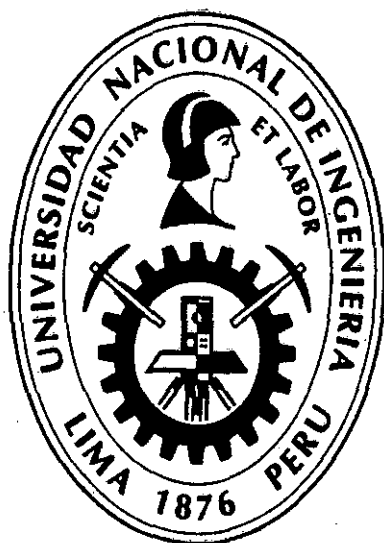


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**ANÁLISIS ACOPLADO HIDRO-MECÁNICO EN LA  
CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UNA PRESA DE TIERRA  
HOMOGENEA**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**MAYU ALBERTO TINCOPA HEREDIA**

**Lima- Perú**

**Digitalizado por:**

**2014**

*Es mucho mejor atreverse a grandes cosas, a obtener triunfos gloriosos, aunque estén mezclados con el fracaso...que alinearse con aquellos espíritus pobres que ni disfrutan mucho ni sufren mucho, porque viven en un crepúsculo gris que no conoce la victoria ni la derrota.*

*Theodore Roosevelt .*

## **AGRADECIMIENTOS**

Dedico estas líneas a mis padres, hermanos y familiares por la inspiración que representan, la motivación y el apoyo incondicional durante el transcurso de mi vida.

A todos mis amigos por los buenos momentos compartidos que me brindan con su compañía, amistad y durante el día a día.

A mis asesores Víctor Sanchez Moya y Fernando Sirumbal por el valioso tiempo brindado y consejos tanto profesionales como de persona durante el desarrollo de mi tesis.

A mi novia Helen que es mi compañera, amiga e inspiración por su apoyo incondicional para afrontar las dificultades que uno va teniendo durante la vida.

## ÍNDICE

	Pág.
<b>RESUMEN.....</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS.....</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>13</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	13
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 Objetivo principal.....	16
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
1.4 METODOLOGÍA.....	16
<b>CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DE LAS PRESAS DE TIERRA.....</b>	<b>18</b>
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	18
2.2 CLASIFICACIÓN DE PRESAS.....	19
2.2.1 Presas de terraplén.....	19
2.2.2 Presas de concreto.....	20
2.3 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN.....	22
2.4 ASPECTOS RELEVANTES.....	23
2.4.1 Consideraciones importantes.....	23
2.4.2 Características de los materiales de presa de tierra.....	24
2.4.3 Mecanismos de defecto, modos de falla y consideraciones de diseño ...	26
2.4.4 Análisis de estabilidad.....	28
<b>CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA.....</b>	<b>30</b>
3.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	30
3.2 ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA MECÁNICA DE SUELOS.....	30
3.2.1 Ecuaciones de equilibrio.....	31
3.2.2 Ecuación de compatibilidad.....	32
3.2.3 Ecuación de resistencia al corte.....	33
3.2.4 Leyes constitutivas.....	33
3.3 ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL FLUJO.....	37

3.3.1	Balance de masa de agua.....	37
3.3.2	Ley de Darcy .....	38
3.3.1	Curva característica de agua-suelo .....	39
<b>CAPÍTULO IV: MÉTODOS NUMÉRICOS .....</b>		<b>40</b>
4.1	PROCESOS ACOPLADOS .....	40
4.1.1	Cambios en la porosidad.....	40
4.1.2	Cambios en la porosidad debido a la deformación mecánica .....	40
4.1.3	Cambios en la permeabilidad debido a la porosidad .....	41
4.2	DESCRIPCIÓN DEL ACOPLAMIENTO .....	41
4.3	PROCESO CONSTRUCTIVO Y OPERACIÓN .....	42
4.4	HERRAMIENTA NUMÉRICA.....	44
<b>CAPÍTULO V: CASOS DE REFERENCIA Y VERIFICACIÓN.....</b>		<b>45</b>
5.1	CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL .....	45
5.1.1	Introducción.....	45
5.1.2	Modelo conceptual .....	46
5.1.3	Propiedades y parámetros de los materiales.....	46
5.1.4	Resultados y discusión.....	47
5.2	ENSAYO TRIAXIAL .....	48
5.2.1	Introducción.....	48
5.2.2	Modelo conceptual .....	49
5.2.3	Propiedades y parámetros de los materiales.....	49
5.2.4	Discusión y resultados.....	50
5.3	CONSTRUCCIÓN DE UN TERRAPLEN POR ETAPAS.....	53
5.3.1	Introducción.....	53
5.3.2	Modelo conceptual .....	53
5.3.3	Propiedades y parámetros de los materiales.....	54
5.3.4	Resultados y discusión.....	54
5.4	INFILTRACIÓN DE UN ESTANQUE.....	56
5.4.1	Introducción.....	56
5.4.2	Modelo conceptual .....	56
5.4.3	Propiedades y parámetros de los materiales.....	57
5.4.4	Discusión y resultados.....	58
<b>CAPÍTULO VI: CASO DE APLICACIÓN PRESA DE TIERRA HOMOGÉNEA. 60</b>		
6.1	DESCRIPCIÓN.....	60

6.2 MODELO CONCEPTUAL .....	60
6.2.1 Información general.....	60
6.2.2 Condiciones de contorno e iniciales .....	61
6.3 PROPIEDADES Y PARAMETROS DE LOS MATERIALES.....	63
6.4 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL .....	65
6.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	66
6.5.1 Evolución de esfuerzos efectivos verticales.....	66
6.5.2 Evolución de los desplazamientos verticales.....	67
6.5.3 Evolución de la presión del agua.....	68
6.5.4 Evolución de la saturación del suelo.....	71
6.5.5 Gradiente hidráulico global .....	72
6.5.6 Evolución del término de acoplamiento .....	72
6.5.7 Cambios en la porosidad.....	73
<b>CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>75</b>
7.1 CONCLUSIONES .....	75
7.2 RECOMENDACIONES.....	76
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>80</b>

## **RESUMEN**

El propósito principal de una presa de tierra es proporcionar la seguridad de retención y almacenamiento del agua; para diversos usos tales como irrigación, agua potable, hidro-eléctricas entre otros, como consecuencia todas las presas deben representar una solución específica de diseño a las circunstancias de sitio.

En este trabajo se ha realizado una simulación detallada del comportamiento esfuerzo-deformación y flujo durante la construcción y operación de una presa de tierra.

Con este trabajo, se busca considerar el efecto de tres dimensiones en el análisis esfuerzo-deformación y flujo de una presa de tierra, como también incluir durante el análisis los fenómenos hidro-mecánicos (HM) que se define como la interacción física entre procesos hidráulicos y mecánicos, los cuales se producen de forma acoplada como por ejemplo el cambio en el esfuerzo efectivo.

La metodología del trabajo ha sido la siguiente. En primer lugar, se ha realizado una revisión exhaustiva del estado del arte de la construcción de presas de tierra, describiendo las ecuaciones acopladas de los fenómenos físicos involucrados. A continuación, se describe la aplicación de métodos numéricos para resolver el sistema completo de ecuaciones. El código comercial COMSOL Multiphysics de elementos finitos (FE) ha sido utilizado como una herramienta numérica para el análisis. Después, varios ejemplos de referencia que implican las diferentes físicas tales como mecánica de suelos y flujo de agua se resuelven para comprobar la implementación propuesta de estas herramientas numéricas. Por último, se realiza una simulación del comportamiento esfuerzo-deformación y flujo de una presa de tierra homogénea con un sistema completo de ecuaciones que representan dichas físicas.

La herramienta numérica utilizada en este trabajo es capaz de resolver simultáneamente el flujo no saturado y la mecánica de suelos en medios porosos. Los cambios en la porosidad y la permeabilidad debido a la compactación, así como el tiempo de embalse/desembalse son los que afectan significativamente el comportamiento hidrodinámico de las presas de tierra. La comprensión del comportamiento real de distintas variables como las presiones

intersticiales, los esfuerzos y los desplazamientos mejora debido a que se considera la saturación variable y el comportamiento esfuerzo-deformación elasto-plástico no lineal durante el proceso de construcción y operación.



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1: Grandes presas: Estadística registrada mundial (ICOLD, 1988a)....	13
Tabla 2.1: Características de suelos del núcleo (Novak, et al., 2007).....	25
Tabla 2.2: Propiedades de ingeniería indicativos para relleno de tierra compactados (Novak, et al., 2007). .....	26
Tabla 3.1: Resumen de modelos constitutivos utilizados en este trabajo (Elaboración propia). .....	36
Tabla 5.1: Resumen de condiciones de contorno asumidas para resolver el problema del ensayo de consolidación. ....	46
Tabla 5.2: Resumen de las propiedades del material utilizado para resolver el ejemplo de referencia del ensayo de consolidación. ....	47
Tabla 5.3: Resumen de las condiciones de contorno considerados para resolver el problema del ensayo triaxial. ....	49
Tabla 5.4: Resumen de propiedades y parámetros de materiales para el ensayo triaxial.....	50
Tabla 5.5: Resumen de condiciones de contorno asumidas para simular la construcción de un terraplén.....	53
Tabla 5.6: Resumen de propiedades y parámetros de los materiales para la construcción de la presa. ....	54
Tabla 5.7: Resumen de condiciones de contorno asumidas para resolver el problema de infiltración del estanque. ....	57
Tabla 5.8: Resumen de propiedades y parámetros de materiales a resolver para el problema de infiltración del estanque.....	57
Tabla 6.1: Resumen de tiempo de construcción y operación de una presa de tierra. ....	62
Tabla 6.2: Resumen de condiciones de contorno para cada fenómeno en la presa de tierra homogénea.....	62
Tabla 6.3: Resumen de valores de propiedades y parámetros mecánicos y flujo involucrados en el modelo.....	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Detalles típicos de una presa de tierra, sección típica (Marsal, 1983).	19
Figura 2.2: Presa homogénea (a), núcleo central (b), pantalla (c), tipos de presa de material suelto de acuerdo a Gonzáles Vallejo et al. (2004).	20
Figura 2.3: Tipos de presa de concreto (a) gravedad, (b) contrafuerte, (c) arco-gravedad y (d) arco-bóveda de acuerdo a Gonzáles Vallejo et al. (2004).	21
Figura 2.4: Esquema de la sección transversal de una presa de tierra con núcleo central (elaboración propia).	23
Figura 2.5: Ilustración de mecanismos de defecto en presas y modos de falla (Novak, et al., 2007).	27
Figura 2.6: Analisis de estabilidad: esquemas de superficies de falla (Novak, et al., 2007).	29
Figura 3.1: Las dependencias entre variables en un análisis estático de la mecánica de suelos.	31
Figura 3.2: Representación de un modelo elástico lineal.	34
Figura 3.3: La trayectoria de esfuerzo-deformación (a) y esfuerzo desviador – esfuerzo efectivo promedio (b) están representados por un modelo elasto-plástico perfecto.	35
Figura 3.4: La trayectoria de esfuerzo-deformación (a) y esfuerzo desviador-promedio (b) se representa por un modelo Cam-Clay modificado.	36
Figura 3.5: Interrelaciones entre variables en el flujo de las aguas subterráneas.	37
Figura 4.1: Ilustración de las interacciones entre diferentes procesos de los fenómenos HM que pueden surgir en los problemas de presas de tierra (adaptado de la figura de Liu, (2004)).	41
Figura 4.2: Secuencia de construcción de una presa de tierra mediante capas. La capa “n” es representado por el paso “n”.	42
Figura 4.3: Curva de construcción con el tiempo por capa.	43
Figura 5.1: Modelo conceptual del ensayo de consolidación.	46
Figura 5.2: Isocronas de lo simulado y la solución analítica.	47

Figura 5.3: La distribución de presión de agua (kPa) en el tiempo $T = 0,02$ y $T = 0,1$ (adimensional). Las flechas representan la dirección del flujo.....	48
Figura 5.4: Dimensiones y condiciones de contorno considerados para resolver el ensayo triaxial de referencia.....	49
Figura 5.5: Esfuerzos y deformación axial como resultado de simular un ensayo triaxial drenado y no drenado con SIGMA/W, PLAXIS y COMSOL. Se consideraron dos modelos constitutivos: modelo Mohr Coulomb(a) y modelo Cam-Clay (b). ....	52
Figura 5.6: Dominio del modelo, geometría y condiciones de contorno asumidas para resolver la construcción de un terraplén. ....	53
Figura 5.7: Contornos de asentamiento (m) simulado con SIGMA/W (a) y COMSOL (b). ....	55
Figura 5.8: Perfiles de asentamientos a lo largo del línea central de la estructura del terraplén. Comparación entre las simulaciones COMSOL y SIGMA/W. ....	55
Figura 5.9: Modelo conceptual, geometría y condición de contorno del estanque.....	56
Figura 5.10: Curva característica de suelo-agua para suelo limoso de Krahn, 2004. ....	58
Figura 5.11 Contornos de presión de carga (m) y simulación del nivel freático con (a) COMSOL (b) SEEP/W.....	59
Figura 5.12: Evolución del flujo de masa acumulativa que sale del sistema.....	59
Figura 6.1: Esquema (a) y sección S-S' (b) del modelo conceptual de una presa de tierra homogénea.....	61
Figura 6.2: Curva característica (a)y permeabilidad (b) del material de relleno utilizado en la presa de tierra.....	64
Figura 6.3: Malla de elementos finitos utilizado para la discretización espacial y del tiempo. ....	66
Figura 6.4: Evolución de esfuerzos efectivos durante distintas etapas construcción, embalse, desembalse y consolidación.....	67
Figura 6.5: Evolución de los desplazamientos verticales durante la construcción y embalse. ....	68
Figura 6.6: La evolución de la presión de agua durante la simulación de construcción, embalse y desembalse. ....	69

---

Figura 6.7: Curva de infiltración sobre el cuerpo de la presa. ....	70
Figura 6.8: Isosuperficies del grado de saturación y líneas de flujo en diferentes días. ....	71
Figura 6.9: Isosuperficies del gradiente hidráulico global durante el proceso de construcción y operación de una presa de tierra. ....	72
Figura 6.10: Isosuperficies del término de acoplamiento para diferentes tiempos. ....	73
Figura 6.11: Isosuperficie de la porosidad debido a la compactación y consolidación para distintos tiempos del análisis. ....	74

**LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS**

$c$	: Cohesión del suelo	$(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
$c'$	: Cohesión del suelo efectiva	$(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
$e$	: Relación de vacíos	$(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$
$e_0$	: Relación de vacíos inicial	$(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$
$E$	: Módulo de Young	$(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$
$F$	: Fuerzas por peso	$(\text{kN})$
$f_{ext}^w$	: Sumidero externo de agua	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1})$
$I_p$	: Índice plástico	$(-)$
$M$	: Pendiente del estado crítico	$(\text{rad}\cdot\text{rad})$
$n$	: Vector normal	$(-)$
$p$	: Presión de agua	$(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
$p'$	: Esfuerzo efectivo promedio	$(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
$P'_c$	: Presión de pre-consolidación inicial	$(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
$q$	: Vector de flujo de Darcy	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
$q$	: Esfuerzo desviador	$(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
$r_u$	: Relación de presión de poros	$(\text{Pa}\cdot\text{Pa}^{-1})$
$s$	: Succión matricial	$(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$
$T$	: Fuerzas de superficie	$(\text{kN})$
$u_i$	: Vector de desplazamiento en la dirección $i$	$(\text{m})$
$W_{opt}$	: Contenido de agua óptima	$(\%)$
$\varepsilon^e$	: Deformación elástica reversible	$(\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$
$\varepsilon^p$	: Deformación plástica irreversible	$(\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$
$\varepsilon_{ij}$	: Deformación en la dirección $i$ y $j$	$(\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$
$\varepsilon_{vol}$	: Deformación volumétrica	$(\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$
$\kappa$	: Índice de hinchamiento	$(-)$
$\lambda$	: Índice de compresión	$(-)$
$\mu$	: Viscosidad dinámica	$(\text{Pa}\cdot\text{s})$
$\nu$	: Relación de Poisson	$(-)$
$\rho_d$	: Densidad seca	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
$\sigma_y$	: Esfuerzo de fluencia	$(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
$\sigma_i$	: Esfuerzo total en la dirección $i$	$(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
$\sigma_{1,2,3}$	: Esfuerzo principal mayor, intermedio y menor	$(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$

$\tau_{ij}$	: Esfuerzo cortante en la dirección $i$ y $j$	(kN·m <sup>-2</sup> )
$\varphi$	: Ángulo de fricción	(°)
$\varphi'$	: Ángulo de fricción efectivo	(°)
$\psi$	: Ángulo de dilatación	(°)
$\nabla$	: Divergencia	
$\Delta$	: Incremento	
$\partial_t$	: Derivada temporal	
$\partial_i$	: Derivada espacial en $i$	
Cap	: superficie de arco de plasticidad	
EDP	: Ecuación diferencial parcial	
EDO	: Ecuación diferencial ordinaria	
EDA	: Ecuación diferencial algebraica	
SWCC	: Curva característica del agua y suelo	

## **INTRODUCCIÓN**

Las presas de tierra son estructuras únicas. Independientemente del tamaño y tipo demuestran una gran complejidad en su respuesta a la carga, las presiones de poro y en su relación interactiva con la hidrología y la geología del sitio. Se utilizan en gran proporción para diversos fines tales como almacenamiento, hidroeléctricas, depósitos de relaves, entre otros.

El estudio se llevó a cabo con la finalidad de comprender a mayor detalle los fenómenos de flujo y mecánicos sobre una presa de tierra. Se tiene como principal interés mejorar el entendimiento en la construcción y operación (embalse y desembalse) de una presa de tierra homogénea mediante la utilización de un análisis acoplado Hidro-Mecánico (HM) con la finalidad de optimizar su diseño y operación.

El trabajo se ha dividido en 7 capítulos. El primer capítulo presenta una revisión del estado del arte, motivación y el enfoque seguido en el estudio. El segundo capítulo presenta la práctica de presas de tierra enfocado en dos aspectos claves: la evolución de las presiones intersticiales y las deformaciones. El tercer capítulo describe la mecánica de suelos y el flujo de agua mediante las ecuaciones que las gobiernan, involucrados en el proceso de construcción y operación de presas de tierra. El cuarto capítulo presenta la herramienta numérica COMSOL para resolver las ecuaciones descritas, teniendo como principal característica la no-linealidad y el acoplamiento entre los fenómenos físicos tales como la mecánica de suelos y el flujo de agua. El quinto capítulo presenta la validación de la herramienta numérica mediante la resolución de cuatro ejemplos de referencia. En el sexto capítulo se desarrolla una aplicación de análisis acoplado de un caso de presa de tierra homogénea realista en tres dimensiones. En el séptimo capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones.

## 1.0 CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

### 1.1 ANTECEDENTES

El propósito principal de una presa es proporcionar la seguridad de retención y almacenamiento del agua; como consecuencia todas las presas deben representar una solución específica de diseño a sus circunstancias de sitio. Por lo tanto el diseño también representa un balance óptimo de las consideraciones técnicas y económicas locales en el momento de la construcción (Novak, et al., 2007).

Las presas son de muchos tipos y su clasificación no está claramente definida. Una amplia clasificación inicial en dos grupos genéricos se puede hacer en términos del principal material de construcción empleado.

- **Presas de terraplén**, se construyen de relleno de tierra y/o relleno de enrocado. La cara de los taludes aguas arriba y aguas abajo son similares y de ángulo moderado, dando una amplia sección y un alto volumen de construcción en relación con la altura.
- **Presas de concreto**, se construyen de concreto en masa. Las inclinaciones de las caras son diferentes, aguas abajo generalmente escarpadas y aguas arriba vertical. Las presas pueden tener perfiles relativamente esbeltos, como es el caso de presas de arco.

Los principales tipos de presas se identifican dentro de dos grupos genéricos en la Tabla 1.1. Las características esenciales del grupo de presas de terraplén y de concreto se detallan más adelante en la sección 2.1.

Tabla 1.1: Grandes presas: Estadística registrada mundial (ICOLD, 1988a).

Grupo	Tipo	Código ICOLD	%
Presas de terraplén	Relleno de tierra	TE	82.9
	Relleno de roca	ER	
Presas de concreto (incluido presas de mampostería)	Gravedad	PG	11.3
	Arco	VA	4.4
	Contrafuerte	CB	1.0
	Múltiples arcos	MV	0.4
Total de grandes presas (ICOLD, 1988a)		36 235	



La construcción de presas de terraplén representa una importante inversión en infraestructura básica en todas las naciones; a su vez estas son numéricamente dominantes por razones técnicas y económicas, y representan aproximadamente el 85-90% de todas las presas construidas.

Hay muchas variables relevantes en la construcción y operación de presas de tierra. Al menos dos de ellas podrían ser mejoradas por un diseño y manejo apropiado: la presión intersticial y el desplazamiento. Estos son de suma importancia por dos principales razones: (1) podrían jugar un importante rol en la seguridad durante la construcción y operación y; (2) son clave para detectar posibles problemas de inestabilidad, especialmente en el corto y largo plazo.

La práctica de simulación en presas de tierra es cada vez más relevante debido a su posible impacto en la eficiencia y en la seguridad. Sin embargo, un modelamiento adecuado de todos los procesos involucrados no es una tarea simple ya que hay varias interrelaciones entre ellos que hacen el sistema muy complejo.

El proceso de desembalse rápido es un ejemplo de tal complejo acoplamiento entre procesos físicos hidromecánicos (HM). Se podría mencionar que la estabilidad del talud aguas arriba de la presa depende de la distribución de la presión intersticial, la cual se relaciona a la permeabilidad a través de la ley de Darcy. A su vez, la permeabilidad puede estar afectada por cambios de porosidad, la cual depende del estado de compactación y consolidación del relleno.

Es muy común encontrar modelos en la literatura relacionados con la disciplina geotécnica e hidrogeológica, pero no es fácil encontrar todo ello acoplado en un problema de ingeniería real. Existen aproximaciones habituales para resolver modelos de presas de tierra bajo los diferentes fenómenos involucrados. Estos pueden ser de una manera desacoplada o parcialmente acoplada debido a su resolución compleja. Alguno de las aproximaciones existentes fueron formuladas para resolver el flujo del agua por infiltración (Flores, 2009), y el análisis mecánico esfuerzo-deformación (Rayo, 2002).

En los últimos años algunos esfuerzos en problemas acoplados Hidro-Mecánicos se han realizado (Errecalde, 2012) y (Awal et al, 2009), pero la mayoría solo

realiza análisis en dos dimensiones. También algunos intentos para resolver una presa de tierra en tres dimensiones han sido reportados (Guerra, 2012; Quispe, 2008), pero la mayoría enfocados al flujo subterráneo y no a la mecánica de suelos.

Una discusión exhaustiva de ingeniería de presas de tierra y enrocado se proporciona en los textos de Fell et al (2010), Novak et al, (2007), Gonzáles de Vallejo et al (2002) y Fell et al (1992).

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Las presas son estructuras únicas. Independientemente del tamaño y tipo demuestran una gran complejidad en su respuesta a la carga y en su relación interactiva con la hidrología y la geología del sitio. En reconocimiento de esto, la ingeniería de presas no es una ciencia estricta y formal. Tal como se practica, es una actividad altamente especializada que se basa en muchas disciplinas científicas como por ejemplo la geología, geotecnia, hidrología, entre otros y la experiencia como un gran elemento de juicio de ingeniería.

Mejorar el diseño de presas de tierra requiere la realización de un análisis integrado de los fenómenos Hidro-Mecánicos (HM). Las variables relevantes en la construcción y operación tales como presión intersticial y desplazamiento no pueden estimarse con precisión sin tener en cuenta los acoplamientos múltiples entre la mecánica de suelos y el flujo subterráneo. En el caso de estructuras de presas de tierra el uso de métodos numéricos permite tanto el análisis tenso-deformación, el análisis de las presiones en un flujo no saturado, así como las fases empleadas en su proceso constructivo.

El estudio también se justifica en el hecho que en los últimos años los métodos numéricos y computacionales son los métodos de cálculo en la actualidad, por lo tanto el manejo de software es cada vez más indispensable y el uso de los mismos va en aumento, pero es importante comprender que si bien son herramientas muy poderosas, requieren de usuarios bien preparados con un conocimiento preciso de los modelos numéricos utilizados, el campo de aplicación y sus limitaciones. También es importante tener criterio a la hora de analizar los resultados, ya que por su facilidad en el uso (ingreso de datos y cálculo), pueden tentar al profesional a pensar que todo lo que sale de esa "caja

negra” es verdadero y no susceptible de error.

### 1.3 OBJETIVOS

Se distinguen dos tipos de objetivos: el objetivo principal y los objetivos específicos.

#### 1.3.1 Objetivo principal

- Mejorar el entendimiento del comportamiento de una presa de tierra mediante la utilización de un análisis acoplado Hidro-Mecánico con la finalidad de optimizar su diseño y operación. Las presiones intersticiales, desplazamientos y esfuerzos desarrollados son estudiados con especial énfasis.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Los siguientes objetivos también son parte de este trabajo:

- Simular problemas HM sobre una presa de tierra homogénea, incluyendo el efecto del proceso de construcción y operación.
- Calcular el efecto 3D debido a la construcción de una presa dentro de un valle teniendo en cuenta la relación entre los fenómenos HM en el análisis.
- Investigar la influencia del embalse y desembalse en una presa de tierra de forma acoplada.
- Mejorar el entendimiento de los procesos como consolidación, procedimiento constructivo, resistencia al corte del suelo, movimiento del flujo subterráneo.

### 1.4 METODOLOGÍA.

Para lograr los objetivos indicados, se ha previsto las siguientes tareas:

- Una revisión general de estado del arte con el fin de conocer los resultados, recomendaciones y limitaciones de estudios previos.
- La descripción de las ecuaciones que gobiernan el flujo del agua subterráneo y la mecánica de suelos.

- Utilización de la herramienta numérica existente (COMSOL) para resolver los fenómenos acoplados descritos, teniendo en cuenta las diferentes etapas de la construcción y operación de una presa de tierra.
- Validación de la herramienta mediante la resolución de cuatro ejemplos de referencia.
- Simulación de un caso demostrativo en tres dimensiones de una presa de tierra homogénea típica.

## **2.0 CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DE LAS PRESAS DE TIERRA**

### **2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL**

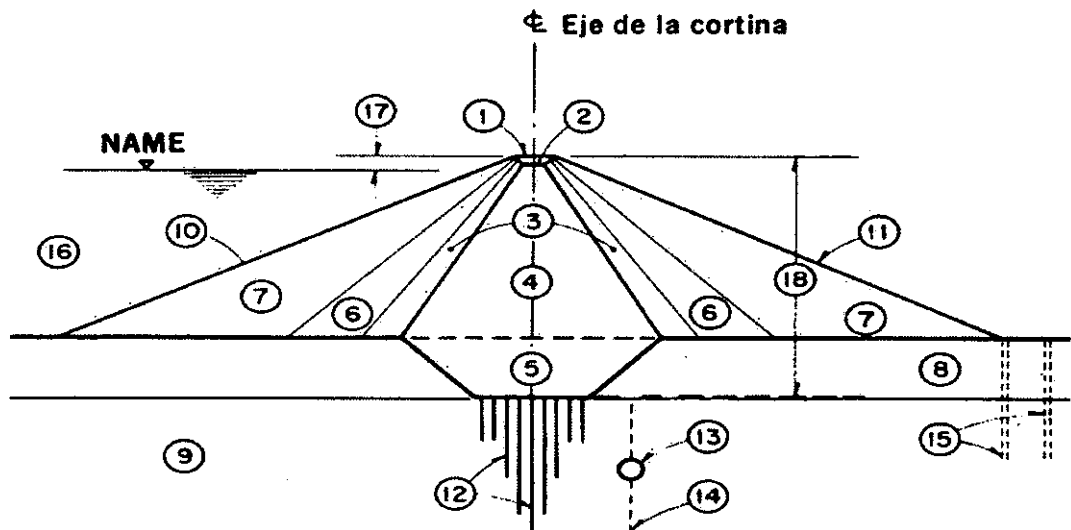
Se denomina presa de tierra a una barrera fabricada con materiales sueltos, naturales, excavados u obtenidos cerca, que se construye habitualmente en una parte angosta sobre río o arroyo con la finalidad de embalsar el agua en el cauce fluvial para su posterior aprovechamiento.

Las presas constituyen una de las obras de ingeniería de mayor importancia para el desarrollo de un país, en sus distintas finalidades: para regadío, abastecimiento, control de avenidas y producción de energía eléctrica (19 % del suministro mundial), entre otros múltiples usos, como el almacenamiento de residuos mineros (González de Vallejo, 2002).

Las presas son denominadas largas o grandes cuando se tiene más de 15 m de altura (medido desde el punto más bajo en la fundación general a la cresta de la presa). Además cualquier presa entre 10 m y 15 m de altura también son calificadas como grandes cada vez que cumpla una de las siguientes condiciones:

- La longitud de la cresta es no menos de 500 metros;
- La capacidad del embalse formado por la presa no es inferior a un millón de metros cúbicos;
- La descarga de inundación máxima tratada con la presa no es menos de 2000 metros cúbicos por segundo;
- El diseño de la presa es inusual.

Durante el diseño de una presa de tierra se debe conocer la cantidad de material disponible (finos, granular y enrocado) con la finalidad de disponer de su uso durante la construcción. La disposición de ellos es variable según el diseño y es importante conocer las partes que constituyen una presa de tierra como se muestra en la Figura 2.1



1	Cresta o corona	7	Enrocamiento	13	Galería
2	Revestimiento de corona	8	Depósitos aluviales	14	Drenes
3	Filtros	9	Roca basal	15	Pozos de alivio
4	Núcleo impermeable	10	Talud aguas arriba	16	Embalse
5	Trinchera	11	Talud aguas abajo	17	Borde libre
6	Transiciones	12	Pantalla de inyección	18	Altura de cortina

Figura 2.1: Detalles típicos de una presa de tierra, sección típica (Marsal, 1983).

## 2.2 CLASIFICACIÓN DE PRESAS

Las presas pueden clasificarse en función de su material de construcción en dos grupos: presas de terraplén y presas de concreto.

### 2.2.1 Presas de terraplén

La principal característica de estas presas es el tipo de material utilizado para su construcción. En principio la gran mayoría de materiales geológicos son aceptables excepto los que se pueden alterar, disolver o evolucionar modificando sus propiedades.

