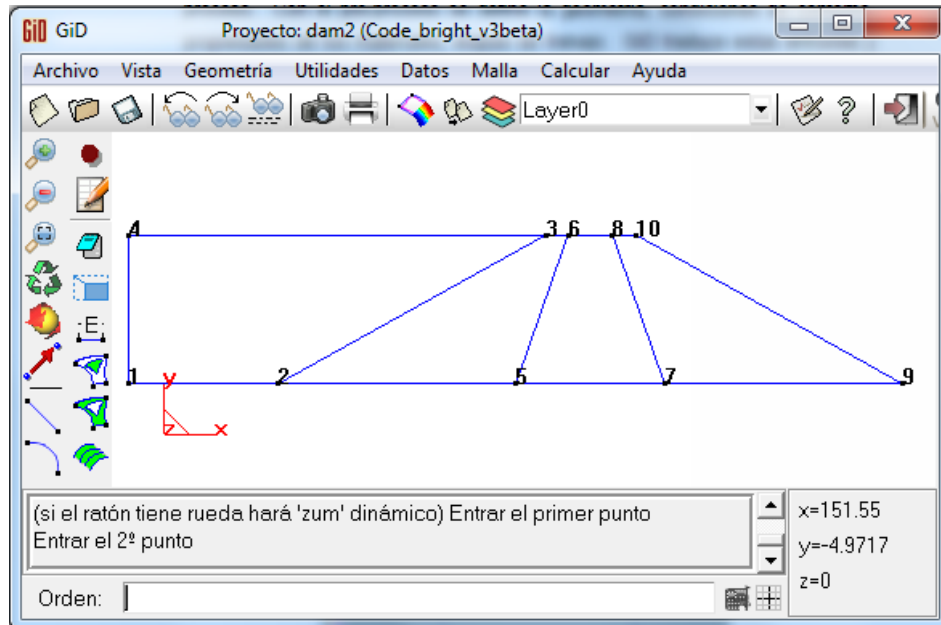
FIGURA 8. Geometría y dimensiones de la presa.



Fuente: Code_Bright-User's Tutorial.

En un comienzo se define la geometría inicial del problema mediante nodos según sus coordenadas, estos nodos se unen con líneas y finalmente, a partir de los conjuntos de líneas se pueden crear superficies, que corresponden a la sección transversal de la presa.

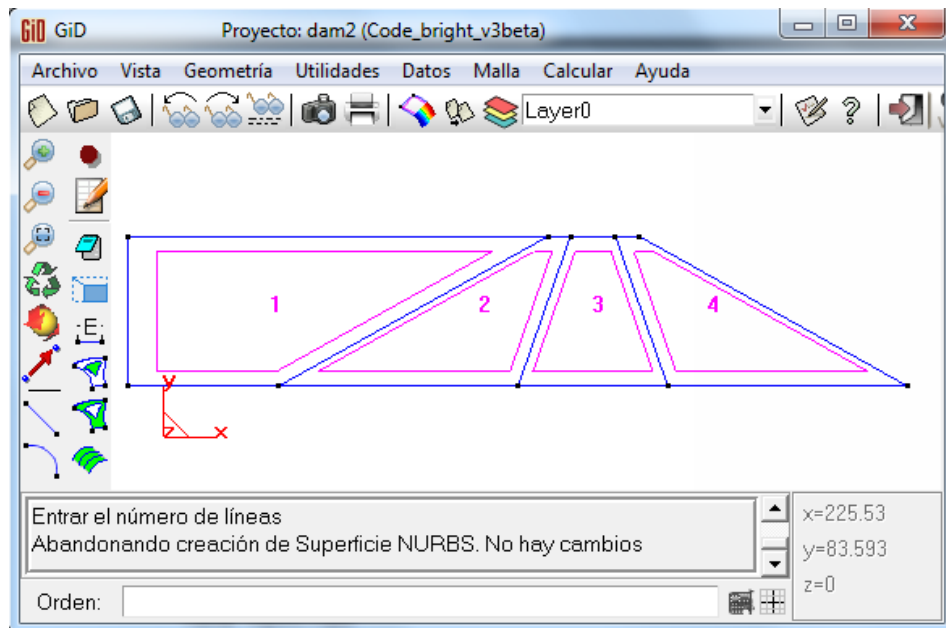
FIGURA 9. Geometría de la presa en Code_Bright.



Fuente: El autor.

Se han creado cuatro superficies, cada uno corresponde a un elemento de la presa. La superficie 1 es el agua, la superficie 2 y 4 son los enrocados de los paramentos y la superficie 3 es el núcleo de arcilla. (Figura 9)

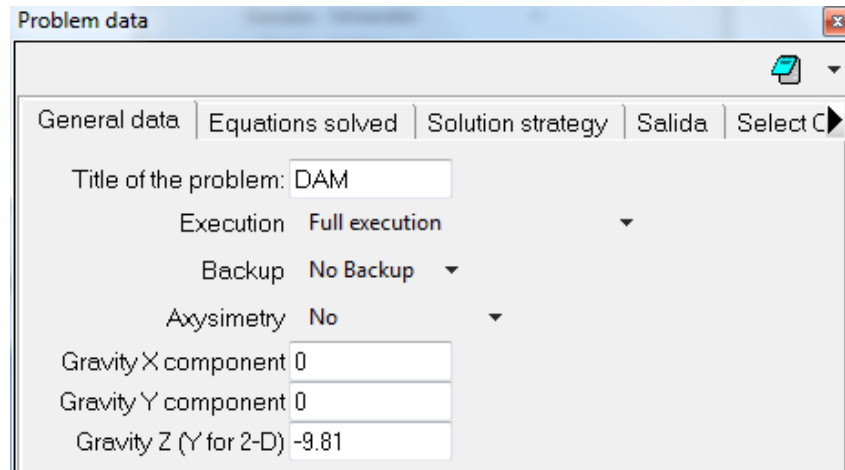
FIGURA 10. Superficies creadas a partir de las líneas.



Fuente: *El autor.*

En el siguiente paso se define el tipo de problema a resolver. En la pestaña de datos generales, se define si hay condición de axisimetría, y si se tiene en cuenta la gravedad en el eje Z, que es el vertical, es necesario darle un título al proyecto, para este caso es DAM.

FIGURA 11. Datos generales del problema.



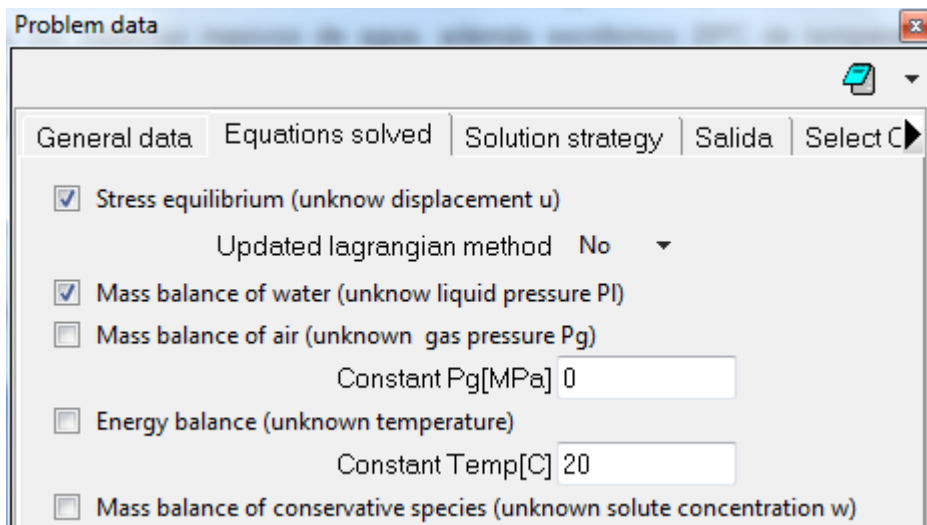
The screenshot shows a window titled "Problem data" with a tabbed interface. The "General data" tab is selected. The settings are as follows:

- Title of the problem: DAM
- Execution: Full execution
- Backup: No Backup
- Axysimetry: No
- Gravity X component: 0
- Gravity Y component: 0
- Gravity Z (Y for 2-D): -9.81

Fuente: *El autor.*

Ahora se definen las ecuaciones a resolver, escogemos el equilibrio de esfuerzos y los balances masivos de agua, además definimos 20°C de temperatura constante durante el problema y la presión de gas la tomamos como cero en cuanto a condiciones iniciales. Los demás parámetros no son importantes para este problema.

FIGURA 12. Equilibrios y balances.



The screenshot shows the same "Problem data" window, but with the "Equations solved" tab selected. The settings are:

- Stress equilibrium (unknown displacement u)
Updated lagrangian method: No
- Mass balance of water (unknown liquid pressure P_l)
- Mass balance of air (unknown gas pressure P_g)
Constant P_g [MPa]: 0
- Energy balance (unknown temperature)
Constant Temp[C]: 20
- Mass balance of conservative species (unknown solute concentration w)

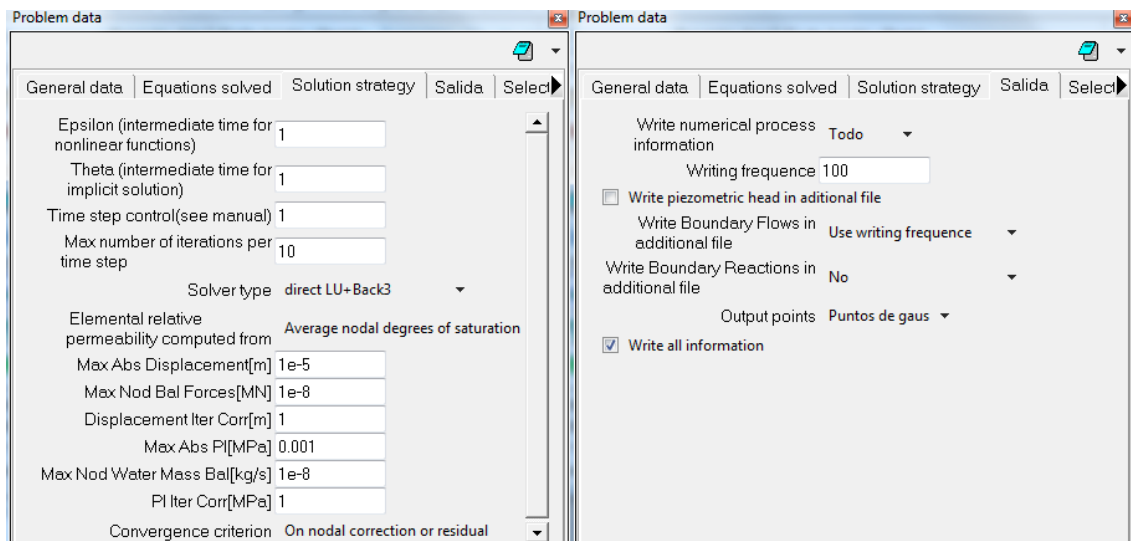
Fuente: *El autor.*

Determino el número de iteraciones por paso para resolver el problema, la precisión de la convergencia con la que deseo sean resueltas las ecuaciones, y la tolerancia de los errores de acuerdo a la aplicación del problema (figura 12).

