



**ANÁLISIS COMPUTACIONAL DEL ESTUDIO DE UNA FALLA DE TALUD
POR DESEMBALSE RÁPIDO MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA PLAXIS**

RAMIRO ANDRÉS CARRASCAL CARRASCAL

JOSÉ DAVID TOBO RAMOS



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**



**ANÁLISIS COMPUTACIONAL DEL ESTUDIO DE UNA FALLA DE TALUD
POR DESEMBALSE RÁPIDO MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA PLAXIS**

**RAMIRO ANDRÉS CARRASCAL CARRASCAL
JOSÉ DAVID TOBO RAMOS**

**Tesis de Grado presentada como requisito parcial para otorgar el título
de Ingeniero Civil**

**Director
WILFREDO DELTORO RODRÍGUEZ
Ingeniero Civil, MSc**

**Codirector
MARIO RAMÍREZ CARRERO
Ingeniero Civil, MSc**



**UNIVERSIDAD INDUTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**



AGRADECIMIENTOS

A nuestros directores de proyecto, los profesores Mario Ramírez carrero y Wilfredo Del Toro Rodríguez, por sus valiosos aportes y su constantes seguimiento a este proyecto para que saliera de la mejor manera.

A Héctor Torres Ortiz, por su desinteresada orientación, en especial a la comprensión del software PLAXIS.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER por albergarnos es su regazo durante este tiempo e impulsarnos a ser profesionales idóneos.

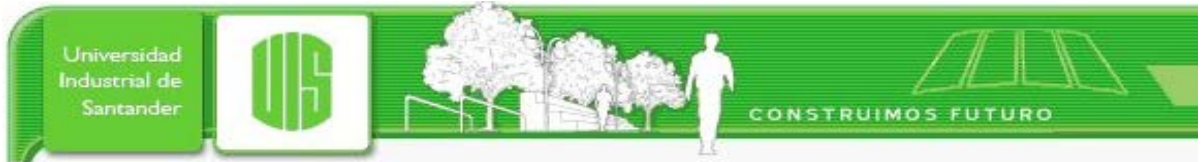


TABLA DE CONTENIDO

	INTRODUCCIÓN	12
1	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	14
1.1	Objetivo General	14
1.2	Objetivos específicos.....	14
2	MARCO TEÓRICO.....	15
2.1	Descripción del problema	15
2.2	Proceso de Calculo en PLAXIS [4]	17
3	METODOLOGÍA	20
4	ANÁLISIS DEL PROYECTO.....	21
4.1	Modelos matemáticos propuestos para el estudio de desembalse rápido.....	21
4.1.1	Método USACE para Desembalse Rápido [6].....	21
4.1.2	Calculo de la ubicación del nivel freático.....	31
4.2	Modelo estándar.....	35
4.3	Presa homogénea	35
4.4	Variación de la geometría	36
4.4.1	Variación en las dimensiones del núcleo	36
4.4.2	Variación de las alturas del embalse.....	39
4.5	Variación de materiales (Parámetros de resistencia)	43
4.5.1	Variación en el Núcleo	44
4.5.2	Variación en el Relleno.....	48
4.5.3	Variación en el subsuelo	53
4.6	Variación del desembalse	57
4.6.1	Variación de los tiempos de desembalse.....	57
4.6.2	Variación de los niveles de embalsamiento.....	59
4.7	Soluciones	60
5	CONCLUSIONES	62
	CITAS BIBLIOGRAFICAS.....	64
	BIBLIOGRAFIA.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Respuesta de un talud de fenómeno de desembalse rápido. [3]....	16
Figura 2. Proceso de la Metodología del Proyecto.....	20
Figura 3. Superficie de deslizamiento circular, utilizando rodajas para el cálculo.	23
Figura 4. Explicación gráfica de las variables.	23
Figura 5. Volumen de control.....	31
Figura 6. Coordenadas del modelo.....	33
Figura 7. Variación del Factor de seguridad respecto a las dimensiones del núcleo.....	37
Figura 8. Variación de la deformación respecto a las dimensiones del núcleo.	38
Figura 9. Niveles de Variación del desembalse.	40
Figura 10. Variación del Factor de seguridad respecto a la altura del desembalse.	40
Figura 11. Variación de la deformación respecto a la altura del desembalse..	42
Figura 12. Variación del factor de seguridad respecto a los materiales del núcleo.	44
Figura 13. Variación de la deformación respecto a los materiales del núcleo.	46
Figura 14. Variación del factor de seguridad respecto a los materiales del relleno.	48
Figura 15. Variación de la deformación respecto a los materiales del relleno.	51
Figura 16. Variación del factor de seguridad respecto a los materiales del subsuelo.....	53
Figura 17. Variación de la deformación respecto a los materiales del subsuelo.	55
Figura 18. Variación del factor de seguridad respecto al tiempo del desembalse.	58
Figura 19. Variación de la deformación respecto al tiempo del desembalse..	58
Figura 20. Variación del factor de seguridad respecto al nivel de desembalse.	59
Figura 21. Variación de la deformación respecto al nivel de desembalse.....	59



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fases de cálculo.....	18
Tabla 2. Valores de materiales del modelo estándar.....	21
Tabla 3. Cálculos de la primera etapa.....	29
Tabla 4. Cálculos de la segunda etapa.....	29
Tabla 5. Cálculos de la tercera etapa.....	30
Tabla 6. Cálculos de la cuarta etapa.....	30
Tabla 7. Cálculos de la quinta etapa.....	31
Tabla 8. Resultados del cálculo de la ubicación del nivel freático por el método de diferencias finitas.	34
Tabla 9. Resultados de la presa del modelo estándar.	35
Tabla 10. Resultados del modelo de presa homogénea.....	36
Tabla 11. Valores de geometría trabajados en el proyecto.	36
Tabla 12. Valores de los materiales trabajados en este proyecto.	43
Tabla 13. Resultados de F.S. de los modelos soluciones.	60
Tabla 14. Resultados de deformación de los modelos soluciones.	60



RESUMEN

TITULO:

ANÁLISIS COMPUTACIONAL DEL ESTUDIO DE UNA FALLA DE TALUD POR DESEMBALSE RÁPIDO MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA PLAXIS*.

Autores:

Carrascal Carrascal, Ramiro Andrés
Tobo Ramos, José David**

PALABRAS CLAVES:

Desembalse rápido, factor de seguridad, deformación máxima, modelo estándar.

CONTENIDO:

Es importante tener en cuenta el estudio de desembalse rápido debido a que es un caso crítico de estabilidad a la hora de construir una presa, sobretodo en su talud aguas arriba. Este proyecto quiere reflejar de qué forma se ve afectado el factor de seguridad y la deformación máxima en una presa respecto a las diversas variables que posee, como son la geometría, los materiales y la tasa de desembalse comparando dichas variables entre sí, para que de esta forma se pueda hallar las características que mejoran o empeoran la estabilidad de una presa debido al proceso de un desembalse de sus aguas. Para el análisis se ha trabajado con el programa computacional PLAXIS, que está programado para solucionar este tipo de problema en poco tiempo, en contraste de lo que se haría manualmente. Los resultados obtenidos en PLAXIS fueron graficados para su mejor interpretación en este proyecto.

Los autores de este proyecto también quisieron hacer sus propios cálculos de obtención de factor de seguridad, utilizando modelos matemáticos que han tenido éxito, y así entender el procedimiento que un programa computacional realiza. Al final del documento se muestran las conclusiones de los resultados más sobresalientes que se obtuvieron de dicho estudio.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. M.Sc. Wilfredo Del Toro Rodríguez. Codirector: Ing. M.Sc. Mario Ramírez Carrero



ABSTRACT

TITLE:

COMPUTATIONAL ANALYSIS STUDY FOR A SLOPE FAILURE RAPID DRAW DOWN PROGRAM USING PLAXIS. *

AUTHORS:

Carrascal Carrascal, Ramiro Andrés
Tobo Ramos, José David**

KEYWORD:

Rapid drawdown, safety factor, maximum deformation standard model.