#### 2.2.1.1 Presas de tierra de sección homogénea

Toda o casi toda la sección transversal está constituida por un mismo material, formado por tierras compactadas de baja permeabilidad. Para controlar las filtraciones a través de la presa se puede utilizar diferentes tipos de drenes.

#### 2.2.1.2 Presas zonadas con núcleo impermeable de arcilla

Constan de dos o más tipos de materiales. La zona de menor permeabilidad o núcleo ejerce las funciones de elemento impermeable. La anchura del núcleo y

su posición dentro de la sección, respecto al resto de los materiales o espaldones, pueden ser muy diversos (ver Figura 2.1).

### 2.2.1.3 Presas de pantalla

El elemento impermeable consiste en una pantalla relativamente delgada o lámina. Los materiales más empleados para pantallas son hormigones asfálticos, hidráulicos, materiales poliméricos o bituminosos, entre otros.

Un esquema con los tipos de presas de terraplén se muestra en la Figura 2.2.

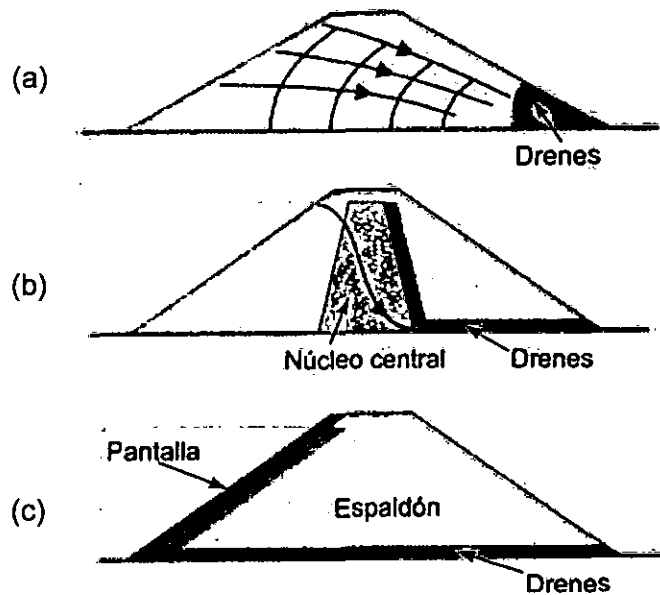


Figura 2.2: Presa homogénea (a), núcleo central (b), pantalla (c), tipos de presa de material suelto de acuerdo a Gonzáles Vallejo et al. (2004).

## 2.2.2 Presas de concreto

Son construidas con hormigón masivos y pueden adoptar distinta geometría dependiendo del terreno de cimentación y la morfología del terreno.

### 2.2.2.1 Presas de gravedad

Su sección transversal es resistente por sí sola sin colaboración mecánica de los estribos del valle. Requieren, en general, mayor volumen de concreto en comparación con otras presas de concreto. Precisan un terreno de cimentación resistente formado por un sustrato rocoso a poca profundidad.

### 2.2.2.2 Presas de contrafuertes

Son presas de gravedad aligeradas formadas por elementos estructurales transversales a la sección, o contrafuertes, con objeto de reducir volumen de obra de concreto y disminuir subpresiones, entre otros fines. Requieren terreno de cimentación muy resistente, concentrándose las cargas en los apoyos de los citados contrafuertes. Generalmente se sitúan en valles amplios y de poca altura.

### 2.2.2.3 Presas de arco-gravedad

Son para reducir la sección de las presas de gravedad, se dispone su planta en arco, con objeto de transmitir parte de las cargas a los estribos (apoyos laterales de la presa sobre las márgenes de la cerrada).

### 2.2.2.4 Presas arco-bóveda

Constituyen las de mayor complejidad de diseño, análisis y construcción, pues se trata de estructuras muy esbeltas, de planta y sección curvas, en que se aprovecha la alta resistencia del terreno de cimentación para disminuir notablemente el volumen de hormigón.

Un esquema con los tipos de presas de concreto se muestra en la Figura 2.3.

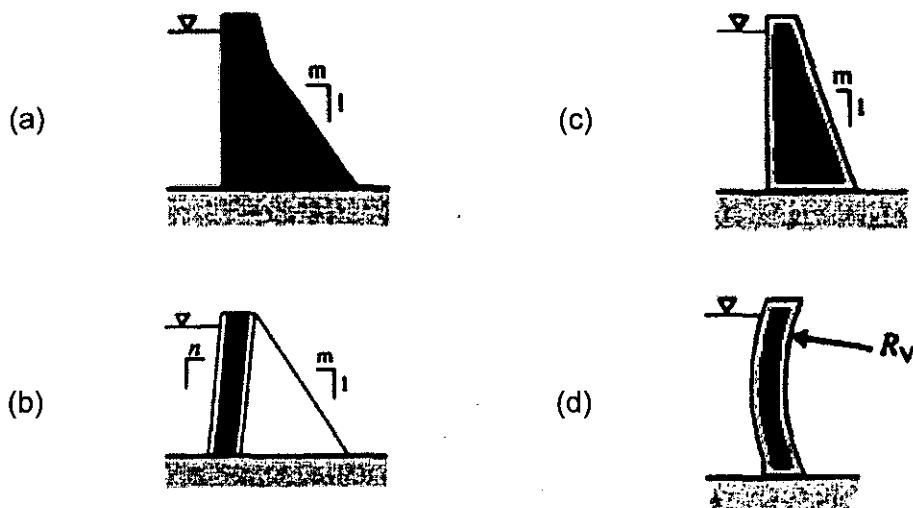


Figura 2.3: Tipos de presa de concreto (a) gravedad, (b) contrafuerte, (c) arco-gravedad y (d) arco-bóveda de acuerdo a Gonzáles Vallejo et al. (2004).



## 2.3 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN

En el trabajo desarrollado, se denomina “construcción” al proceso de compactación de cada capa hasta llegar al nivel deseado, y se denomina “operación” al proceso de embalse y desembalse durante la vida útil de la presa de tierra.

Las actividades que comprenden el procedimiento de construcción están clasificadas en cuatro grupos principales:

- Desarrollo de fuente de materiales;
- Construcción y preparación de la fundación;
- Control y construcción del relleno y;
- Construcción de trabajos auxiliares.

Actividades de **desarrollo de fuentes de materiales** implican la apertura de áreas de préstamo o canteras, incluyendo la instalación de planta fija, por ejemplo; chancadoras, fajas transportadoras, etc. También se construyen accesos y galerías de acarreo entre las distintas áreas de préstamo y el sitio del terraplén, y se moviliza la excavación y acarreo de la planta.

Actividades de **preparación de la fundación**, incluyendo la desviación del río, se puede proceder al mismo tiempo con el desarrollo de las fuentes de relleno. La desviación del río temporal se efectúa comúnmente mediante la conducción a un túnel de derivación o desvío, el cual en la mayoría de casos posteriormente alberga la salida de trabajos. (Cuando se planifica una salida a través de alcantarillas o debajo del terraplén en lugar de un túnel que flanquean la alcantarilla puede ser utilizado temporalmente para fines de desvío del río.)

**Construcción de rellenos** es un ejercicio en la utilización eficiente de la planta dentro de los términos de los requisitos de las especificaciones sobre el cumplimiento de los materiales y la técnica de compactación. Las operaciones de colocación pueden estar sujetas a la influencia de las condiciones meteorológicas y a los cambios sutiles en las características del material. El control de la colocación está centrado en la supervisión del contenido de agua, espesor de la capa y el procedimiento de compactación.

**Construcción de obras auxiliares** abarca la construcción de vertederos y tanques de sedimentación, alcantarillas o túneles para trabajos fuera, etc. Torres de válvula y trabajos de control similares. También incluye la finalización de los detalles de la cresta. Ej. Carreteras, obras de drenaje, etc. Y donde las condiciones climáticas lo permiten vegetación de la cara del talud aguas abajo.

Por ejemplo, una sección de diseño de presa de tierra zonificada con núcleo central con las características típicas se muestra en la Figura 2.4.

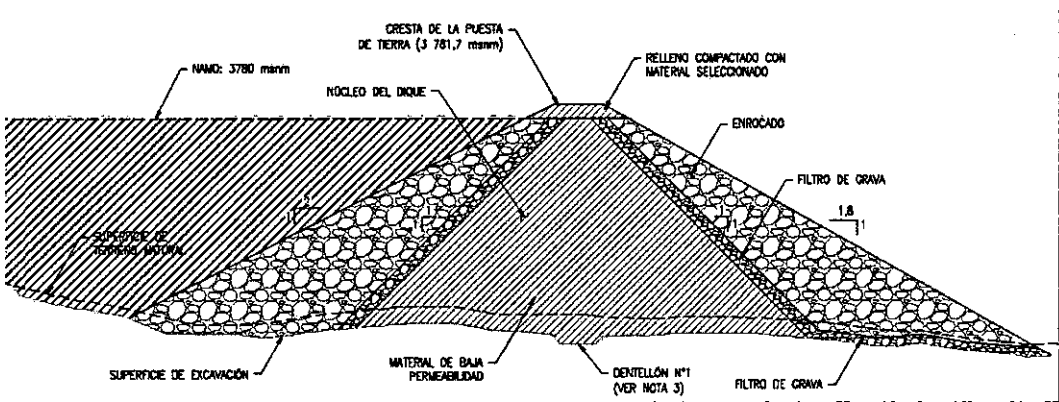


Figura 2.4: Esquema de la sección transversal de una presa de tierra con núcleo central (elaboración propia).

El proceso de construcción de una presa de tierra involucra compactación de suelo en aproximadamente 0.15 a 0.30 m de capa desde su fundación hasta la altura de la presa. Durante la construcción, el suelo compactado tiene un grado inicial de saturación de aproximadamente 80%. La presión del agua intersticial es negativa, a menudo considerablemente menor que la presión absoluta cero (Fredlund, et al., 1993).

## 2.4 ASPECTOS RELEVANTES

Los propósitos principales de una presa son la seguridad de retención y el almacenamiento del agua. Por lo tanto, los ingenieros deben considerar especialmente los siguientes aspectos relevantes:

### 2.4.1 Consideraciones importantes

Las presas difieren de todas las otras grandes estructuras de ingeniería civil en un número de consideraciones importantes:

- Cada presa, grande o pequeña, es única; la fundación geológica, las características de los materiales y las avenidas en la cuenca hidrológica son específicas para cada sitio.
- Las presas están sujetas a la carga de diseño durante la mayor parte de su vida útil.
- Las presas no tienen una vida útil estructural, que es posible; sin embargo, tienen una vida ficticia para efectos contables, o una vida funcional dictada por sedimentos en los embalses.
- La inmensa mayoría de las presas son de relleno de tierra, construido a partir de una amplia gama de suelos naturales; estos son los menos consistentes entre los materiales de construcción.
- La ingeniería de presas reúne una amplia gama de disciplinas, por ejemplo, mecánica estructural y flujo, geología y geotecnia, hidrología e hidráulica de inundaciones, a un grado bastante único.
- La ingeniería de presas es críticamente dependiente de la aplicación del juicio de expertos.

En resumen, la ingeniería de presas es una disciplina distintiva de base amplia y especializada. El ingeniero de presas requiere para sintetizar las soluciones de diseño lograr que: exista un compromiso de la seguridad, y representar el equilibrio óptimo entre las consideraciones técnicas, económicas y ambientales.

#### 2.4.2 Características de los materiales de presa de tierra

Hay tres categorías principales de material de relleno que son necesarios en presas de tierra para cumplir con los requisitos: el núcleo, los espaldones y drenaje/filtros.

**Relleno del núcleo** debe tener baja permeabilidad e idealmente tener de intermedia a alta plasticidad para dar cabida a un grado limitado de deformación sin riesgo a agrietamiento. El núcleo es el elemento clave en un terraplén y el más exigente en cuanto a las características del material y la uniformidad, las propiedades del núcleo de arcilla compactada son críticos para la integridad de estanqueidad a largo plazo.

**Relleno de espaldón** requiere suficientemente alta resistencia al corte

para permitir la construcción económica de taludes estables para conseguir un ángulo de inclinación lo más empinado posible. Es preferible que el relleno tenga una permeabilidad relativamente alta para ayudar en la disipación de presiones intersticiales. El rango de materiales adecuados varía en todo el espectro desde un material granular grueso a rellenos que pueden diferir poco de los materiales del núcleo.

**Material de drenaje/filtro** debe estar limpio, con buen drenaje y no está predispuesto a degradación química. Procesado de gravas naturales finas, roca triturada y gruesa a arenas medias son adecuados y se utilizan en determinadas secuencias y gradación por la naturaleza del núcleo adyacente y/o rellenos del espaldón. El costo de los materiales de filtro procesados es relativamente alto y por lo tanto el requerimiento se mantiene a un mínimo.

Las principales características de funcionamiento de los grupos más importantes de los suelos adecuados para núcleos laminados se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Características de suelos del núcleo (Novak, et al., 2007)

Descripción del suelo (BS 5930)	Resistencia al agrietamiento	Erosión – resistencia a tubificar	Rodillo de compactación óptimo	Sensibilidad al control de contenido de agua de compactación
Arena limosa o gravas; 6% de arcilla (GM-SM)	Bajo; aumenta con $< \rho_d$ y $> I_p$	Bajo; aumento con $< \rho_d$ y $> I_p$	Neumático de goma (20 – 80 t)	Alto para evitar la fragilidad
Arena arcillosa o gravas; 20% de arcilla (GC-SC)	Intermedio en representar $\rho_d$	Intermedio	Neumático de goma (20 – 80 t)	Bajo para el control de $p_l$
Arcilla de baja plasticidad (CL)	Relativamente flexible	Alto; aumenta con $> \rho_d$	Neumático de goma o pata de cabra	Intermedio a alto para control de $p_l$
Arcilla de alta plasticidad (CH)	Flexible; puede resistir largas deformaciones	Alto; aumenta con $> \rho_d$	Pata de cabra	Alto para control de $p_l$

Valores representativos de los parámetros de ingeniería más importantes de compactación de rellenos de tierra, que se deben utilizar en un núcleo o espaldón, se resumen en la Tabla 2.2. Se debe tener en cuenta que también se tabulan los parámetros comparables para relleno de enrocado compactada.

Tabla 2.2: Propiedades de ingeniería indicativos para relleno de tierra compactados (Novak, et al., 2007).

Tipo de relleno (BS 5930)	Características de compactación		Resistencia al corte (esfuerzo efectivo)		Coeficiente de compresibilidad	Coeficiente de permeabilidad horizontal	Características de drenaje
	Peso Unitario $\gamma_d^{max}$ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	Contenido de agua $W_{opt}$ (%)	Cohesión $c'$ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	Fricción, $\phi'$ (grados)			
Gravas (GW-GC)	18-22	5-10	0	35-40	0.1-1.0	$10^{-3} - 10^{-5}$	Excelente
Arenas (SW-SP)	16-20	10-20	0	35-40	0.5-1.5	$10^{-4} - 10^{-6}$	Bueno - regular
Limos (ML-MH)	16-20	15-30	<10	25-35	0.5-2.5	$10^{-5} - 10^{-8}$	Regular - pobre
Arcillas (CH)	16-21	15-30	<20	20-30	0.5-3.0	$10^{-7} - 10^{-10}$	Muy pobre - impermeable
Relleno de enrocado triturado* (rango de 2-600 mm)	17-21	N/A	0	40-55	N/A	$10^{-1} - 10^{-2}$	Libre-excelente drenaje

\*Relleno de enrocado triturado se muestra solo para efectos comparativos.

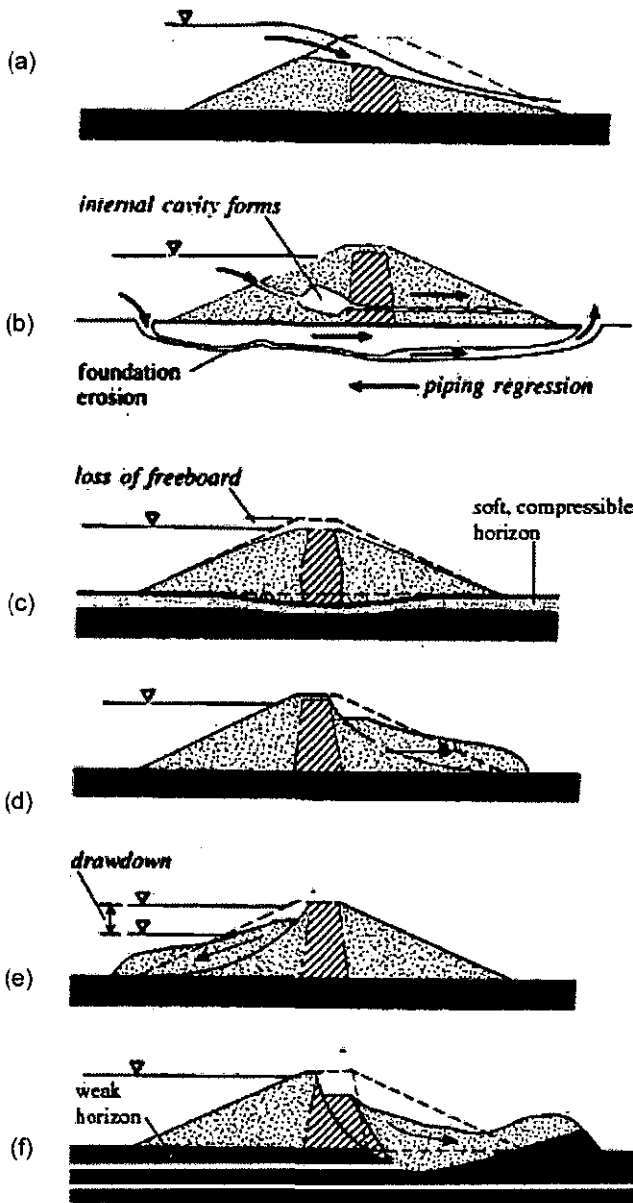
### 2.4.3 Mecanismos de defecto, modos de falla y consideraciones de diseño

Los mecanismos de defecto principal y modos de falla identificable con las presas de tierra se ilustran en forma esquemática en la Figura 2.5.

Ciertos mecanismos son interrelacionados, por ejemplo el desbordamiento puede resultar de la inadecuada capacidad del aliviadero o de una falta de borde libre que puede a su vez, ser el resultado de los asentamientos a largo plazo por consolidación o cargas externas.

La erosión interna y mecanismos de desbordamiento son motivo de especial preocupación, siendo cada uno responsable por cada 30-35% de los incidentes y fallas graves.

En el esquema de los riesgos principales a ser protegidos (Figura 2.5) y el diagrama esquemático de una presa de tierra (Figura 2.4) se pueden destacar las principales consideraciones de diseño:



Desbordamiento conduce al lavado; limos menos cohesivos, arenas, etc. El mayor riesgo a corto plazo.

Erosión interna y tubificación con migración de finos al núcleo etc. También en la fundación (notar la regresión del "pipe" y la formación de cavidades internas; puede iniciar mediante agrietamiento interno o por la filtración a lo largo de la alcantarilla del perímetro etc).

Asientos en el terraplén y fundación (deformación y agrietamiento interno) tenga en cuenta también los modos de deformación transversal del valle.

Inestabilidad (1): talud aguas abajo demasiado alto y empinado en relación a la resistencia al corte del material del espaldón.

Inestabilidad (2): Falla del talud aguas arriba siguiendo la rápida reducción del nivel de agua.

Inestabilidad (3): Falla de la fundación aguas abajo debido a sobrecarga de horizontes blandos y débiles

Figura 2.5: Ilustración de mecanismos de defecto en presas y modos de falla (Novak, et al., 2007).

- **Desbordamiento y borde libre.** El aliviadero y la capacidad de salida deben ser suficientes para evitar el desbordamiento, con riesgo de erosión grave y posible lavado del terraplén. El borde libre, es decir, la diferencia entre el nivel máximo de embalse y el nivel mínimo de la cresta de la presa, debe ser suficiente para evitar desbordamiento por acción del oleaje. También debe incluir una provisión para la predicción de asientos a largo plazo del terraplén y para la compresibilidad de la fundación.

- **Estabilidad.** El terraplén, incluyendo su fundación, debe ser estable en la construcción y en todas las condiciones de operación del embalse. Por lo tanto, la cara de los taludes debe ser suficientemente plana para asegurar que los esfuerzos internos y cimentación se mantienen dentro de límites aceptables.
- **Control de la infiltración.** La infiltración dentro y bajo el terraplén debe ser controlada para evitar la erosión interna oculta y la migración de materiales finos, por ejemplo, desde el núcleo, o la erosión externa y desprendimiento. Gradientes hidráulicos, las presiones de infiltración y velocidades de infiltración dentro y debajo de la presa por lo tanto deben ser contenidas en niveles aceptables para los materiales en cuestión.
- **Protección cara aguas arriba.** La cara aguas arriba debe ser protegida contra la erosión local como un resultado de la acción de las olas, el movimiento de hielo, etc.
- **Vertedero y obras adicionales.** Se debe tener cuidado para asegurar que el vertedero o las otras instalaciones construidas a través de la presa no permitan el paso sin obstáculos del agua de infiltración a lo largo de su perímetro con riesgo de migración del suelo y de la tubería.

#### 2.4.4 Análisis de estabilidad

La estabilidad de las presas de tierra debe ser evaluada en relación a las condiciones cambiantes de carga y régimen de las infiltraciones que se desarrollan a partir de la construcción a través del primer embalse en servicio operacional, incluyendo el desembalse del reservorio.

Un número de superficies de falla representativa de diferentes presas de tierra y/o lugares de fundación se ilustran esquemáticamente en la Figura 2.6.

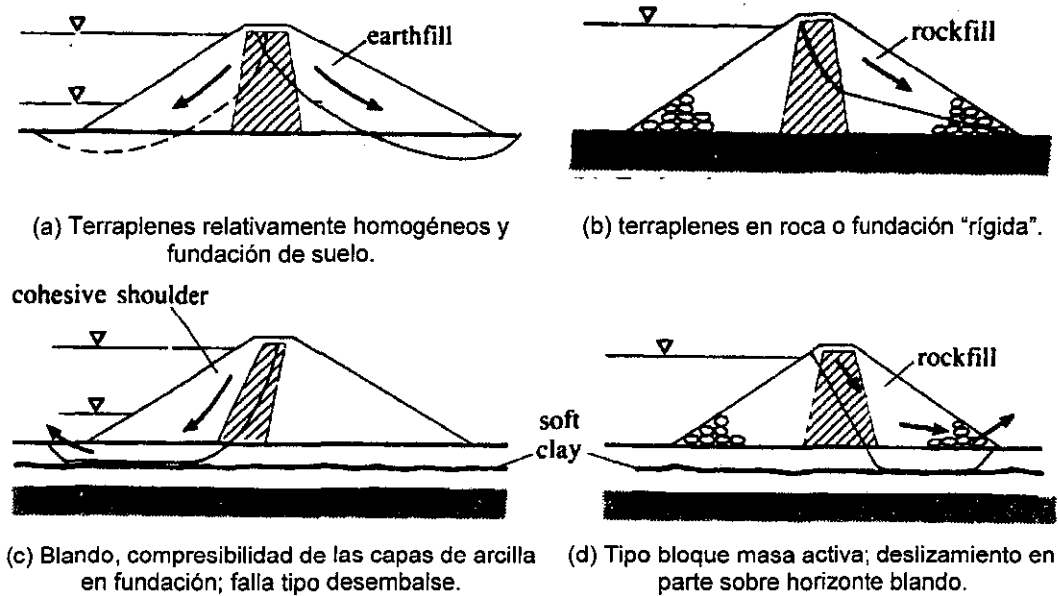


Figura 2.6: Analisis de estabilidad: esquemas de superficies de falla (Novak, et al., 2007).

Las siguientes condiciones críticas deben ser analizadas:

- 1 Fin de la construcción (ambos taludes)
- 2 Flujo permanente, reservorio lleno (talud aguas abajo crítico)
- 3 Desembalse rápido (talud aguas arriba crítico)
- 4 Carga sísmica adicional para 1,2 y 3, si es apropiado para la ubicación.

El análisis es en términos de los parámetros de resistencia al corte en esfuerzo efectivo cohesión ( $c'$ ) y ángulo de fricción efectivo ( $\varphi'$ ), con las presiones intersticiales ( $p_l$ ) o la relación de presión de poros ( $r_u$ ). Los parámetros de esfuerzo total,  $c$  y  $\varphi$ , son adecuados solo para un corto plazo y análisis aproximado, por ejemplo la estabilidad en una etapa intermedia durante la construcción.



### 3.0 CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA

En este capítulo se proporciona una descripción detallada de las expresiones matemáticas consideradas para modelar los fenómenos involucrados en la construcción y operación de presas de tierra.

La notación compacta se utiliza en la escritura de las ecuaciones diferenciales parciales (EDPs).

#### 3.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Las hipótesis de trabajo son:

- La presión atmosférica se establece en cero porque se considera un sistema abierto.
- La variación de presión de agua (succión) con el contenido volumétrico de agua del relleno se representa mediante una función de curva característica agua-suelo. No se considera el comportamiento de histéresis de la curva.
- Agua y partículas de suelo se asumen como fases incompresibles.
- Se supone un medio poroso, homogéneo e isotrópico.

Las variables principales de mecánica de suelos y flujo de agua son el vector desplazamiento ( $u$ ) y la presión de agua ( $p$ ), respectivamente.

#### 3.2 ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA MECÁNICA DE SUELOS

La mecánica de suelos de una presa de tierra se rige mediante ecuaciones de equilibrio y compatibilidad, así como las leyes constitutivas que describen el comportamiento de los materiales. Estas ecuaciones que gobiernan y las relaciones constitutivas se describen a continuación por separado.

Un esquema de la dependencia entre las variables y las condiciones de contorno en el caso de un análisis estático se muestra en la Figura 3.1.

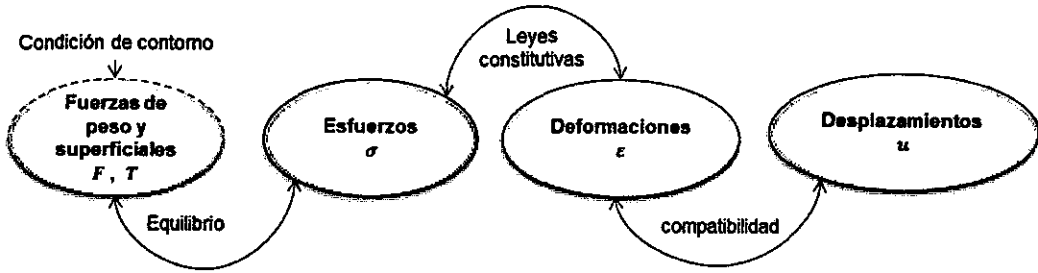


Figura 3.1: Las dependencias entre variables en un análisis estático de la mecánica de suelos.

Se seguirá la convención de signos de mecánica de medios continuos (Chen, 1990) que considera positivo los esfuerzos de tracción. Esto significa que los esfuerzos principales de compresión tienen un signo negativo y se ordenan como  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .

### 3.2.1 Ecuaciones de equilibrio

La ecuación de equilibrio relaciona el tensor de esfuerzo con las fuerzas de cuerpo a través de la llamada ecuación de Cauchy.

Para cuantificar como se transmiten las fuerzas a través de un continuo, se utiliza el concepto de esfuerzo (fuerza/unidad de área). La magnitud y dirección de un esfuerzo y la manera en el cual este varía espacialmente indica cómo se transfieren las fuerzas. Sin embargo, estos esfuerzos no pueden variar arbitrariamente, sino que deben obedecer la ecuación de equilibrio.

Las ecuaciones de equilibrio para un suelo en condiciones no saturadas, en términos de esfuerzo total se expresa por la Ec. 1.

$$\nabla \cdot \sigma = -[(1 - n)\rho_s + nS_w\rho_w]g \quad (1)$$

donde  $n$  es la porosidad del medio ( $m^3 \cdot m^{-3}$ ),  $\rho_s$  es la densidad de partículas de suelo ( $kg \cdot m^{-3}$ ),  $\rho_w$  es la densidad del agua ( $kg \cdot m^{-3}$ ),  $S_w$  es el grado de saturación de agua ( $m^3 \cdot m^{-3}$ ) y  $g$  es el vector de aceleración de la gravedad de ( $m \cdot s^{-2}$ ). El tensor simétrico de esfuerzo total,  $\sigma$  ( $N \cdot m^{-2}$ ) se define en la Ec. 2.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  y  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$  son los esfuerzos normales y cortantes ( $N \cdot m^{-2}$ ), respectivamente.

En un medio poroso de saturación variable el esfuerzo efectivo  $\sigma'$  ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ) controla el comportamiento del suelo. Algunos modelos constitutivos del material incorporan el efecto de succión cuando el suelo es no saturado (Alonso, 1990). La succión ( $s$ ) se define por la Ec. 3:

$$s = (p_a - p) \quad (3)$$

donde  $s$  es la succión ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $p_a$  es la presión de aire ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y  $p$  es la presión de agua ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ). La saturación efectiva  $S_e$  ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ) se define por la Ec. 4:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

donde  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $\theta_r$  es el contenido volumétrico de agua residual ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ), y  $\theta_s$  es el contenido volumétrico de agua saturado ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ). El contenido volumétrico de agua se relaciona con la porosidad  $n$  y el grado de saturación de agua  $S_w$  por la Ec. 5:

$$\theta = nS_w \quad (5)$$

### 3.2.2 Ecuación de compatibilidad

La ecuación de compatibilidad relaciona las deformaciones normal ( $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ ) y de corte ( $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ ) con los desplazamientos  $u, v$  and  $w$  en las direcciones  $x, y$  and  $z$ , respectivamente (Timoshenko, et al., 1951):

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= -\frac{\partial u}{\partial x} & \epsilon_{xy} = \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \epsilon_y &= -\frac{\partial v}{\partial y}; & \epsilon_{yz} = \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \epsilon_z &= -\frac{\partial w}{\partial z} & \epsilon_{xz} = \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \quad (6)$$

Para expresar la deformación de corte, tendrá la forma de tensor ( $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{xz}$ ) o como la forma de ingeniería ( $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ ) pueden ser utilizada. El tensor de deformaciones simétrico  $\epsilon$  ( $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ) mostrado en la Ec (7), se puede expresar en términos de componentes de esfuerzo normal y de corte:

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} & \epsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3.2.3 Ecuación de resistencia al corte

La resistencia al corte de un suelo **saturado** se describe utilizando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y el concepto de esfuerzo efectivo (Terzaghi, 1936) en la Ec. 8.

$$\tau = c' + (\sigma - p) \tan \varphi' \quad (8)$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo de cortante en el plano de falla en la rotura ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $c'$  es la "cohesión efectiva" ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $(\sigma - p)$  es el esfuerzo normal efectivo en el plano de falla en la rotura ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $\varphi'$  es el ángulo efectivo de fricción interna ( $^\circ$ ).