Es necesario también ingresar ahora las propiedades de los materiales, la presa consiste de un núcleo formado de material de baja permeabilidad y de los paramentos los cuales son enrocados. Sin embargo para realizar la simulación es necesario considerar el agua como un material independiente. El modelo constitutivo es de propiedades viscoplásticas, el cual es una simulación más completa que toma en cuenta el rango plástico de los materiales.

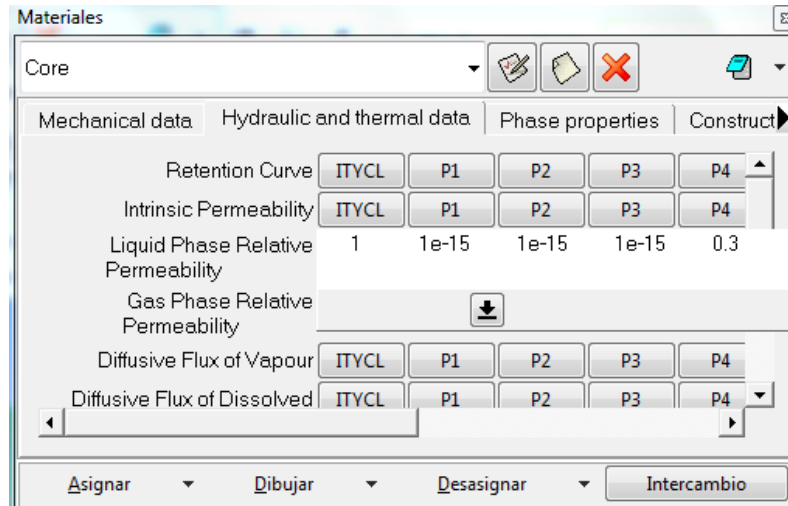
A la arcilla se le asignan propiedades mecánicas (figura 13), entre estas el módulo de elasticidad, el coeficiente de poisson y los parámetros necesarios para tener en cuenta la viscoplasticidad para suelos no saturados según el modelo general de la teoría de Desai (1992) y Perzyna (1966), y desarrolladas por Molist (1997) y Sánchez ya que este modelo es el que está implementado en el Code_Bright.

FIGURA 13. Estrategia de Solución y salida.



Fuente: *El autor.*

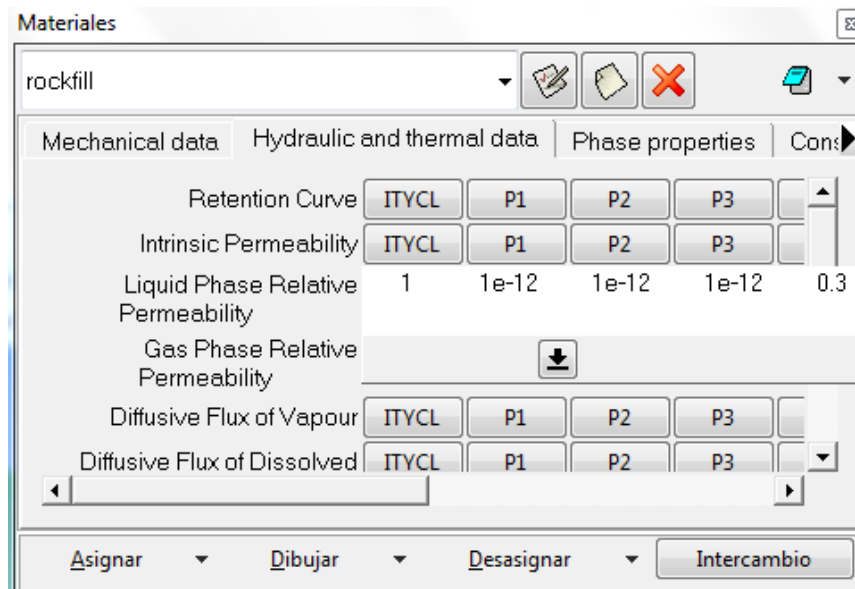
FIGURA 14. Propiedades del material Arcilla.



Fuente: El autor.

A la arcilla también se le asignan propiedades hidráulicas entre ellas, la curva de retención del material y la permeabilidad (figura 13), Code_Bright utiliza la permeabilidad intrínseca de los materiales. Se tiene en cuenta también que las capas materiales son construidas en el sitio a medida que pasa el tiempo.

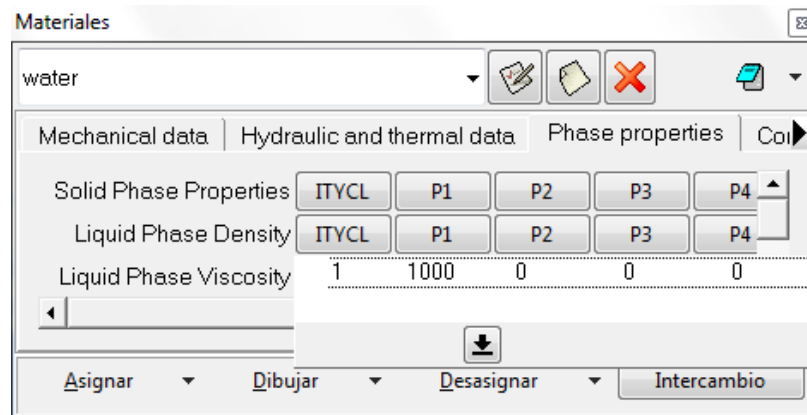
FIGURA 15. Propiedades del material Enrocado.



Fuente: El autor.

Al enrocado se le asignan propiedades mecánicas e hidráulicas al igual que al agua que al ser considerada como un material se le asigna parámetros de fase y térmicas (Figura 15). Cabe anotar que adicionalmente se realizan simulaciones con los mismos materiales, condiciones de frontera, tiempo y flujo, pero teniendo en cuenta propiedades netamente elásticas de los materiales con el fin de comparar posteriormente los resultados de las simulaciones. En cuanto al modelo elástico, a los materiales les es asignado el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson únicamente, en cuanto al modelo visco elástico se ingresan valores necesarios para el desarrollo del modelo constitutivo viscoplástico de Desai y Perzyna.

FIGURA 16. Propiedades del material, Agua.



Fuente: *El autor.*

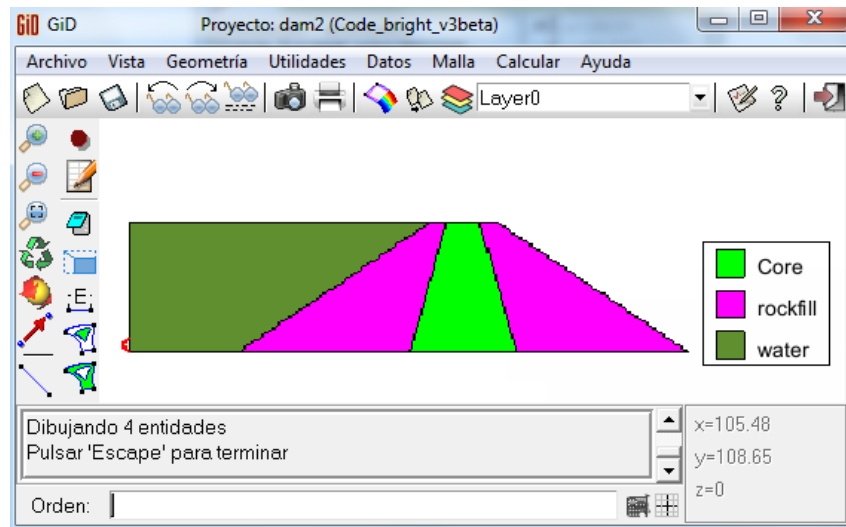
Se asigna cada material a la superficie correspondiente, los materiales se diferencian en la pantalla por el color escogido por Code_Bright. Se definen las condiciones de contorno para llevar a cabo la simulación. Al ser un problema hidromecánico, se definen las siguientes condiciones:

- Condiciones mecánicas de frontera
- Condiciones de flujo en las fronteras
- Esfuerzos iniciales
- Porosidad inicial de los materiales

- Valores iniciales

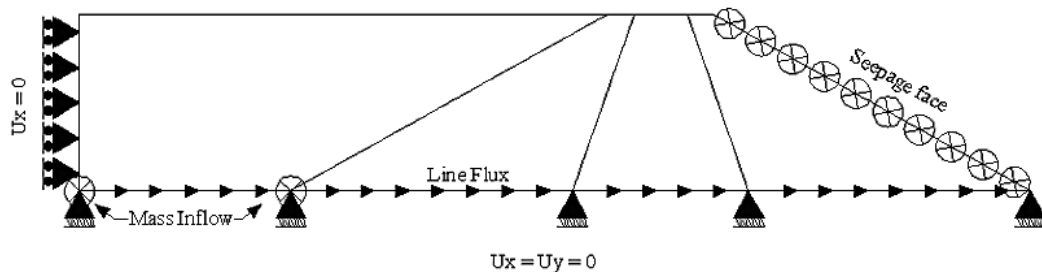
Es necesario ingresar las restricciones de desplazamiento, en este caso la base de la presa y la base del agua tienen restricción horizontal y vertical, el lado izquierdo del agua solo debe estar restringido horizontalmente. Para simular el llenado de la presa, es necesaria una condición de flujo de masa en la base del agua. La línea de base del agua la usamos para la inyección del agua. La base de la presa es impermeable y hay una condición de filtración en el paramento aguas abajo de la presa. Se muestran las condiciones en la figura 17 y 18.

FIGURA 17. Materiales Asignados.



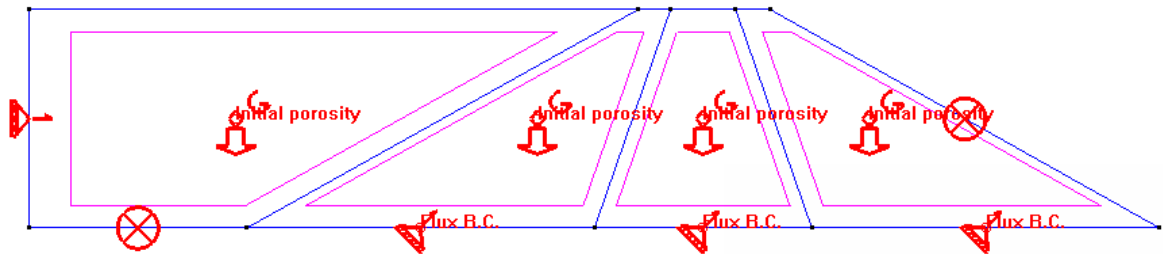
Fuente: El autor.

FIGURA 18. Condiciones de frontera mecánicas y de flujo.



Fuente: Code_Bright-Tutorial.DAM.