CONTENT:

It is relevant to take into account the study of rapid drawdown because it is a critical case when building the dam, especially in the upstream slope. This project aims to reflect how it is affected the safety factor and the maximum deformation in a dam about the many variables that have, such as geometry, the materials and rate of drawdown, comparing these variables to each other, so that this way, in this paper find the features that improve or worsen the stability of a dam due to the process of a drawdown waters. For the analysis we have worked with a computational program called PLAXIS, which is programmed to solve this kind of problem in a short time, in contrast to what would be done manually. The results were plotted in PLAXIS for best performance on this project.

The authors of this project also wanted to do their own calculations to obtain the safety factor of the dam analyzed, using mathematical models that have been successful in other studies, and thus understand the process that a computer program performs in this kind of problems. At the end of the document presents the conclusions of the most outstanding results of this study were obtained.

* Degree work

** Faculty of physical –Mechanical. Civil Engineering School. Director: Ing. M.Sc. Wilfredo Del Toro Rodríguez. Codirector: Ing. M.Sc. Mario Ramírez Carrero

INTRODUCCIÓN

Este trabajo consiste en el análisis y el estudio de un caso crítico de estabilidad de una presa conocido como desembalse rápido. El fenómeno de desembalse rápido se empezó a estudiar a mediados de los años 60; así que se puede considerar que es relativamente reciente su estudio, y esto influye en que mucha gente en el mundo ignora aun su gran importancia, pero es reconocido por varios autores, de ser uno de los casos más críticos de estabilidad de una presa [1-3]. El desembalse rápido consiste en la caída súbita del nivel de agua de un reservorio almacenado en una presa, lo cual genera una inestabilidad en el talud aguas arriba, debido que al tener un descenso tan rápido, el talud aguas arriba del reservorio, no puede evacuar con la misma velocidad el agua, como si lo hace el reservorio, esto produce un desequilibrio de fuerzas, debido a que el talud queda con la presión de poros que anteriormente tenía, pero que esta ya no es contrarrestada por la presión hidrostática que generaba el agua. Además debido al desembalse, se genera un aumento de los esfuerzos cortantes dentro del talud, que genera un potencial desestabilizador que puede ocasionar su colapso. Este fenómeno se puede asimilar a un ensayo triaxial consolidado no drenado. [1]

Este fenómeno ha sido investigado por reconocidos geotecnistas, como Morgenstern N., Dvinoff A- Harr N. y Chang Ch., por citar algunos, pero se continúa sin determinarse un modelo matemático exacto, que refleje todas las características que se originan en un talud por desembalse rápido. Se han propuesto modelos matemáticos que de forma aproximada muestran algunos resultados; uno de ellos que últimamente ha tomado mayor fuerza para este tipo de estudio, es el método de las diferencias finitas, método que es aplicado en reconocidos software como PLAXIS (Programa con el que se trabajó en este proyecto), programa que mediante métodos numéricos resuelve problemas complejos en el área de la geotecnia, arrojando respuestas como deformaciones y factores de seguridad, entre otros.

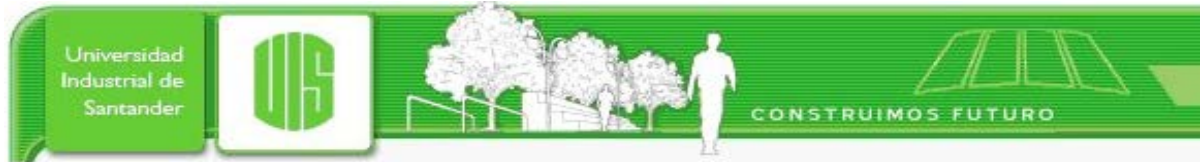
En este trabajo se estudian las diferentes variables que puede afectar las deformaciones y el factor de seguridad de una presa por desembalse rápido, pero primero se quiso hacer, por parte de los autores, un pequeño estudio de cálculo de factor de seguridad en una presa denominada modelo estándar, la cual se escogió como patrón de comparación para los modelos realizados en PLAXIS.

El análisis matemático utilizado para el estudio del modelo comentado, fue el propuesto por US Army Corps of Engineers [2], método de relativa facilidad para el estudio de desembalse rápido. Dicho procedimiento es diferente al que se utiliza en PLAXIS, debido a que el método del USACE trabaja con el método



de equilibrio limite y PLAXIS, trabaja con el método de diferencias finitas, y la justificación de que se haya realizado el análisis en forma manual, consistió en entender de una mejor forma, el fenómeno de desembalse rápido desde el punto de vista matemático, debido a sugerencias de nuestros directores de proyecto. La razón por la que se escogió el método del USACE y no otros, fue por su relativa facilidad de obtención del factor de seguridad para un análisis de desembalse rápido.

Después de haber realizado los cálculos del ejemplo en forma manual, en el artículo se muestran los resultados obtenidos en PLAXIS, que de forma más notoria (factor de seguridad y deformación máxima) influyen en la estabilidad de los diferentes modelos de presas que se analizaron, y por supuesto las conclusiones que se llegaron al final del trabajo.



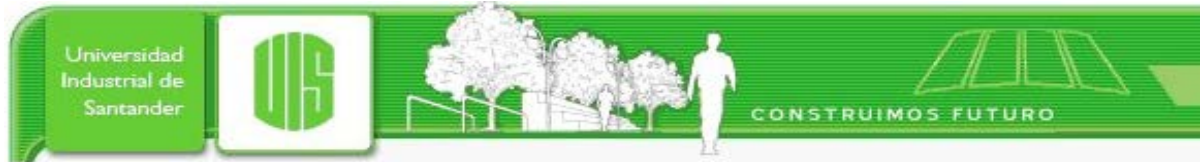
1 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1 Objetivo General

- Estudiar el fenómeno de falla de un talud debido a las consecuencias de desembalse rápido en una presa.

1.2 Objetivos específicos

- Comprender los fenómenos físicos que se originan en los taludes de una presa por el caso de desembalse rápido de sus aguas.
- Comprender y exponer el modelo matemático que otros autores han sugerido para abordar el problema de un desembalse rápido.
- Estudiar la influencia de los parámetros de resistencia para el caso de un desembalse rápido (factor de seguridad).
- Estudiar la influencia de la geometría de la presa en su estabilidad por desembalse rápido. (factor de seguridad).
- Estudiar el comportamiento del descenso del nivel freático en el talud de una presa y examinar la variación de este descenso, en el factor de seguridad.



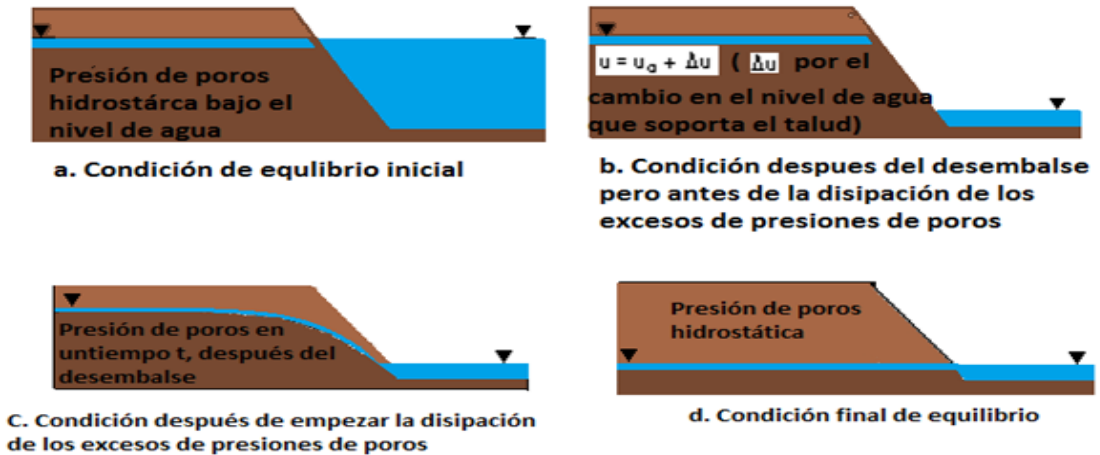
2 MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción del problema

Recientemente, el estudio de desembalse rápido ha venido tomando mayor protagonismo en el estudio de análisis de las presas, debido a que si se mira la primera mitad del siglo pasado, este fenómeno era desconocido por parte de los ingenieros; solo hasta la década de los años sesenta su existencia empezó a conocerse, sobre todo por los trabajos realizados por Morgenstern N., pues él analizó que ciertos problemas que se planteaban en esa época no estaban siendo resueltos, como desastres o fallas de los taludes aguas arriba de la presa, como efecto secundario de cuando ocurría un desembalse; todo esto sin comprender muy bien las razones de estos acontecimientos. Incluso, Morgenstern observó que, en algunos casos, estos problemas habían sido peores que los sucedidos aguas abajo. Hablando en el ámbito local, en Colombia no se han tenido muchos registros de este fenómeno, muy probablemente debido a la poca o nula investigación que se ha hecho sobre el tema. El estudio del fenómeno de desembalse rápido es importante de tenerlo en cuenta, debido a que las fallas en una presa no pueden ser ignoradas, pues ellas por lo general contienen un gran volumen de agua que pueden llegar a tener variación en su nivel y pueden ocasionar una tragedia, pues estos fenómenos a menudo se presentan en lugares concentrados por núcleos de personas, lo que hace que esta inquietud no pueda pasar desapercibida.