Por otro lado, la resistencia al corte de un suelo **no saturado** se puede formular en términos de las variables de estado de esfuerzos independientes (Fredlund, 1978). Las variables de estado de esfuerzo,  $(\sigma - p_a)$  y  $(p_a - p)$ , han demostrado ser la combinación más ventajosa para la práctica. Utilizando estas variables de esfuerzo, la ecuación de resistencia cortante se escribe como sigue en la Ec. 9:

$$\tau = c' + (\sigma - p_a) \tan \varphi' + (p_a - p) \tan \varphi^b \quad (9)$$

donde  $c'$  es la cohesión en succión matricial y esfuerzo normal neto igual a cero ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $(\sigma - p_a)$  es el estado de esfuerzo normal neto en el plano de falla en la rotura ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $(p_a - p)$  es la succión matricial en el plano de falla en la rotura ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $\varphi^b$  es el ángulo que indica la razón de incremento de la resistencia al corte en relación con la succión matricial.

Una comparación de la Ec. 8 y 9 revelan que la ecuación de resistencia al corte para un suelo no saturado es una extensión de la ecuación de resistencia al corte para un suelo saturado. En el primer caso, dos variables de estado de esfuerzo se utilizan para describir su resistencia al corte, mientras que en el segundo caso solo una variable de estado de esfuerzo (es decir esfuerzo normal efectivo  $(\sigma - p)$ ) es requerida.

### 3.2.4 Leyes constitutivas

Las leyes constitutivas se necesitan para describir el comportamiento del material. En resumen, estas leyes constitutivas representan el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo y proporcionan un enlace entre las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad. Estas relaciones se expresan en la Ec. 10:

$$d\sigma' = Dd\varepsilon \quad (10)$$

donde  $D$  es la relación constitutiva o matriz de rigidez el cual representa el estado de esfuerzo actual y la historia pasada del suelo ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ). En la (Ec. 10)  $d\sigma'$  es el vector de esfuerzos efectivo incremental ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y  $d\varepsilon$  es el vector de deformación incremental ( $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

Las relaciones constitutivas consideradas en este trabajo se describen brevemente a continuación.

### 3.2.4.1 Elasticidad lineal

El modelo elástico lineal se basa en la ley de Hook de elasticidad isotrópica. Esto se puede utilizar para modelar rocas.

La Figura 3.2 muestra una gráfica sencilla de la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación en un modelo de elasticidad lineal.

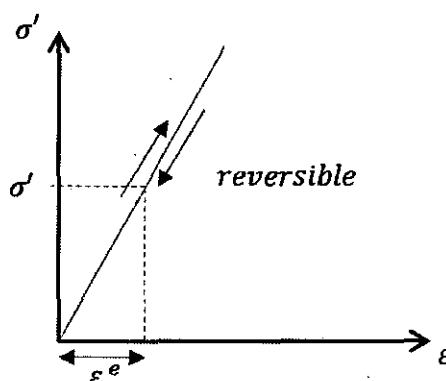


Figura 3.2: Representación de un modelo elástico lineal.

Dos parámetros elásticos básicos son necesarios para calcular la matriz de rigidez ( $D$ ): módulo de Young  $E$  y razón de Poisson  $\nu$ .

### 3.2.4.2 Elasto plástico Mohr-Coulomb

Este modelo se basa en el criterio de falla de Mohr-Coulomb el cual representa una aproximación de "primer orden" para el comportamiento del suelo o roca. Gráficos simples representando la trayectoria de esfuerzo deformación en un modelo elasto-plástico perfecto se muestran en la Figura 3.3.

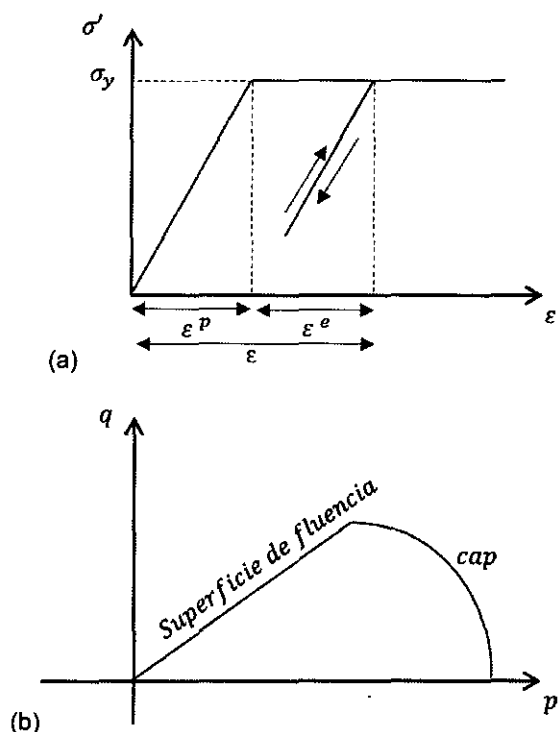


Figura 3.3: La trayectoria de esfuerzo-deformación (a) y esfuerzo desviador – esfuerzo efectivo promedio (b) están representados por un modelo elasto-plástico perfecto.

La matriz de rigidez ( $D$ ) para este modelo depende de cinco parámetros: el módulo de Young  $E$  y la razón de Poisson  $\nu$  concerniente a la elasticidad del suelo; ángulo de fricción  $\varphi$  y cohesión  $c$  concerniente a la plasticidad del suelo y ángulo de dilatancia  $\psi$  relacionado al cambio volumétrico debido a aplicarse una deformación de corte.

#### 3.2.4.3 Cam-Clay modificado

El modelo Cam-Clay modificado es un modelo muy bien conocido en literatura de modelación de un suelo, una explicación detallada se puede encontrar (Wood, 1990). Se modela principalmente en suelos de tipo arcillas normalmente consolidados.

Los diagramas que se muestran en la Figura 3.4 representan la trayectoria de esfuerzo y deformación de un modelo Cam-Clay modificado.

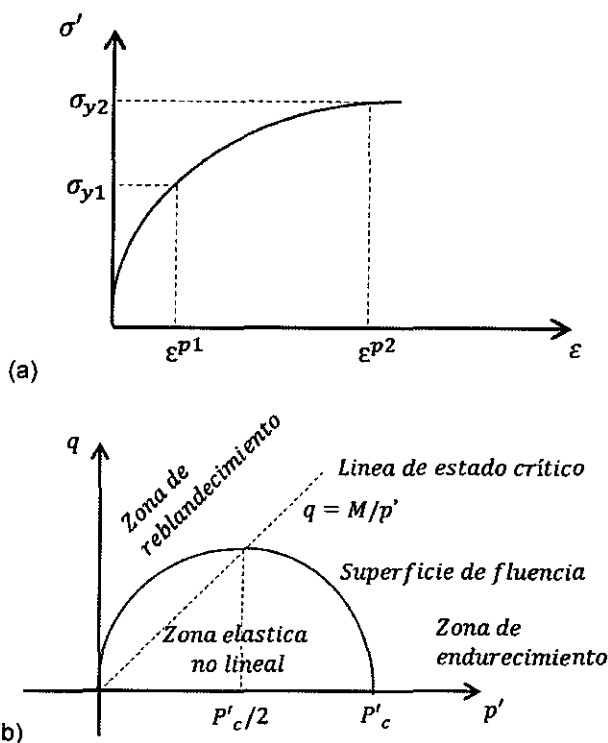


Figura 3.4: La trayectoria de esfuerzo-deformación (a) y esfuerzo desviador-promedio (b) se representa por un modelo Cam-Clay modificado.

La matriz de rigidez ( $D$ ) para este modelo involucra seis parámetros de entrada: Modulo de Young  $E$ , razón de Poisson  $\nu$ , índice de hinchamiento  $\kappa$ , índice de compresión  $\lambda$ , relación de vacíos inicial  $e_0$  y la pendiente del estado crítico  $M$ , la cual dependen del ángulo de fricción.

### 3.2.4.4 Resumen de modelos constitutivos

Un resumen de modelos constitutivos y sus variables de dependencia se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Resumen de modelos constitutivos utilizados en este trabajo (Elaboración propia).

Modelo constitutivo	Material	Caso aplicado	Parámetros dependientes
Elástico lineal	Concreto y roca intacta	Esfuerzos inicial	$D(E, \nu)$
Mohr-Coulomb	Suelo y roca	Estabilidad de taludes	$D(E, \nu, \varphi, c, \psi)$
Cam-Clay modificado	Arcilla blanda	Asentamiento y estabilidad	$D(E, \nu, \kappa, \lambda, e_0, \varphi)$

### 3.3 ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL FLUJO

En flujo de agua subterránea en medios porosos, la ley de Darcy y el balance de masa de agua deben satisfacer las ecuaciones. Estos fenómenos se consideran por separado más adelante.

Las interrelaciones entre los procesos se muestran esquemáticamente en la Figura 3.5.

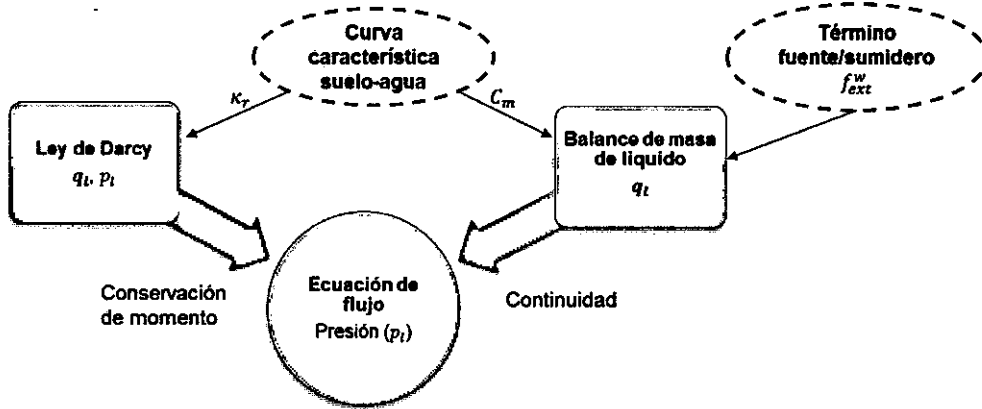


Figura 3.5: Interrelaciones entre variables en el flujo de las aguas subterráneas.

#### 3.3.1 Balance de masa de agua

La ecuación de balance de masa para suelos no saturados se puede escribir como:

$$\partial_t(nS_w\rho_w) = -\nabla \cdot (\rho_w \mathbf{q}) + f_{ext}^w \quad (11)$$

donde  $\mathbf{q}_t$  es el vector de flujo de Darcy ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) y  $f_{ext}^w$  es un sumidero externo de agua ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ). El término del lado izquierdo de la Ec. 11 se puede expresar también como:

$$\partial_t(nS_w\rho_w) = \rho_w[\partial_p(nS_w) + S_w(nX_f + (1-n)X_p)]\partial_t(p) \quad (12)$$

donde  $X_f$  es la compresibilidad del agua (Pa<sup>-1</sup>) que es igual a  $(\frac{1}{\rho_w})\partial_p(\rho_w)$  y  $X_p$  es la compresibilidad efectiva de la matriz de suelo (Pa<sup>-1</sup>) que es igual a  $(\frac{1}{1-n})\partial_p(n)$ .

El siguiente término de almacenamiento  $S$  (Pa<sup>-1</sup>) se puede utilizar para simplificar la Ec. 12.



$$S = nX_f + (1 - n)X_p \quad (13)$$

Suponiendo constante la densidad de agua, sólido y condición saturada, el término advectivo de la Ec. 11 puede ser expresado para agua y sólido como:

$$\nabla \cdot (\rho_w n \mathbf{v}_w) = \nabla \cdot (n(\mathbf{v}_{rel} + \mathbf{v}_s)) = 0 \quad (14)$$

$$\nabla \cdot (\rho_s(1 - n)\mathbf{v}_s) = \nabla \cdot (\mathbf{v}_s) - \nabla \cdot (n\mathbf{v}_s) = 0 \quad (15)$$

donde  $\mathbf{v}_w$  es la velocidad de agua real ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). La velocidad de las partículas de suelo  $\mathbf{v}_s$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) puede escribirse como  $\partial_t(\mathbf{u})$ . Sumando las dos ecuaciones (14 and 15) resulta en:

$$\nabla \cdot (n\mathbf{v}_{rel}) + \nabla \cdot (\partial_t(\mathbf{u})) = 0 \quad (16)$$

donde  $\mathbf{v}_{rel}$  es la velocidad del agua relativo ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) y es representado por  $\frac{\mathbf{q}}{n}$  para condición saturada. Por otra parte, la deformación volumétrica  $\varepsilon_{vol}$  es igual a la divergencia del tensor de desplazamiento  $\nabla \cdot (\mathbf{u})$ . Esta ecuación (Ec. 16) puede ser reorganizada a:

$$\nabla \cdot (\rho_w \mathbf{q}) = \rho_l \nabla \cdot (\mathbf{q}) + \rho_w \partial_t(\varepsilon_{vol}) \quad (17)$$

Finalmente, la formulación de la ecuación a resolver es la siguiente:

$$\rho_w [C_m + S_w S] \partial_t(p) = -\rho_w \nabla \cdot (\mathbf{q}) - \rho_w \partial_t(\varepsilon_{vol}) + f_{ext}^w \quad (18)$$

donde  $C_m$  es la capacidad de la humedad específica (-) que es igual a  $\partial_p(\theta)$ .

### 3.3.2 Ley de Darcy

La ley de Darcy describe la velocidad de un fluido a través de un medio poroso. Se puede escribir en términos de la presión de la siguiente manera:

$$\mathbf{q} = -\frac{\kappa \kappa_r}{\mu} (\nabla p - \rho_w \mathbf{g}) \quad (19)$$

donde  $\mathbf{q}$  es el vector de flujo de Darcy ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $\kappa$  es el tensor de permeabilidad intrínseca ( $\text{m}^2$ ),  $\mu$  es la viscosidad dinámica ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ) y  $\kappa_r$  (-) denota la permeabilidad relativa (entre 0 y 1) la cual depende del grado de saturación de agua.

### 3.3.1 Curva característica de agua-suelo

La curva característica de agua-suelo (SWCC) se define como la relación entre el contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) y la succión ( $p_a - p$ ).

Diversas expresiones matemáticas de estas relaciones se pueden encontrar en la literatura. Las más ampliamente conocidas son las propuestas por (Van Genuchten, 1980) y (Brooks, 1964).

La función de permeabilidad relativa  $\kappa_r$  también puede estar relacionada con el contenido volumétrico de agua o de succión. A menudo, estas relaciones se deducen de la SWCC y la teoría de capilaridad. La SWCC experimental y la función de permeabilidad también se pueden formular.

## 4.0 CAPÍTULO IV: MÉTODOS NUMÉRICOS

En este capítulo se describen las herramientas numéricas utilizadas en la solución de las ecuaciones que gobiernan el flujo y la mecánica de manera acoplada. También se explica el acoplamiento entre los diferentes procesos y su implementación en el programa de cálculo utilizado.

Los métodos numéricos y computacionales son los métodos de cálculo en la actualidad, pero es importante comprender que si bien son herramientas muy poderosas, requieren de usuarios bien preparados con un conocimiento preciso de los modelos numéricos utilizados, el campo de aplicación y sus limitaciones. También es importante tener criterio a la hora de analizar los resultados, ya que por su facilidad en el uso (ingreso de datos y cálculo), pueden tentar al profesional a pensar que todo lo que sale de esa “caja negra” es verdadero y no susceptible de error.

### 4.1 PROCESOS ACOPLADOS

Se refiere a procesos comunes los cuales no pertenecen a un fenómeno simple.

#### 4.1.1 Cambios en la porosidad

La porosidad dinámica total  $n$  puede cambiar debido a efectos mecánicos. Esto se define en la Ec. 20.

$$n^{k+1} = n_0 + \Delta n_{mecánico}^{k+1} \quad (20)$$

donde  $k$  es el paso de tiempo calculado anterior,  $k + 1$  es el paso de tiempo actual,  $n_0$  es la porosidad inicial y  $\Delta n_{mecánico}^{k+1}$  es el incremento de la porosidad mecánica. La cual se define en la Ec. 21.

#### 4.1.2 Cambios en la porosidad debido a la deformación mecánica

Los cambios de porosidad debido a efectos mecánicos como el fenómeno de la compactación pueden ser representados por (Wood, 1990) mediante la Ec. 21.

$$\Delta n_{mecánica}^{k+1} = \varepsilon_{vol}^{k+1} \cdot (1 - n^k) \quad (21)$$

donde  $\Delta n_{mecánica}^{k+1}$  es el cambio de porosidad (-) y  $\varepsilon_{vol}^{k+1}$  es la deformación volumétrica (-).

### 4.1.3 Cambios en la permeabilidad debido a la porosidad

Los cambios en porosidad afectarán la permeabilidad del medio poroso. En suelos y rocas reales, la permeabilidad varía con la porosidad (Carman, 1937) mediante la Ec. 22.

$$\kappa = \kappa_0 \left( \frac{n}{n_0} \right)^3 \quad (22)$$

donde  $\kappa_0$  es el tensor de permeabilidad intrínseca inicial ( $m^2$ ). Cabe indicar que la porosidad ( $n$ ) se refiere a la indicada en el apartado 4.1.1.

## 4.2 DESCRIPCIÓN DEL ACOPLAMIENTO

Las interacciones entre los diferentes procesos estudiados en el presente trabajo se ilustran en la Figura 4.1. Se evidencia que existen dos bucles de retroalimentación cerrados: un bucle exterior (modificación de la permeabilidad – velocidad del agua) y un bucle interno (la presión de agua intersticial – modificación de la porosidad).

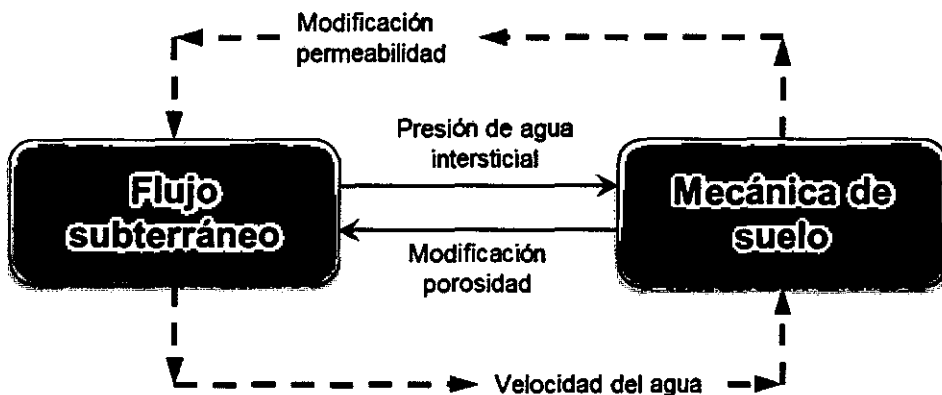


Figura 4.1: Ilustración de las interacciones entre diferentes procesos de los fenómenos HM que pueden surgir en los problemas de presas de tierra (adaptado de la figura de Liu, (2004)).

Se pueden dividir en dos tipos de acoplamiento según su influencia en el comportamiento físico: acoplamiento fuerte y débil.

El acoplamiento fuerte se representa mediante la Ec. 10 y Ec. 18 que son el conjunto de ecuaciones EDPs que forman el problema multifísico. Se resuelven considerando como incógnitas las variables  $u$  y  $p$ . El acoplamiento de estas variables se representa implícitamente en los esfuerzos efectivos que a su vez influyen en la resistencia al corte del suelo (ver apartado 3.2.3)

El acoplamiento débil se representa mediante la porosidad dinámica total (Ec. 20) la cual afecta al flujo de las aguas subterráneas y a la mecánica de suelo de forma indirecta. Ya sea mediante la permeabilidad que es afectada por el cambio de porosidad dinámica mediante la Ec. 22 y la densidad del material mediante la ecuación de equilibrio (Ec. 1).

### 4.3 PROCESO CONSTRUCTIVO Y OPERACIÓN

El modelamiento del proceso constructivo de una presa de tierra es importante debido a dos razones: (i) permite calibrar el modelo y (ii) puede ayudar a mejorar la estabilidad de la presa de tierra y la seguridad de la operación.

La presente metodología consiste en simular secuencialmente cada capa que se apila durante la construcción y operación de una presa de tierra (capas de compactación). Por lo tanto, esta estrategia de simulación permite minimizar la secuencia de construcción de una presa de tierra en capas, como se muestra en la Figura 4.2.

En esta aproximación de simulación secuencial el resultado obtenido durante el cálculo de las capas anteriores se utiliza para definir el inicio y condiciones de contorno de las siguientes capas.

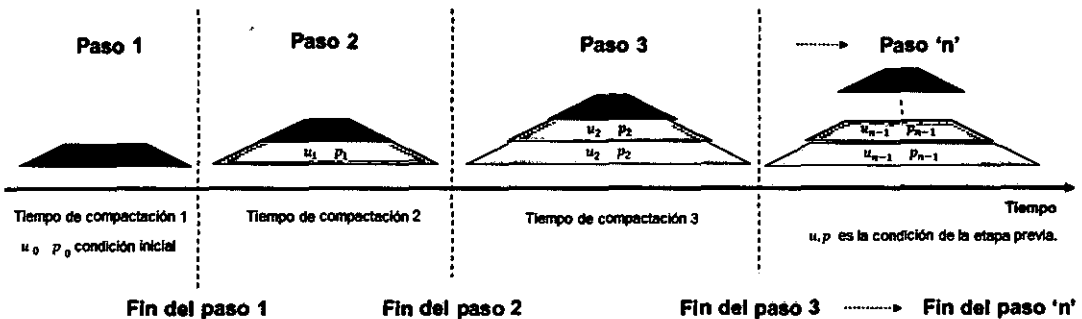


Figura 4.2: Secuencia de construcción de una presa de tierra mediante capas. La capa "n" es representado por el paso "n".

Con la finalidad de realizar una simulación progresiva de la construcción de la presa se ha considerado un tiempo de construcción por capas como se muestra en la Figura 4.3.

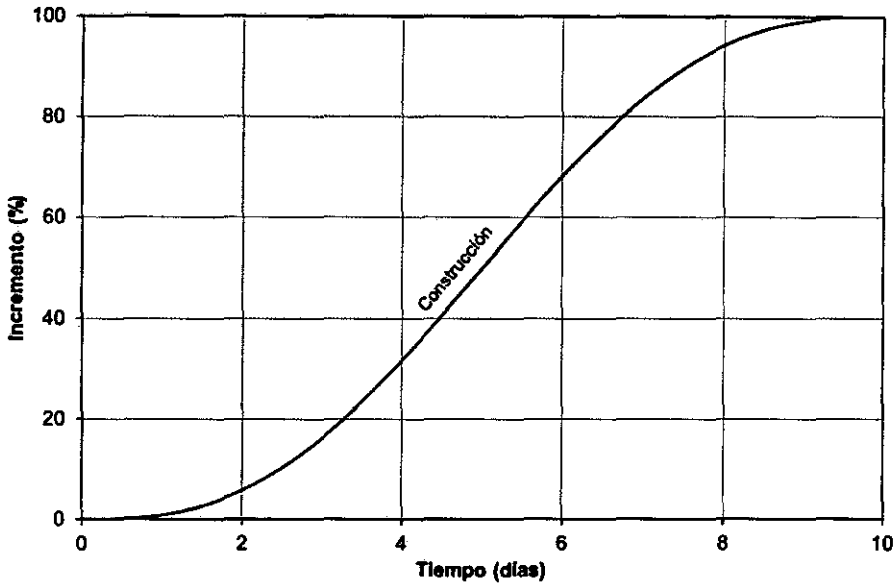
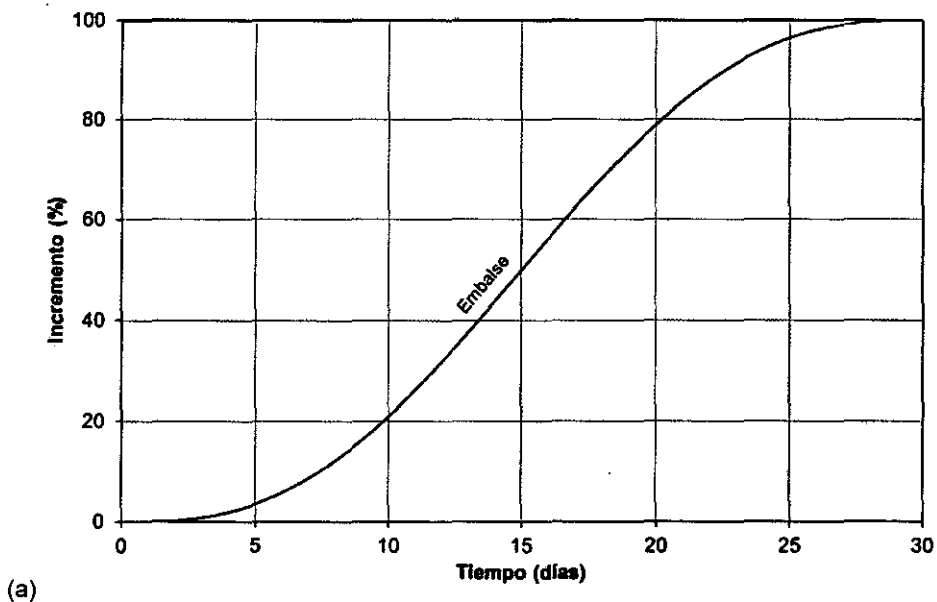


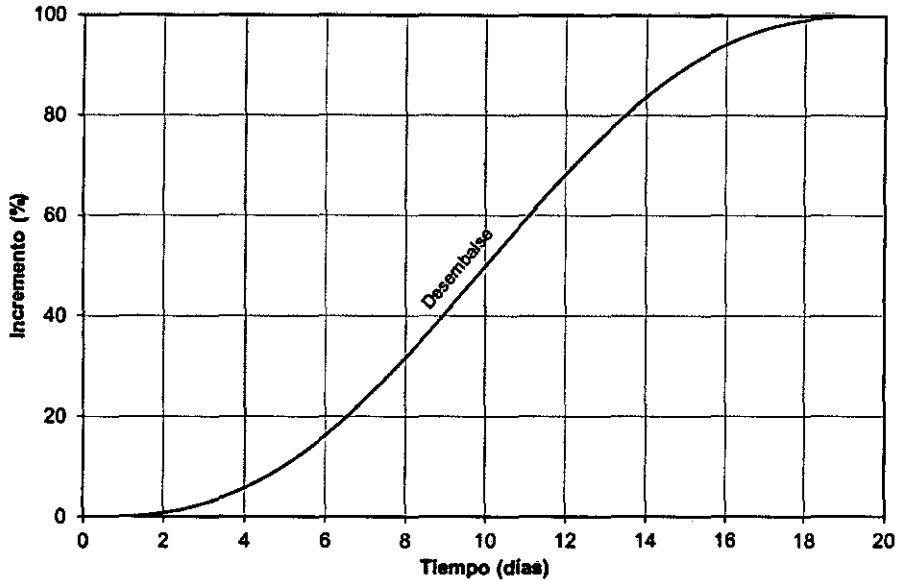
Figura 4.3: Curva de construcción con el tiempo por capa.

Se debe comprender por operación al proceso de embalse y desembalse durante el tiempo de vida de la estructura.

Para simular el embalse y desembalse en el comportamiento mecánico y de flujo se ha establecido de una manera que el nivel de carga hidráulica y esfuerzo mecánico sea variable con el tiempo.

En la Figura 4.4a y 4.4b se muestra las dos curvas suavizadas que representan el tiempo que demora para realizar el embalse y desembalse, respectivamente. Estas curvas serán utilizadas en el caso de aplicación capítulo VI.





(b)

Figura 4.4: curva de embalse con el tiempo (a) y curva de desembalse con el tiempo (b).

#### 4.4 HERRAMIENTA NUMÉRICA

La herramienta numérica a ser utilizada es Comsol Multiphysics versión 4.3 (COMSOL, de aquí en adelante) es un entorno de software de elementos finitos de gran alcance para el modelado y simulación de un gran número de sistemas basados en la física. (COMSOL, 2011). COMSOL es ampliamente utilizado en varias aplicaciones científicas y tecnológicas para el modelamiento de procesos basados en ecuaciones diferenciales parciales/ordinarias (EDP/EDO) y ecuaciones diferenciales algebraicas (EDA), que permite abordar diferentes acoples y sistemas altamente no lineales.

COMSOL es un producto independiente y tiene una interfaz gráfica de usuario intuitivo y flexible (GUI), con opciones de configuraciones flexibles para la geometría y la generación de mallas, el establecimiento de las propiedades del material y los diferentes procesos físicos, configuración de las opciones de resolver (paralelizada directa y solucionadores iterativos), post-procesamiento y visualización de los resultados. Además permite que se accede por programación de scripts en Java, que es conveniente para el propósito de acoplamiento de COMSOL para paquetes de software externos.

Mayor información sobre COMSOL se brinda en el Anexo B.

## 5.0 CAPÍTULO V: CASOS DE REFERENCIA Y VERIFICACIÓN

El objetivo de este capítulo es validar la herramienta numérica (COMSOL) con la cual se ha calculado para resolver los fenómenos acoplados de la mecánica de suelo y el flujo no saturado.

Diversos ejemplos de referencia han sido resueltos en COMSOL y comparados con las soluciones analíticas en algunos casos y soluciones numéricas obtenidas con otros códigos de elementos finitos.

Se ha resuelto cuatro casos:

- El primer caso es un ensayo de consolidación y se utilizó para validar el acoplamiento entre la mecánica y el flujo no saturado.
- El segundo caso refiere a un ensayo triaxial y se utilizó para validar el enfoque del esfuerzo efectivo de la mecánica de suelos (presión de agua y esfuerzo total). Mohr-Coulomb y Cam-Clay se utilizan como modelos constitutivos.
- El tercer caso se refiere a la construcción de una presa por etapas por donde se sigue el proceso construcción. Este caso se utilizó para validar la evolución de los desplazamientos y esfuerzos.
- El cuarto caso se refiere de un estanque contaminado, donde se acopla el flujo no saturado y el transporte de solutos.

### 5.1 CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

#### 5.1.1 Introducción

Consolidación es un proceso transitorio de flujo inestable en el cual existe acoplamiento entre flujo y cambio de volumen a medida que el suelo se ajusta gradualmente a un nuevo régimen de esfuerzo efectivo (Wood, 1990).