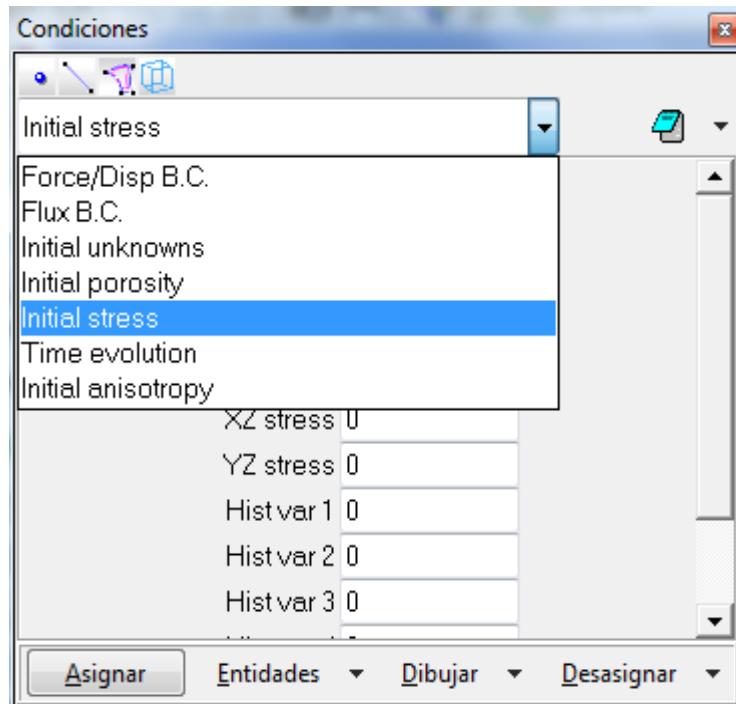
FIGURA 18.1 Esquema de condiciones iniciales de esfuerzo y porosidad en Code_Bright.



Fuente: El autor.

En el problema que está siendo modelado hay dos variables iniciales importantes, primeramente debe tenerse en cuenta que el núcleo y el enrocado son materiales no saturados, por lo que hay que asignarles un valor de succión inicial y un estado de esfuerzos inicial a los materiales.

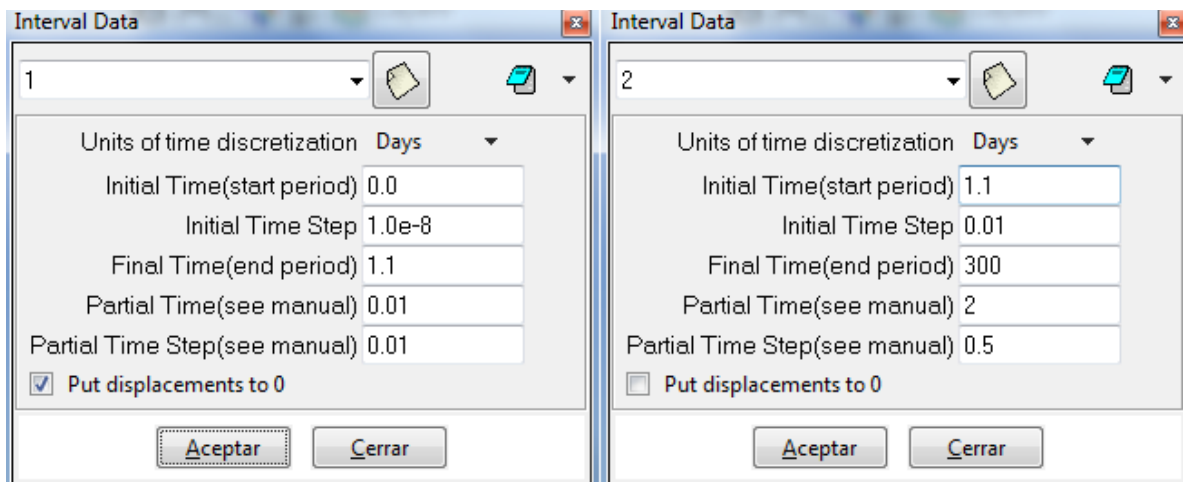
FIGURA 19. Ingreso de parámetros iniciales.



Fuente: El autor.

Una vez los datos del problema, materiales y condiciones han sido introducidos, se hace necesario definir los intervalos de tiempo. Como condición de frontera adicional se incrementa la presión en la línea base del agua para simular el llenado de la presa, el cual se simula en 300 días, repartido en dos intervalos. Un primer intervalo durante el cual no hay cargas presentes (de 0 a 1) y que me permite equilibrar las condiciones iniciales, el segundo intervalo es de 1.1 días a 300 días, que es donde se lleva a cabo la simulación.

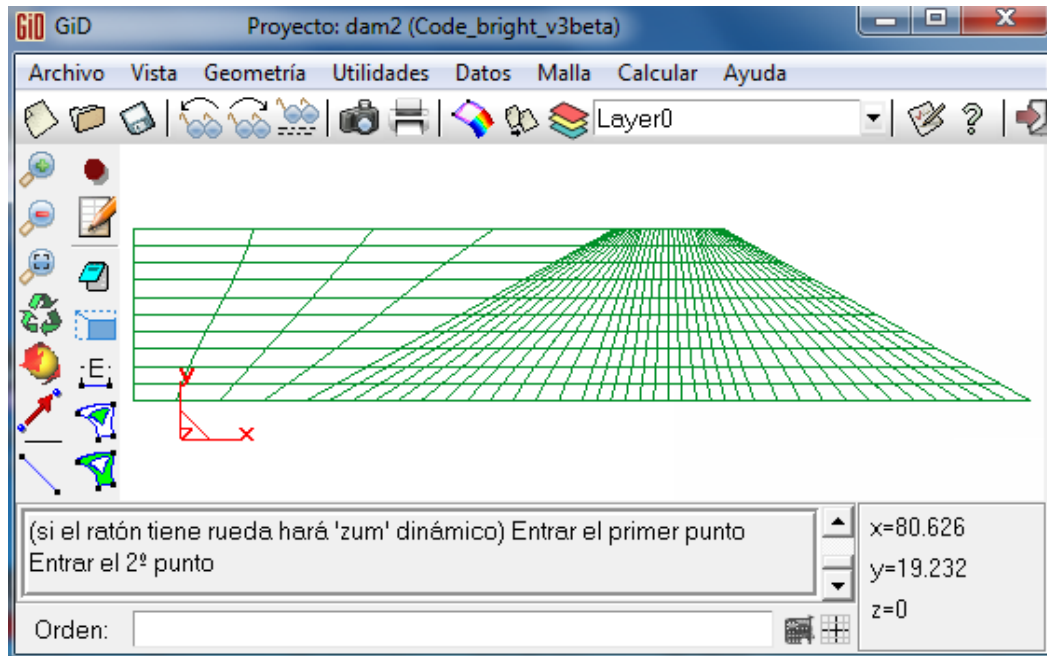
FIGURA 20. Intervalos de tiempo.



Fuente: *El autor.*

Realizado lo anterior se procede a generar la malla compuesta por elementos rectangulares, y a cada superficie se le asigna la cantidad de elementos deseada, al ser una versión de prueba el GiD restringe la cantidad de nodos.

FIGURA 21. Malla generada.

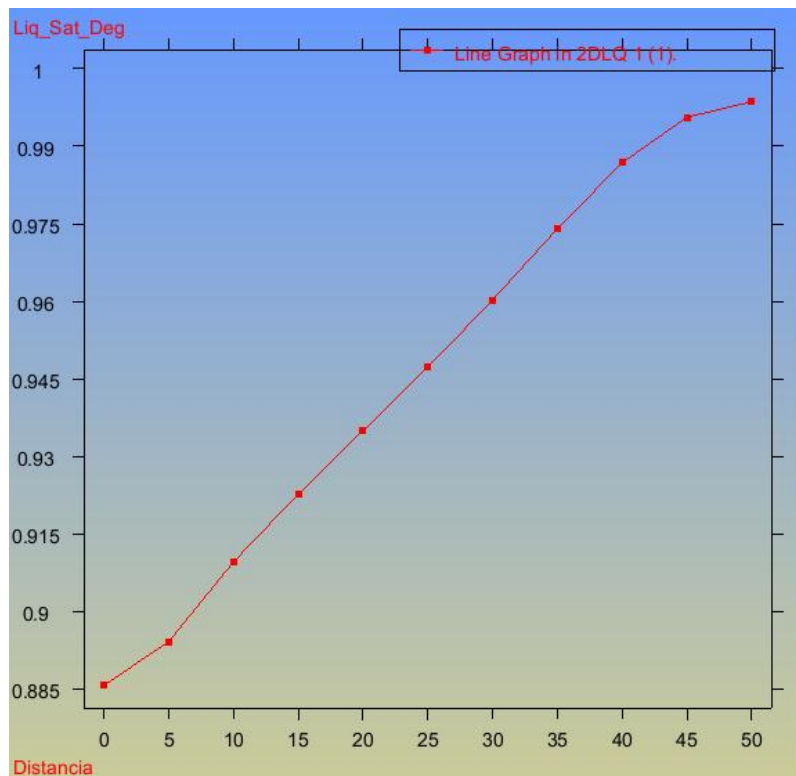
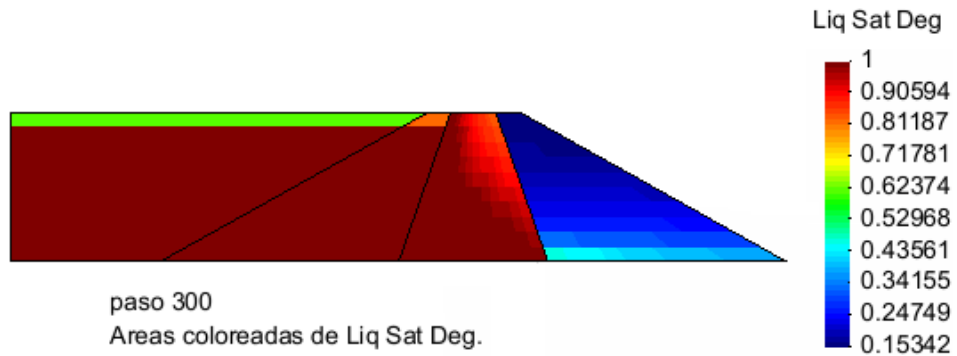


Fuente: *El autor.*

En este nivel del avance ya se encuentra el modelo numérico terminado. Los cálculos los realiza el Code_Bright y los resultados los muestra el postproceso de GiD.

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos, en la figura 21 se ve el grado de saturación de la presa, y la evolución del grado de saturación con el tiempo en de un punto del núcleo de arcilla.

FIGURA 22. Ejemplo de Gráficas de Resultados.



Fuente: *El autor.*

3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Obtenidos los resultados de las simulaciones del software, se hace un análisis de sensibilidad de las variables. Se analizan los desplazamientos, la evolución del

grado de saturación en diferentes puntos del núcleo de arcilla y las líneas de isopresión entre otros aspectos.