Hablando en forma puntual de lo que significa el fenómeno de desembalse rápido, este consiste en la disminución del nivel de agua en un embalse, ya sea de forma inmediata o de forma gradual, que origina una condición inestable en el talud aguas arriba de la presa, que puede ocasionar una falla en dicho talud. Se puede decir que el proceso de desembalse rápido consiste en cuatro etapas, presentadas a continuación:

Figura 1. Respuesta de un talud de fenómeno de desembalse rápido. [3]

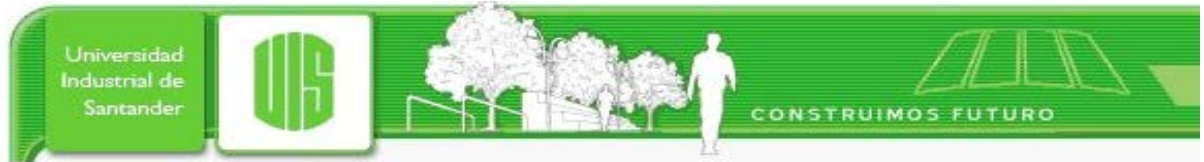


La primera etapa se refiere al momento en que la presa ya ha sido construida y el agua del embalse ha alcanzado el nivel con el que ha sido diseñada. En esta etapa existe una condición de equilibrio entre las diversas fuerzas dentro del talud.

La segunda etapa consiste en el desembalse; el agua almacenada en la presa ha disminuido en forma constante o inmediata, pero el agua en el talud no lo ha hecho de la misma forma.

La tercera etapa consiste en que la disminución del nivel de agua de la presa ha sido de forma rápida; los poros no han podido disipar la presión que originalmente tenían cuando la presa estaba llena, debido a que el agua del talud no ha evacuado el agua a la misma tasa en que lo ha hecho el embalse, lo que provoca un desequilibrio de fuerzas y un exceso de presión de poros.

La cuarta etapa consiste en la expulsión del agua contenida en el talud hasta el nivel en que se ha igualado con el nivel de agua del embalse. La expulsión del agua ha ocasionado la disipación de la presión de poros del material del talud, lo que hace que se tenga una condición de equilibrio como inicialmente estaba la presa (antes de que se originara el desembalse). Una consecuencia importante en esta etapa es que los esfuerzos efectivos del suelo han disminuido y hacen que los esfuerzos cortantes aumenten, lo que puede llevar a una falla; además, a esto también hay que agregarle que ahora el talud no cuenta con la presión hidrostática del agua, lo que incrementa las condiciones favorables de que el talud llegue a colapsar. La condición más crítica en el



fenómeno de desembalse rápido se presenta una vez que el desembalse ha ocurrido. [3]

En lo concerniente a este trabajo, esta investigación no pretende el planteamiento de una solución del fenómeno de desembalse rápido ni aportar nada nuevo de lo que ya otros autores han investigado; su enfoque principal es exponer la importancia que debe tener el estudio de este fenómeno para que sea tomado en cuenta por quienes lo desconozcan, o que simplemente sea una buena lectura para las personas que lo conozcan o se interesen por este tema, pues en este trabajo serán mostradas las bases conceptuales y matemáticas que otros autores han propuesto en sus investigaciones anteriormente, y finalmente demostrar con un ejemplo los problemas que tendría una presa con este fenómeno, en lo que concierne a la variación del factor de seguridad del talud de la presa, que pueda llegar a ser afectado por este problema, pues hay que recordar que frecuentemente existen núcleos urbanos que habitan cerca de estos tipos de obras, por lo que este fenómeno es de vital importancia a la hora de la construcción de una presa. El ejemplo que se ha mencionado será el modelamiento de una presa desarrollado por un programa especializado en estos casos, como el programa PLAXIS programa con el que se demostrarán los tipos de problemas expuestos anteriormente en forma gráfica.

2.2 Proceso de Calculo en PLAXIS [4]

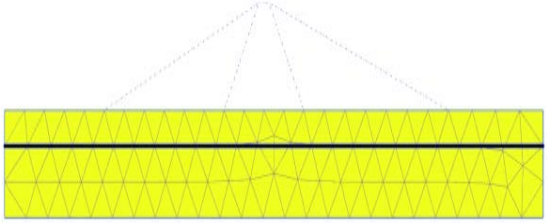
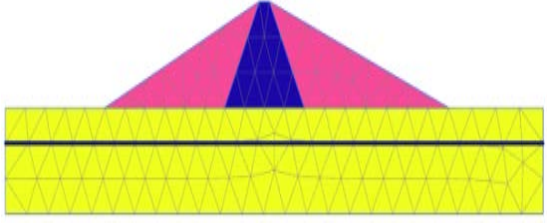
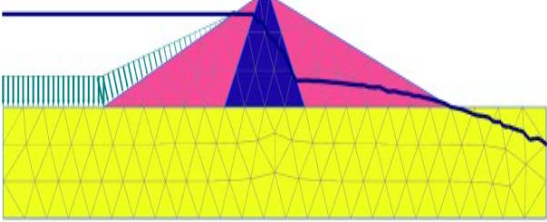
El proceso de cálculo en PLAXIS consistirá en una fase inicial y 9 fases más. En la primera fase se construye la presa. En la segunda fase el nivel de agua del embalse estará a una altura de 25 metros (altura de diseño), para esta situación la distribución de presión de agua es calculada usando un estado estacionario de flujo de aguas subterráneas. La tercera y cuarta fase parten de la anterior situación estándar (es decir, una presa con un embalse a 25 m) y el nivel de agua bajará a 5 metros; para esto se hará una distinción en el intervalo de tiempo cuando esto ocurra (es decir, en la fase 3 y 4 tendrán diferentes velocidades de reducción del nivel de agua, en forma rápida y en forma lenta respectivamente). En la fase 5 también iniciará en la fase 2 y considerará el comportamiento a largo plazo de la presa en el nivel de 5 metros del embalse, lo cual implica un cálculo de aguas subterráneas en estado estacionario de flujo, para que así se calcule la distribución de presión

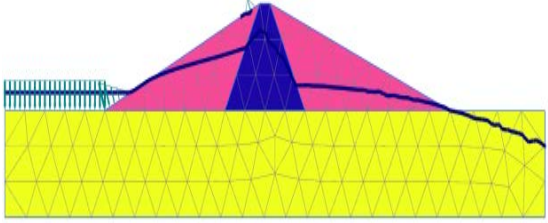
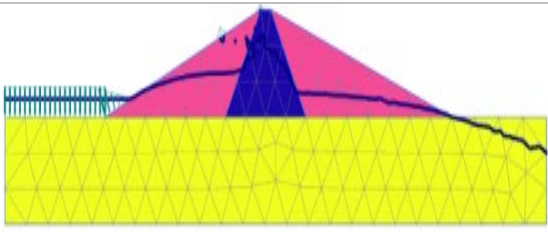
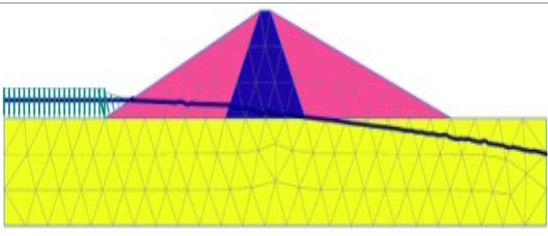
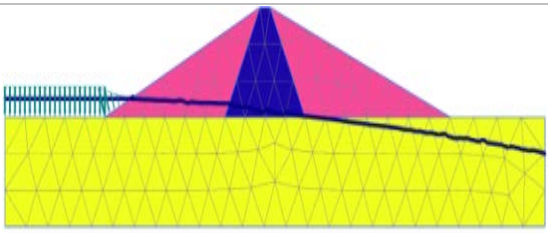
de agua. Finalmente, para las cuatro situaciones de presión de agua (fase 6 a fase 9) el factor de seguridad de la presa será calculada por medio de un análisis de seguridad.