El proceso de consolidación se puede explicar con la ayuda de un modelo mecánico que se describe en (Potts, 1999). En este problema vamos a usar la solución analítica proporcionada por (Biot, 1956). El análisis se simplifica teniendo en cuenta la simetría axial intrínseca del modelo.



Los propósitos de este ejemplo de referencia son demostrar y comprobar la implementación del acoplamiento entre el esfuerzo y la presión de agua mediante una formulación, con el fin de simular un ensayo de consolidación.

### 5.1.2 Modelo conceptual

Se tiene un aparato de consolidación de 10 cm de diámetro y 2 cm de altura (ver Figura 5.1). La muestra de suelo es comprimida desde la parte superior por una carga de contorno (AB) de 100 kPa. Una membrana flexible contiene el suelo radialmente, lo que permite cambios en las fuerzas radiales mediante el establecimiento del agua de confinamiento.

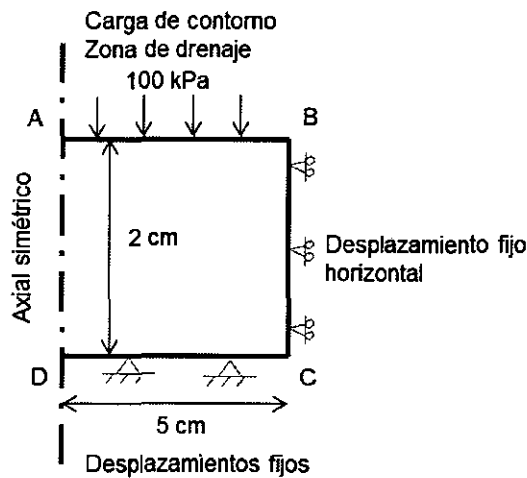


Figura 5.1: Modelo conceptual del ensayo de consolidación.

Las condiciones de contorno del ejemplo de referencia se especifican en la Tabla 5.1. La información es proporcionada de forma genérica.

Tabla 5.1: Resumen de condiciones de contorno asumidas para resolver el problema del ensayo de consolidación.

Contorno	Mecánica de suelos	Flujo de agua
AB	$\sigma \cdot n = 100 \text{ kPa}$	Salida de flujo
BC	$u_x = 0$	$q \cdot n = 0$
CD	$u_x = u_y = 0$	$q \cdot n = 0$
DA	Axial simétrico	Axial simétrico

Donde  $n$  es el vector normal,  $\sigma$  es el tensor de esfuerzos,  $q$  es el vector de flujo y  $u_i$  es el vector desplazamiento.

### 5.1.3 Propiedades y parámetros de los materiales

Los valores de los parámetros considerados para resolver este ejemplo de

referencia se muestran en la tabla 5.2. Han sido basados en una arcilla estándar de comportamiento lineal.

Tabla 5.2: Resumen de las propiedades del material utilizado para resolver el ejemplo de referencia del ensayo de consolidación.

	Propiedades y parámetros	Unidades	Material
			Arcilla
Mecánico	Densidad del sólido, $\rho_s$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 000
	Módulo de Young, $E$	kPa	1 000
	Relación de Poisson, $\nu$	-	0
Hidrodinámico	Permeabilidad intrínseca, $\kappa$	$\text{m}^2$	1e-15
	Porosidad, $n$	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	0,3
	Almacenamiento, $S$	$\text{Pa}^{-1}$	1e-7
	Viscosidad dinámica, $\mu^*$	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	0,001
	Densidad del agua, $\rho_w^*$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 000

\* Valores característicos del agua.

#### 5.1.4 Resultados y discusión

La Figura 5.2 muestra las curvas isócronas para varios tiempos. La solución analítica de la ecuación de Terzagui se representa mediante la línea azul continua, mientras la solución obtenida con la simulación en COMSOL se representa por círculos. Una precisión adecuada puede ser observada entre la simulación y la solución analítica.

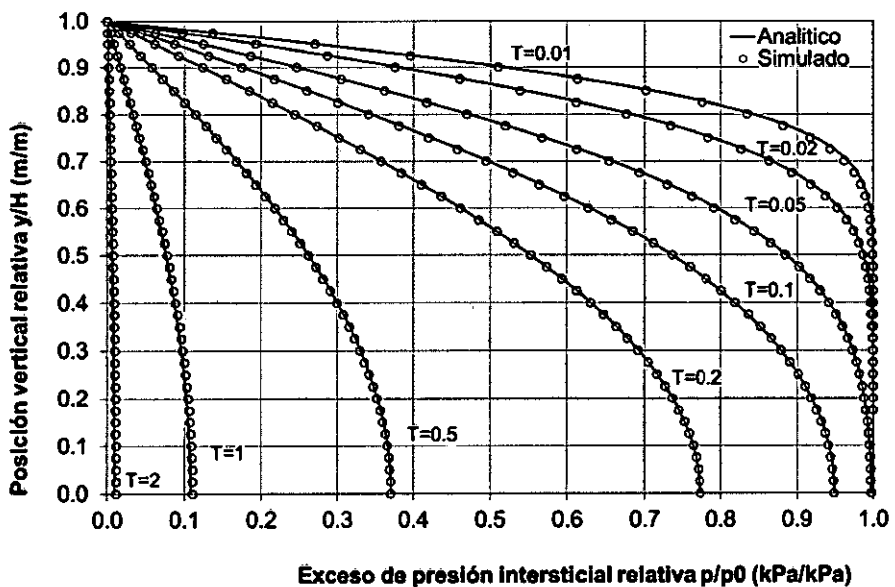


Figura 5.2: Isocronas de lo simulado y la solución analítica.

donde  $T$  representa el tiempo variable de forma adimensional, el cual equivale a la siguiente expresión ( $T = \frac{c_v t}{H^2}$ ). La Figura 5.3 muestra la disipación de la presión de agua como una consecuencia del drenaje del suelo, en dos diferentes tiempos.

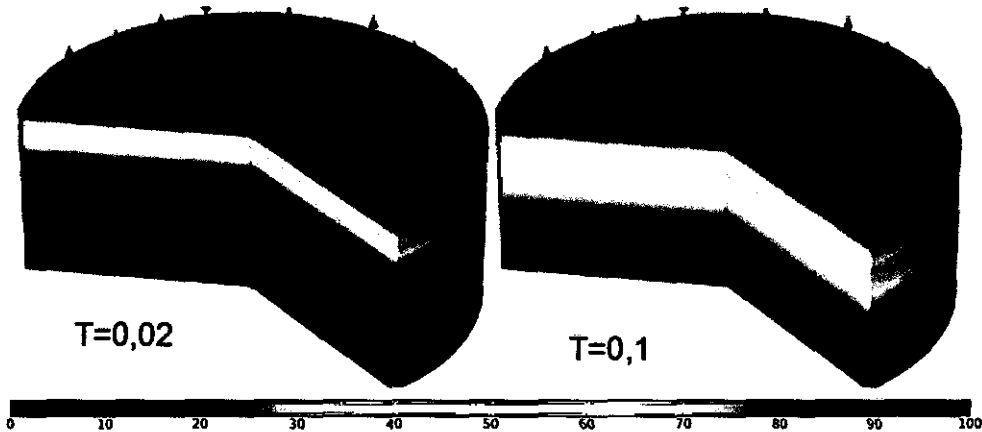


Figura 5.3: La distribución de presión de agua (kPa) en el tiempo  $T = 0,02$  y  $T = 0,1$  (adimensional). Las flechas representan la dirección del flujo.

## 5.2 ENSAYO TRIAXIAL

### 5.2.1 Introducción

El ensayo triaxial es uno de los ensayos más comunes que se utilizan en las pruebas de laboratorio del suelo. La muestra de suelo se coloca normalmente dentro de una membrana de látex y después se comprime a deformación constante manteniendo una presión radial.

En este ejemplo de referencia, un desplazamiento vertical y una presión de confinamiento se aplican sobre la muestra. Se estudian la respuesta estática y la carga de rotura para una presión de confinamiento. El material se simula con dos diferentes relaciones de modelos constitutivos: criterio de Mohr Coulomb y Cam-Clay. El análisis se simplifica teniendo en cuenta la simetría axial intrínseca del modelo.

El propósito de este ejemplo de referencia es demostrar y verificar el comportamiento del suelo en esfuerzos efectivos mediante la simulación de un ensayo triaxial. Este ejemplo es una adaptación del Manual SIGMAW (Krahn, 2004).

### 5.2.2 Modelo conceptual

En la Figura 5.4, se observa un aparato triaxial de 1 m de diámetro y 1 m de altura, que presiona la muestra de suelo desde la parte superior mediante un desplazamiento prescrito (AB). Una membrana flexible contiene el suelo radialmente, permitiendo cambios en las fuerzas radiales mediante el establecimiento de la presión del agua de confinamiento (BC). El esfuerzo y desplazamiento se preparó en el módulo "structure solid" de COMSOL Multiphysics.

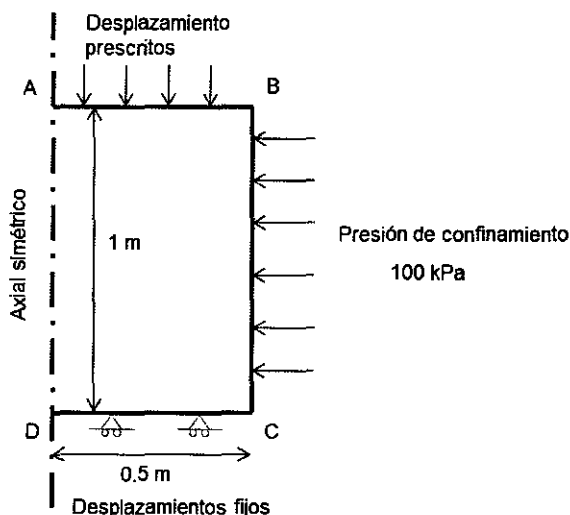


Figura 5.4: Dimensiones y condiciones de contorno considerados para resolver el ensayo triaxial de referencia.

Las condiciones de contorno del problema se indican en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Resumen de las condiciones de contorno considerados para resolver el problema del ensayo triaxial.

Contorno	Mecánica de suelos	Flujo del fluido
AB	Desplazamiento prescrito	$q \cdot n = 0$
BC	$\sigma \cdot n = 100 \text{ kPa}$	$q \cdot n = 0$
CD	$u_x = u_y = 0$	$q \cdot n = 0$
DA	Axial simétrico	$q \cdot n = 0$

donde  $n$  es el vector normal,  $\sigma$  es el tensor de esfuerzo  $q$  es el vector de flujo y  $u_i$  es el vector desplazamiento.

### 5.2.3 Propiedades y parámetros de los materiales

Los valores de las propiedades y parámetros considerados para resolver estos ejemplos de referencia se muestran en la tabla 5.4. Se han considerado el relleno 1 y 2 como modelo constitutivo Mohr Coulomb y Cam-Clay,

respectivamente.

Tabla 5.4 Resumen de propiedades y parámetros de materiales para el ensayo triaxial.

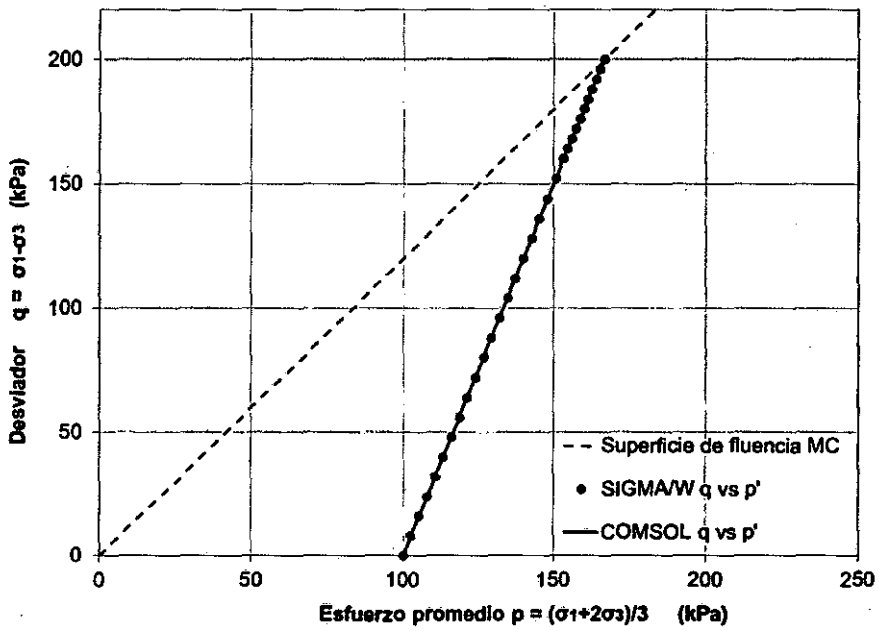
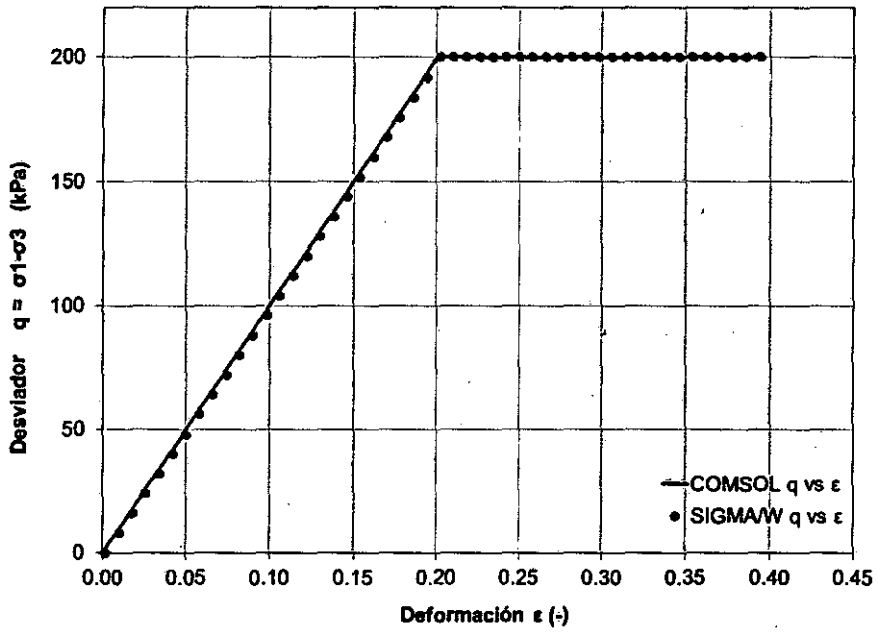
	Propiedades y parámetros	Unidades	Materiales	
			Relleno 1	Relleno 2
<b>Mecánico</b>	Módulo de Young, $E$	kPa	1 000	1 000
	Angulo de fricción, $\varphi$	°	30	25,6
	Relación de Poisson, $\nu$	-	0,334	0,334
	Índice de compresibilidad, $\lambda$	-	-	0,3
	Índice de hinchamiento, $\kappa$	-	-	0,05
	Relación de vacíos inicial, $e_0$	-	-	1,5
<b>Hidrodinámico</b>	Permeabilidad intrínseca inicial, $\kappa$	m <sup>2</sup>	-	1e-12
	Volumen de agua saturado, $\theta_s$	m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	-	0,5
	Volumen de agua residual, $\theta_r$	m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	-	0,03
	Almacenamiento, $S$	Pa <sup>-1</sup>	-	1e-7
	Viscosidad dinámica, $\mu^*$	Pa·s	-	0,001
	Densidad del agua, $\rho_l^*$	kg·m <sup>-3</sup>	-	1 000

\* Valores característicos del agua.

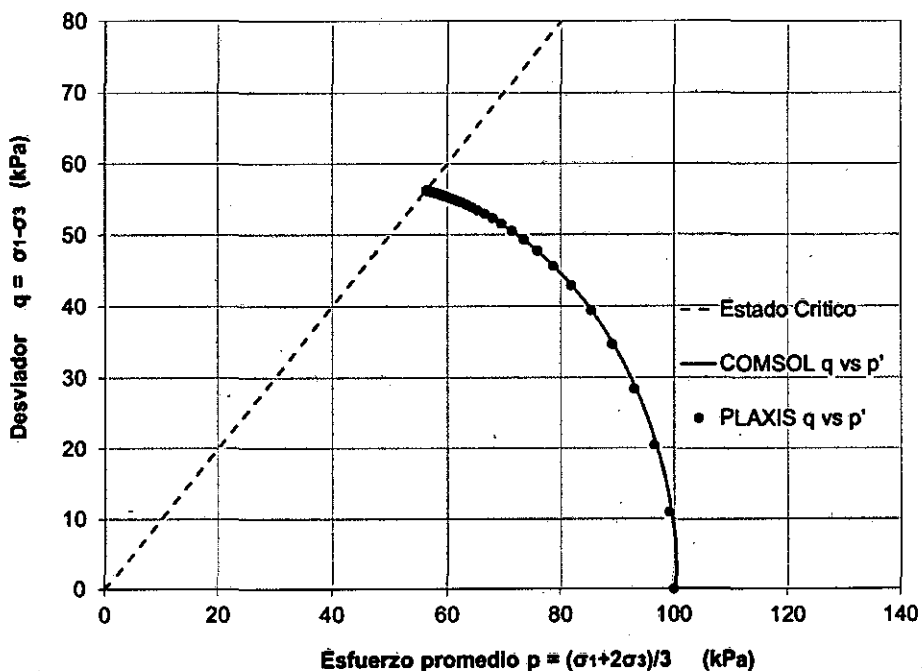
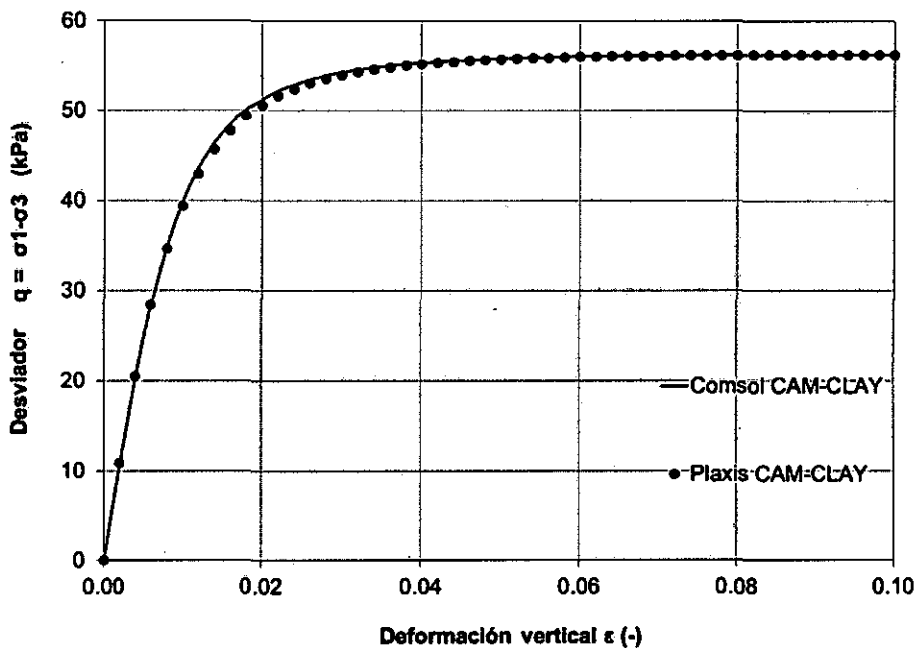
#### 5.2.4 Discusión y resultados

La Figura 5.5 muestra la trayectoria de esfuerzos que resultó suponiendo condiciones acopladas drenadas y no drenadas, para los modelos constitutivos Mohr Coulomb (a) y Cam-Clay (b), respectivamente.

Los valores obtenidos se aproximan muy bien a la solución numérica de otros códigos (SIGMA/W y PLAXIS). La trayectoria de esfuerzo total y efectivo se desarrolla debido a los dos tipos diferentes de comportamiento del suelo con el agua.



(a)



(b)

Figura 5.5: Esfuerzos y deformación axial como resultado de simular un ensayo triaxial drenado y no drenado con SIGMA/W, PLAXIS y COMSOL. Se consideraron dos modelos constitutivos: modelo Mohr Coulomb(a) y modelo Cam-Clay (b).

### 5.3 CONSTRUCCIÓN DE UN TERRAPLEN POR ETAPAS

#### 5.3.1 Introducción

Este ejemplo simple muestra la simulación de la construcción de un terraplén por etapas en suelo blando.

El propósito de este ejemplo de referencia es verificar que el desplazamiento vertical debido al proceso de construcción sea correcto.

Este ejemplo es una adaptación del manual SIGMA/W (Krahn, 2004).

#### 5.3.2 Modelo conceptual

La Figura 5.6 muestra la geometría del problema. El relleno se coloca en ocho capas sucesivas de un metro de altura cada una. El análisis comienza mediante el establecimiento de la condición de esfuerzo in-situ y se sigue mediante ocho análisis que representan la colocación del relleno.

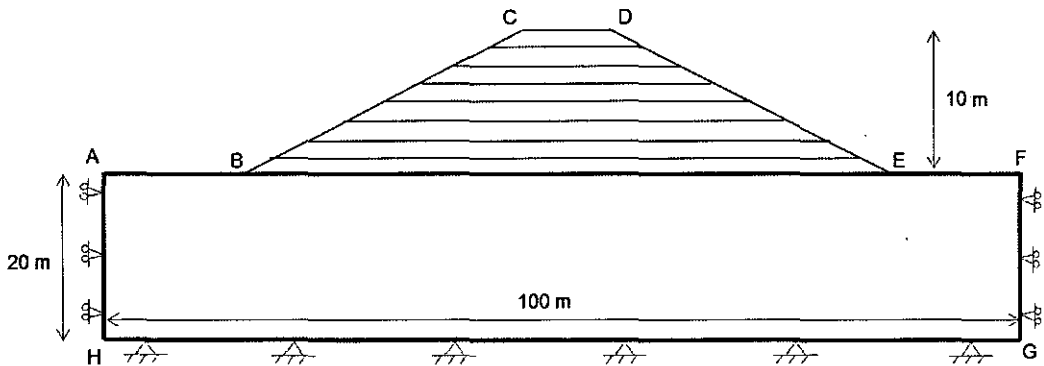


Figura 5.6: Dominio del modelo, geometría y condiciones de contorno asumidas para resolver la construcción de un terraplén.

Las condiciones de contorno consideradas para resolver este ejemplo de referencia, se indican en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Resumen de condiciones de contorno asumidas para simular la construcción de un terraplén.

Contorno	Mecánica de suelos
AH	$u_x = 0$
ABCDEF	libre
FG	$u_x = 0$
HG	$u_x = u_y = 0$

donde  $u$  es el vector desplazamiento.



### 5.3.3 Propiedades y parámetros de los materiales

Se ha considerado la fundación y relleno del terraplén mediante el modelo constitutivo elasto-plástico (Mohr Coulomb).

Este ejemplo de referencia se resolvió asumiendo los parámetros específicos mostrados en la tabla 5.6.

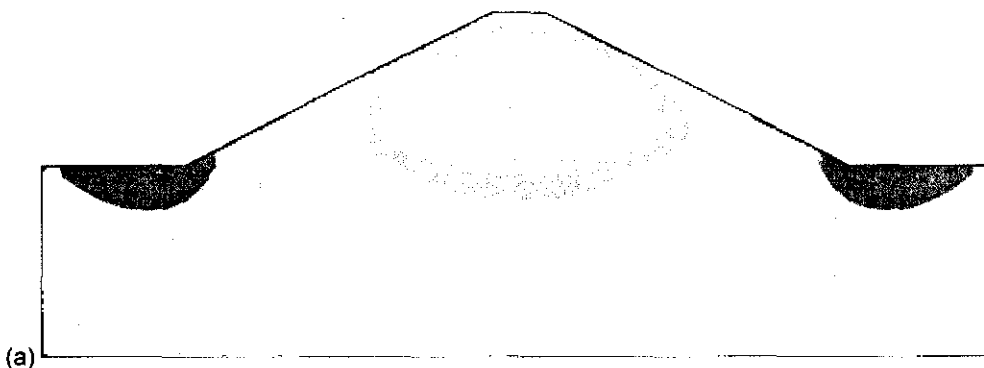
Tabla 5.6 Resumen de propiedades y parámetros de los materiales para la construcción de la presa.

	Propiedades y parámetros	Unidades	Materiales	
			Fundación	Relleno
Mecánico	Densidad del sólido, $\rho_s$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 000	2 000
	Cohesión, $c'$	kPa	200	5
	Angulo de fricción, $\varphi$	°	30	35
	Módulo de Young, $E$	kPa	200 000	5 000
	Relación de Poisson, $\nu$	-	0.49	0.40

### 5.3.4 Resultados y discusión

Los contornos de asentamientos obtenidos con ambos códigos se muestran en la Figura 5.7. Existen diferencias en la distribución de asentamientos extremos debido al grosor de malla, y por otro lado existen similitudes en la distribución de asentamientos en el centro por el proceso de carga por etapas.

Estos valores son buenas aproximaciones mediante ambos programas. Durante la construcción del terraplén, los asientos se producen debido al proceso constructivo.



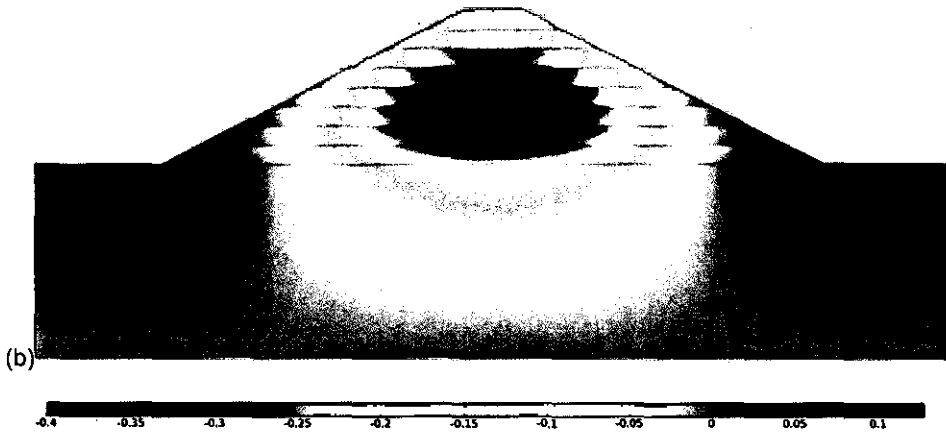


Figura 5.7: Contornos de asentamiento (m) simulado con SIGMAW (a) y COMSOL (b).

Dos perfiles de asentamientos desarrollados dentro de las capas 6 y 8 del terraplén y a lo largo de la línea central del terraplén se muestran en la Figura 5.8. Se debe tener en cuenta que el asentamiento más grande está en el centro del terraplén como uno podría esperar.

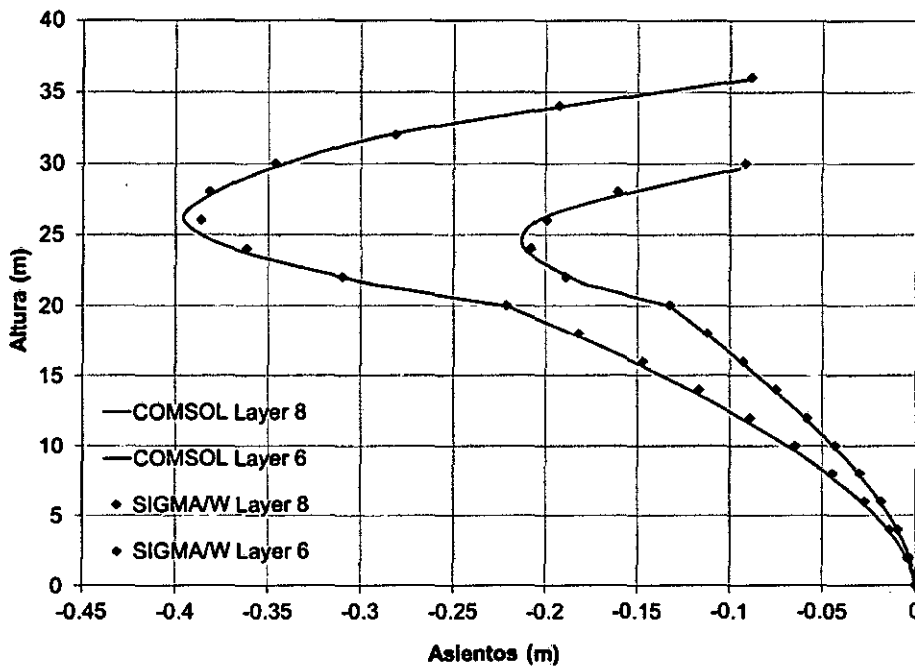


Figura 5.8: Perfiles de asentamientos a lo largo de la línea central de la estructura del terraplén. Comparación entre las simulaciones COMSOL y SIGMAW.

## 5.4 INFILTRACIÓN DE UN ESTANQUE

### 5.4.1 Introducción

Este ejemplo de referencia es el flujo no saturado a través de un estanque. El propósito de este ejemplo de referencia es demostrar y verificar la ecuación de Richard para un sistema de flujo en estado estacionario.

El alcance de esta comparación será representado por un modelo de flujo no saturado en dos dimensiones el cual está basado en el Manual de usuario SEEP/W (Krahn, 2004). En este ejemplo se usará un programa muy usado en análisis de flujo (SEEP/W) para comprobar lo obtenido mediante COMSOL.

### 5.4.2 Modelo conceptual

El sistema consiste en un terraplén de tierra con un estanque. La solución de infiltración se prepara en el módulo "Subsurface-flow" de COMSOL. El modelo se corre sobre un tiempo de 2750 s.

La Figura 5.9 muestra la geometría del modelo y la condición de contorno del problema. Un estanque se localiza en la esquina superior izquierda y se modeló usando una condición de carga hidráulica (ABC). Una cara potencial de filtración ha sido aplicada a lo largo del talud (EF) y una presión de agua igual a cero se utiliza en el pie del talud (FG).