3.1 Modelo constitutivo

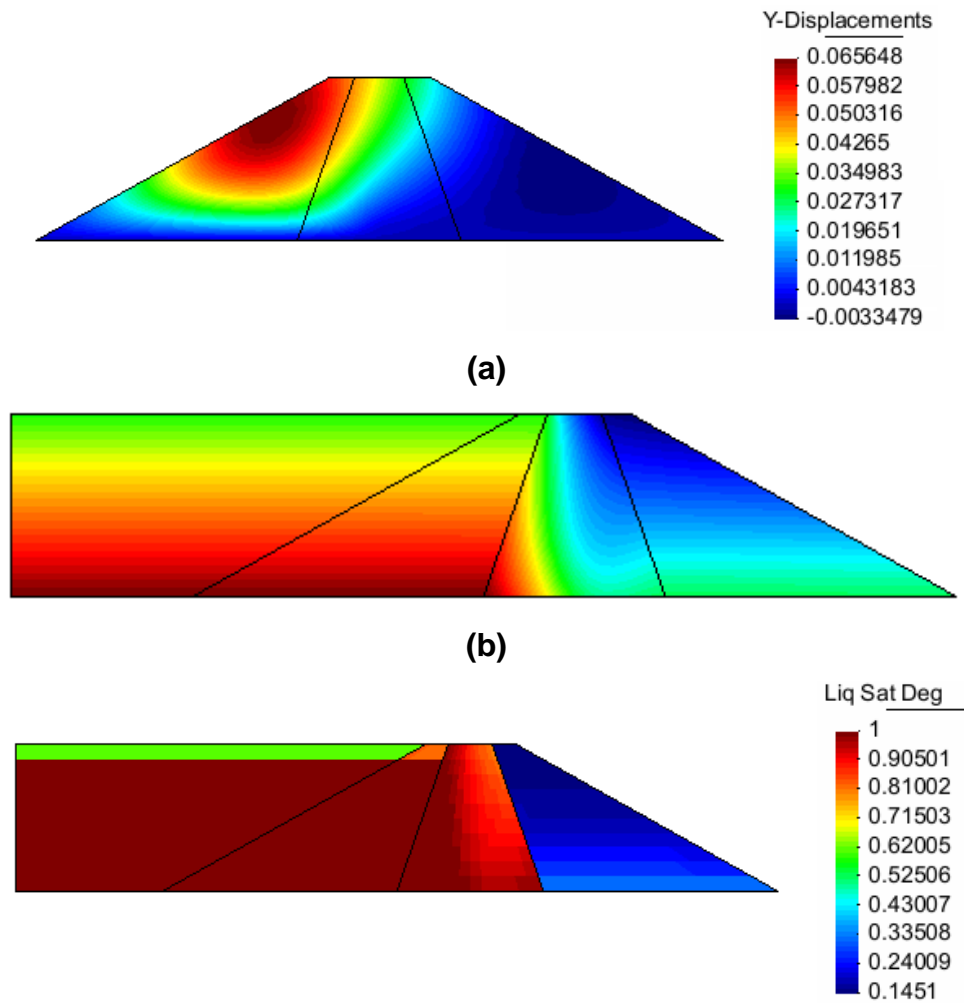
Se han creado dos modelos constitutivos, se muestran gráficas del modelo constitutivo elástico y del modelo constitutivo visco-plástico, donde se comparan gráficamente, los desplazamientos en dirección vertical, las dirección que siguen las líneas de isopresión y el grado de saturación en el tiempo final de llenado de la presa es decir 300 días, cada una de estos modelos es probado para diferentes condiciones de permeabilidad.

3.1.1 Modelo constitutivo Elástico Lineal

La teoría de la elasticidad lineal permite aproximarse a gran cantidad de problemas de interés ingenieril, se refiere a aquellos materiales que tienen la propiedad de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar su forma original si es estas fuerzas exteriores se eliminan.

Es aplicable a problemas estáticos e isoterms, donde la aplicación de las cargas es lo suficientemente lenta para que los efectos dinámicos sean despreciables y donde la variación de la temperatura no es significativa. Se admite como hipótesis de partida, que es lineal y reversible así como el carácter infinitesimal de las deformaciones geométricas.

FIGURA 23. (a) Desplazamientos Verticales [m] , (b) Líneas de Isopresión, (c) Grado de Saturación, $k=1e-15$ [m2].



(c) Fuente: El autor.

3.1.2 Modelo constitutivo Visco-Plástico

Basado en la teoría de Desai y Perzyna se pueden estimar las deformaciones viscoplásticas y esfuerzos, (cabe anotar que el Code_Bright usa este modelo) cuando un elemento de la masa de suelo está bajo cargas propias de su cuerpo y externas. En este modelo el fenómeno de fluencia se caracteriza porque las deformaciones no son solamente función del estado de tensiones, sino también

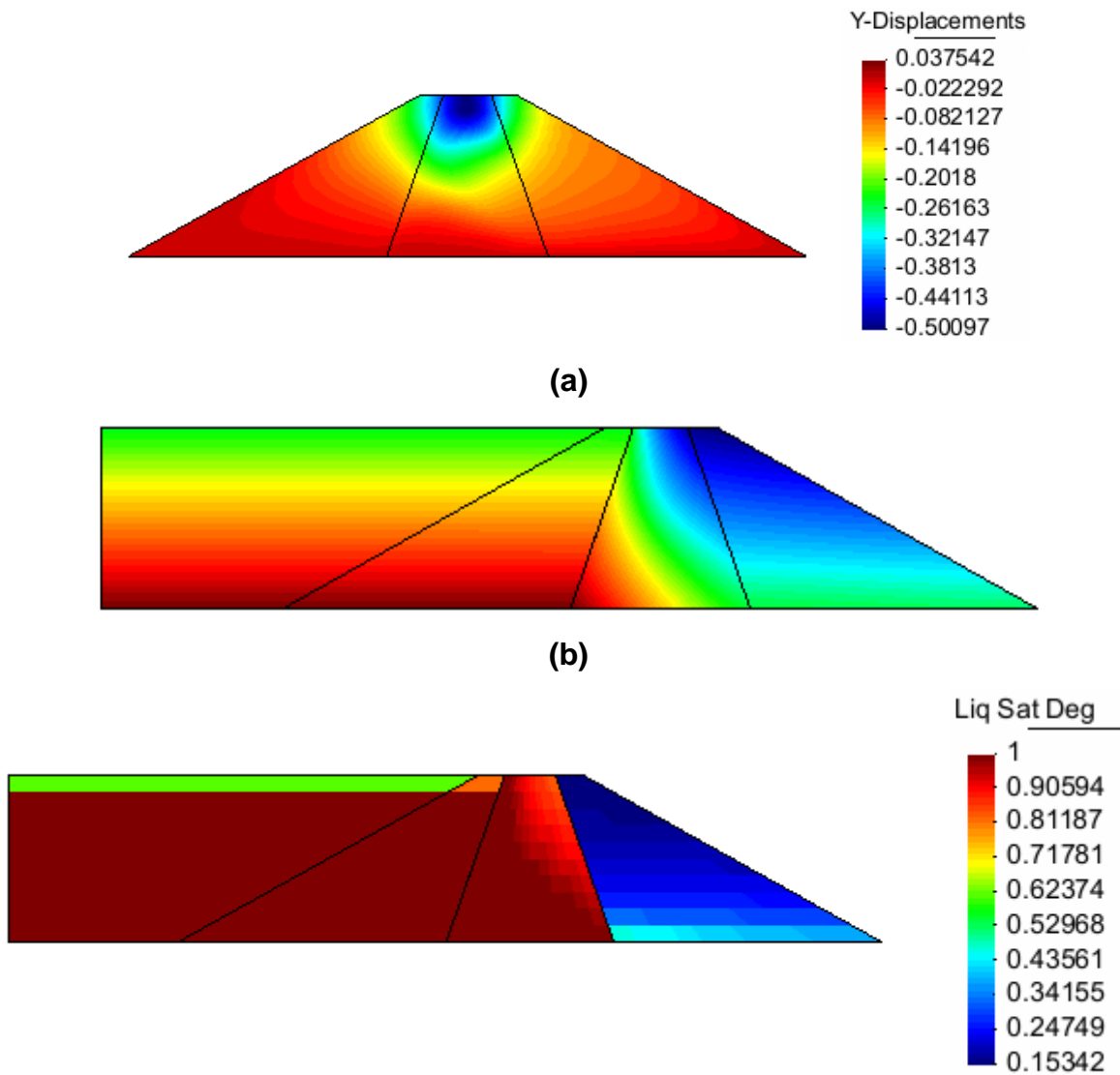
del tiempo y además de una deformación instantánea, el material sufre deformaciones de fluencia (deformaciones viscoplásticas) y se debe tener en cuenta que en este comportamiento, la viscosidad es una propiedad del material que es tomada en cuenta una vez se excede la resistencia última del suelo y éste comienza a deformarse a un esfuerzo constante con el tiempo.

Perzyna (1960), define la variación de las deformaciones viscoplásticas en el tiempo como un tensor dependiente de la viscosidad, así como también de la resistencia máxima del suelo proporcionada por la denominada función de fluencia y de la variación del potencial plástico respecto al tensor de esfuerzos, expresión

$$\text{matemática del modelo } \varepsilon_{ij}^{vp} = \frac{\partial \varepsilon_{ij}^{vp}}{\partial t} = \Gamma \langle \phi(F) \rangle \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1.7).$$

Como funciones involucradas en este modelo aparece la función de fluencia del material F que está en función de la succión s y la potencia a I , $J1$ el primer invariante del tensor de esfuerzos efectivos σ_{ij} , $J2$ y $J3$ que son el segundo y tercer invariante del tensor de esfuerzos desviadores y los valores iniciales de estos. Otro parámetro es G que es la función de potencial viscoplástico, σ_{ij} corresponde al tensor de esfuerzos. Así mismo parámetros de la curva de fluencia de la carga de colapso LC y variables de compresión propias del material.

FIGURA 24. (a) Desplazamientos Verticales [m], (b) Líneas de Isopresión, (c) Grado de Saturación, $k=1e-15$ [m²].



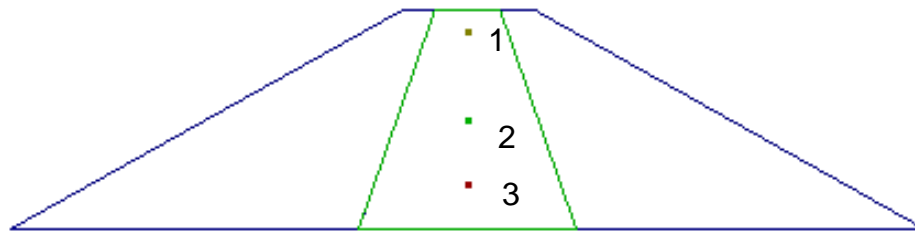
(c) Fuente: *El autor.*

En las figuras 22 y 23 se hace visible la diferencia entre los modelos constitutivos, ya que en el modelo elástico se concentran los desplazamientos en el enrocado aguas arriba y en el viscoplástico en el núcleo de arcilla, el enrocado aguas arriba y parte del núcleo se saturan en ambos modelos, sin embargo en el viscoplástico la porción saturada es mayor.

3.2 Grado de Saturación

Se evalúa grado de saturación en el modelo constitutivo viscoplástico, a diferentes profundidades del eje central del núcleo de arcilla, en las gráficas se observa la evolución del grado de saturación en el tiempo, de cada uno de estos puntos para diferentes permeabilidades. Los puntos de control están sobre el eje del núcleo el punto 1 a 45m de la base, el punto 2 a 25m y el punto 3 a 10m.