En resumen este proceso conlleva a los siguientes pasos:

- El nivel de agua se mantiene a 25 m.
- El nivel del agua baja rápidamente de 25 a 5 m.
- El nivel de agua cae lentamente de 25 a 5 m.
- El nivel de agua cae muy lentamente hasta los 5 metros y permanece allí.

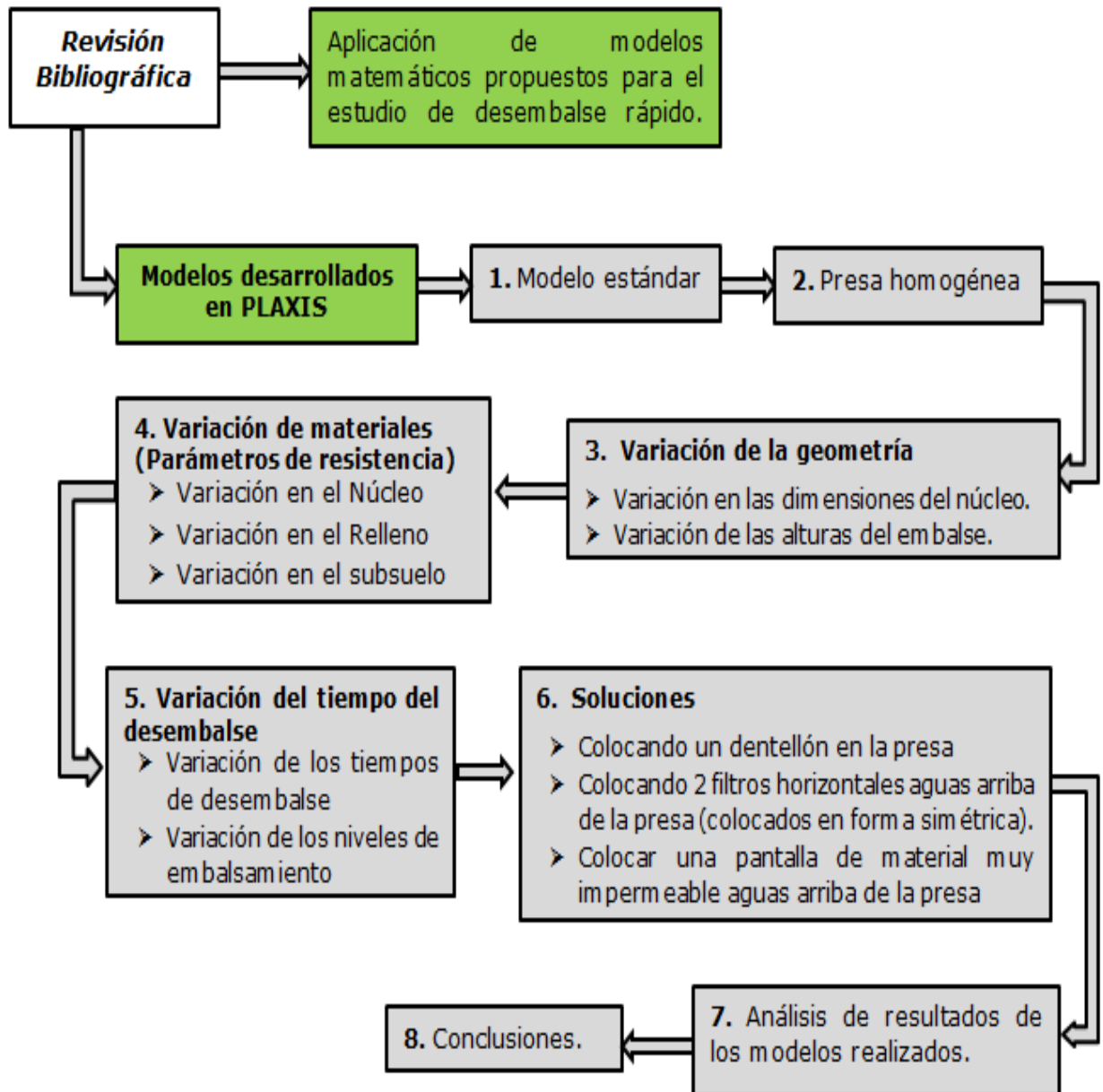
Tabla 1. Fases de cálculo.

Fase	Contenido	Grafica
Fase Inicial	Las presiones de agua iniciales se generan sobre la base de un nivel freático horizontal general, a una profundidad de 10 m por debajo de la superficie del suelo. La presa no ha sido construida todavía.	
Fase 1	En esta fase la presa ha sido construida, y está conformada por el núcleo y el relleno. En esta fase el agua no ha fluido a la presa todavía, por lo cual el nivel freático continúa constante.	
Fase 2	En esta fase se genera el aumento del nivel de agua en el embalse hasta 25 metros por encima del suelo (Izquierda de la presa).	

<p>Fase 3</p>	<p>En esta fase se considera el desembalse en forma lineal, el cual el nivel de agua ha disminuido a 20 metros en 5 días (4 m/d) en la parte que el nivel de agua había aumentado (izquierda de la presa).</p>	
<p>Fase 4</p>	<p>Es el mismo caso que de la fase 3, solo que el nivel de agua desciende en 50 días (0.4 m/d).</p>	
<p>Fase 5</p>	<p>En esta fase ya ha ocurrido el desembalse, el cual se ha supuesto en estado estacionario. El nivel de agua ha disminuido a 5 metros por encima del suelo (izquierda de la presa).</p>	
<p>Fase 6-9</p>	<p>En las fases de 6 a 9 los cálculos de estabilidad se definen para las fases 2 a 5 respectivamente. Esto se hace para establecer el tipo de cálculo de seguridad que arroja el programa.</p>	

3 METODOLOGÍA

Figura 2. Proceso de la Metodología del Proyecto.



4 ANÁLISIS DEL PROYECTO

La forma en que se orientó el desarrollo de este proyecto, fue la de que se cumplieran los objetivos planteados en este, todos ellos orientados en el análisis de la variación del factor de seguridad de una presa con un núcleo impermeable en su centro, por la variación de datos de su estructura, como los parámetros de resistencia (materiales), geometría, tasa de desembalse y soluciones estructurales como filtros y pantallas impermeables; todos estos analizados para cuatro fases distintas[5]: llenado de la presa, desembalse rápido (para un tiempo de 5 días de desembalse), desembalse lento (para un tiempo de 50 días de desembalse), y desembalse en un estado estacionario (cuando las características del mismo no varían con el tiempo). En cada modelo se cambió una variable y se dejó a las demás como constantes, de ahí se obtenían los valores de factor de seguridad y deformación máxima con los que se querían hacer la comparación mencionada. Los valores que se dejaron constantes provenían de un modelo que se le denominó "modelo estándar", debido a que sirvió de patrón a la hora de cambiar las variables. Los datos del modelo estándar se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de materiales del modelo estándar.

PARAMETROS	NÚCLEO	RELLENO	SUB-SUELO
Peso No saturado [kn/m ³]	16	16	17
Peso saturado [kn /m ³]	20	20	21
Módulo de Young [kn /m ²]	8000	20000	50000
Poisson [-]	0.35	0.33	0.30
Cohesión [kn /m ²]	5	5	10
Ángulo de Fricción [grados]	25	30	32
Permeabilidad [m/día]	0.0001	0.25	0.02

4.1 Modelos matemáticos propuestos para el estudio de desembalse rápido

4.1.1 Método USACE para Desembalse Rápido [6]

El método escogido es el método simplificado de Bishop, que solo es aplicable para superficies de falla circulares. En los cálculos se supuso que no hay drenaje.

El método de USACE, envuelve 2 o 3 etapas de cálculos de estabilidad del talud para cada dovela, cuyo procedimiento es mostrado a continuación.