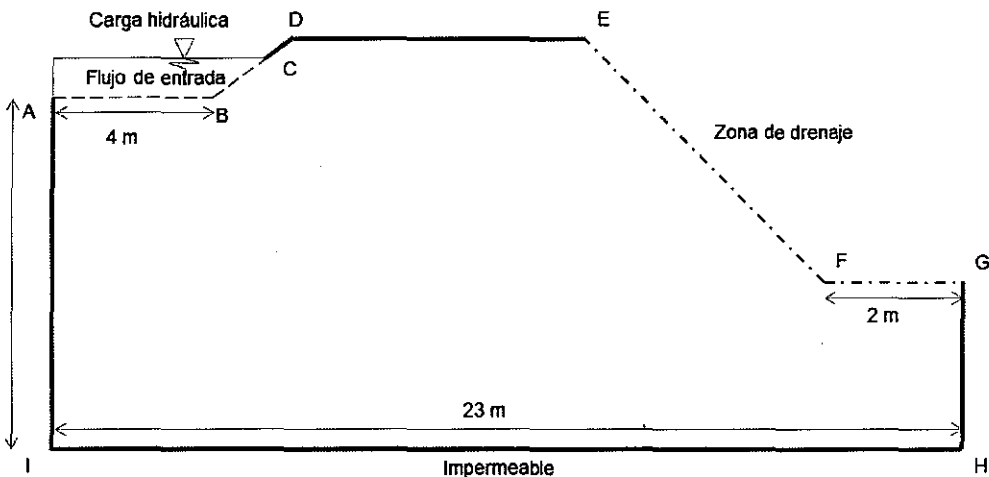


Figura 5.9: Modelo conceptual, geometría y condición de contorno del estanque.

Las condiciones de contorno son indicados en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Resumen de condiciones de contorno asumidas para resolver el problema de infiltración del estanque.

Contorno	Flujo de agua
AB	$\bar{h}_1 = 10,25 \text{ m}$
BC	$\bar{h}_1 = 10,25 \text{ m}$
CDE	$q \cdot n = 0$
EF	Salida de flujo
FG	$p - p_0 = 0$
GHIA	$q \cdot n = 0$

Donde  $n$  es el vector normal,  $\bar{h}_1$  es la carga hidráulica y  $q$  es el vector de flujo.

#### 5.4.3 Propiedades y parámetros de los materiales

Las propiedades de materiales considerados en este ejemplo se resumen en la Tabla 5.8. El material utilizado es un suelo tipo limo

Tabla 5.8 Resumen de propiedades y parámetros de materiales a resolver para el problema de infiltración del estanque.

	Propiedades y parámetros	Unidades	Material
Hidrodinámico	Permeabilidad intrínseca saturada, $\kappa_s$	$\text{m}^2$	1e-9
	Volumen de agua saturado, $\theta_s$	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	0,35
	Volumen de agua residual, $\theta_r$	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	0,03
	Almacenamiento, S	-	1e-9
	Densidad del agua, $\rho_l^*$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 000
	Viscosidad dinámica, $\mu^*$	Pa·s	0,001

\*Valores característicos del agua.

Las funciones hidráulicas (SWCC y conductividad) se muestran en la Figura 5.10, se basan en funciones que se obtuvieron de un ejemplo de referencia (Krahn, 2004).

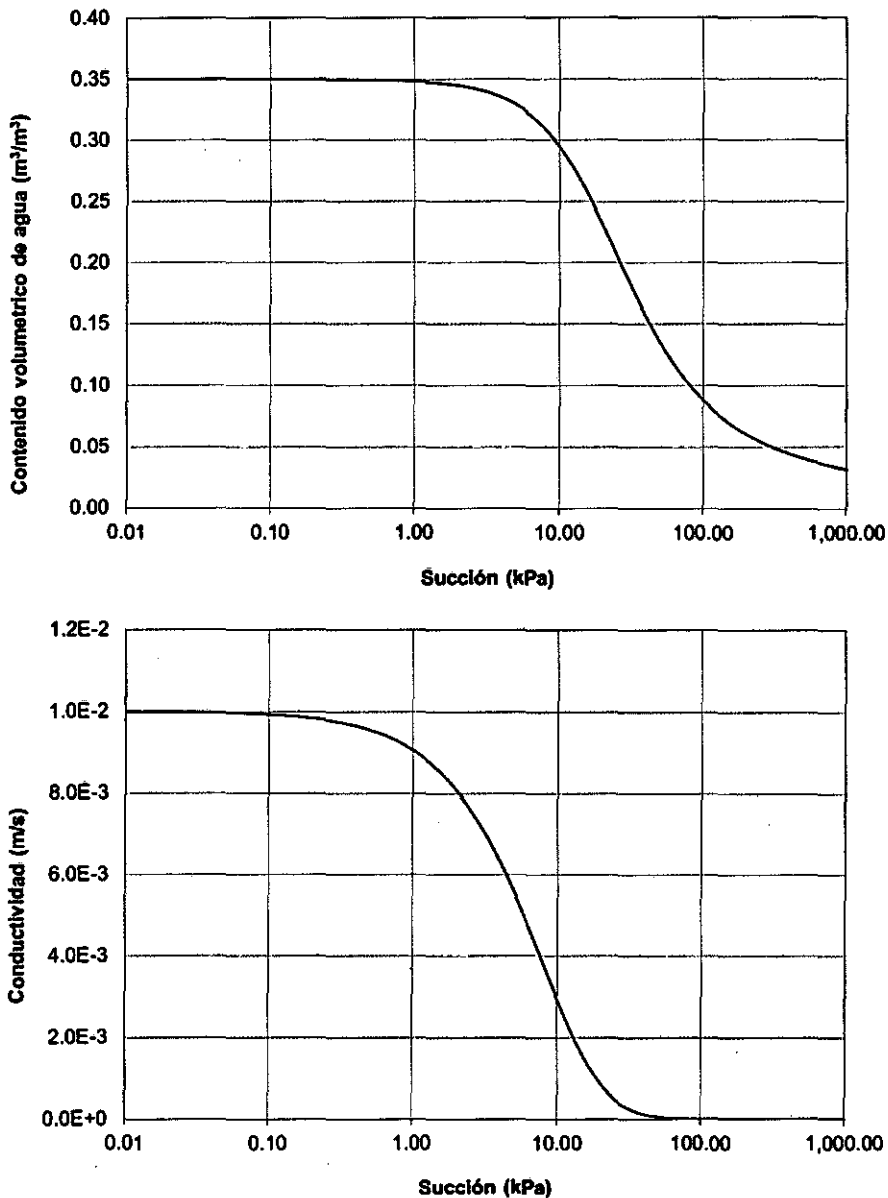


Figura 5.10: Curva característica de suelo-agua para suelo limoso de Krahn, 2004.

#### 5.4.4 Discusión y resultados

De las siguientes figuras se puede observar que el resultado obtenido a partir de COMSOL está en estrecho acuerdo con los obtenidos con SEEP/W.

Los resultados de la simulación de infiltración en estado estacionario muestra que en una cara de infiltración se ha desarrollado cerca al pie del talud (ver Figura 5.11). La Figura 5.11 también muestra el nivel freático representado mediante una línea azul. Esto se espera para el comportamiento del flujo por las propiedades de material asumido.

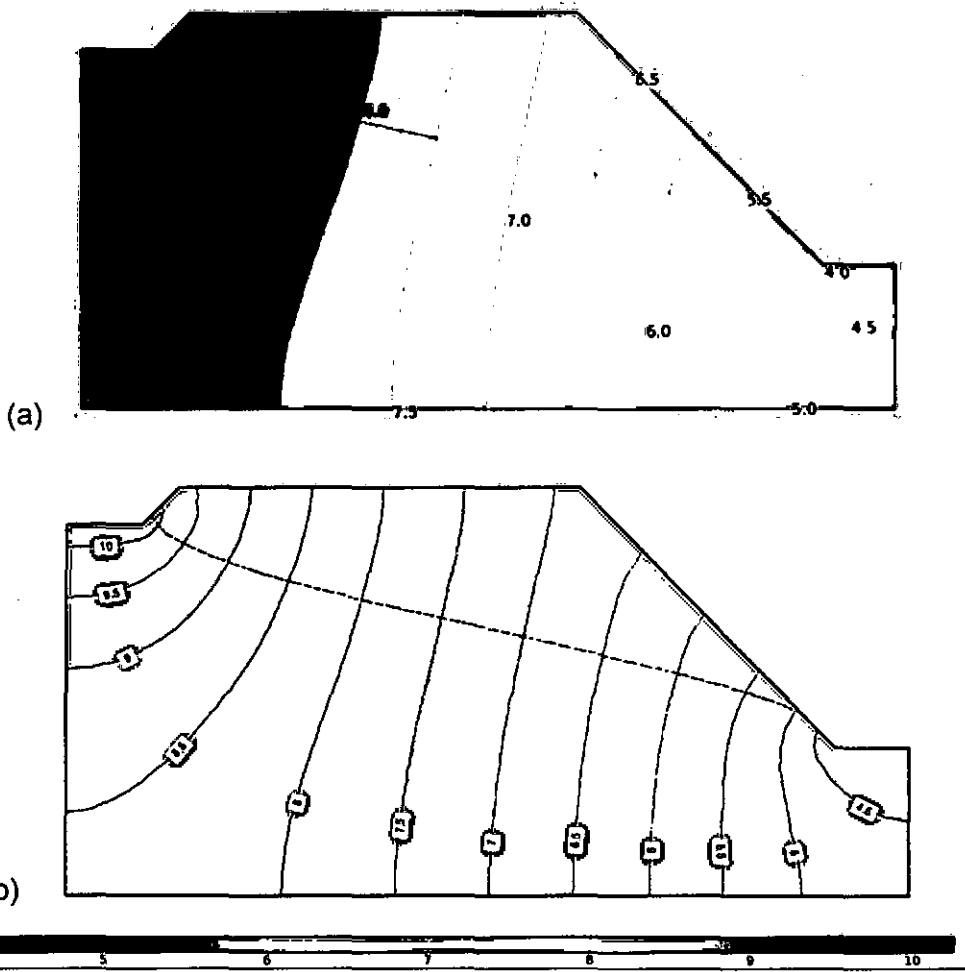


Figura 5.11 Contornos de presión de carga (m) y simulación del nivel freático con (a) COMSOL (b) SEEPW.

La Figura 5.2 muestra la evolución de la masa acumulada que sale del sistema a través de la zona de drenaje.

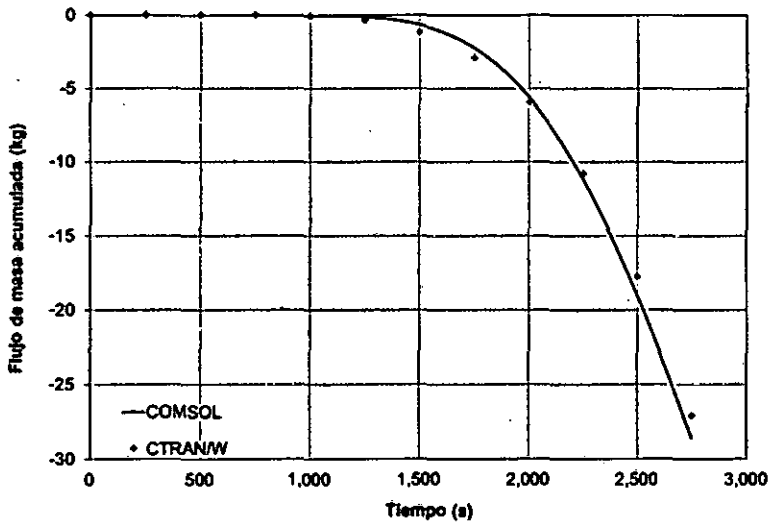


Figura 5.12: Evolución del flujo de masa acumulativa que sale del sistema.

## **6.0 CAPÍTULO VI: CASO DE APLICACIÓN PRESA DE TIERRA HOMOGÉNEA**

### **6.1 DESCRIPCIÓN**

Este capítulo presenta un caso de aplicación para una presa de tierra homogénea con un sistema de drenaje en el pie del talud (aguas abajo) cuyo fin es almacenar agua. El objetivo es analizar Hidro-Mecánicamente los diferentes parámetros que influyen en los procesos de construcción, infiltración por embalse y consolidación por desembalse.

La simulación de la presa de tierra homogénea involucra la construcción mediante 6 capas (50 días), el embalse hasta la cota 3780 (30 días) y desembalse hasta la cota 3765 (20 días). Se ha tomado una topografía realista y es un caso con parámetros muy cercanos a la realidad.

Los detalles de forma secuencial del programa utilizado se muestran en el Anexo A, donde se resume el pre proceso, el tipo de malla, tiempo de análisis y post proceso.

### **6.2 MODELO CONCEPTUAL**

#### **6.2.1 Información general**

La geometría y dimensiones reproducen un diseño de presa de tierra homogénea con drenaje en el pie (Figura 6.1). La presa tiene una sección transversal con una cresta de 8 metros de ancho y una altura máxima de 30 metros. Su talud aguas arriba es de 2.5 horizontal a 1 vertical y aguas abajo es de 2 horizontal a 1 vertical. La presa cuenta con un cuerpo de material de baja permeabilidad y un drenaje en el pie del talud aguas abajo.

El modelo ha estado considerado en tres dimensiones y se compone por tres diferentes dominios:

- Roca de fundación (dominio 1)
- Agua de almacenamiento (dominio 2)
- Cinco capas de relleno de tierra y una capa de drenaje (dominio 3)

Los fenómenos físicos involucrados pueden ser descritos mediante la Ec. 8 y Ec.

10 (comportamiento del suelo) y la Ec. 18 (flujo no saturado). Estas ecuaciones han sido solucionadas mediante la herramienta numérica COMSOL y su acoplamiento se esquematiza en la Figura 4.1.

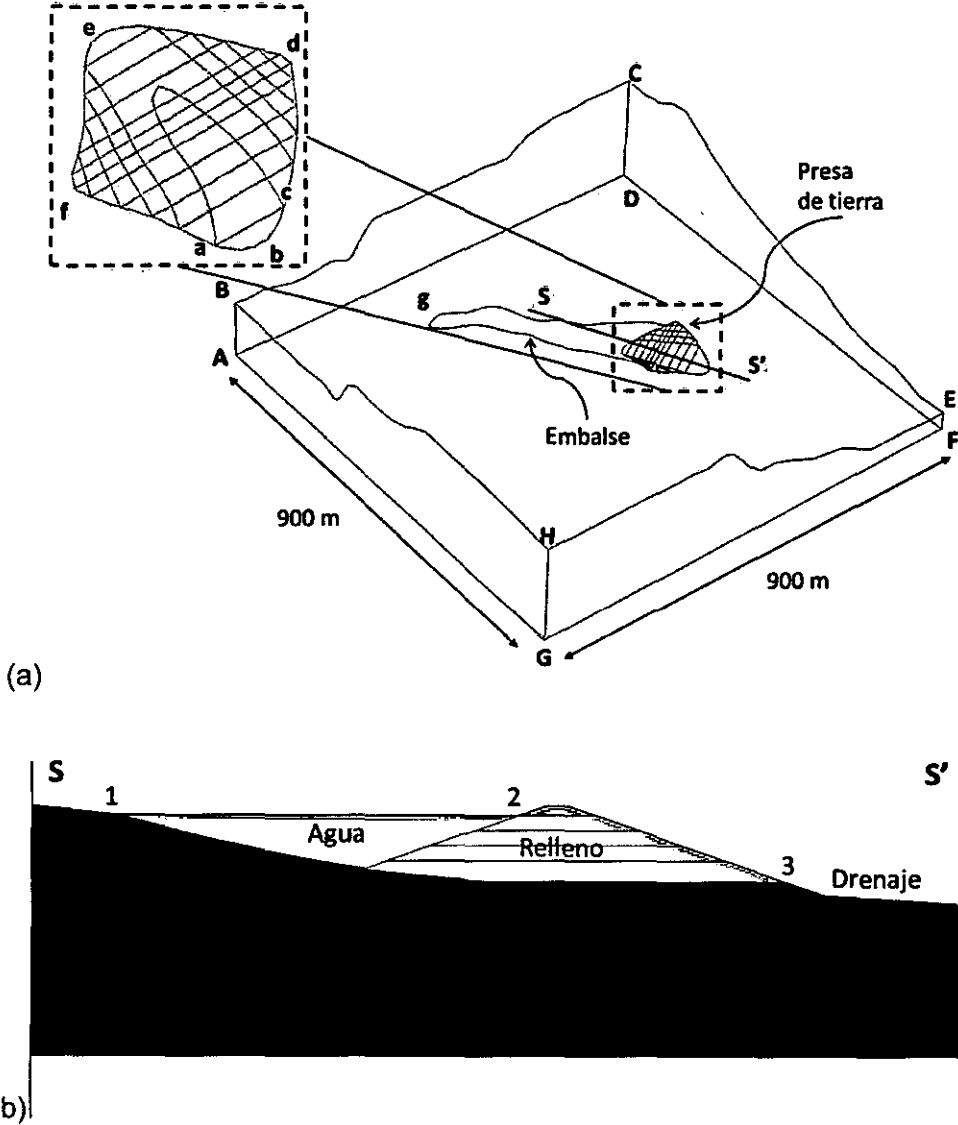


Figura 6.1: Esquema (a) y sección S-S' (b) del modelo conceptual de una presa de tierra homogénea.

### 6.2.2 Condiciones de contorno e iniciales

El proceso de construcción ha sido considerado mediante la aplicación de una carga progresiva por cada capa.

Se considera que la construcción de cada capa se realiza durante 10 días incluyendo la capa de drenaje, para mayor detalle de los procesos de construcción, embalse y desembalse (ver Tabla 6.1).



Tabla 6.1 Resumen de tiempo de construcción y operación de una presa de tierra.

Proceso	Etapa	Duración	
		Tiempo inicial (días)	Tiempo final (días)
Construcción	Capa 1 y drenaje	0	10
	Capa 2	10	20
	Capa 3	20	30
	Capa 4	30	40
	Capa 5	40	50
Embalse	Elevación 3780 m	50	80
Flujo transitorio	Saturación	80	150
Desembalse	Descenso 3765 m	150	170
Consolidación	Desplazamientos	170	250

Los modelos constitutivos elasto-plástico (Cam-Clay) para el relleno y elástico lineal para la roca y agua son utilizados para simular el comportamiento mecánico. Estas consideraciones representan las capacidades del programa COMSOL y el comportamiento real de la presa.

Las condiciones iniciales para cada dominio son cero tanto deformaciones ( $\epsilon_0$ ) y esfuerzos ( $\sigma_0$ ). Información a detalle acerca de las condiciones de contorno tanto mecánico y flujo se incluyen en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Resumen de condiciones de contorno para cada fenómeno en la presa de tierra homogénea.

Contorno	Mecánica de suelos	Flujo de agua
ABCD-CDEF-EFHG-HGBA	$u_x = 0$	$q \cdot n = 0$
ADFG	$u_x = u_y = 0$	$q \cdot n = 0$
acdf (2-3)	Libre	$q \cdot n = 0$
BCEH	Libre	$q \cdot n = 0$
abc (3-4)	Libre	$p - p_0 = 0$
dfg (1-2)	Libre	$p - \rho g(H_0 - z)\bar{h}_1 = 0$

donde  $n$  es el vector normal,  $q$  es el vector de flujo y  $u$  es el vector desplazamiento.

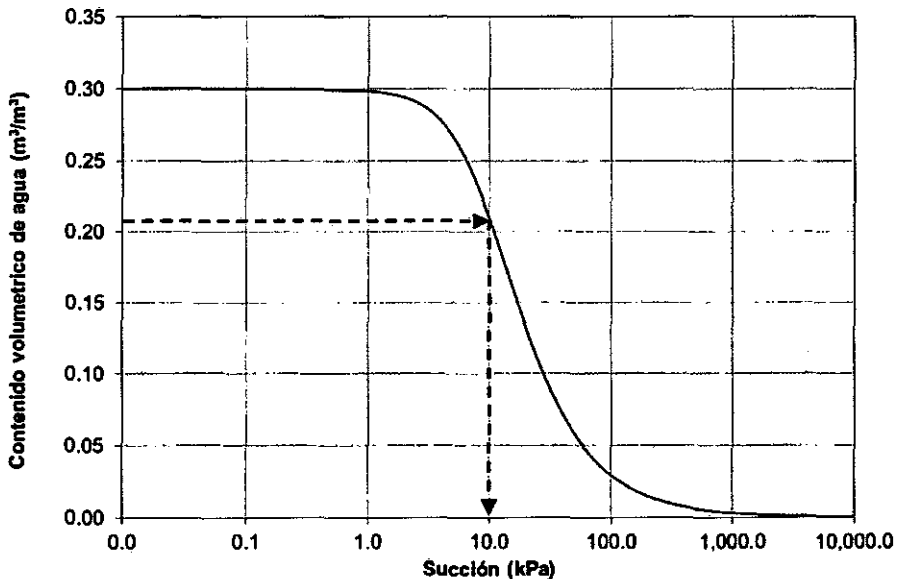
La humedad de compactación de las capas del material de relleno se considera igual a 11% que represente el  $0.21 \text{ m}^3/\text{m}^3$  de contenido volumétrico de agua, por lo tanto en la curva característica utilizada (ver Figura 6.2a) es equivalente a una presión negativa (succión matricial) igual a 10kPa.

Una condición de nivel hidráulico creciente con el tiempo se considera en la cara aguas arriba del talud (dfg ó 1-2) mayor detalle sobre la variación del nivel hidráulico se explica en el apartado 4.3 (ver Figura 4.4a y 4.4b). Una condición de no flujo de salida se considera en los lados fuera del dominio de drenaje (abc ó 3-4).

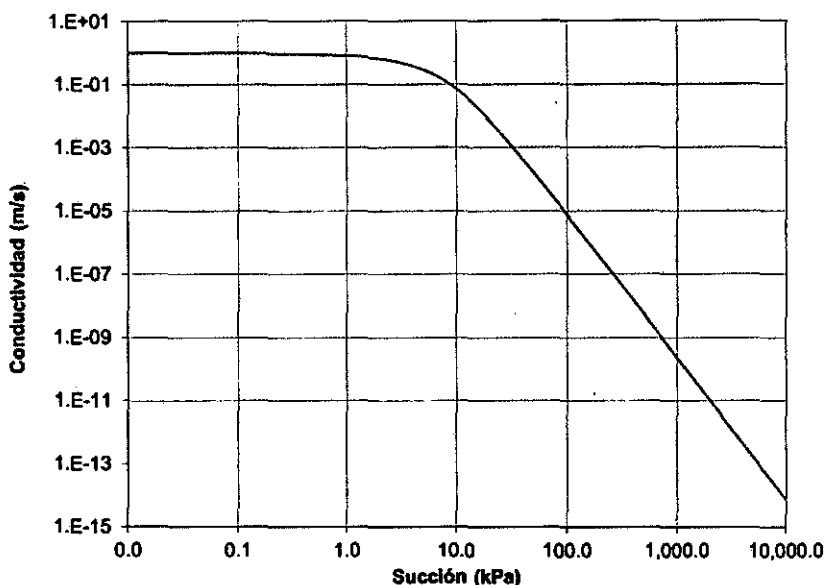
### 6.3 PROPIEDADES Y PARAMETROS DE LOS MATERIALES

Propiedades isotrópicas y homogéneas para todos los materiales han sido asumidas. Vale la pena señalar que los valores de los parámetros adoptados han sido considerados de diferentes fuentes de información, como son ensayos de laboratorio, ensayos in situ y mediciones de campo promedio para un material similar. La combinación de todos ellos, sin embargo, podrían no corresponder a un caso real, ya que han sido tomados de diferentes referencias (Custodio, et al., 1976) y (Potts, 2001).

Curva característica de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) se han calculado utilizando los parámetros de retención de la información proporcionada mediante valores referenciales (Fredlund, et al., 1993). La Figura 6.2 representa la SWCC del relleno utilizado.



(a)



(b)

Figura 6.2: Curva característica (a) y permeabilidad (b) del material de relleno utilizado en la presa de tierra.

Una lista de parámetros utilizados puede ser encontrada en la Tabla 6.3. Se presenta a continuación la descripción de las propiedades de materiales que intervienen en la simulación.

- Los parámetros de resistencia de la roca de fundación se estiman de valores de RMR que varían entre 40 a 50.
- El drenaje se compone de grava la cual se representa con alta permeabilidad. Los parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción) son asumidos igual al del relleno.
- Los parámetros de resistencia y rigidez (cohesión, ángulo de fricción, índice de hinchamiento, índice de compresibilidad y módulo de Young) del relleno ha estado tomado de ensayos triaxiales en materiales similares e información disponible de referencias.

Tabla 6.3 Resumen de valores de propiedades y parámetros mecánicos y flujo involucrados en el modelo.

	Propiedades y parámetros	Unidades	Materiales			
			Roca	Relleno	Drenaje	Agua
Mecánico	Densidad del sólido, $\rho_s$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	3 000	2 800	2 800	-
	Índice de compresibilidad, $\lambda$	-	-	0.013	0.013	-
	Índice de hinchamiento, $\kappa$	-	-	0.003	0.003	-
	Relación de vacíos inicial, $e_0$	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	-	0,43	0,43	-
	Angulo de fricción, $\varphi$	°	-	40	40	-
	Módulo de Young, $E$	MPa	2 000	100	100	100
	Relación de Poisson, $\nu$	-	0.30	0.30	0.30	0.30
Hidrodinámico	Permeabilidad intrínseca inicial, $\kappa$	$\text{m}^2$	1e-13	5e-14	1e-11	1e-9
	Porosidad inicial, $n_0$	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	0.30	0.30	0.30	1
	Volumen de agua saturado, $\theta_s^{**}$	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	Porosidad	Porosidad	Porosidad	-
	Volumen de agua residual, $\theta_r$	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	0.03	0.03	0.03	-
	Almacenamiento, $S$	$\text{Pa}^{-1}$	1e-9	1e-7	1e-7	-
	Densidad del agua, $\rho_l^*$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 000	1 000	1 000	1 000
	Viscosidad dinámica, $\mu^*$	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	0.001	0.001	0.001	0.001
	Van Genuchten					
	$\alpha$	$\text{kPa}^{-1}$	-	1	1	-
	$n$	-	-	2	2	-
	$l$	-	-	0.5	0.5	-

\*valores característicos del agua.

\*\* "Porosidad" es la suma de la porosidad inicial y cambios de la porosidad mecánica.

#### 6.4 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

La malla consiste en 44 434 elementos tetraédricos, 10 530 elementos triangulares, 756 elementos de borde y 30 elementos de vértice todos son de interpolación lineal. Su distribución alrededor de todos los dominios se muestra en la Figura 6.3.

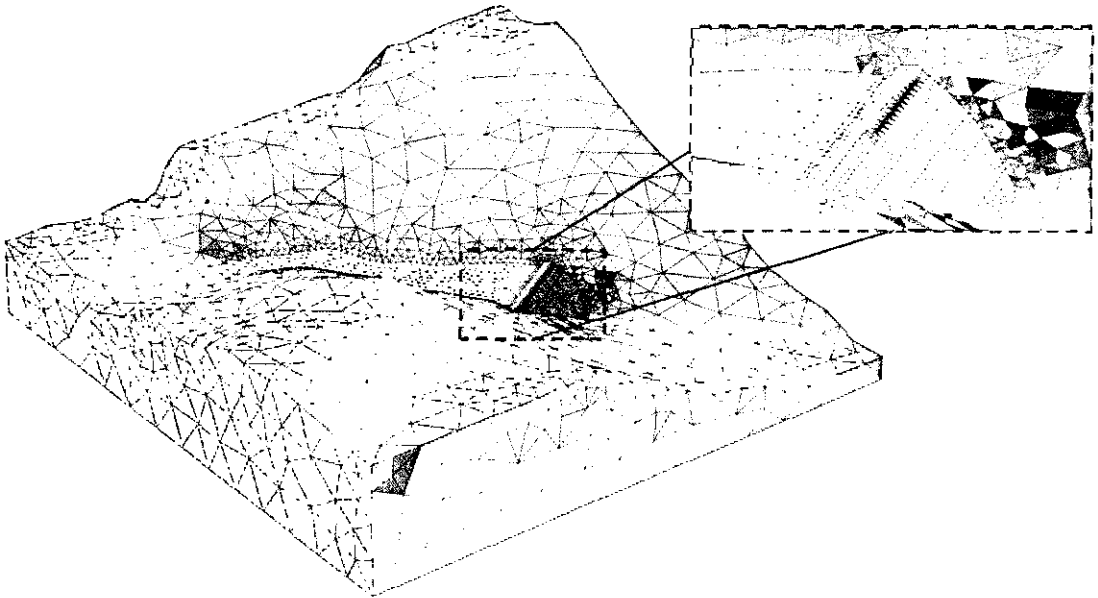


Figura 6.3: Malla de elementos finitos utilizado para la discretización espacial y del tiempo.

Se tiene mayor cantidad de elementos en los dominios 2 y 3 (agua y presa) debido a que se quiere mayor precisión de los valores obtenidos, por el contrario se tiene menor cantidad de elementos en el dominio 1 (roca).

## 6.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados han sido analizados e interpretados de forma minuciosa con la finalidad de identificar los procesos y fenómenos involucrados como la influencia entre ellos.

Se ha escogido diferentes variables relevantes que contribuyen al entendimiento de nuestro problema y una discusión de cada uno de ellos se describe a continuación.

### 6.5.1 Evolución de esfuerzos efectivos verticales

La distribución de esfuerzos efectivos verticales se muestra en la Figura 6.4. Para distintos momentos de la simulación (construcción, embalse, desembalse y consolidación).

Se observa la variación de esfuerzos debido a factores como la carga por propio peso (construcción), aumento y disminución del nivel de carga hidráulica (embalse y desembalse) y disipación de presiones de intersticial (consolidación).

Se ha superpuesto contornos de presiones intersticiales (línea blanca) donde se

aprecia cómo influye sobre el esfuerzo efectivo.