FIGURA 25. Puntos de control

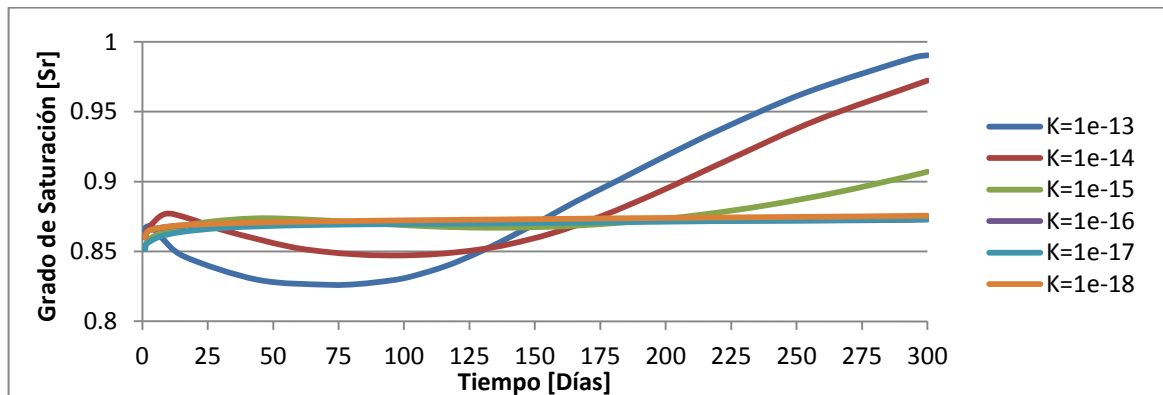


Fuente: *El autor.*

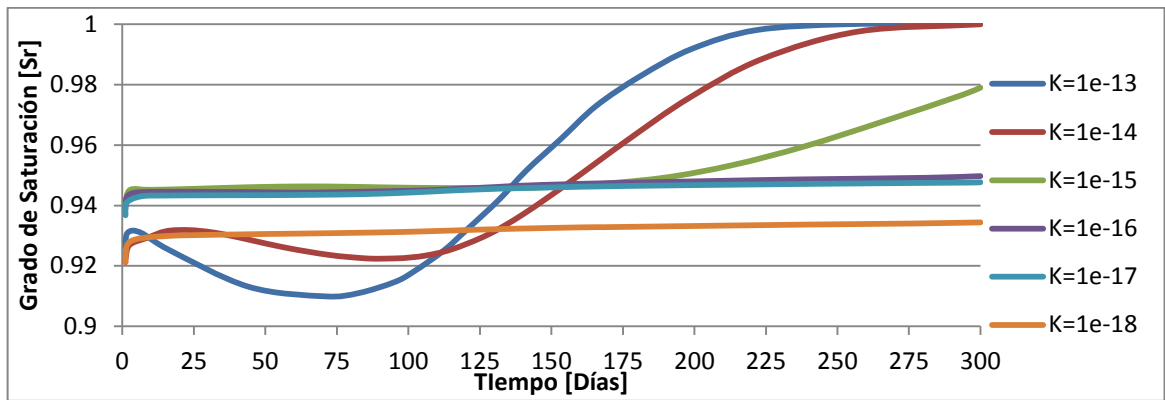
Modelo Viscoplastico

FIGURA 26. Variación del grado de saturación en diferentes puntos del núcleo de arcilla.

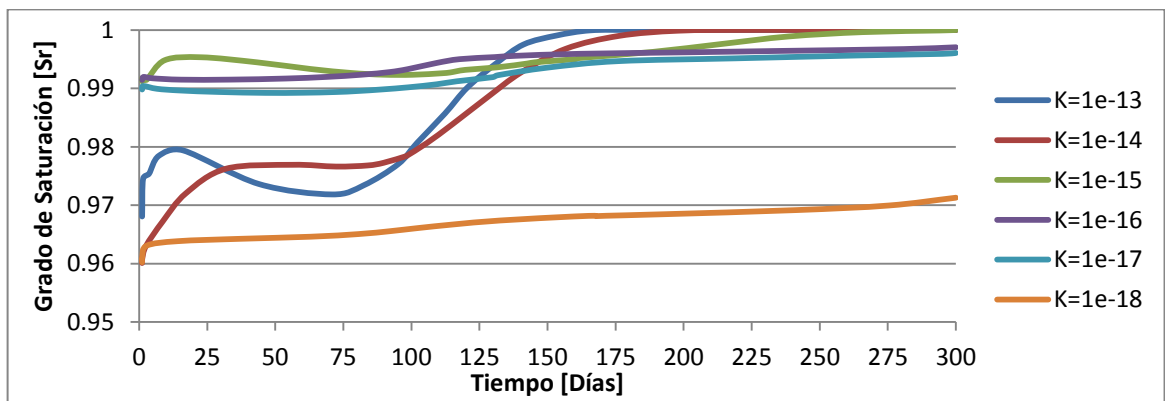
Punto 1



Punto 2



Punto 3

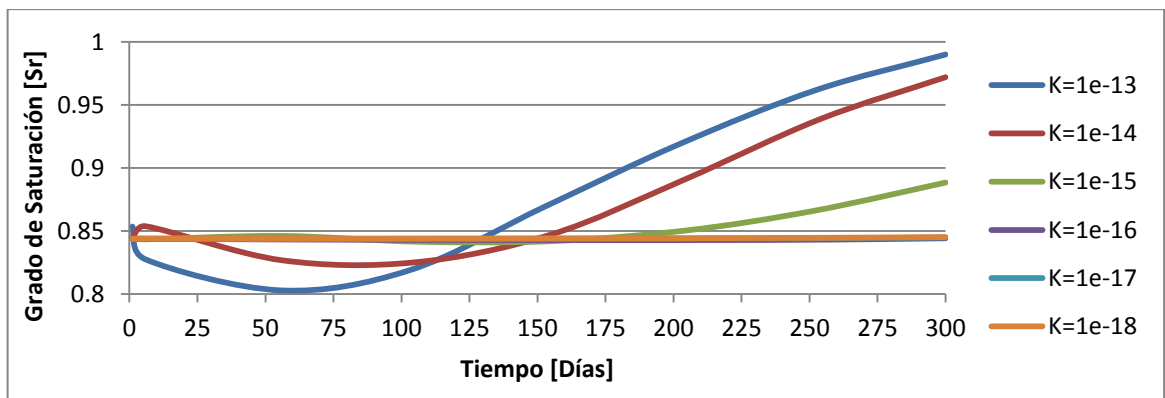


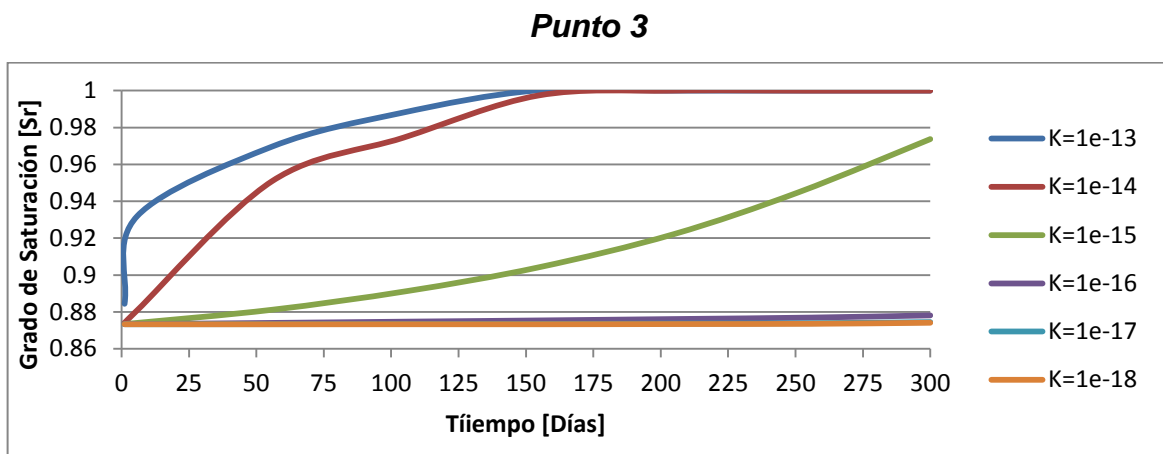
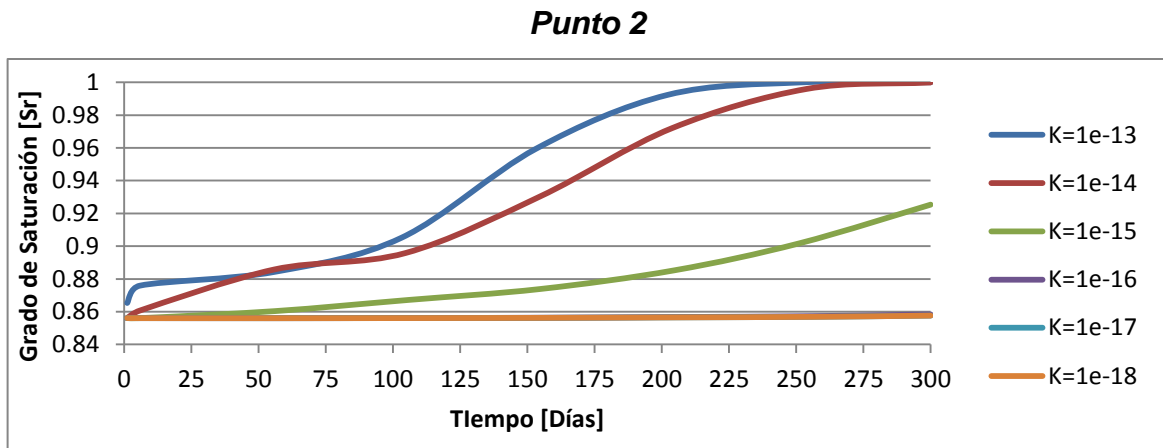
Fuente: El autor.

Modelo Elástico

FIGURA 27. Variación del grado de saturación en diferentes puntos del núcleo de arcilla.

Punto 1





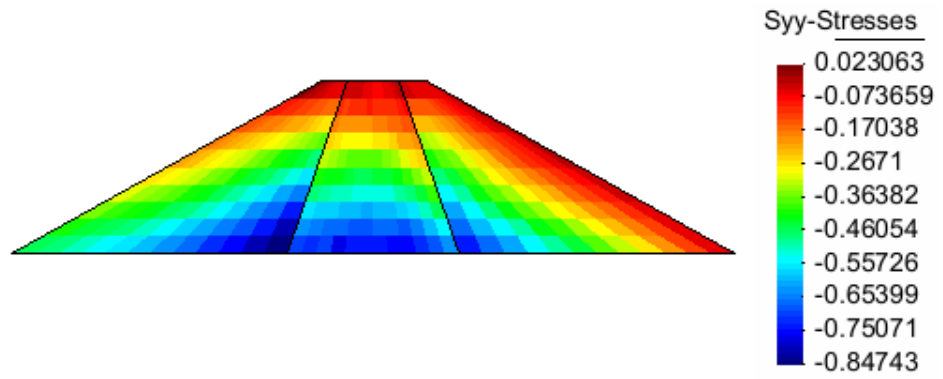
Fuente: El autor.

3.3 Esfuerzos verticales

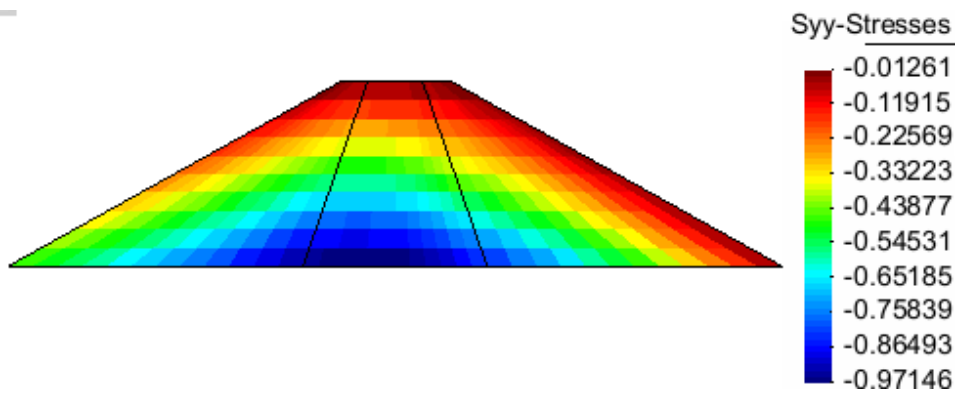
Se muestran las áreas coloreadas de esfuerzos verticales en el modelo constitutivo viscoplástico y elástico, los esfuerzos de compresión son mayores en la base impermeable de la presa, en la cresta y en el paramento aguas abajo los esfuerzos verticales son menores que los del paramento aguas arriba.