4.1.1.1 Definición de las variables

B=Ancho de la dovela. [m]

C'=Cohesión. [kn/m²]

dh=Brazo horizontal del momento. [m]

dv= Brazo vertical del momento. [m]

F=Factor de seguridad (definido con respecto a la resistencia cortante). [-]

F.S.=Factor de seguridad (definido con respecto a la resistencia cortante). [-]

dR= Valor de la intercepción de la envolvente de rotura en el diagrama de 'p-q'. [kn/m²]

hp=Altura piezométrica por encima de la parte inferior de la dovela (cabeza de presión) en el punto medio de la dovela. [m]

hs=Altura promedio de agua por encima de la parte superior de la dovela. [m]

h'=Altura promedio de la dovela. [m]

Kc=Relación de tensión principal efectiva $\sigma'_{1c} / \sigma'_{3c}$ para consolidación. [-]

Kf= Relación de tensión principal efectiva $\sigma'_{1f} / \sigma'_{3f}$ para consolidación. [-]

Mp= Momento producido por la fuerza P sobre el centro del círculo. [kn*m]

N= Fuerza normal ejercida el inferior de la dovela. [kn]

P=Fuerza del agua ejercida de forma perpendicular en lo superior de la dovela. [kn]

p= Presión del agua ejercida de forma perpendicular en lo superior de la dovela. [kn/m²]

R=Radio del círculo de falla. [m]

s= Resistencia a cortante. [kn/m²]

S= Fuerza cortante ejercida encima de la dovela. [kn]

Sd=Resistencia de corte drenada. [kn/m²]

U=Presión de poros. [kn/m²]

Ui=Fuerza de la presión de poros ejercida en la cara de arriba de la dovela. [kn]

Ui+1= Fuerza de la presión de poros ejercida en la cara de abajo de la dovela. [kn]

W= Peso de la dovela. [kn]

Zi=Fuerza de fricción ejercida en la cara de arriba de la dovela. [kn]

Zi+1= Fuerza de fricción ejercida en la cara de abajo de la dovela. [kn]

α = Inclinación respecto a la horizontal de la parte inferior de la dovela. [grados]

β =Inclinación respecto a la horizontal de la parte superior de la dovela. [grados]

Δl =Longitud de la parte inferior de la dovela. [m]

$\Delta l'$ =Longitud de la parte superior de la dovela. [m]

γ =Peso específico del suelo. [kn/m³]

γ_w =Peso específico agua. [kn/m³]

γ_{sat} =Peso específico saturado del suelo. [kn/m³]

Φ' = Ángulo de fricción. [grados]

σ =Esfuerzo normal. [kn/m²]

σ' = Esfuerzo efectivo normal. [kn/m²]

$\sigma'c$ = Esfuerzo efectivo normal sobre la superficie de deslizamiento en la consolidación, antes del desembalse rápido. [kn/m²]

$\sigma'd$ = Esfuerzo efectivo normal sobre la superficie de deslizamiento después del drenaje, seguido del desembalse rápido. [kn/m²]

$\sigma'fc$ = Esfuerzo efectivo normal sobre el plano de falla en la consolidación. [kn/m²]

τ =Esfuerzo cortante. [kn/m²]

τ_c = Esfuerzo cortante sobre la superficie de deslizamiento en la consolidación, antes del desembalse rápido. [kn/m²]

τ_{ff} = Esfuerzo cortante sobre el plano de la falla. [kn/m²]

$\tau_{ff-kc=1}$ = Esfuerzo cortante (resistencia) de la envolvente de τ_{ff} vs σ'_{fc} para la consolidación isotrópica. [kn/m²]

$\tau_{ff-kc=Kf}$ = Esfuerzo cortante (resistencia) de la envolvente de τ_{ff} vs σ'_{fc} para el máximo grado de anisotropía consolidación, $K_c = K_f$. [kn/m²]

Θ = Inclinación de la fuerza de fricción. [grados]

ψ_R = Ángulo de inclinación de la envolvente de rotura en el diagrama de 'p-q'. [grados]

$\psi_{kc=1}$ = Ángulo de inclinación de τ_{ff} vs σ'_{fc} cortante sobre la fuerza de la consolidación isotrópica.[grados]

4.1.1.2 Procedimiento

Figura 3. Superficie de deslizamiento circular, utilizando rodajas para el cálculo.

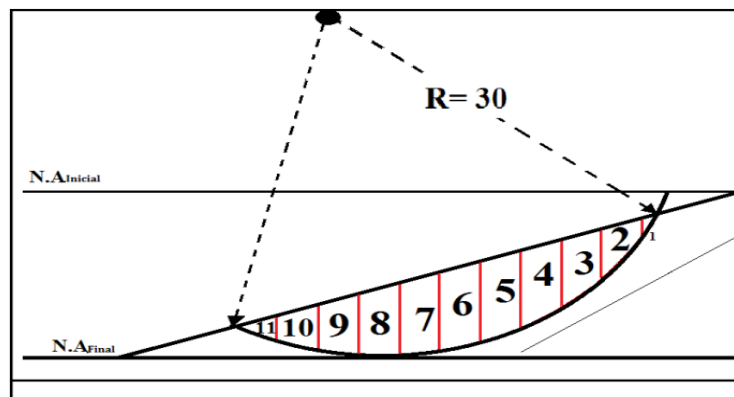
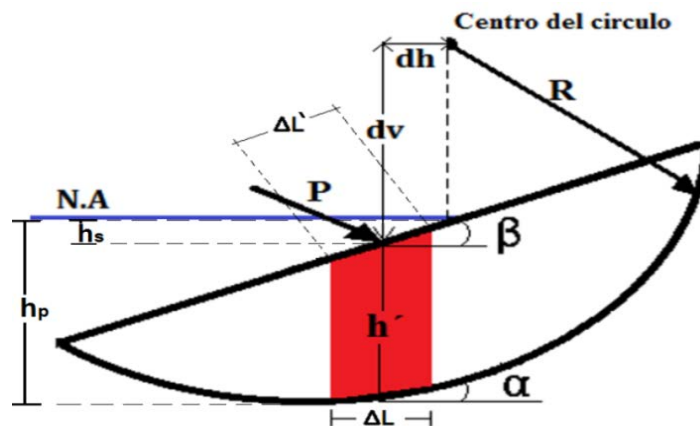


Figura 4. Explicación gráfica de las variables.





Constantes utilizadas:

$$\gamma_{sat} = 20 \frac{kN}{m^3} \quad \gamma_w = 10 \frac{kN}{m^3} \quad \phi = 30^\circ \quad c = 5 \text{ kPa}$$

$$(\theta = 15^\circ \quad \psi_R = 35^\circ \quad d_r = 15 \text{ kPa} \quad R = 30 \text{ m}) \rightarrow \text{asumidos}$$

Ecuaciones utilizadas:

$$\phi_R = \sin^{-1} \left(\frac{\tan \psi_R}{2 + \tan \psi_R} \right) \quad (1)$$

$$C_R = \frac{d_r(1 - \sin \phi_R)}{2 \cdot \cos \phi_R} \quad (2)$$

$$d_{k_c=1} = C_R \left(\frac{\cos \phi_R \cos \phi'}{1 - \sin \phi_R} \right) \quad (3)$$

$$\psi_{k_c=1} = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \phi_R \cos \phi'}{1 - \sin \phi_R} \right) \quad (4)$$

4.1.1.2.1 Cálculos de la primera Fase

4.1.1.2.1.1 Primera Etapa

Los cálculos para la primera etapa son mostrados en la tabla 3, los cuales son los resultados de estabilidad para análisis constantes de filtraciones de agua. Los parámetros de resistencia al corte de los esfuerzos efectivos ($c'=5 \text{ kPa}$, $\phi' = 30^\circ$) son utilizados para todas las dovelas. Los pesos de las dovelas son calculados usando pesos unitarios totales. Las presiones de poros y las cargas externas de agua se calculan a partir de la línea piezométrica antes del desembalse. El valor final del ensayo para el factor de seguridad en un proceso iterativo (en nuestro caso resuelto por la herramienta de Solver en Excel) fue de F.S. = 2,68.