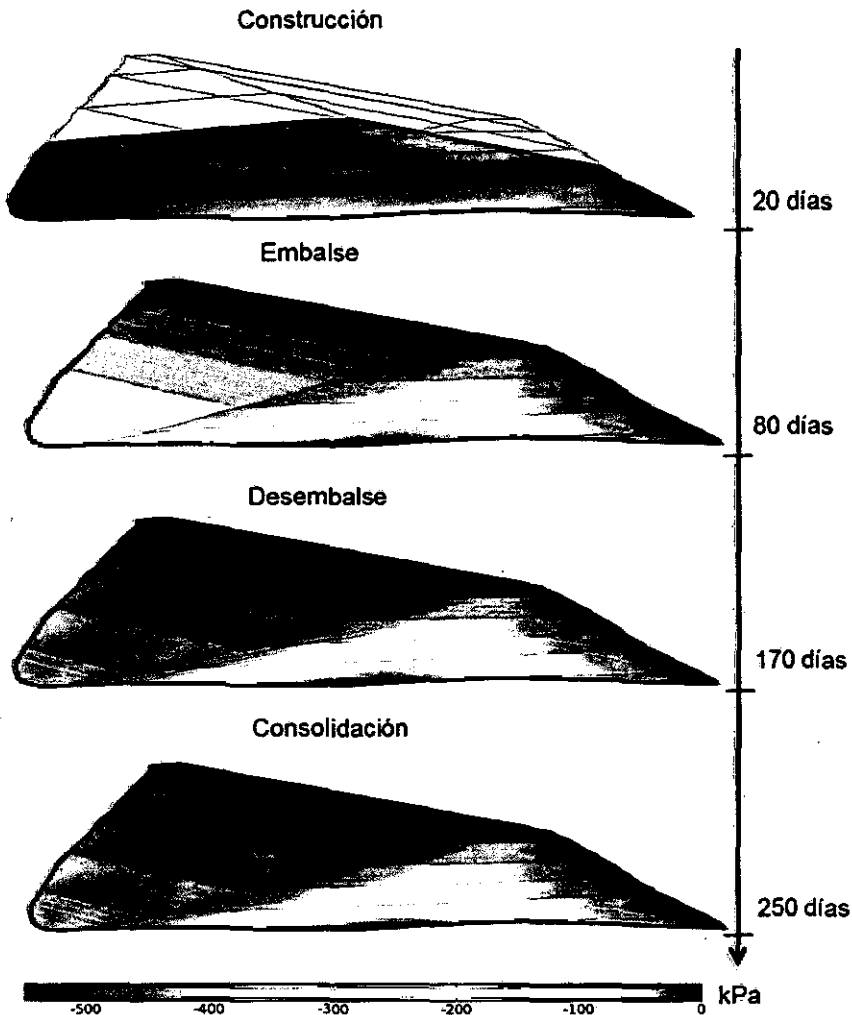


Figura 6.4: Evolución de esfuerzos efectivos durante distintas etapas construcción, embalse, desembalse y consolidación.

El comportamiento de esfuerzos efectivos es fundamental, debido a la relación directa en la resistencia al corte del suelo (ver Ec. 8). Ya que es esta última hace fallar el suelo.

### 6.5.2 Evolución de los desplazamientos verticales

En la Figura 6.5 se muestra la evolución de los desplazamientos verticales durante la construcción y embalse cabe indicar que se ha considerado 5 capas de relleno y una de drenaje.

En el comportamiento de los desplazamientos verticales se aprecia la influencia del el peso propio, capa por capa en función del tiempo y el cambio de la presión intersticial. Cabe indicar que no está representando un comportamiento real

observado en campo.

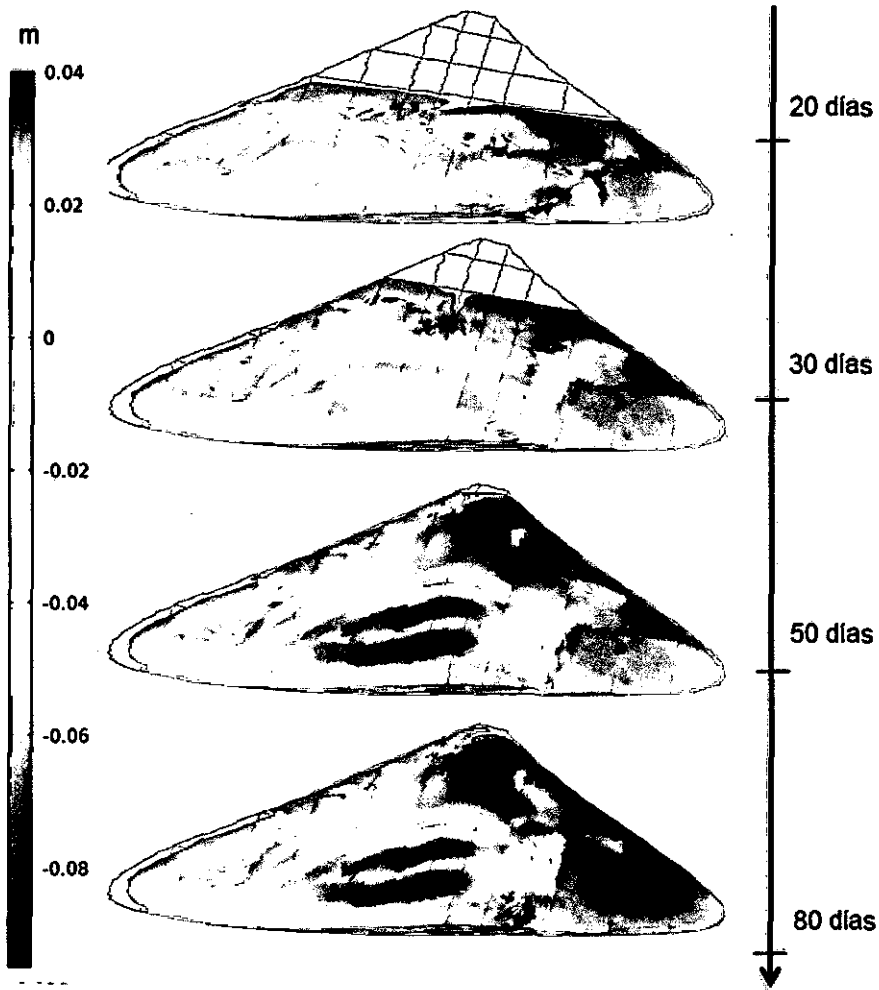


Figura 6.5: Evolución de los desplazamientos verticales durante la construcción y embalse.

Los desplazamientos verticales o asentamientos son considerados en el diseño mediante el borde libre. Se debe considerar que el valor negativo y positivo tan solo representa el sentido de movimiento.

### 6.5.3 Evolución de la presión del agua

Durante las etapas de construcción y operación (embalse y desembalse) se desarrollan las presiones de agua como se muestra en la Figura 6.6.

Se observa que la baja permeabilidad del cuerpo de la presa dificulta llegar a un estado estacionario y a su vez el desembalse rápido, manteniendo los niveles de presión alta durante un tiempo considerable (consolidación).

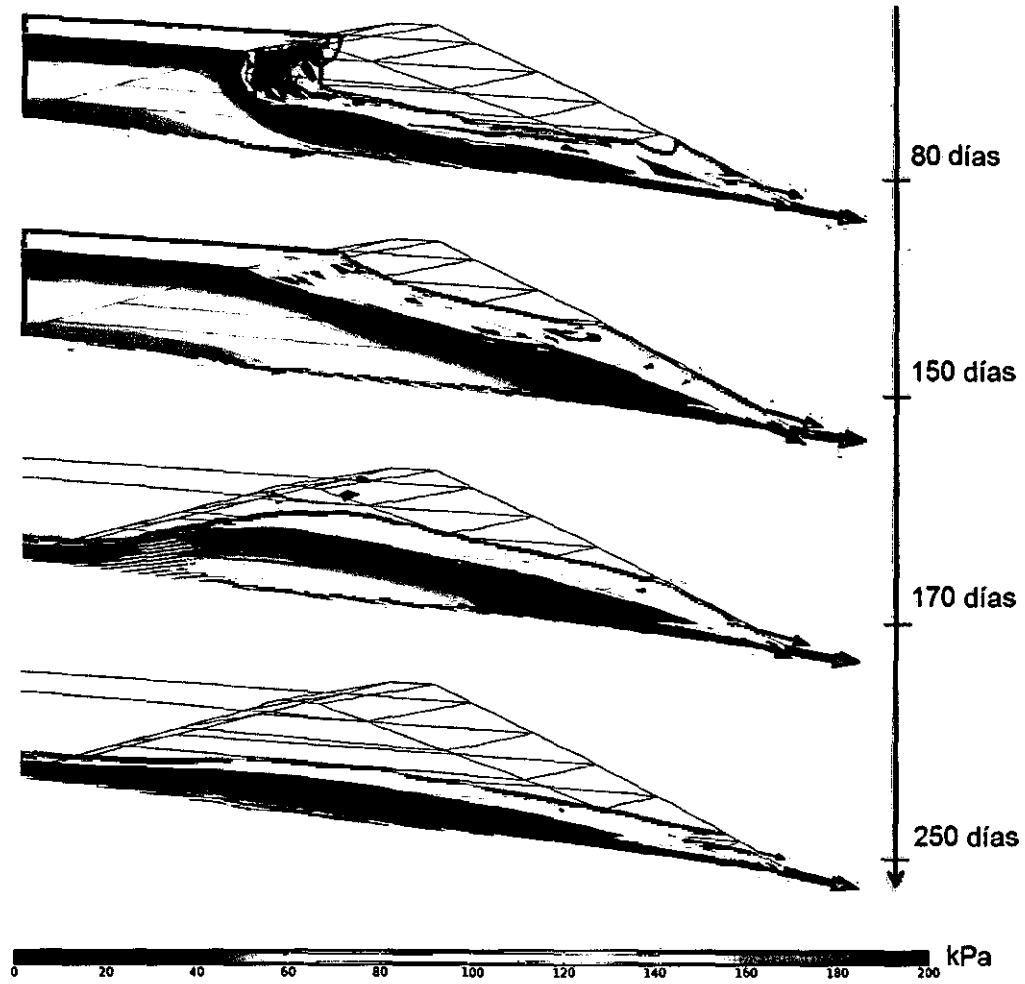


Figura 6.6: La evolución de la presión de agua durante la simulación de construcción, embalse y desembalse.

Un factor importante es la infiltración ocasionada. Para ello se muestra la Figura 6.7. Donde se observa el caudal (eje izquierdo) y el volumen de infiltración (eje derecho) generado durante los 250 días de simulación en la zona de drenaje (Ver Figura 6.1).



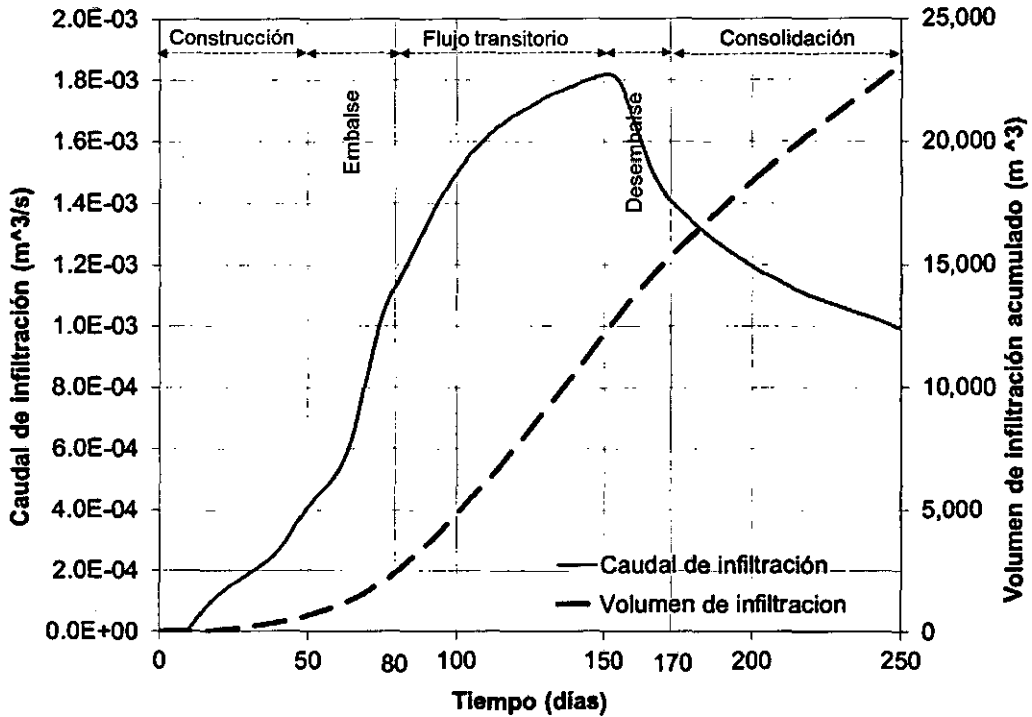


Figura 6.7: Curva de infiltración sobre el cuerpo de la presa.

Se observa que existe un punto de inflexión en el caudal de infiltración debido al desembalse, esto se debe a la disminución del gradiente hidráulico.

Tres características importantes se aprecian como es el caudal inicial igual a cero y que la mínima pendiente (aproximadamente cero) representa el estado estacionario y por el contrario las pendientes variables es el estado transitorio.

El volumen de infiltración acumulado (eje derecho) ocasionado durante 250 días de simulación es aproximadamente 23 000 m<sup>3</sup> lo que representa una pérdida de 13%. Cabe señalar que este volumen de infiltración se ha comparado con el volumen de embalse (174 400 m<sup>3</sup>). Este valor es importante durante el tiempo de sequía ya que debe asegurar el abastecimiento del volumen de agua considerado para su óptima operación.

### 6.5.4 Evolución de la saturación del suelo

El comportamiento hidrodinámico está condicionado por el tiempo que toma el agua para saturar el material de relleno en el camino hacia el sistema de drenaje. Los diferentes estados de flujo (transitorio y estacionario) se muestran en la Figura 6.8. Después de un periodo transitorio, un estado de equilibrio se logra al tiempo de 150 días luego del embalse y 250 días después del desembalse.

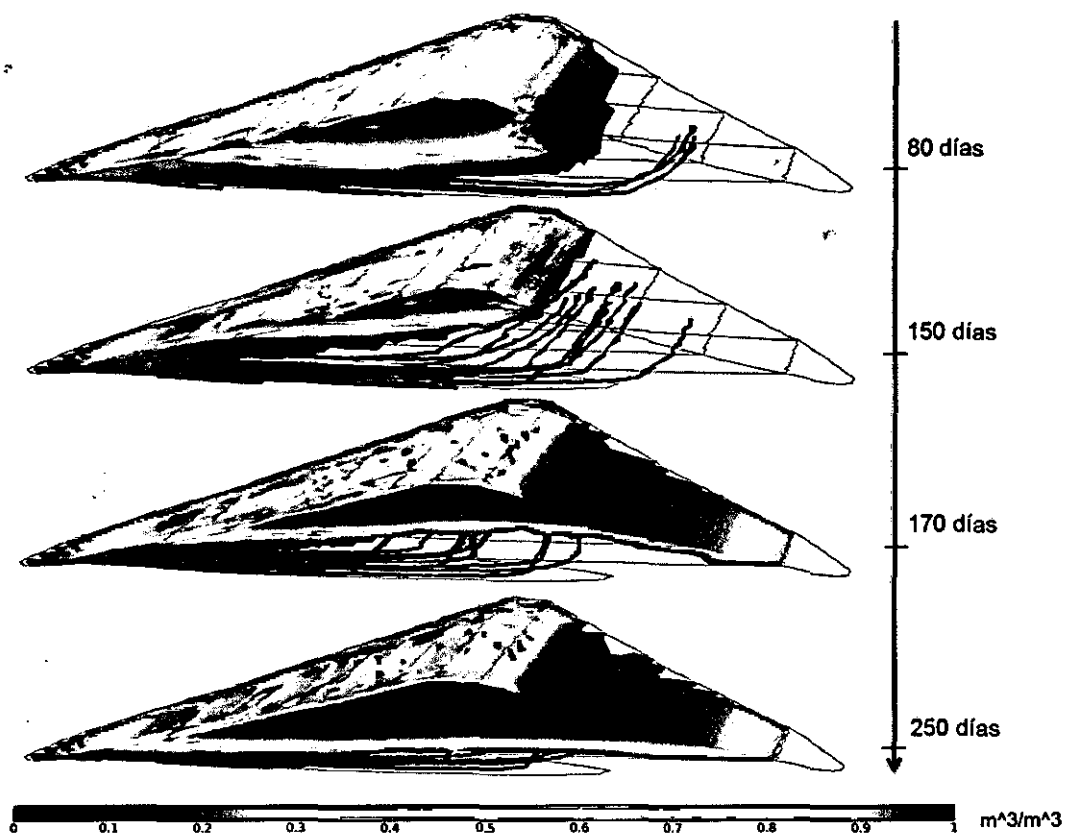


Figura 6.8: Isosuperficies del grado de saturación y líneas de flujo en diferentes días.

Las líneas azules representan el sentido y magnitud del flujo a través del cuerpo de la presa. La no saturación del suelo juega un rol favorable en la resistencia cortante del suelo (Ec. 9). La isosuperficie roja representa el nivel freático. Se observa que la zona lateral se satura rápidamente comparada con la zona central.

### 6.5.5 Gradiente hidráulico global

La Figura 6.9 muestra el cambio de los niveles hidráulicos debido al embalse y desembalse de la presa para diferentes tiempos de simulación.

Las fechas blancas representan la magnitud y dirección del flujo a través de la fundación y la presa.

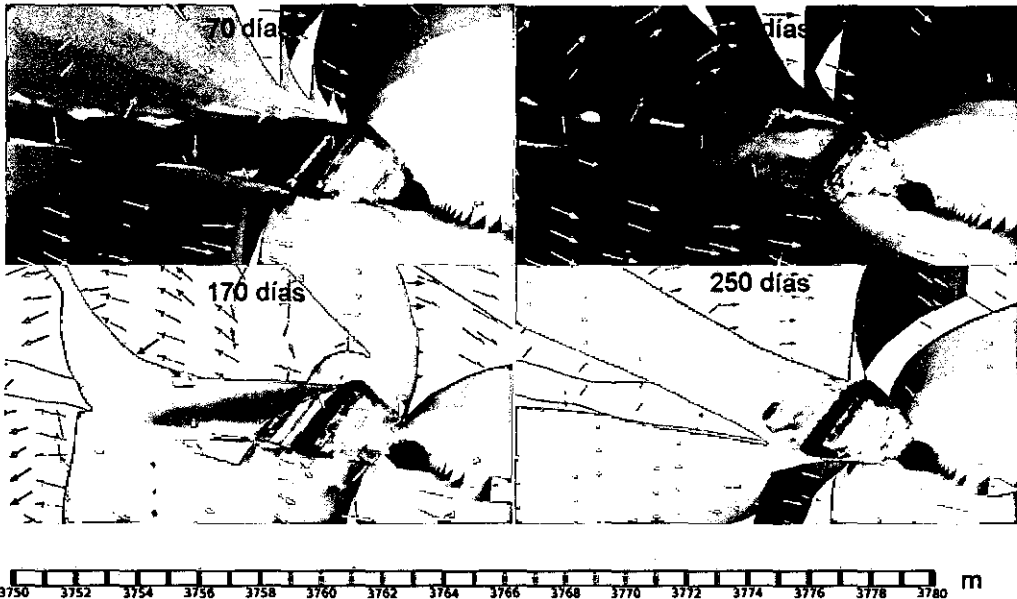


Figura 6.9: Isosuperficies del gradiente hidráulico global durante el proceso de construcción y operación de una presa de tierra.

El gradiente hidráulico es importante para conocer posibles zonas de sifonamiento. Se aprecia a los 150 días una variante de hasta 30 metros del nivel máximo de embalse hacia la cota inferior del sistema de drenaje.

### 6.5.6 Evolución del término de acoplamiento

El término de acoplamiento se define y muestra en la Ec. 17, para esquematizar, se ha multiplicado por  $1e+6$  el valor obtenido.

En la Figura 6.10 se muestra la evolución del término de acoplamiento, para distintas etapas de la simulación.

Se puede apreciar que la carga debido a la construcción, embalse y desembalse afectan en mayor proporción el cuerpo de la presa, y todo lo contrario ocurre en el proceso de consolidación lo cual existe poca influencia.

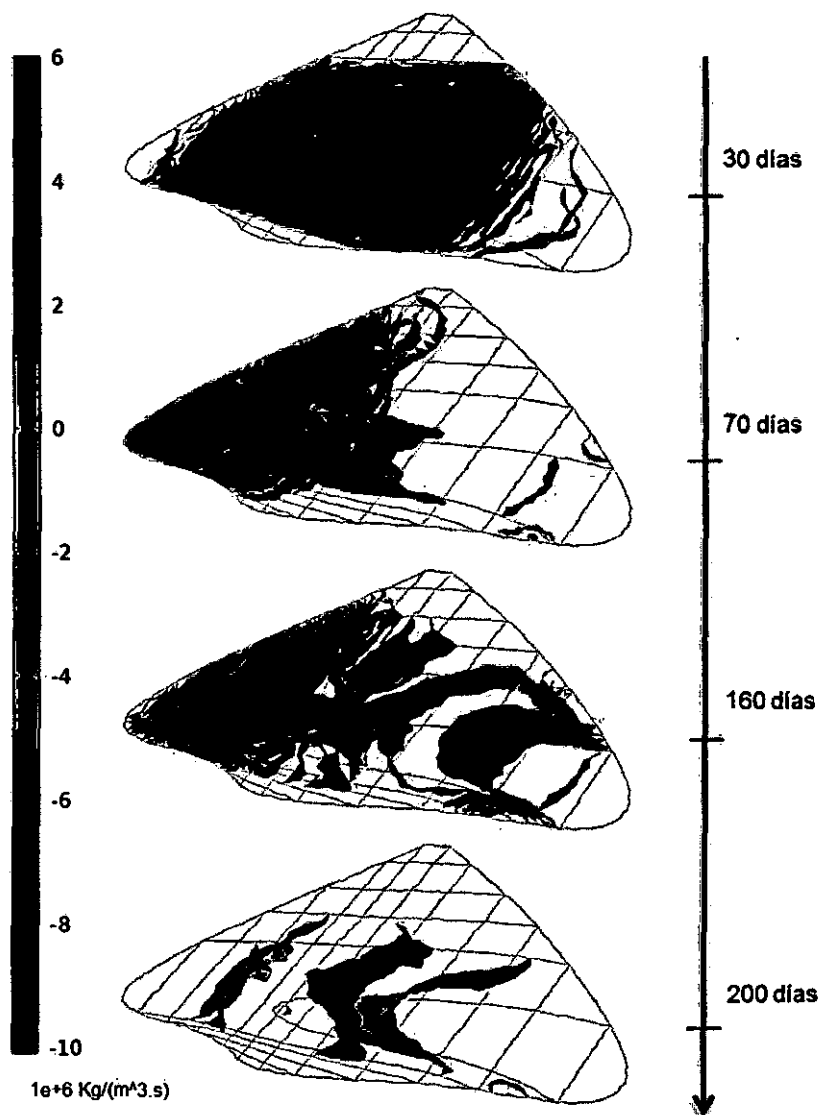


Figura 6.10: Isosuperficies del término de acoplamiento para diferentes tiempos.

### 6.5.7 Cambios en la porosidad

Se observa en la Figura 6.11, el cambio de la porosidad mecánica debido a la compactación. El cambio de porosidad debido a la compactación es muy pequeño debido a que el índice de compresión ( $\lambda$ ) considerado es un valor para materiales de baja compresibilidad. El único cambio con el tiempo que afecta a la deformación volumétrica es el cambio de la presión del agua que sólo ocurre por la carga y procesos de infiltración. Estos procesos, en este caso no son lo suficientemente importantes para provocar grandes desplazamientos.

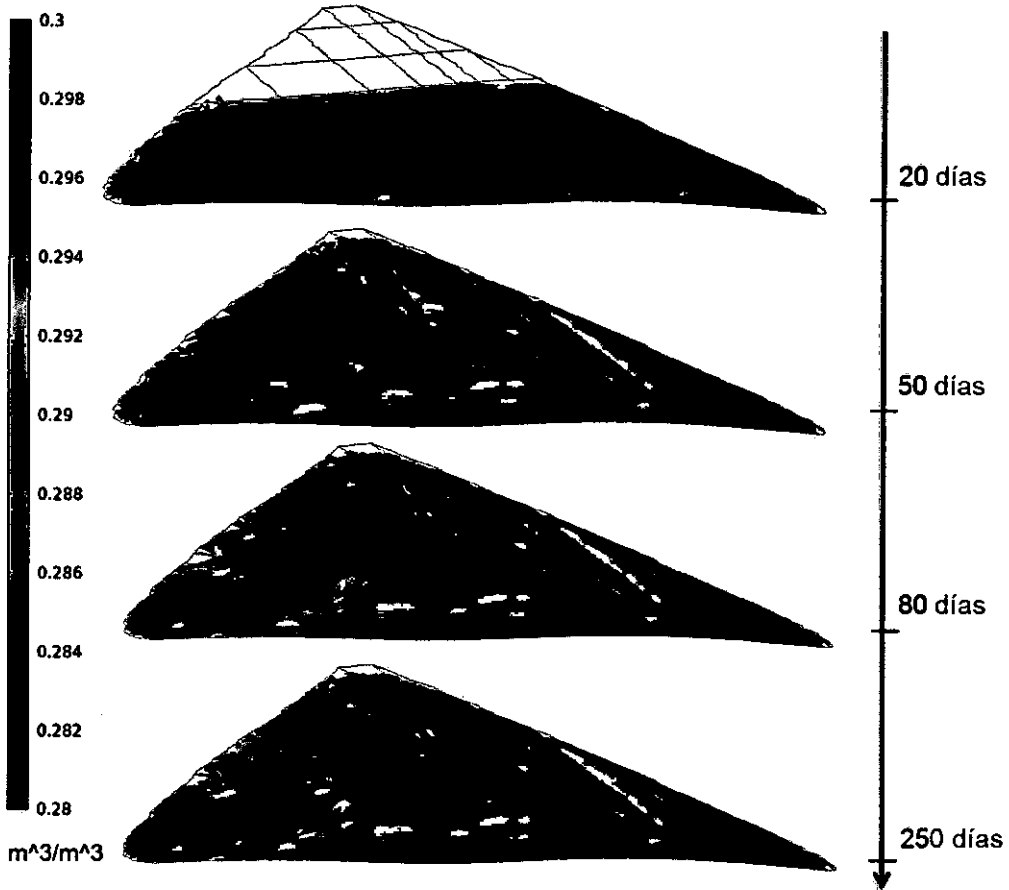


Figura 6.11: Isosuperficie de la porosidad debido a la compactación y consolidación para distintos tiempos del análisis.

La distribución de la densidad va tener un comportamiento similar a la Figura 6.11. Debido a que este término es principalmente afectado por el grado de saturación de agua y la porosidad como se describe en la Ec. 1. La permeabilidad se considera variable con la porosidad como se describe en el apartado 4.1.3. Por lo tanto una distribución similar a la Figura 6.11 se podría apreciar.

## **7.0 CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El fenómeno HM acoplado ha sido simulado en este trabajo en el contexto de un reservorio de almacenamiento de agua. El principal objetivo de trabajar tal complejo problema HM ha sido mejorar el entendimiento del comportamiento de una presa de tierra homogénea durante la construcción y operación.

El avance de cálculo computacional nos permite realizar este tipo de análisis de forma más común, desde luego con muchos criterios de ingeniería que permitan discriminar la información obtenida.

La simulación ha sido llevada a cabo por el código COMSOL Multiphysics el cual se ha verificado y validado su desempeño en aplicaciones de mecánica de suelos y flujo no saturado subterráneo.

### **7.1 CONCLUSIONES**

Las siguientes conclusiones se pueden extraer de este estudio:

- Es necesario evaluar el desarrollo de los esfuerzos efectivos durante el proceso constructivo, embalse y desembalse, a efectos de adecuar el ritmo de construcción y operación al proceso de disipación de presiones intersticiales en la fundación y/o el núcleo de una presa.
- Se concluye de los resultados obtenidos de las diferentes variables relevantes tales como esfuerzos efectivos, desplazamientos verticales, presiones de agua, saturación del suelo, gradiente hidráulico global, término de acoplamiento y cambio de porosidad que las etapas más críticas son los tiempos de embalse y desembalse.
- A pesar de que la simulación ha sido restringida a 6 capas de relleno, el tiempo total de simulación ha sido aproximadamente (250 días) y los valores de parámetros utilizado han sido escogidos para un material similar, el ejemplo de ilustración reportado en este trabajo muestra que es factible simular el comportamiento en una presa de tierra tomando en cuenta los fenómenos acoplados HM.
- El considerar los fenómenos de forma acoplada en todo momento, nos permite mejorar la comprensión del proceso constructivo y operacional sobre una presa de tierra homogénea.

- El proceso de construcción también juega un rol importante en la evolución de presiones intersticiales. Las presiones intersticiales no drenadas son difíciles de generar cuando se carga debido al estado no saturado del relleno, pero el tiempo de construcción de cada capa influye en la respuesta hidráulica de la presa de tierra.
- Los análisis de presas de tierra que utilizan la formulación HM acoplada son escasos y por lo general se realiza de forma independiente o no están completamente acoplado. Este trabajo es un primer intento en esta dirección. Los trabajos futuros pueden incluir estas consideraciones.
- Este trabajo proporciona una herramienta para la gestión de riesgos mediante la calibración del modelo, brindando tres características relevantes de una presa de tierra: los estudios de ingeniería, la construcción y el proceso de operación.

## 7.2 RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones se pueden extraer de este estudio:

- Se requiere una mejor comprensión del material de relleno desde un punto de vista geomecánico. Como propuesta, al menos algunos ensayos edométricos con control de succión deben llevarse a cabo para obtener los parámetros mecánicos correspondientes. Además, algunos ensayos de resistencia (corte directo o triaxial con o sin control de succión) se podrían llevar a cabo.
- Para conseguir un adecuado control, se recomienda monitorear en campo y en análisis las diferentes variables que se involucran en la construcción y operación de una presa de tierra.
- El tiempo de embalse y desembalse son importantes características del desempeño de una presa de tierra. Por lo tanto, un análisis de sensibilidad con estas características debería ser realizado.
- Mejorar la descripción mecánica del relleno mediante el uso de un modelo para suelos no saturados. El Modelo Básico de Barcelona podría ser un buen punto de partida, pero un modelo más apropiado para el relleno debería ser adoptado finalmente.

- Las condiciones sísmicas de estabilidad debe ser estudiado para diseñar la presa de tierra, debido que en nuestro país juega un rol crítico.



## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405-430. España, 1990.
2. Awal, R., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y. & Zhang, H. Three dimensional transient seepage and slope stability analysis of landslide dam. *Annual of Disas. Prev. Res. Inst. N° 52 (B)*. Japón, 2009.
3. Biot, M. A. General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material. *Journal of Applied Mechanics*, 23(1), 91-96. USA, 1956.
4. Brooks, R. H. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers*, Colorado State University. USA, 1964.
5. Carman, P. Fluid flow through granular beds. *Transactions-Institution of Chemical Engineers*, 15, 150-166. USA, 1937.
6. Chen W.F., & Mizuno E. Nonlinear analysis in soil mechanics: theory and implementation (Developments in Geotechnical Engineering, 3er ed., Elsevier Science. Países bajos, 1990.
7. COMSOL Multiphysics Version 4.3 ([www.comsol.com](http://www.comsol.com)), Suecia, 2011.
8. Custodio, E., Llamas, M. R., *Hidrogeología Subterránea*, Omega Barcelona, España, 1976.
9. Errecalde, I. A. Modelling the SM-3 DAM QUEBEC CANADA. *Universitat Politècnica de Catalunya*. España, 2012.
10. Fell, R., MacGregor, P. & Stapledon, D. Geotechnical engineering of embankment dams. AA Balkema. Australia, 1992.
11. Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. Geotechnical engineering of dams. CRC Press. Australia, 2010.
12. Flores, M. Á. Evaluación de filtraciones en presas, modelación numérica de flujo en medios porosos saturados y no saturados, *Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil*. Chile, 2009.
13. Fredlund, D. G. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321. Canada, 1978.
14. Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons. Canada, 1993.
15. Guerra P., P. D. 3D Groundwater seepage analysis of a levee intersection. *Canadian Dam Association Association Canadienne Des Barrages*. Canada, 2012.

16. Gonzáles de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. Ingeniería geológica. Prentice Hall. España, 2002.
17. ICOLD. World Register of Dams: 1st Updating, International Commission on Large Dams. Francia, 1988a.
18. Krahn, J. Stress and deformation modeling with SIGMA/W, an engineering methodology. GEO-SLOPE International Ltd., Calgary. Canada, 2004.
19. Krahn, J. Transport Modeling with CTRAN/W: an engineering methodology. GEO-SLOPE International Ltd., Calgary. Canada, 2004.
20. Liu, J. & Barry H. B. Simulations of a coupled hydro-chemo-mechanical system in rocks. Geotechnical & Geological Engineering, 22(1), 121-133. Australia, 2004.
21. Novak, P., Moffat, A., Nalluri, C., & Narayanan, R. Hydraulic structures. Taylor & Francis. UK, 2007.
22. Marsal, R. J. & Resindez, N. D. Presas de tierra y enrocamiento, Limusa, Mexico, 1983.
23. Potts, D. M., & Zdravković, L. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application (Vol. 2), Thomas Telford Services Limited. UK, 2001.
24. Potts, D. M., & Zdravković, L. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory (Vol. 1), 304-310, Thomas Telford Services Limited. UK, 1999.
25. Quispe, Q. R. Implementação Numérica para Análise de Fluxo Transiente 3D em Barragens. Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro. Brasil, 2008.
26. Rayo, L. J. Análisis tenso-deformación de la construcción incremental de presas de tierra: comparación entre los programas FLAC y PLAXIS, Universidad Politécnica de Cataluña. España, 2002.
27. Terzaghi, V. K. The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. In Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 54-56. USA, 1936.
28. Timoshenko, S., & Goodier, J. N. Theory of elasticity. McGraw-Hill, 412. USA, 1951.
29. Van Genuchten, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892-898. USA, 1980.
30. Wood, D. M. Soil behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge University Press. UK, 1990.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

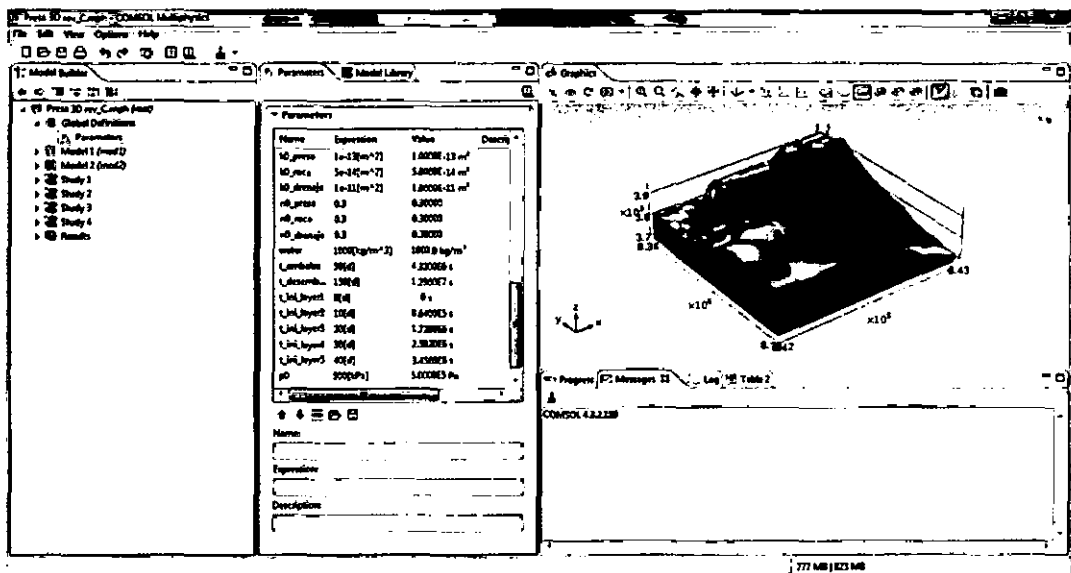
### BREVE DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

En este anexo, se describe de forma breve el procedimiento para establecer un análisis HM mediante COMSOL.

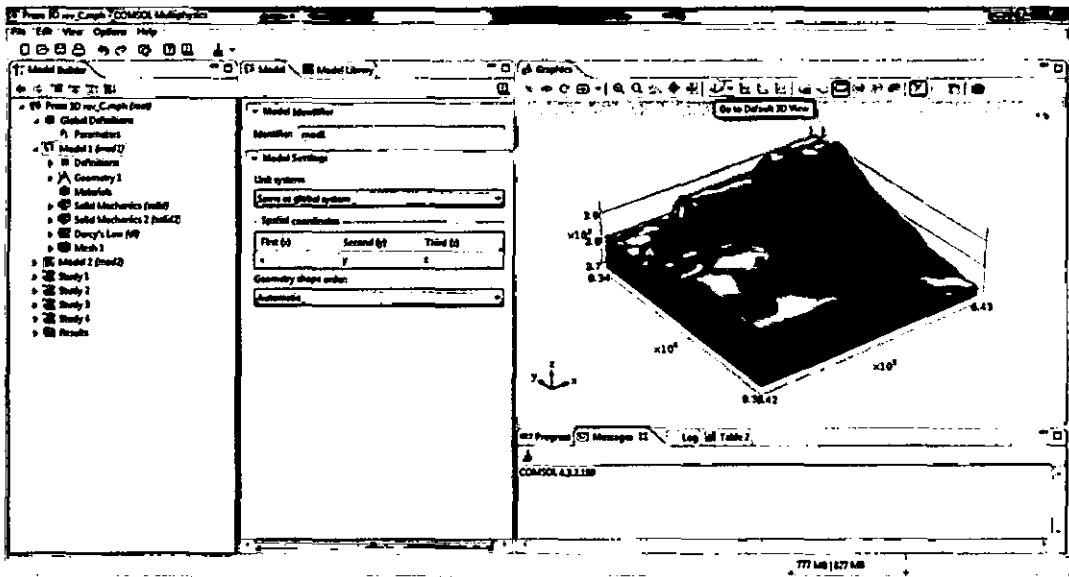
COMSOL tiene una estructura de árbol que organiza los diferentes análisis. La información utilizada se muestra en las siguientes imágenes con la finalidad de reproducir dicho cálculo en un futuro.

### INFORMACIÓN GENERAL

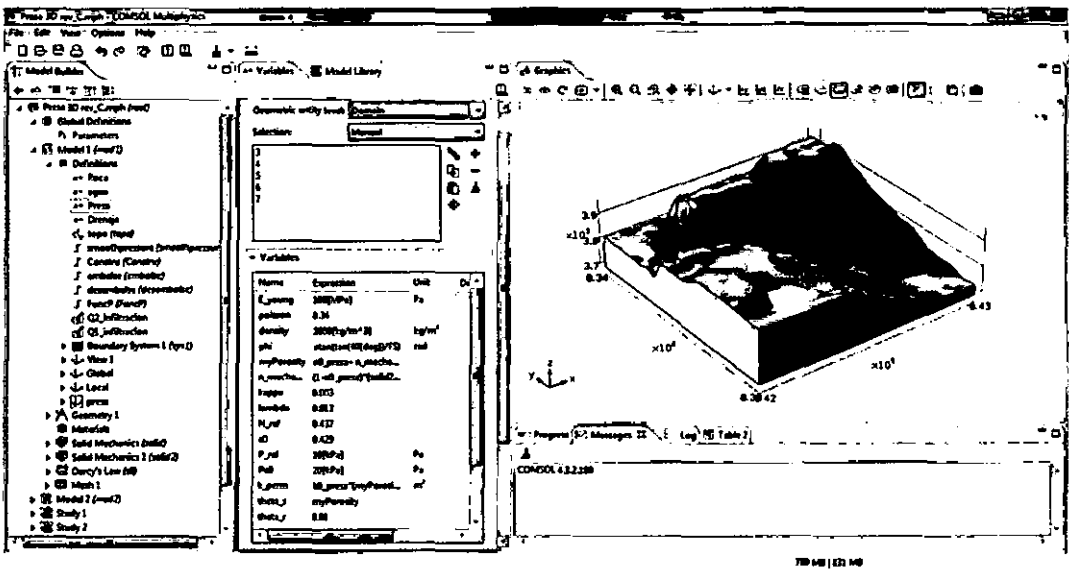
#### Parámetros globales



El modelo conformado por 2 análisis mecánicos y 1 análisis de flujo.



Las definiciones de cada dominio (roca, agua, presa y drenaje) se definen por las diferentes propiedades (ver Tabla 6.3).

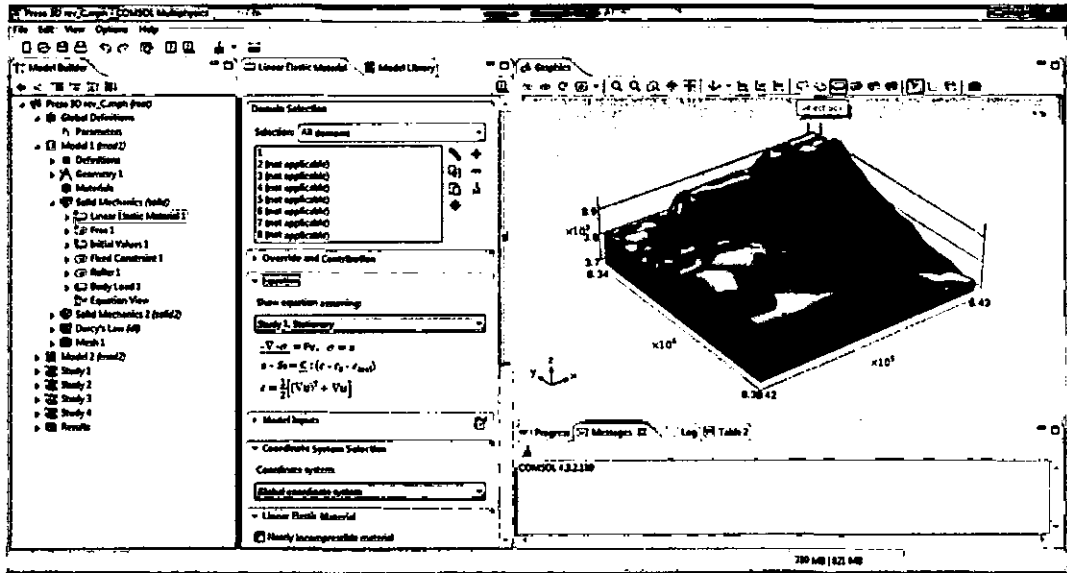




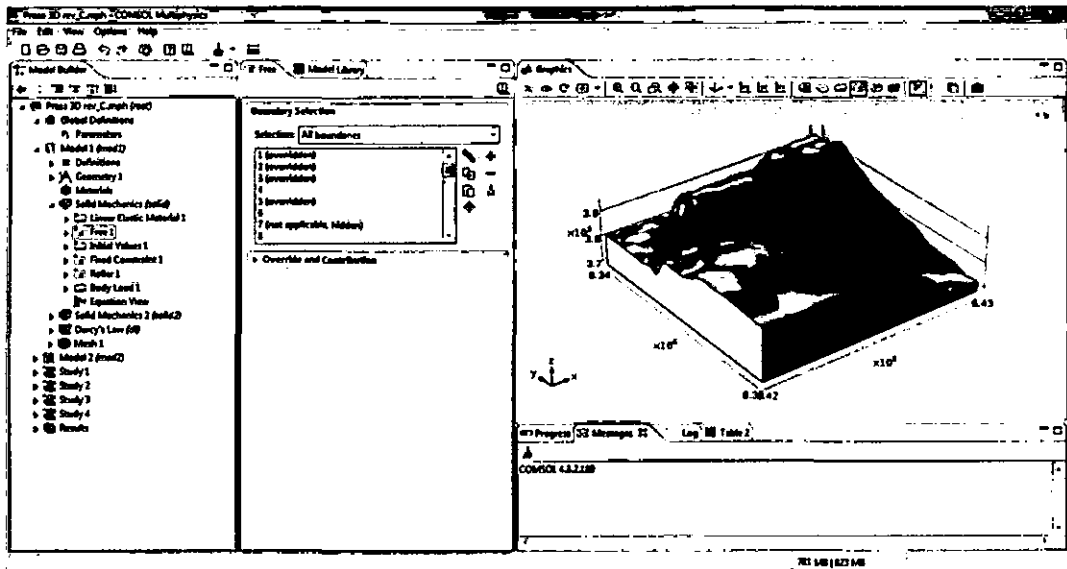
## ANÁLISIS MECÁNICO

El primer dominio (volumen azul) representa una roca o fundación (Solid Mechanics).

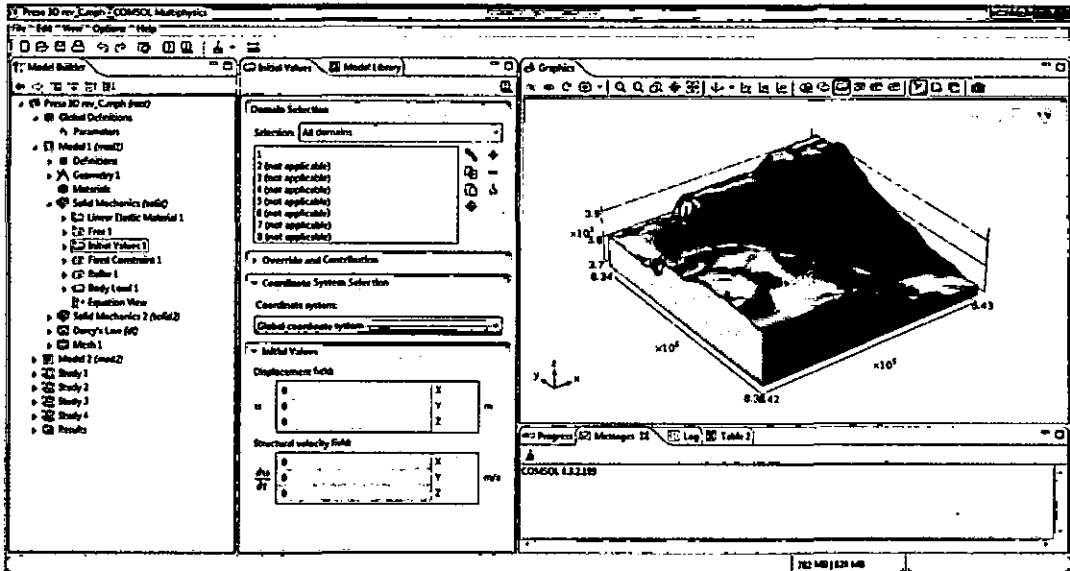
Para su representación un modelo lineal elástico se utilizó.



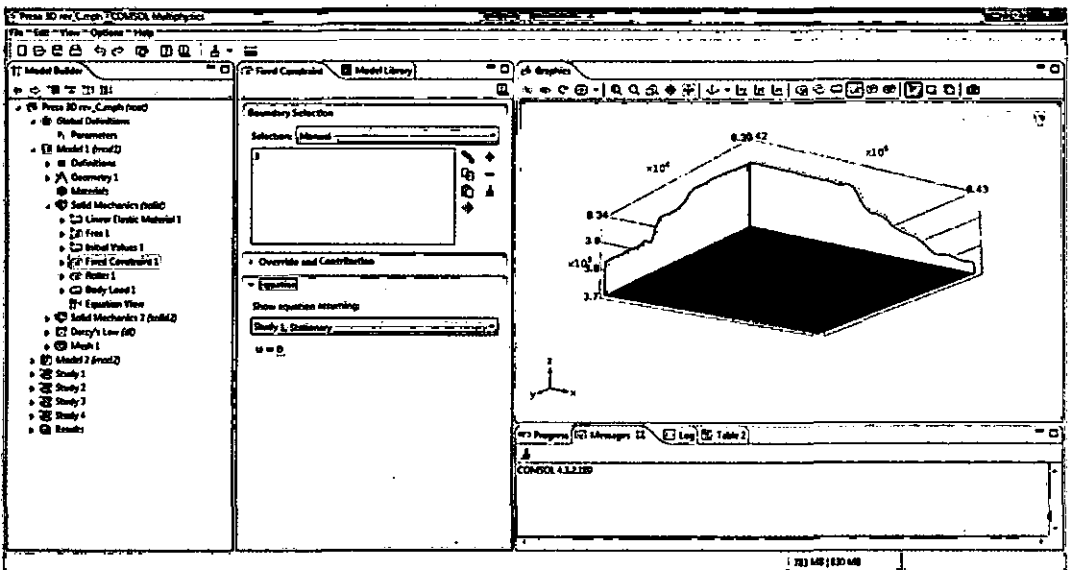
Condición libre de desplazamientos (superficie azul)



Valores iniciales de desplazamiento (volumen azul)

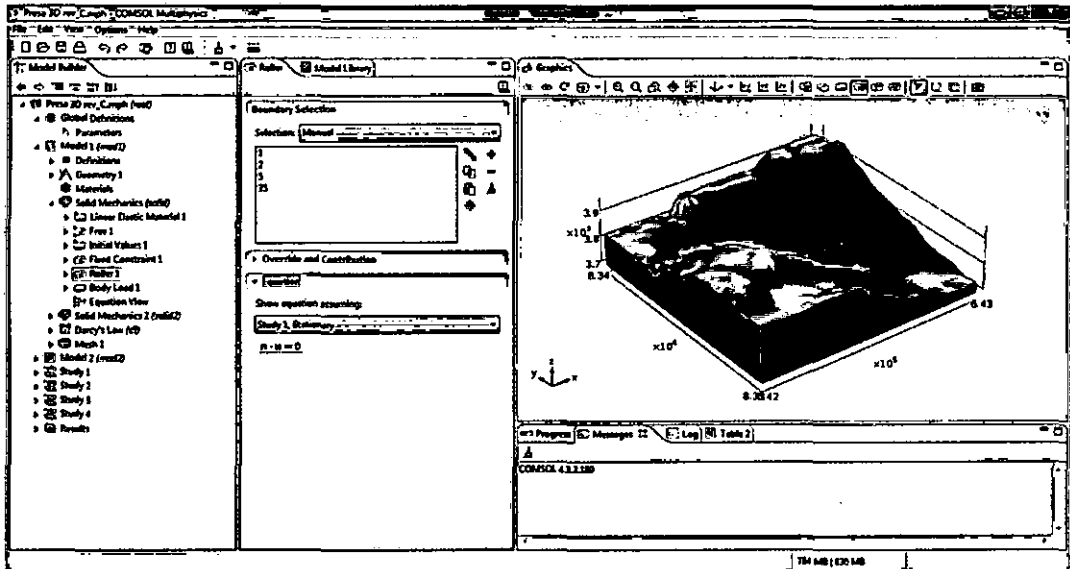


Condición de desplazamiento horizontal y vertical fijo (superficie azul)

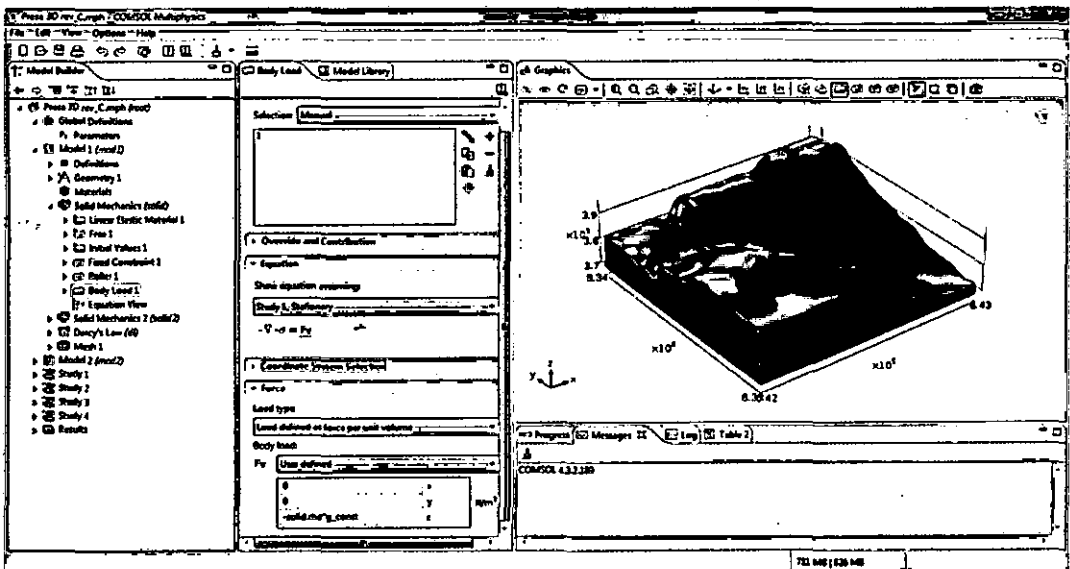




Condiciones fijas de desplazamiento horizontal (superficie azul)

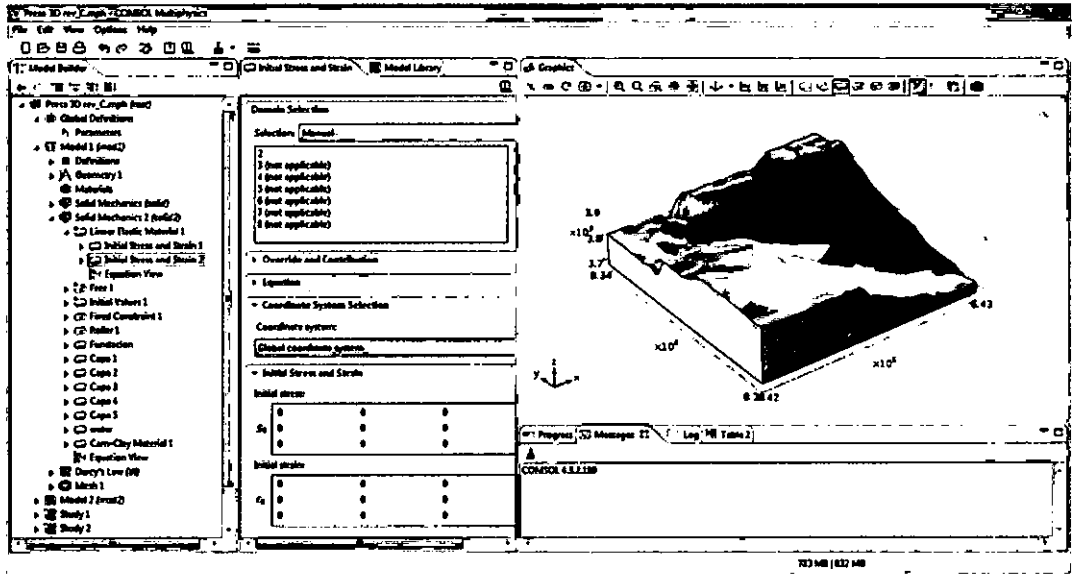


Carga por peso del material de roca (volumen azul).



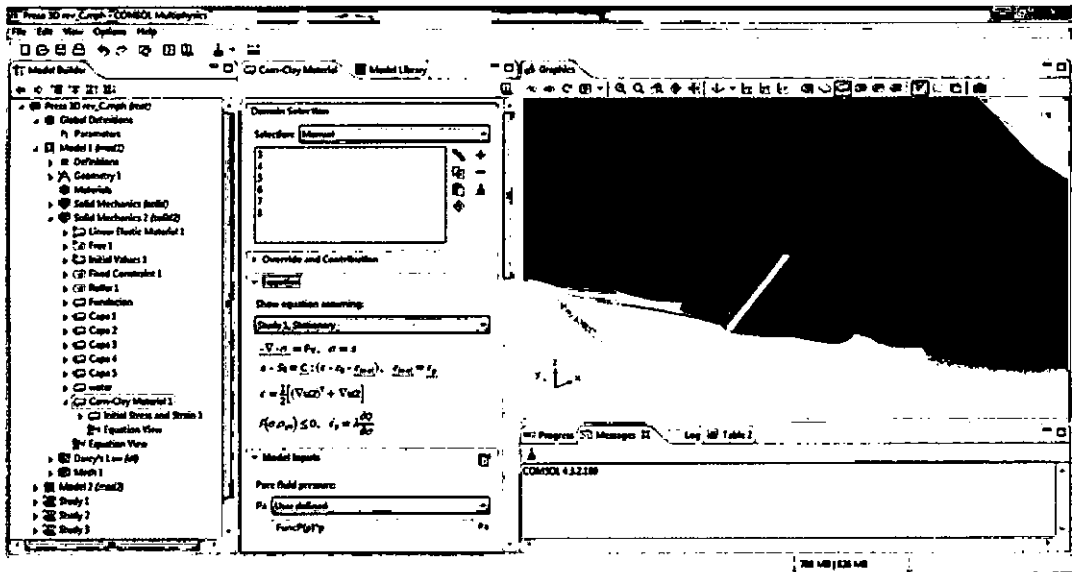
El segundo dominio (volumen azul) representa el agua de embalse (Solid Mechanics 2).

Para su representación un modelo lineal elástico se utilizó (Solid Mechanics 2)

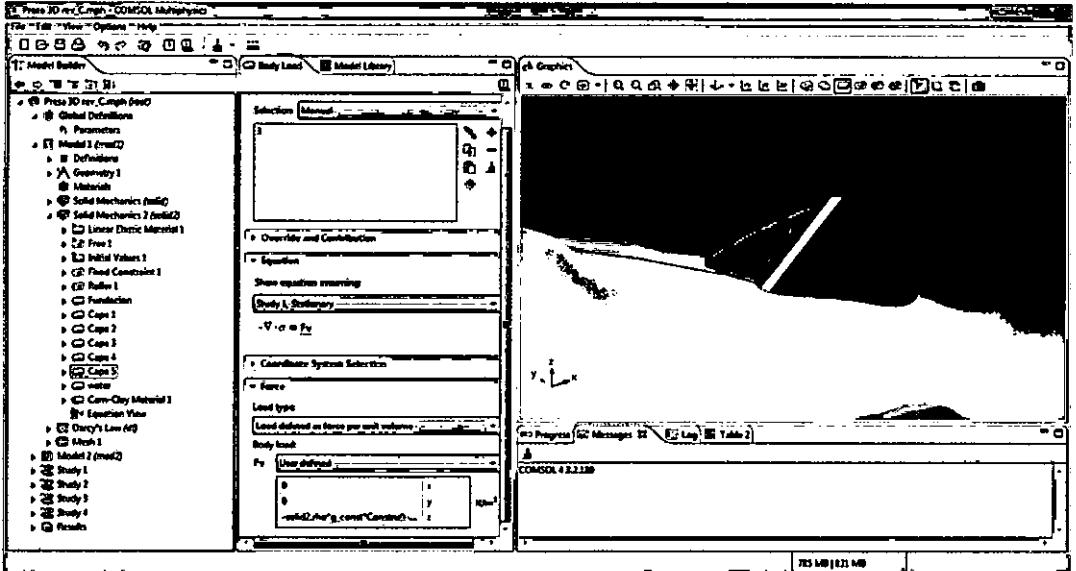


El tercer dominio (volumen azul) representa el relleno de la presa (Solid Mechanics 2).

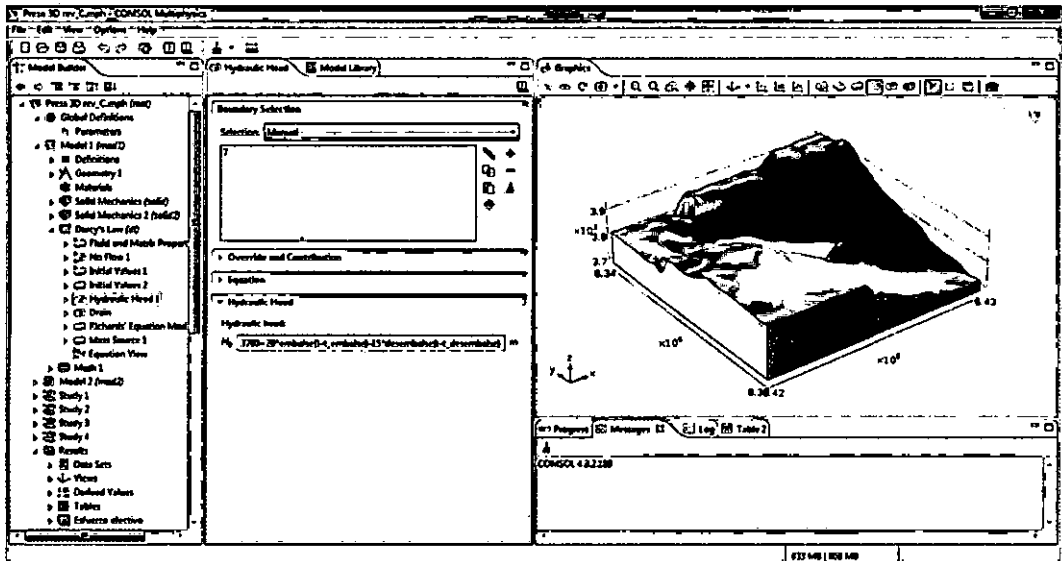
Para su representación un modelo Cam-Clay se utilizó (Solid Mechanics 2)



Carga de peso propio progresiva con el tiempo (ver Figura 4.3) del material de relleno para la quinta capa (volumen azul)



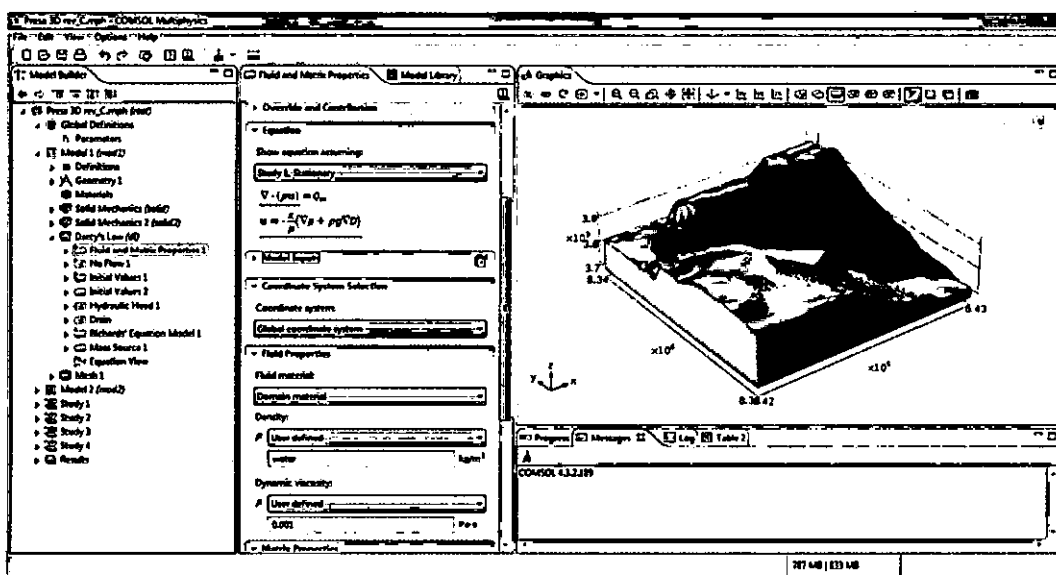
Carga del peso de embalse progresiva con el tiempo (ver Figura 4.4a) representado con el volumen azul.