FIGURA 28. Gráfica de esfuerzos verticales [MPa] permeabilidad intrínseca $k=1e-13$ [m²]. (a) Modelo Viscoplastico, (b) Modelo Elástico

(a)



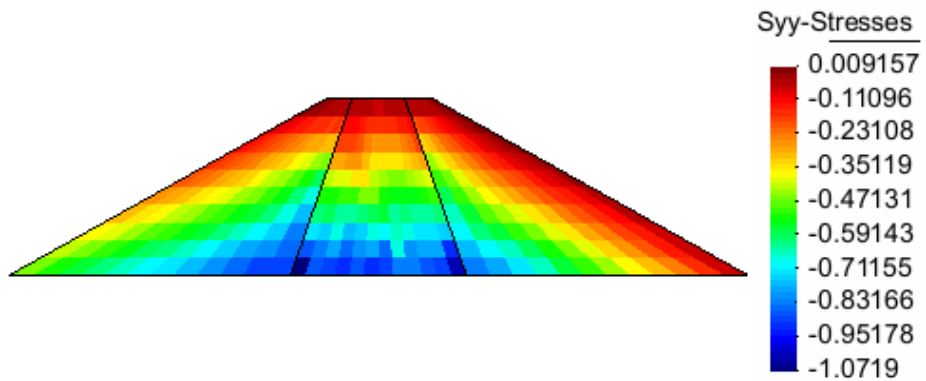
(b)



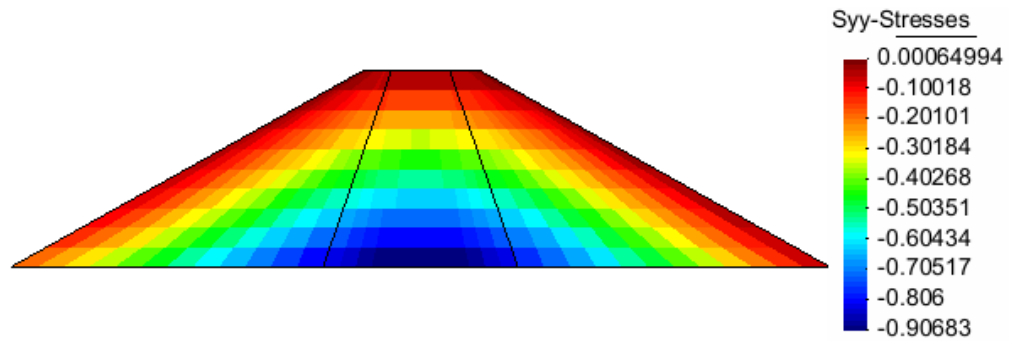
Fuente: *El autor.*

FIGURA 29. Gráfica de esfuerzos verticales [MPa] permeabilidad intrínseca $k=1e-15$ [m²]. (a) Modelo Viscoplastico, (b) Modelo Elástico

(a)



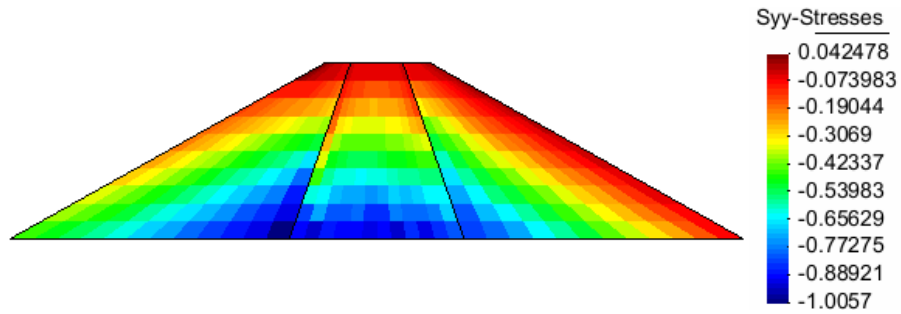
(b)



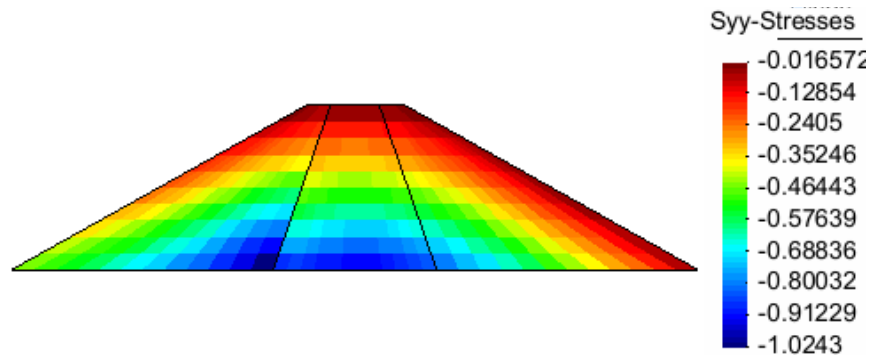
Fuente: *El autor.*

FIGURA 30. Gráfica de esfuerzos verticales [MPa] permeabilidad intrínseca $k=1e-17$ [m²]. (a) Modelo Viscoplastico, (b) Modelo Elástico

(a)



(b)



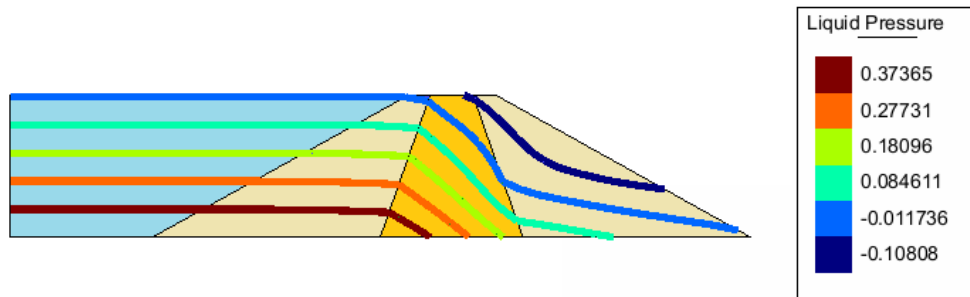
Fuente: *El autor.*

3.4 Líneas de Isopresión

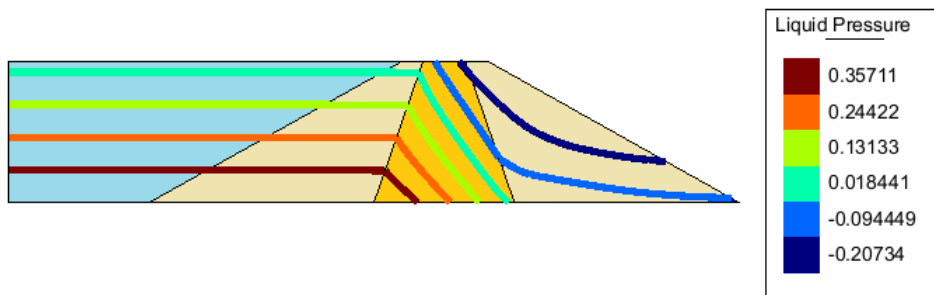
Se muestran las líneas de isopresión que corren a lo largo de la presa, esquemáticamente se presentan de 5-8 líneas, la cuales varían su forma en el núcleo de arcilla debido a los cambios de permeabilidad, consecuencia del aumento del gradiente hidráulico, se considera la base de la presa una línea de flujo. Independiente del modelo elástico o viscoplástico, las líneas de igual presión mantienen su forma.

FIGURA 31. Grafica de líneas de igual presión para diferentes permeabilidades

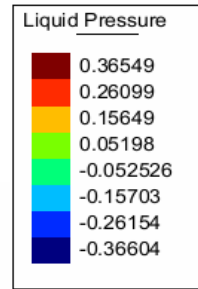
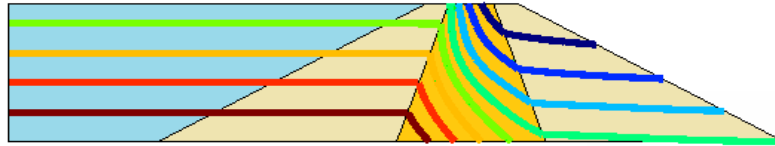
(a) $k=1e-13$ [m²]



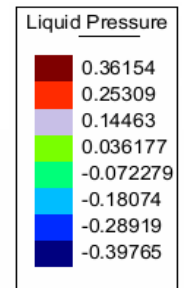
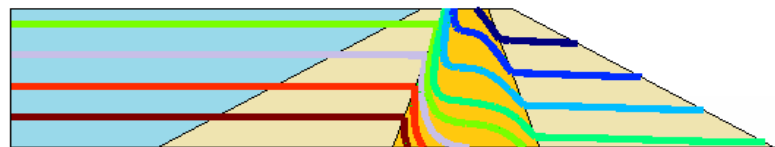
(b) $k=1e-14$ [m²]



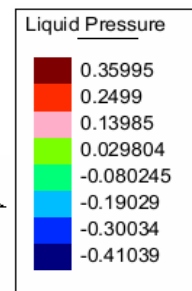
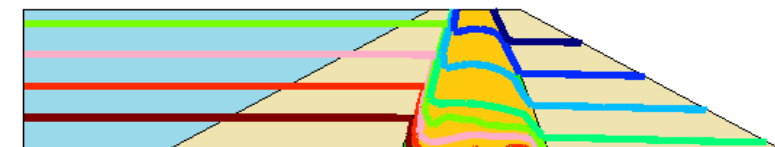
(c) $k=1e-15$ [m²]



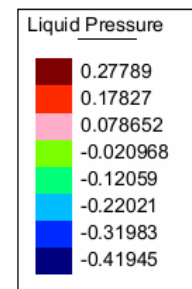
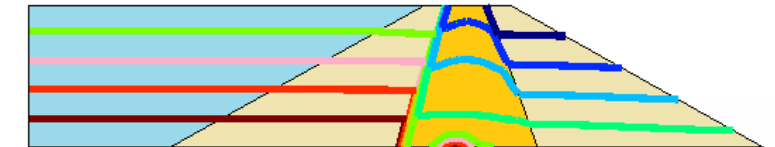
(d) $k=1e-16$ [m²]



(e) $k=1e-17$ [m²]



(f) $k=1e-18$ [m²]



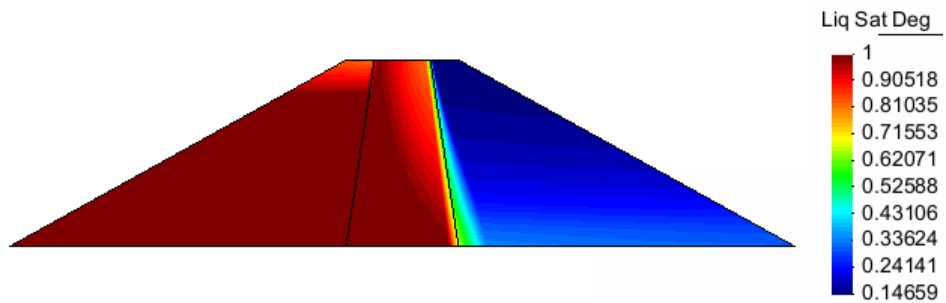
Fuente: El autor.