Ecuaciones utilizadas:

$$\Delta l = \frac{b}{\cos \alpha} \quad (5)$$

$$\text{Área} = b * h' \quad (6)$$

$$W = \text{Área} * \gamma_{sat} \tag{7}$$

$$P = h_s * \gamma_w \tag{8}$$

$$\Delta l' = \frac{b}{\cos \beta} \tag{9}$$

$$P = p * \Delta l' \tag{10}$$

$$M_p = P. [d_v. \text{sen} \beta + d_h. \text{cos} \beta] \tag{11}$$

$$U = h_p * \gamma_w \tag{12}$$

$$F = \frac{\sum [c' b + (W + P \cos \beta - ub) \cdot \tan \Phi']}{\sum m_a} \tag{13}$$

$$m_a = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \Phi'}{F} \tag{14}$$

$$F.S. = \frac{F}{\sum W \text{sen} \alpha - \frac{\sum M_p}{R}} \tag{15}$$

4.1.1.2.1.2 Segunda Etapa

Luego se calcula la resistencia al corte no drenado y los esfuerzos de consolidación (normales). Las respuestas son mostradas en la tabla 4.

Ecuaciones utilizadas:

$$N = \frac{W + P \cos \beta - \frac{b \tan \alpha}{F} (c' - u \tan \Phi')}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \Phi'}{F}} \tag{16}$$

$$\sigma'_c = \frac{N}{\Delta l} - u \tag{17}$$

$$S = \frac{c' b + (W + P \cos \beta - ub) \tan \Phi'}{F \cos \alpha + \sin \alpha \cdot \tan \Phi'} \tag{18}$$

$$\tau_c = \frac{S}{\Delta l} \tag{19}$$

$$K_c = \frac{\sigma'_c + \tau_c \left(\frac{\sin \Phi' + 1}{\cos \Phi'} \right)}{\sigma'_c + \tau_c \left(\frac{\sin \Phi' - 1}{\cos \Phi'} \right)} \quad (20)$$

$$\tau_{(ff-K_c=1)} = d_{(K_c=1)} + \sigma'_c \tan(\psi_{K_c=1}) \quad (21)$$

$$\tau_{(ff-K_c=K_f)} = c' + \sigma'_c \tan \Phi' \quad (22)$$

$$K_f = \frac{(\sigma'_c + c' \cos \Phi')(1 + \sin \Phi')}{(\sigma'_c - c' \cos \Phi')(1 - \sin \Phi')} \quad (23)$$

$$\tau_{ff} = \frac{(K_f - K_c)\tau_{(ff-K_c=1)} + (K_c - 1)\tau_{(ff-K_c=K_f)}}{K_f - 1} \quad (24)$$

4.1.1.2.2 Cálculos de la segunda Fase

4.1.1.2.2.1 Tercera Etapa

Los resultados de la tercera etapa son mostrados en la tabla 5. Los parámetros de resistencia al corte de los esfuerzos efectivos se asignan con $c_2' = \tau_{ff}$, $\Phi'_2 = 0^\circ$ y se utilizan para todas las dovelas. La presión de poros en esta fase es ignorada, debido a que el nivel freático (después del desembalse) está por debajo de todas las dovelas. Si en la base de algunas de las dovelas está localizada sobre suelos que drenan libremente, el esfuerzo efectivo, los parámetros de resistencia al corte (c' y Φ') y la presión de poros apropiada, serán asignados a estas dovelas para los cálculos de la tercera etapa. La presión de poros para los suelos que drenan libremente sería para este desembalse.

Para los cálculos de estabilidad de esta etapa, se halló un factor de seguridad F.S.=2.32 donde los valores asumidos y calculados son iguales (iteración).

4.1.1.2.2.2 Cuarta Etapa

Los resultados para la evaluación de la resistencia para el análisis de la tercera etapa, son mostradas en la tabla 6. Las resistencias cortantes para suelos drenados calculadas en esta etapa, se comparan con los esfuerzos cortantes sin drenar (calculado en la segunda etapa), τ_{ff} , usados en los cálculos de la segunda etapa para determinar cuál de las dos es más baja. Si la resistencia al corte drenado (S_d) es menor para cualquier dovela, se requiere una tercera fase de los cálculos. En este caso, los parámetros de esfuerzos efectivos

cortantes, (c' y Φ'), se utilizan para los sectores donde las fuerzas cortantes drenadas son menores, y la resistencia al corte sin drenaje se utiliza para los cortes donde las fuerzas sin drenaje resulten menores. Para las resistencias al corte sin drenar, se utilizan los mismos cálculos de la tercera etapa. Si las resistencias de corte no drenadas son más bajas que las resistencias drenadas para todos los cortes, las resistencias al corte sin drenaje son más críticas y los cálculos en la tercera fase no son necesarios. En este caso, el factor de seguridad para el desembalse rápido es el factor de seguridad calculado para la segunda fase. Para hallar F.S. en la ecuación (26), se itera hasta que Z_{i+1} en la última dovela sea igual a cero.

Ecuaciones utilizadas:

$$N = \frac{W + P \cos \beta - (Z_i - Z_{i-1}) \sin \theta - (c'_2 - u \tan \Phi'_2) \frac{\Delta l \sin \alpha}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \Phi'_2}{F}} \quad (25)$$

$$Z_{i+1} = Z_i + \frac{C_1 + C_2 + C_3 - C_4}{m_a} \quad (26)$$

$$C_1 = W \left(\sin \alpha - \frac{\cos \alpha \cdot \tan \Phi'_2}{F} \right) \quad (27)$$

$$C_2 = (U_i - U_{i+1}) \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \Phi'_2}{F} \right) \quad (28)$$

$$C_3 = P \left[\sin(\alpha - \beta) - \frac{\cos(\alpha - \beta) \tan \Phi'_2}{F} \right] \quad (29)$$

$$C_4 = (c'_2 - u \tan \Phi'_2) \frac{\Delta l}{F} \quad (30)$$

$$m_a = \cos(\alpha - \theta) - \frac{\sin(\alpha - \theta) \tan \Phi'_2}{F} \quad (31)$$

$$\sigma = \frac{N}{\Delta l} \quad (32)$$

$$\sigma'_d = \sigma - u \quad (33)$$

$$\tau_{ff} = c'_2 + \sigma'_d \cdot \tan \Phi'_2 \quad (34)$$

$$S_d = c' + \sigma'_d \cdot \tan \Phi' \quad (35)$$

Si $S_d > \tau_{ff} \rightarrow$ usar resistencia drenada, de lo contrario usar resistencia no drenada.



4.1.1.2.3 Cálculos de la tercera Fase

4.1.1.2.3.1 Quinta Etapa

Para el ejemplo tratado, las resistencias drenadas son inferiores a las resistencias no drenadas para las dovelas 1 y 2; por lo tanto se requiere los resultados de la tercera fase, estos son mostrados en la tabla 7. En esta etapa las condiciones son las mismas utilizadas en la segunda fase, a excepción de los parámetros en la resistencia al corte y la presión de poros para las dovelas 1 y 2, donde la resistencia al corte es la menor para suelos drenados. Para estos sectores las presiones de poros se calculan a partir de la superficie piezométrica después del desembalse. Las presiones de poros se igualan a cero para los sectores donde se utilizan la resistencia cortante no drenada. Para el valor final del ensayo el factor de seguridad fue de $F = 2.02$. Este valor es el factor de seguridad después de una rápida caída de presión para este método.

Remplazando en la ecuación (15) los valores obtenidos de cada fase son:

$$F.S._1 = \frac{2239.98}{1494.09 - \frac{19793.86}{30}} = 2.68 \rightarrow \text{Valores de la Tabla 1}$$

$$F.S._2 = \frac{3461.16}{1494.09 - \frac{0}{30}} = 2.32 \rightarrow \text{Valores de la Tabla 3}$$

$$F.S._3 = \frac{3017.72}{1494.09 - \frac{0}{30}} = 2.02 \rightarrow \text{Valores de la Tabla 5}$$

Para $F.S._3$ se escogen los valores dependiendo si resultó resistencia drenada o resistencia no drenada.

Tabla 3. Cálculos de la primera etapa.