## ANÁLISIS DE FLUJO

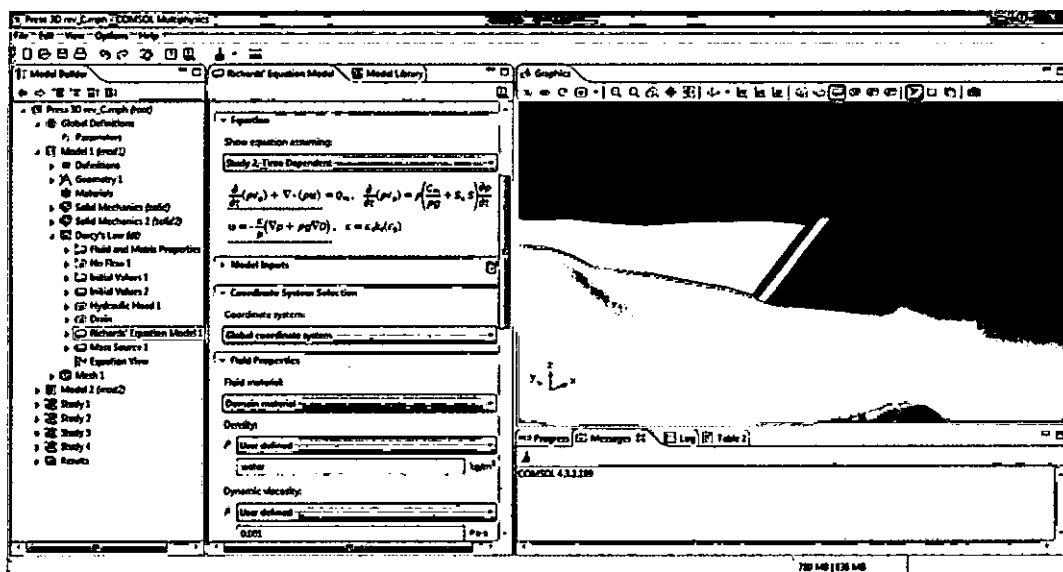
El primer y segundo dominio (volumen azul) representan la fundación y embalse (Darcy's law).

Para su representación del flujo, se utilizó la ecuación de Darcy.

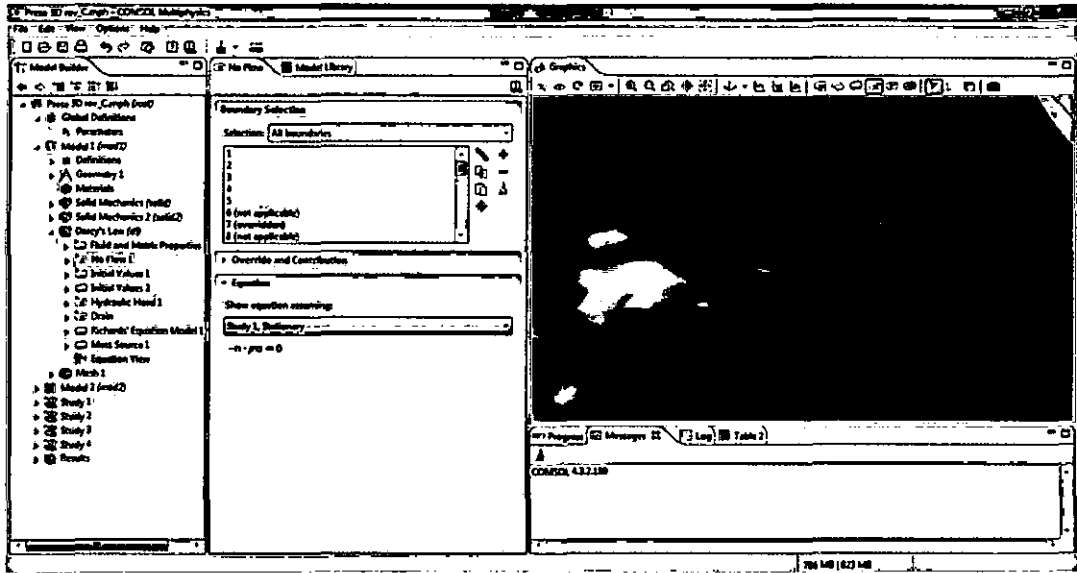


El tercer dominio (volumen azul) representa el relleno, una zona no saturada.

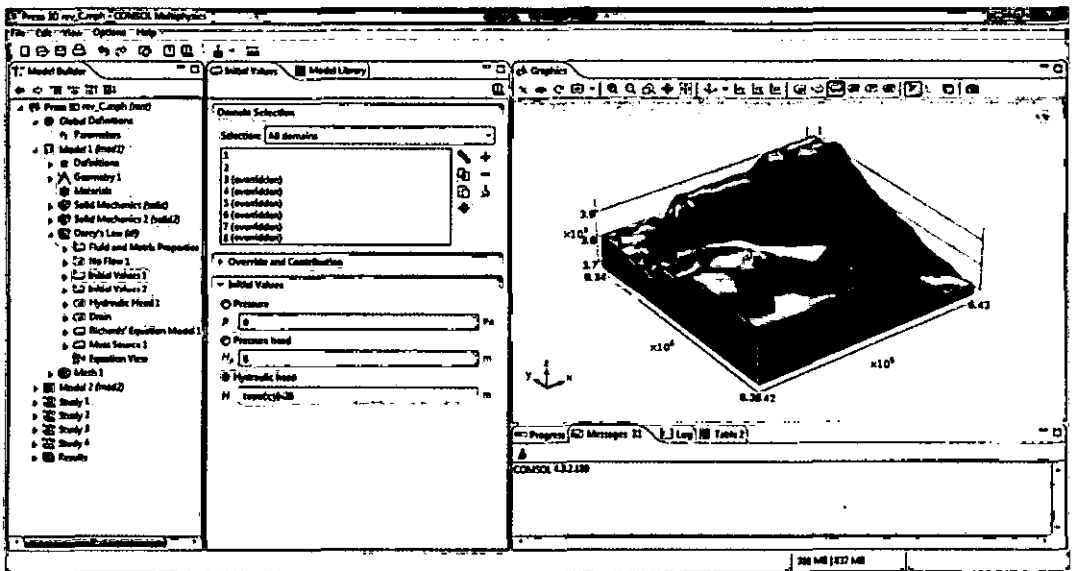
Para su presentación del flujo, se utilizó la ecuación de Richard.



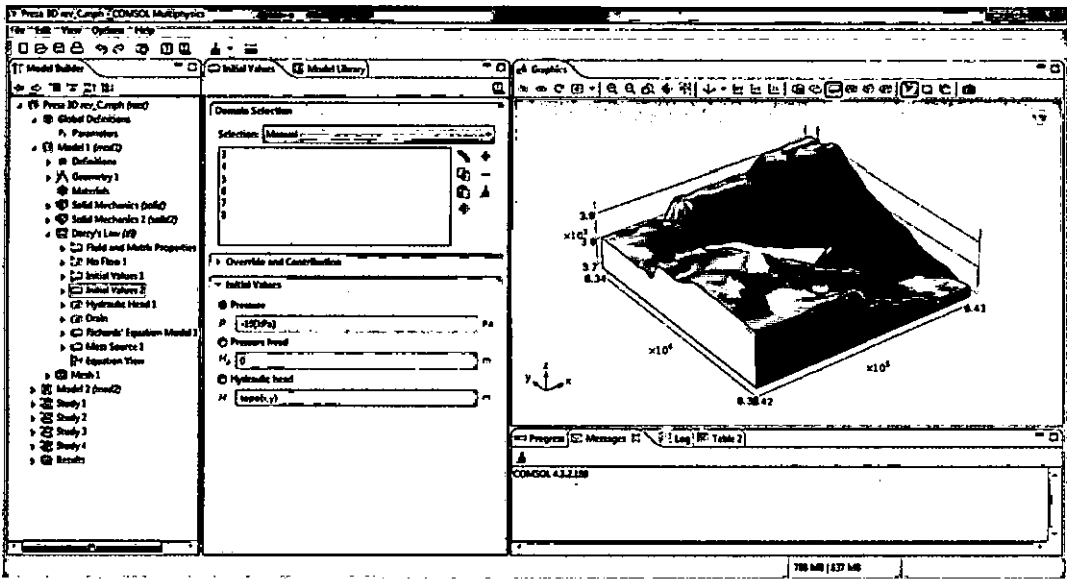
Contorno de no flujo (superficie azul)



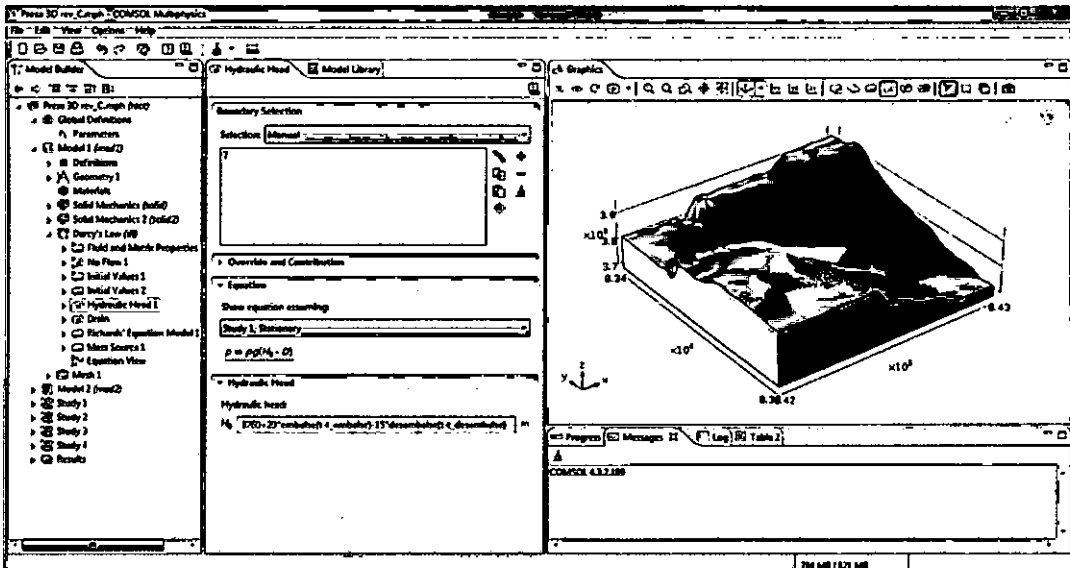
Valores iniciales de carga hidráulica para la fundación y embalse (volumen azul)



Valores iniciales de carga hidráulica para el relleno (volumen azul)



Condición de nivel hidráulico fijo para simular el embalse (superficie azul). Se ha representado con una función en el tiempo (Figura 4.4a)

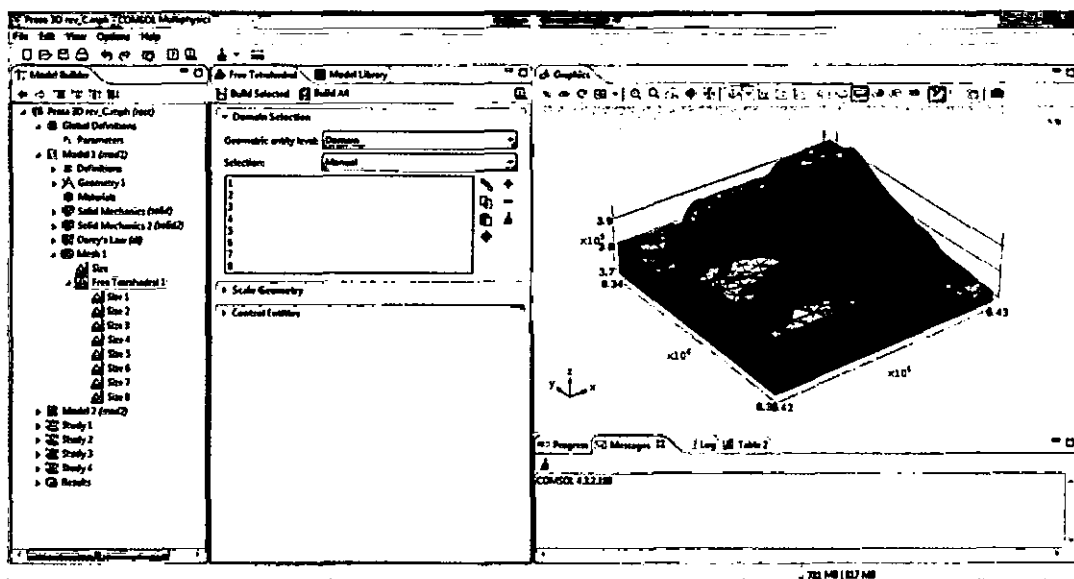




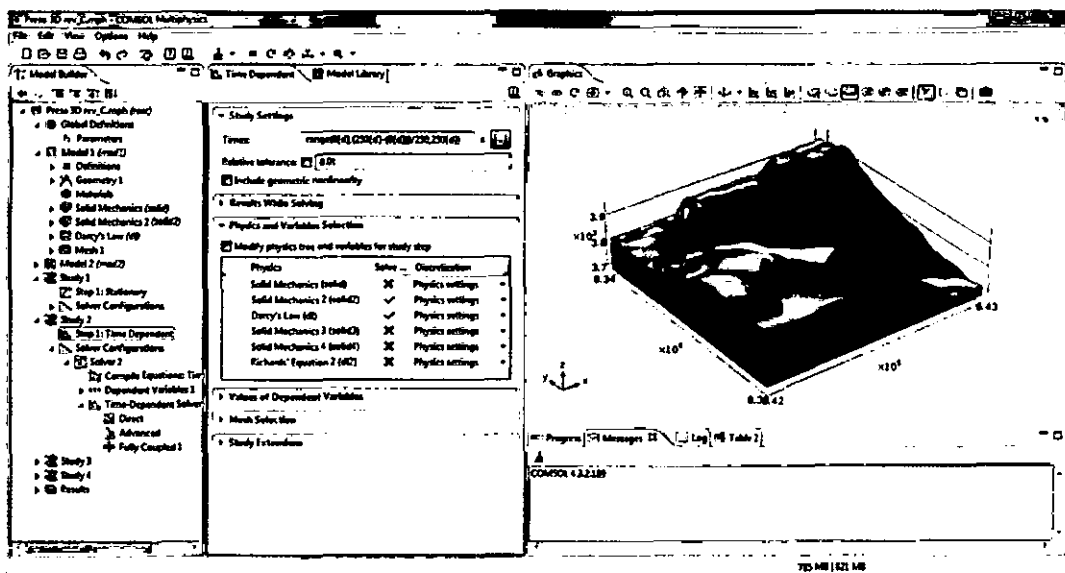
## MALLADO Y POST PROCESO

Se muestra algunas configuraciones significativas durante el proceso mado y post proceso.

### Mallado



### Tiempo de estudio







## ANEXO B

### COMSOL MULTIPHYSICS VERSIÓN 4.3b

#### DESCRIPCIÓN

COMSOL Multiphysics™ es una herramienta de modelado y análisis para prototipaje virtual de fenómenos físicos. COMSOL Multiphysics puede modelar virtualmente cualquier fenómeno físico que un ingeniero o científico pueda describir con ecuaciones diferenciales parciales (PDE), incluyendo transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo y mecánica estructural, soportando la integración de problemas de diferentes campos - Multifísica.

Las prestaciones de multifísica integradas en COMSOL Multiphysics capacitan al usuario para simultáneamente modelar cualquier combinación de fenómenos. A través de estas prestaciones, COMSOL Multiphysics integra las dos formas posibles de modelar (a través de aplicaciones predefinidas que permiten crear el modelo fijando las cantidades físicas que caracterizan el problema, y a través de las ecuaciones que modelan el problema) y permite combinarlas.

La estructura sobre la que COMSOL trabaja es un sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales (PDEs), una descripción matemática de varios fenómenos físicos basados en las leyes de la ciencia. Cualquier experto en su campo que sepa como crear simulaciones usando PDEs puede ampliar aquellos sistemas modelando explícitamente en términos de estos tipos de ecuaciones.

COMSOL Mph. simplifica el desarrollo de aplicaciones a través del uso de la Biblioteca de Modelos, que incorpora ejemplos de diversas áreas de aplicación. A través de ellos, los usuarios, sin necesidad de poseer profundos conocimientos en matemáticas o análisis numérico, podrán construir un modelos.

#### CARACTERÍSTICAS

- o Interfaz gráfica "amigable" e interactiva para todas las etapas del proceso de modelado.
- o Ilimitadas prestaciones de multifísica.
- o Formulación general para un modelado rápido y sencillo de sistemas arbitrarios de PDEs.
- o Multifísica multidimensional para modelado simultáneo de sistemas en 1D, 2D y 3D.

- o Incorpora herramientas CAD para modelado sólido en 1D, 2D y 3D.
- o Permite importar y reparar la geometría de archivos CAD en formato DXF y IGES. En particular, permite la importación de archivos creados en AutoCAD y CATIA.
- o Generación automática y adaptativa de mallas, con un control explícito e interactivo sobre su tamaño.
- o Extensa biblioteca de modelos que documentan y muestran más de 80 ejemplos resueltos.
- o Disponibles los "solvers" más novedosos; entre ellos destacan, "solvers" iterativos para problemas estacionales lineales y no lineales, dependientes del tiempo, y de valores propios.
- o Postprocesado interactivo que permite visualizar cualquier función de la solución.
- o Integración total con MATLAB y sus toolboxes.

## SECTORES

Las prestaciones de modelización y simulación de COMSOL, junto con las librerías disponibles para él, lo convierten en una herramienta aplicable en amplio abanico de áreas, entre las que destacamos:

- o Acústica, electromagnetismo, sistemas microelectromecánicos (MEMS), ingeniería de microondas, componentes de radiofrecuencia, dispositivos semiconductores, propagación de ondas.
- o Reacciones químicas, difusión, dinámica de fluidos, fluidos en medios porosos, transferencia del calor, fenómenos de transporte.
- o Mecánica de estructuras
- o Física, geofísica, óptica, fotónica, mecánica cuántica.
- o Sistemas de control.
- o Modelización de componentes.
- o Matemática aplicada.
- o

## MÓDULOS

COMSOL Multiphysics posee un conjunto de librerías que proporcionan un entorno de trabajo cómodo para campos específicos de la física, todas ellas desarrolladas por el propio fabricante. Vea su información detallada a través del link en la parte inferior de esta página.

COMSOL Multiphysics®						
ELECTRICAL	MECHANICAL	FLUID	CHEMICAL	MULTIPURPOSE	INTERFACING	
AC/DC Module	Heat Transfer Module	CFD Module	Chemical Reaction Engineering Module	Optimization Module®	LiveLink™ for MATLAB®	LiveLink™ for Excel®
RF Module	Structural Mechanics Module	Microfluidics Module	Batteries & Fuel Cells Module	Material Library	CAD Import Module	ECAD Import Module
MEMS Module	Nonlinear Structural Mechanics Module	Subsurface Flow Module	Electrodeposition Module	Particle Tracing Module	LiveLink™ for SolidWorks®	LiveLink™ for SpaceClaim®
Plasma Module	Geomechanics Module	Pipe Flow Module	Corrosion Module		LiveLink™ for Inventor®	LiveLink™ for AutoCAD®
	Fatigue Module				LiveLink™ for Creo™ Parametric	LiveLink™ for Pro/ENGINEER®
	Acoustics Module				LiveLink™ for Solid Edge®	File Import for CATIA®/S

**AC/DC Module:** Fruto de la escisión del módulo de electromagnetismo en dos módulos más específicos, nace AC/DC Module para incidir en el análisis electrostáticos, magnetostático y cuasiestático con acoplamientos ilimitados con otras físicas, para el modelado del rendimiento de condensadores, inductores, motores y microsensores.

**Acoustics Module:** El módulo de acústica ha sido diseñado específicamente para aquellos que trabajan con dispositivos que producen, miden y utilizan ondas acústicas. Sus modos de aplicación, fáciles de usar, proporcionan todas las herramientas necesarias para modelar propagación de ondas acústicas en sólidos y fluidos estacionarios, así como aeroacústica en campos móviles.

**Batteries and Fuel Cells Module:** Este módulo es una herramienta especializada diseñada para modelar todo tipo de aplicaciones de baterías y células de combustible.

**CFD Module:** El módulo CFD se ajusta para la simulación avanzada de fluidos. Sus interfaces permiten modelar flujo turbulento y laminar en una o múltiples fases.

**Chemical Reaction Engineering Module:** Este módulo sirve para estudiar sistemas reactivos que incluyen transporte de materiales y energía.

**Corrosion Module:** El módulo de corrosión permite a los ingenieros simular la electroquímica de la corrosión y la protección contra la corrosión de estructuras metálicas.

**Electrochemistry Module:** Modela aplicaciones de electrólisis, electrodiálisis y electroanálisis.

**Electrodeposition Module:** Electrodeposition Module lleva la potencia de COMSOL Multiphysics a los procesos electroquímicos para aplicaciones tan diversas como el plateado de cromo en la industria de automoción, galvanización, electrocoloración, electroplateado decorativo y electrodeposición para fabricación de PCB.

**Fatigue Module:** Cálculo de fatiga estructural de ciclo alto o bajo dentro del entorno de COMSOL Multiphysics. Requiere el módulo de mecánica de estructuras.

**Geomechanics Module:** El módulo de geomecánica es una ampliación especializada para el Structural Mechanics Module para la simulación de aplicaciones geotécnicas como túneles, excavaciones, estabilidad de pendientes, y estructuras de retención.

**Heat Transfer Module:** este módulo resuelve problemas que involucran cualquier combinación de fenómenos de conducción, convección y radiación. Una amplia variedad de interfaces para el modelado permiten por ejemplo realizar estudios de radiación superficie a superficie, flujo no isotérmico, transferencia de calor en tejidos vivos y transferencia de calor en capas finas y corazas. Los detallados modelos ilustran ejemplos para diversas áreas de aplicación como enfriamiento electrónico y sistemas de potencia, procesado y producción térmica o tecnología médica y bioingeniería.

**MEMS Module:** incluye aplicaciones listas para usar que cubren aspectos como microfluídica más electromagnético estructurales, interacciones térmico estructurales y fluido estructural. La librería de modelos adjunta aporta detallados ejemplos que muestran como modelar mecanismos microelectromecánicos como actuadores, sensores, y dispositivos microfluídicos. Los modelos, a menudo, tratan deformaciones grandes de piezas sólidas, que el software tiene en cuenta para los contornos móviles.

**Microfluidics Module:** El módulo de microfluídica aporta herramientas fáciles de usar para el estudio de dispositivos microfluídicos y flujos de gas enrarecido.

Entre las aplicaciones más importantes se incluyen las simulaciones de dispositivos *lab-on-a-chip*, microfluídica digital, dispositivos electrocinéticos y magnetocinéticos, inkjets, y sistemas de vacío.

**Molecular Flow Module**: Flujo de gases enrarecidos para sistemas de vacío.

**Multibody Dynamics Module**: Analiza montajes de cuerpos rígidos y flexibles.

**Nonlinear Structural Materials Module**: Nonlinear Structural Materials Module complementa las funcionalidades de los módulos de mecánica estructural y de MEMS añadiendo modelos de materiales no lineales. Cuando las deformaciones estructurales se hacen muy grandes, ciertas no linealidades en las propiedades del material fuerzan al usuario a abandonar los modelos de materiales lineales. Esta situación también ocurre en algunas condiciones de operación, como por ejemplo a altas temperaturas.

**Pipe Flow Module**: Pipe Flow Module se utiliza para simulaciones de flujo de fluido, transferencia de masa y calor, transitorios hidráulicos, y acústica en tuberías y redes de canales. Las simulaciones de flujo de tuberías dan la velocidad, variaciones de presión y temperatura a lo largo de tuberías y canales. El módulo es apropiado para tuberías y canales que tienen longitudes suficientemente grandes para que el flujo en ellos se pueda considerar que está completamente desarrollado y representado mediante una aproximación 1D.

**Plasma Module**: Los plasmas de baja temperatura representan una amalgama de mecánica de fluidos, ingeniería de reacciones, cinética, transferencia de calor, transferencia de masa y electromagnetismo. El Plasma Module es una herramienta especializada para modelar las descargas de no equilibrio que ocurren en un amplio rango de disciplinas en ingeniería

**RF Module**: Segundo módulo del escindido módulo de electromagnetismo, RF Module nace para incidir en el modelado de RF, microondas e ingeniería óptica. Este tipo de modelado requiere resolver la escala del dispositivo transmisor mientras que capturan efectos de escala muchos órdenes de magnitud mayor.

**Semiconductor Module**: Simulación de dispositivos semiconductores.

**Structural Mechanics Module**: módulo de mecánica estructural que

proporciona un entorno de modelación especializado donde se complementa el poder de análisis de elementos finitos con su experiencia en mecánica estructural. Combinado con la modelación a base de ecuaciones de COMSOL Multiphysics, ofrece combinaciones multifísicas ilimitadas y análisis tradicional de mecánica estructural en 2D y 3D.

**Subsurface Flow Module (antes Earth Science Module):** este módulo consta de un gran número de interfaces de modelado predefinidas y listas para usar para el análisis de flujos subsuperficiales. Estas interfaces permiten la rápida aplicación de las ecuaciones de Richard, ley de Darcy, la extensión de Brinkman de la ley de Darcy para flujos en medios porosos y las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo libre. Además, el módulo puede modelar el transporte y reacción de solutos así como el transporte de calor en medios porosos. La librería de modelos incluye ejemplos que abarcan desde flujos de petróleo y gas en medios porosos a la distribución de trazadores en flujos de acuíferos.

**Wave Optics Module:** Simula propagación de ondas electromagnéticas en grandes estructuras ópticas.

## **OTRAS HERRAMIENTAS DE MODELADO DE COMSOL**

**Material Library:** La librería de materiales dispone de más de 2500 materiales y un total de 20.000 propiedades (24 diferentes tipos de propiedades elásticas, térmicas y otras). La mayoría de las propiedades son funciones polinómicas a trozos de la temperatura, lo que las hace ideales para el modelado multifísico como es el caso del análisis electrotérmico y térmico-estructural. Se puede realizar búsquedas de materiales por nombre, número DIN o UNS.

**Optimization Module:** Proporciona las funciones más avanzadas para definir y resolver problemas de optimización.

**Particle Tracing Module:** Permite ampliar la funcionalidad de COMSOL con cálculo de trayectoria de partículas en un fluido o campo electromagnético, incluyendo interacciones campo-partícula.

## **PRODUCTOS DE INTERFAZ**

**LiveLink for Excel:** Integración de COMSOL con Microsoft Excel® para

intercambiar datos del modelado y controlar la simulación desde este programa.

**LiveLink for Matlab:** Integra de forma ajustada COMSOL Multiphysics con MATLAB para ampliar el modelado con scripting y para construir aplicaciones que incorporen los modelos del usuario.

**CAD Import Module:** Una estrecha colaboración entre los diseñadores y los modeladores requiere de buenas herramientas para manipular geometrías. COMSOL Multiphysics introduce un potente e importante módulo, el CAD Import Module que simplifica en gran medida la transición entre los diseños geométricos que los ingenieros crean con herramientas CAD especializadas al modelado matemático en COMSOL Multiphysics.

**ECAD Import Module:** Importa archivos ECAD dentro de COMSOL Multiphysics convirtiendo los esquemas 2D en modelos CAD 3D.

**LiveLink for AutoCAD:** Con la nueva interfaz LiveLink for AutoCAD se pueden transferir geometrías 3D desde AutoCAD a COMSOL Multiphysics. La geometría sincronizada en el modelo de COMSOL permanece asociada con la geometría en AutoCAD. Esto significa que la configuración aplicada a la geometría, como las físicas o los ajustes del mallado son retenidos después de subsecuentes sincronizaciones. La interfaz de LiveLink también es bidireccional para permitir iniciar un cambio de la geometría de AutoCAD desde el modelo de COMSOL.

**LiveLink for Creo Parametric:** Conexión bidireccional entre la geometría CAD de Creo Parametric y COMSOL Multiphysics.

**LiveLink for Inventor:** Conexión bidireccional entre la geometría CAD de Inventor y COMSOL Multiphysics.

**LiveLink for Pro/ENGINEER:** Conexión bidireccional entre la geometría CAD de Pro/ENGINEER y COMSOL Multiphysics.

**LiveLink for Solid Edge:** Conexión bidireccional entre la geometría CAD de Solid Edge y COMSOL Multiphysics.

**LiveLink for SolidWorks:** Conexión bidireccional entre la geometría CAD de SolidWorks y COMSOL Multiphysics.



**LiveLink for SpaceClaim:** El nuevo LiveLink para SpaceClaim proporciona una fusión del modelado directo y la simulación multifísica en un entorno perfectamente integrado, permitiendo diseños óptimos y colaboración entre equipos CAD y CAE.