3.5 Influencia del cambio en la geometría del núcleo

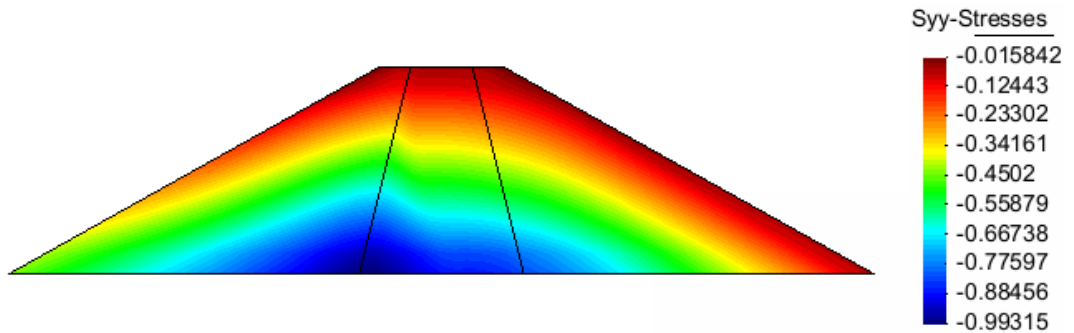
Se cambia la geometría del núcleo de arcilla del modelo elástico, disminuyendo las pendientes a medida que se aumenta el ancho de la base del núcleo, el enrocado aguas abajo continúa sin saturarse, y el núcleo no se satura por completo y los esfuerzos continúan acentuándose en el paramento aguas arriba de la presa, las líneas de isopresión mantienen su forma habitual, descrita anteriormente,

FIGURA 32. Cambios geométricos en el núcleo de arcilla

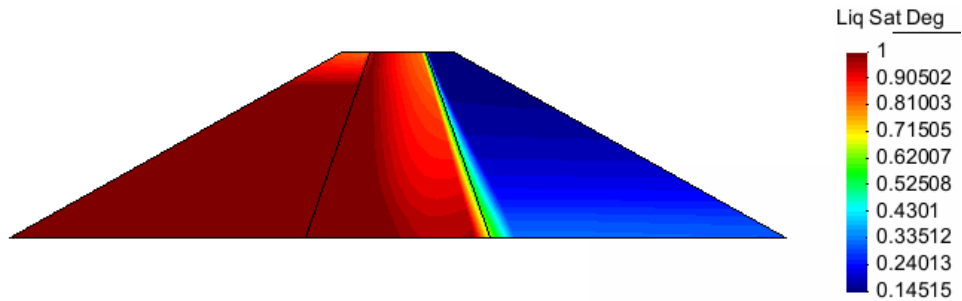
(a) Base del núcleo = 30m



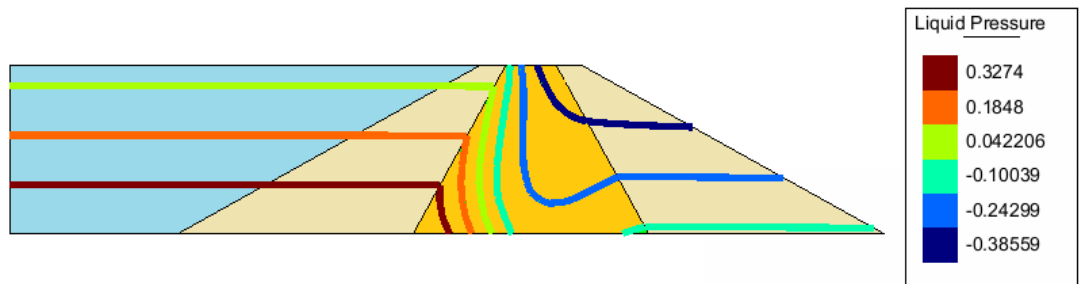
(b) Base del núcleo = 40m



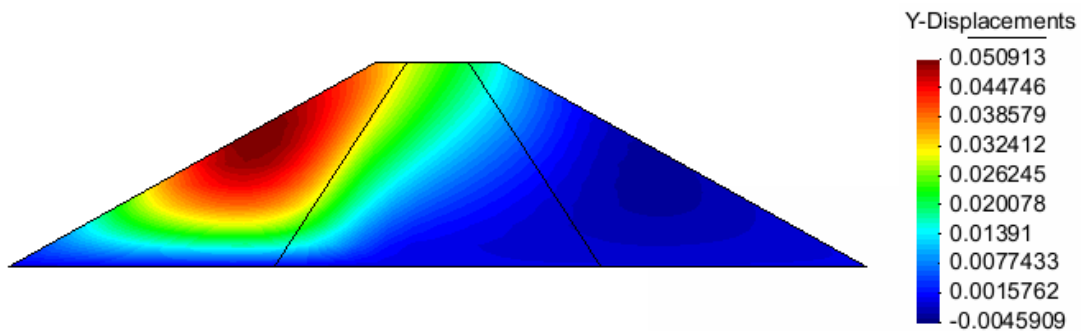
(c) Base del núcleo = 50m



(d) Base del núcleo = 70m



(e) Base del núcleo = 80m



Fuente: *El autor.*

3.6 Variación de la permeabilidad, k horizontal diferente a k vertical en el núcleo de arcilla.

Las permeabilidades del suelo son anisotrópicas, con k_h , el coeficiente de permeabilidad horizontal, varias veces más grande que k_v , el coeficiente de permeabilidad vertical. En rellenos compactados la relación k_h/k_v , puede exceder

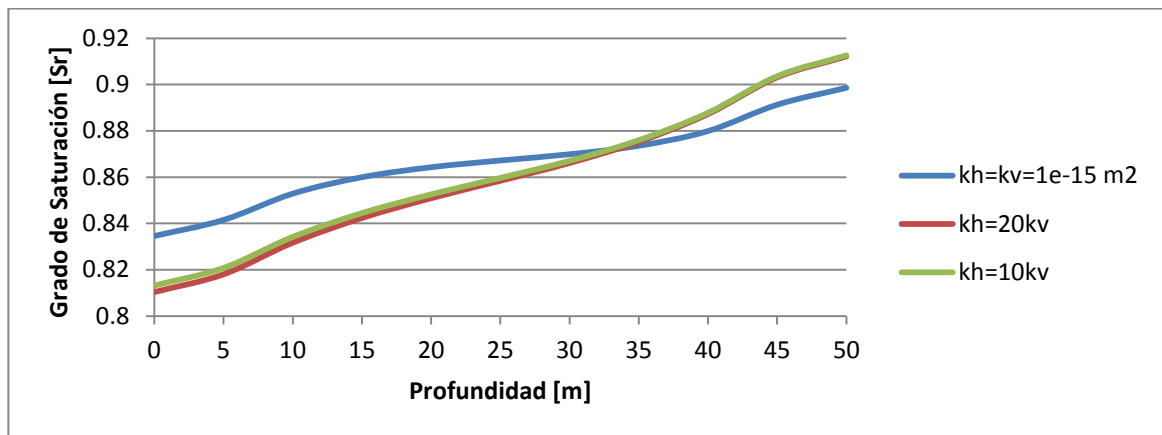
de 20. El coeficiente de permeabilidad horizontal se determina con más confiabilidad in situ, es decir, mediante ensayos de bombeo en campo, entre otros.

Se simulan en Code_Bright para el modelo elástico, dos condiciones para las permeabilidades del núcleo en dirección vertical y horizontal.

1. $k_h=1e-15 \text{ m}^2$ $k_v=5e-17 \text{ m}^2$
2. $k_h=1e-15 \text{ m}^2$ $k_v=1e-16 \text{ m}^2$
3. $k_h=1e-15 \text{ m}^2$ $k_v=1e-15 \text{ m}^2$

A medida que se alcanza la profundidad de 50m, el grado de saturación aumenta para todos los casos, en la gráfica se observa cómo al inicio del eje que se evalúa, el grado de saturación es menor para las condiciones de permeabilidad vertical baja, esta tendencia se mantiene hasta una profundidad aproximada de 35 m, luego S_r para la condición isotrópica se hace menor a las condiciones 1 y 2.

FIGURA 33. Evolución del grado de saturación, en el eje central de núcleo de arcilla

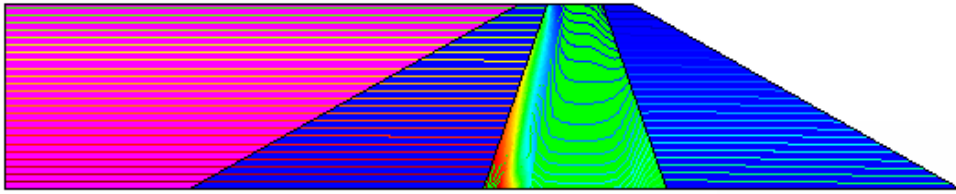


Fuente: *El autor.*

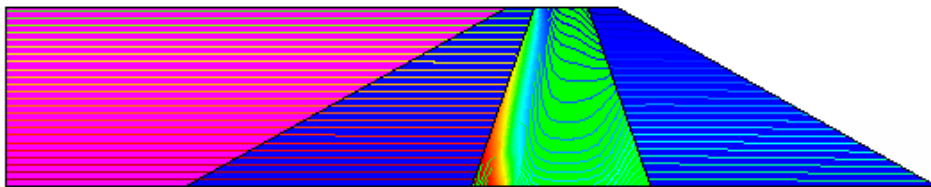
Se evidencia como las líneas de igual presión, tienden a ser horizontales debido a la baja permeabilidad en la dirección vertical.

FIGURA 34. Líneas de isopresión en condición de anisotropía.

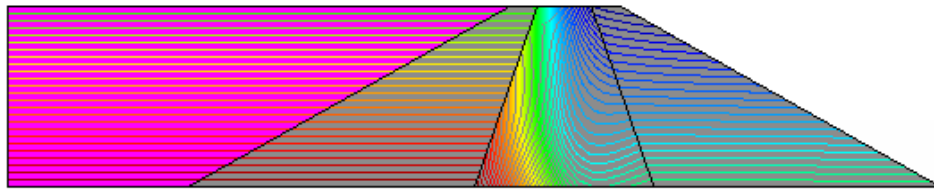
(a) $kh=20kv$; $kh=1e-15 \text{ m}^2$ $kv=5e-17 \text{ m}^2$



(b) $kh=10kv$; $kh=1e-15 \text{ m}^2$ $kv=1e-16 \text{ m}^2$



(c) $kh=kv=1e-15 \text{ m}^2$



Fuente: *El autor.*

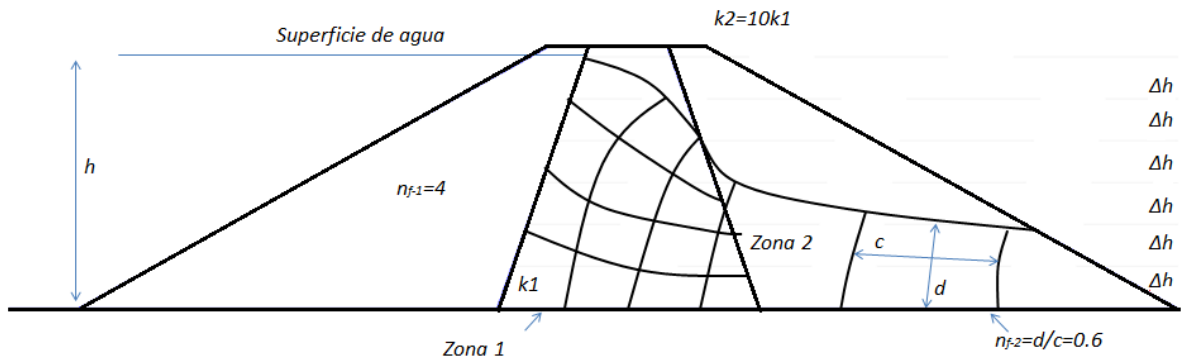
3.7 Construcción de redes de flujo en secciones compuestas.