Dovela	b	h'	α	β	hs	dh	dv	hp	ΔL	Área	W	Wsin α	p	$\Delta L'$	P	Mp	U	c	Φ'	$cb+(W+P\cos\beta-ub)\tan\Phi$	ma	F
1	1.22	1.05	63	18	3.21	-26.76	12.95	0	2.69	1.281	25.62	22.83	32.10	1.28	41.18	-883.19	0.00	5	30	43.50	0.65	67.38
2	4	4.3	54	18	4.08	-24.15	13.82	0	6.81	17.2	344.00	278.30	40.80	4.21	171.60	-3208.45	0.00	5	30	312.83	0.76	410.67
3	4	7.28	43	18	5.41	-20.15	15.15	12.69	5.47	29.12	582.40	397.20	54.10	4.21	227.54	-3295.22	126.90	5	30	188.12	0.88	214.26
4	4	8.94	33	18	6.75	-16.15	16.49	15.69	4.77	35.76	715.20	389.53	67.50	4.21	283.89	-2913.86	156.90	5	30	226.46	0.96	236.94
5	4	9.71	24	18	8.08	-12.15	17.82	17.79	4.38	38.84	776.80	315.95	80.80	4.21	339.83	-2055.53	177.90	5	30	244.24	1.00	244.00
6	4	9.78	17	18	9.41	-8.15	19.15	19.19	4.18	39.12	782.40	228.75	94.10	4.21	395.77	-725.62	191.90	5	30	245.86	1.02	241.23
7	4	9.26	9	18	10.75	-4.15	20.49	20.01	4.05	37.04	740.80	115.89	107.50	4.21	452.13	1078.27	200.10	5	30	233.85	1.02	228.97
8	4	8.18	-2	18	12.08	-0.15	21.82	20.26	4.00	32.72	654.40	-22.84	120.80	4.21	508.07	3353.29	202.60	5	30	208.91	0.99	210.62
9	4	6.57	-8	18	13.41	3.85	23.15	19.98	4.04	26.28	525.60	-73.15	134.10	4.21	564.00	6099.88	199.80	5	30	171.73	0.96	178.82
10	4	4.4	-17	18	14.75	7.85	24.49	19.15	4.18	17.6	352.00	-102.91	147.50	4.21	620.36	9326.30	191.50	5	30	121.61	0.89	136.12
11	4	1.64	-25	18	16.08	11.85	25.82	17.72	4.41	6.56	131.20	-55.45	160.80	4.21	676.30	13018.00	177.20	5	30	57.87	0.82	70.97
Σ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1494.09	-	-	-	19793.86	-	-	-	-	-	2239.98

Tabla 4. Cálculos de la segunda etapa.

N	U	$\sigma'c$	S	τ	Kc	$\tau-kc=1$	$\tau-kc=kf$	Kf	τ_{ff}
93.44	0.00	34.77	27.68	10.30	1.83	40.53	25.07	3.85	36.06
652.37	0.00	95.86	163.18	23.98	1.68	111.69	60.35	3.28	96.51
1017.80	126.90	59.19	91.32	16.70	1.78	68.98	39.18	3.47	59.60
1117.41	156.90	77.38	100.45	21.06	1.75	90.17	49.68	3.36	77.35
1163.64	177.90	87.86	103.44	23.62	1.74	102.37	55.73	3.31	87.53
1184.28	191.90	91.23	102.54	24.51	1.73	106.30	57.67	3.30	90.76
1171.89	200.10	89.26	97.99	24.20	1.74	104.01	56.54	3.31	88.73
1141.03	202.60	82.48	90.94	22.72	1.76	96.11	52.62	3.33	82.01
1081.80	199.80	68.02	78.85	19.52	1.79	79.26	44.27	3.41	67.71
1000.54	191.50	47.71	62.36	14.91	1.88	55.60	32.54	3.60	47.78
866.78	177.20	19.19	37.30	8.45	2.36	22.38	16.08	4.75	20.09

Tabla 5. Cálculos de la tercera etapa.

Dovela	b	h'	Àrea	W	α	Wsin α	hs	hp	c_2	Φ'_2	p	β	l'	P	dh	dv	Mp	u	cb+(W+Pcos β -ub)tan Φ	ma	F
1	1.22	1.05	1.281	25.62	63	22.83	0	0	36.06	0	0	18	1.28	0	0	0	0	0	43.99	0.45	96.90
2	4	4.3	17.2	344.00	54	278.30	0	0	96.51	0	0	18	4.21	0	0	0	0	0	386.06	0.59	656.80
3	4	7.28	29.12	582.40	43	397.20	0	0	59.60	0	0	18	4.21	0	0	0	0	0	238.41	0.73	325.99
4	4	8.94	35.76	715.20	33	389.53	0	0	77.35	0	0	18	4.21	0	0	0	0	0	309.40	0.84	368.92
5	4	9.71	38.84	776.80	24	315.95	0	0	87.53	0	0	18	4.21	0	0	0	0	0	350.14	0.91	383.27
6	4	9.78	39.12	782.40	17	228.75	0	0	90.76	0	0	18	4.21	0	0	0	0	0	363.06	0.96	379.64
7	4	9.26	37.04	740.80	9	115.89	0	0	88.73	0	0	18	4.21	0	0	0	0	0	354.92	0.99	359.35
8	4	8.18	32.72	654.40	-2	-22.84	0	0	82.01	0	0	18	4.21	0	0	0	0	0	328.03	1.00	328.23
9	4	6.57	26.28	525.60	-8	-73.15	0	0	67.71	0	0	18	4.21	0	0	0	0	0	270.86	0.99	273.52
10	4	4.4	17.6	352.00	-17	-102.91	0	0	47.78	0	0	18	4.21	0	0	0	0	0	191.14	0.96	199.87
11	4	1.64	6.56	131.20	-25	-55.45	0	0	20.09	0	0	18	4.21	0	0	0	0	0	80.36	0.91	88.67
Σ	-	-	-	-	-	1494.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	3461.16

Tabla 6. Cálculos de la cuarta etapa.

ΔL	N	hp	U	σ drenado	τ ff	sd	Resistencia
2,69	-8,08	0	0	-3,01	36,06	3,26	D
6,81	204,83	0	0	30,10	96,51	22,38	D
5,47	564,55	0	0	103,22	59,60	64,59	U
4,77	676,18	0	0	141,77	77,35	86,85	U
4,38	734,26	0	0	167,70	87,53	101,82	U
4,18	750,65	0	0	179,46	90,76	108,61	U
4,05	735,32	0,01	0,1	181,47	88,73	109,77	U
4,00	703,01	0,26	2,6	173,04	82,01	104,91	U
4,04	600,16	0	0	148,58	67,71	90,78	U
4,18	453,23	0	0	108,36	47,78	67,56	U
4,41	196,59	0	0	44,54	20,09	30,72	U

Tabla 7. Cálculos de la quinta etapa.

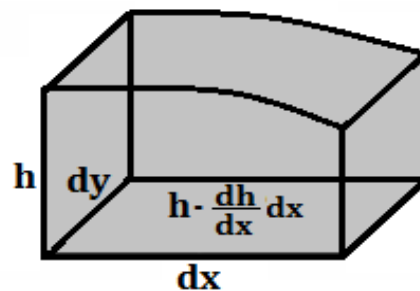
u	c	Φ'	$cb+(W+P\cos\beta-ub)\tan\Phi$	ma	F
0	5	30	20.89	0.67	31.21
0	5	30	218.61	0.78	279.05
0	59.6	0	238.41	0.73	325.99
0	77.35	0	309.40	0.84	368.92
0	87.53	0	350.14	0.91	383.27
0	90.76	0	363.06	0.96	379.64
0	88.73	0	354.92	0.99	359.35
0	82.01	0	328.03	1.00	328.23
0	67.71	0	270.86	0.99	273.52
0	47.78	0	191.14	0.96	199.87
0	20.09	0	80.36	0.91	88.67
-	-	-	-	-	3017.72

4.1.2 Calculo de la ubicación del nivel freático

Uno de los mayores problemas que se tiene al estudiar el comportamiento de un talud por desembalse rápido, consiste en la incertidumbre de la posición del nivel freático que tendrá.

El modelo matemático que se utilizó para determinar el nivel freático de la presa en este trabajo, fue el propuesto por Dvinoff y Harr en 1971 [7]; para llegar a la ecuación que ellos emplearon se expone el siguiente procedimiento.

Figura 5. Volumen de control.