Cuando el flujo de agua pasa por una frontera hacia otro suelo de diferente permeabilidad, las líneas en el segundo suelo deben elongarse o hacerse mas cortas para hacer que la relación entre largo y ancho de los rectángulos satisfagan la ecuación

$$\frac{c}{d} = \frac{k_2}{k_1} \quad (3.1)$$

c es la longitud y d el ancho de los rectángulos en el segundo suelo, la permeabilidad del primer suelo es k_1 , y la del segundo es k_2 .

**FIGURA 35. Método para construir una red de flujo para una sección compuesta-
Primera prueba de red de flujo (incorrecta)**



Fuente: El autor.

Para desarrollar una red de flujo en este tipo de secciones se siguen los siguientes pasos.

1. Localizar el nivel del reservorio aguas arriba y el nivel de salida aguas abajo, tener en cuenta la diferencia de cabeza de agua h , y dividir h en un número conveniente de incrementos iguales Δh . Dibujar líneas guía horizontales en los intervalos Δh aguas abajo de la sección.
2. Suponer una posición inicial para la línea de nivel freático en ambas zonas, y dibujar una red de flujo preliminar, haciendo cuadrados en la zona 1 y rectángulos en la zona 2, procurar hacer las relaciones largo-ancho iguales ajustando la línea de nivel freático. Al completar este paso, la red de flujo de prueba debe estar razonablemente bien dibujada y debe satisfacer los requerimientos básicos de una red de flujo, aunque probablemente la zona 2 no satisface la ecuación (3.1), aunque la red de flujo ha sido dibujada la relación k_2/k_1 probablemente no es igual a la proporción k_2/k_1 originalmente asumida para la sección.

3. Calcular la relación actual k_2/k_1 para la red de flujo de prueba primeramente dibujada, para hacer este chequeo, procedemos así :
 - (a) Contar el número de canales de flujo entre dos líneas equipotenciales adyacentes en la zona 1 y llamamos este número n_{f-1} . Para la red de flujo de prueba de la figura 35 $n_{f-1}=4.0$.
 - (b) Contar el número de canales de flujo entre dos líneas equipotenciales adyacentes en la zona 2 y llamar este número n_{f-2} . En la figura 35 n_{f-2} es igual a la relación ancho-largo del rectángulo de la zona 2, $d/c=0.6$
 - (c) El valor actual de k_2/k_1 para la red de prueba para la figura 35 se determina de la ecuación

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{n_{f-1}}{n_{f-2}} \quad (3.2)$$

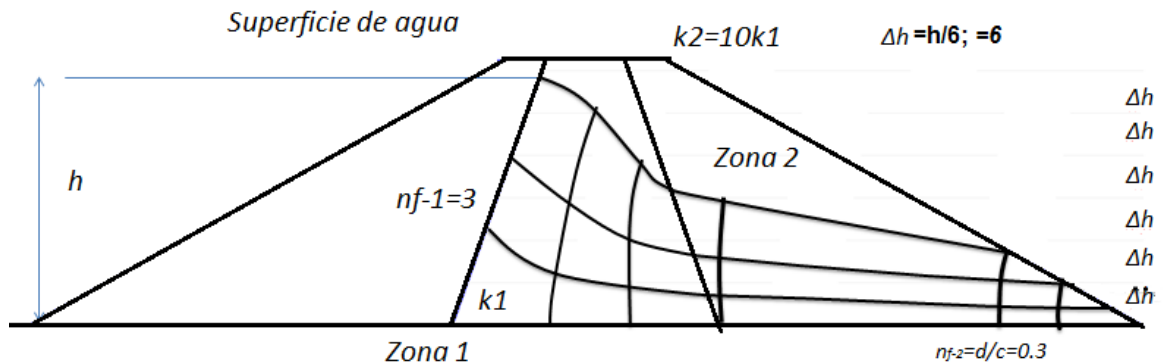
- (d) Si la relación calculada k_2/k_1 es muy alta, la línea de saturación en la zona 2 es esta muy baja y debe subir en la gráfica. Si la relación calculada k_2/k_1 es muy baja, la línea de saturación en la zona 2 está muy alta y debe bajar en la gráfica. Levantar o disminuir la línea de nivel freático en la zona 2 como se indica y construir una nueva red de flujo de prueba.
- (e) Repetir pasos de (a) a (d) hasta que la red de flujo con la precisión deseada sea obtenida.

Aplicando la ecuación (3.2) a la primera red de flujo de prueba en este ejemplo, $k_2/k_1=4/0.3=13.3$. La proporción k_2/k_1 para el ejemplo fue asumida de 10, la relación k_2/k_1 de la red de flujo de prueba es muy alta, por lo tanto el nivel de la línea de saturación en la zona dos es muy bajo, y debe ser aumentado. Para la segunda red de flujo de prueba $n_{f-1}=3$ y $n_{f-2}=0.3$. La proporción calculada de $k_2/k_1=3/0.3=10$, es el valor original asumido.

La cantidad de infiltración puede ser calculada por $q = kh \frac{n_f}{n_d}$ y debe ser la misma en las zona 1 y zona 2. En la zona 1 $q=k_1h(n_{f-1}/n_d)$ y en la zona 2 $q=k_2h(n_{f-2}/n_d)$,

para la red construida en la figura 36 $n_{f-1}=3$ y $n_{f-2}=0.3$, $nd=6$, la cantidad de infiltración q puede ser calculada tanto k_1 o k_2 . Usando k_1 , $q=k_1h(n_{f-1}/n_d)=k_1h(3/6)=0.5 k_1h$. Usando k_2 , $q=k_2h(n_{f-2}/n_d)=k_2h(0.3/6)=0.05 k_2h$. Pero $k_2=10k_1$, por lo tanto $q=0.05 (10k_1)h=0.5k_1h$.

**FIGURA 36. Método para construir una red de flujo para una sección compuesta-
Red completa**



Fuente: El autor.

Siguiendo las situaciones simuladas anteriormente para un permeabilidad del núcleo de arcilla de $1e-5$ m/s y una permeabilidad para la zona 2 o enrocado aguas debajo de $1e-4$ m/s se calcula el caudal de infiltración $Q_o=kh(Nf/Nd)(a/b)$.

$$Q = 1 * 10^{-5} * 48 * \left(\frac{3}{6}\right) * \left(\frac{1}{1}\right) * (24 * 3600) = 20.7 \text{ m}^3\text{m}^{-1}\text{día}^{-1}$$

$$Q = 1 * 10^{-4} * 48 * \left(\frac{3}{6}\right) * \left(\frac{1}{10}\right) * (24 * 3600) = 20.7 \text{ m}^3\text{m}^{-1}\text{día}^{-1}$$

4. CONCLUSIONES.

- Las simulaciones numéricas, permiten obtener información complementaria a la evolución de diferentes variables en una simulación. De esta manera se puede tener una visión mas completa de los métodos tradicionales usados en la práctica.
- Se deben plantear diferentes modelos constitutivos en las simulaciones en software, teniendo en cuenta el conocimiento de la academia, para así comparar y definir cual es el que mas se asemeja a lo que sucede en la naturaleza.
- El modelo constitutivo viscoplástico, al tener en cuenta parámetros de estados lineales y plásticos, es más apropiado para una simulación de presas de núcleo de arcilla con caras en enrocado, pues va más allá del estado de fluencia de los materiales, de igual manera los desplazamientos verticales se hacen evidentes en toda la presa a cambio del modelo constitutivo lineal cuya simulación presenta desplazamientos localizados en el enrocado aguas arriba y pequeña parte del núcleo de arcilla.
- Al variar la permeabilidad del núcleo de arcilla, se evidencia un cambio en el grado de saturación en las diferentes regiones de la presa, a mayor permeabilidad mayor grado de saturación en el material.
- La pendiente de las líneas de isopresión en el núcleo de arcilla se ve afectada de acuerdo a la permeabilidad, a baja permeabilidad las líneas de presión sufren un cambio de pendiente suave al atravesar el núcleo, y en la arcilla impermeable el cambio de presión en las líneas se hace de manera muy pronunciada en la transición del enrocado-núcleo aguas arriba, lo que indica los cambios de gradiente de presión a lo largo de la presa.

- Debido a los procesos de compactación y propiedades de los materiales, la permeabilidad horizontal usualmente es mayor que la vertical lo que modifica las redes de flujo y el caudal de infiltración al comparar estos aspectos con un suelo isotrópico.
- La distribución de esfuerzos para ambos modelos constitutivos es similar, estando concentrados los mayores esfuerzos en la base de la presa y los menores en la cresta para ambos casos, presentándose mayoritariamente compresiones en el enrocado y el núcleo de arcilla y expansiones en la parte superior de las caras del enrocado.
- El cambio significativo de las dimensiones del núcleo no representa mayor variación en las demás variables estudiadas en esta simulación, su diseño depende del comportamiento estructural que se desea para la estabilidad de la presa y de la disponibilidad de materias primas cercanas a la construcción.
- Es necesario controlar la infiltración en las diferentes zonas de la presa para prevenir la migración de materiales finos del núcleo de arcilla y seleccionar materiales de resistencia y permeabilidad apropiada o valerse de estructuras adicionales como de drenes o filtros.

5. BIBLIOGRAFIA

- Cedergren, Harry R. *Seepage, Drainage, and Flow Nets*. U.S.A.: O Jhon Wiley & Sons, Inc. 1967.
- García, Claudia. *Triaxial verdadero con succión controlada*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- Juárez, Eulalio; Rico, Alfonso. *Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México: Editorial Limusa, 2000.
- Mora, Carolina. *Contención de taludes en estado viscoplástico*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- P.Novak, A.I.B. Moffat, C. Nalluri and R. Narayanan. *Hydraulic Structures*. London: E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hal, 1996.
- Rojas, Silvio H.; León, Belén. *Formulación Matemática del Modelo Viscoplastico de Perzyna*. Mérida: Universidad de los Andes.
- Sherard, James L.; Woodward, Richard J.; Gizienski, Stanley F. y Clevenger, William A. *Earth and Earth-Rock Dams*. U.S.A.: Jhon Wiley & Sons, Inc. 1963.
- Universitat Politècnica de Catalunya, Departamento de ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica. *Manual Code_Bright*. Disponible en https://www.etcg.upc.edu/recerca/code_bright, 2011.