Primero obtendremos una expresión, para saber cuál es el volumen acumulado de agua en el talud; esta se puede expresar por medio de la ecuación de porosidad.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \rightarrow V_t = \partial x \cdot \partial y \cdot \partial h \quad (36)$$

En este caso se trabaja con la porosidad efectiva “ λ ” por ser un caso más realista, y se asume que el volumen de vacíos está lleno de agua (V_w).

$$V_v = V_w = \lambda \cdot \partial x \cdot \partial y \cdot \partial h \quad (37)$$

El volumen acumulado de agua, también se puede expresar como la diferencia del caudal de entrada por el caudal de salida, multiplicando dicha resta por un diferencial de tiempo; los caudales de entrada y de salida se pueden expresar mediante la ecuación de Darcy. El caudal de salida tendrá la misma expresión que el caudal de entrada, excepto en que en el primero se tendrán en cuenta las pérdidas.

Se asume que el material es homogéneo e isotrópico.

$$V_w = [Q_{Ent} - Q_{Sal}] \cdot \partial t \quad (38)$$

$$Q_{Ent} = k \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot h \cdot \partial y \quad (39)$$

$$Q_{Sal} = k \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(h - \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \partial x \right) \cdot h \cdot \partial y \quad (40)$$

$$Q_{Sal} = \left(\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \partial x \right) \cdot k \cdot h \cdot \partial y \quad (41)$$

$$V_w = k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \partial x \cdot h \cdot \partial y \cdot \partial t \quad (42)$$

Igualando las Ecuaciones (37) y (42):

$$V_w = \lambda \cdot \partial x \cdot \partial y \cdot \partial h = k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \partial x \cdot h \cdot \partial y \cdot \partial t$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k \cdot h}{\lambda} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) \quad (43)$$

Para la resolución de esta ecuación diferencial, aplicamos el método de las diferencias finitas, por lo tanto la ecuación (43) se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{h_{t+1,i} - h_{t-1,i}}{2\Delta t} = \frac{k \cdot h_{t,i}}{\lambda} \left(\frac{h_{t,i+1} - 2 \cdot h_{t,i} + h_{t,i-1}}{\Delta x^2} \right) \quad (44)$$

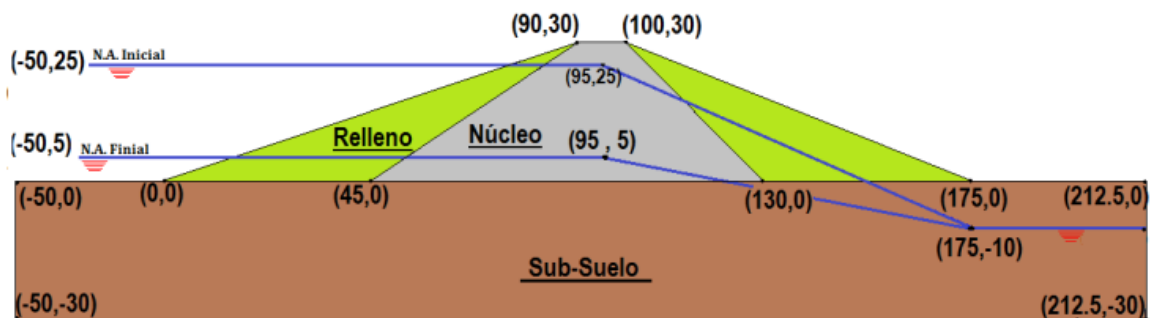
La ecuación (44) se puede reescribir:

$$C \cdot (h_{t,i+1} - 2 \cdot h_{t,i} + h_{t,i-1}) \cdot h_{t,i} + h_{t-1,i} - h_{t+1,i} = 0 \quad (45)$$

$$C = \left(\frac{2 \cdot \Delta t \cdot k}{\lambda \Delta x^2} \right) \quad (46)$$

Los valores de frontera se pueden obtener al analizar el gráfico de la presa, antes y después del desembalse.

Figura 6. Coordenadas del modelo



En este caso, se planteó que el desembalse será de 5 días, por lo tanto, se puede plantear que las condiciones de frontera, del nivel freático respecto al tiempo son:

$$h_{t,0} = -4t + 25 \text{ [m]} \quad (47)$$

$$h_{t,212.5} = -10 \text{ [m]} \quad (48)$$

Para el caso de los valores de frontera de la variable en x , se realizó una interpolación polinomial de grado 2, de la tendencia de la cabeza hidráulica respecto a la distancia, para que de esta forma se pudiera obtener una ecuación aproximada de dichos puntos. Los puntos se tomaron cada metro respecto a la cabeza hidráulica (h).

$$h_{0,x} = -0.0013x^2 + 0.0987x + 24.04 \text{ [m]} \quad (49)$$

$$h_{5,x} = -0.0005x^2 + 0.0423x + 4.5887 \text{ [m]} \quad (50)$$

A continuación se hallaron los valores de las constantes:

$$\Delta t = \frac{5 - 0}{11} = \frac{5}{11} \quad (51)$$

$$\Delta x = \frac{212.5 - 0}{11} = \frac{425}{22} \quad (52)$$

El valor de la constante “c” de la ecuación (46), varía a lo largo de la presa, ya que para el relleno, el subsuelo y el núcleo poseen permeabilidades diferentes (ver tabla 2), como también de las porosidades efectivas con valores de 0.25, 0.25 y 0.01 [8] respectivamente, de ahí se obtuvieron los siguientes valores:

$$c_1 = 2,44.10^{-3} m^{-1} \quad c_2 = 1,95.10^{-4} m^{-1} \quad c_3 = 2,44.10^{-5} m^{-1}$$

Para este caso se trabajó con un único valor “c”, para hacer más sencillo el análisis matemático; el valor escogido fue el promedio de las 3 constantes.

$$C = \frac{2,44.10^{-3} + 1,95.10^{-4} + 2,44.10^{-5}}{3} = 8,9.10^{-4} m^{-1}$$

Después de esto se planteó y se resolvió la serie de ecuaciones que resultaban de dicho método, para este trabajo se trabajó con 11 intervalos para cada variable, obteniendo 100 ecuaciones en total. Todo este proceso matemático fue elaborado en una hoja de Excel, y las ecuaciones resueltas con la herramienta Solver, para que finalmente se obtuviera la posición del nivel freático para un determinado tiempo y distancia que se quisiera saber; cabe resaltar que este método es aproximado y puede diferir con el posible valor real de la presa, pero nos permite tener una idea del proceso de desembalse. Los resultados son mostrados en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados del cálculo de la ubicación del nivel freático por el método de diferencias finitas.

5.00	5	5.22	5.48	5.36	4.87	4.01	2.77	1.17	-0.82	-3.17	-5.90	-10
4.55	6.82	5.21	3.58	1.95	0.34	-1.25	-2.80	-4.32	-5.79	-7.22	-8.62	-10
4.09	8.64	7.08	5.49	3.87	2.22	0.53	-1.18	-2.91	-4.67	-6.43	-8.21	-10
3.64	10.45	8.71	6.93	5.12	3.28	1.43	-0.45	-2.34	-4.24	-6.16	-8.08	-10
3.18	12.27	10.36	8.42	6.45	4.45	2.43	0.39	-1.67	-3.74	-5.82	-7.91	-10
2.73	14.09	12.02	9.91	7.77	5.61	3.42	1.21	-1.01	-3.24	-5.49	-7.74	-10
2.27	15.91	13.67	11.40	9.09	6.77	4.41	2.04	-0.35	-2.75	-5.16	-7.58	-10
1.82	17.73	15.32	12.89	10.42	7.92	5.41	2.87	0.32	-2.25	-4.83	-7.41	-10
1.36	19.55	16.98	14.38	11.76	9.10	6.42	3.72	0.99	-1.74	-4.49	-7.24	-10
0.91	21.36	18.68	15.96	13.20	10.40	7.56	4.70	1.80	-1.13	-4.07	-7.03	-10
0.45	23.18	20.70	18.15	15.50	12.73	9.82	6.78	3.60	0.31	-3.08	-6.53	-10
0.00	25	25.46	25.91	25.39	23.90	21.44	18.01	13.61	8.24	1.90	-5.41	-10
-	0	19.32	38.64	57.95	77.27	96.59	115.91	135.23	154.55	173.86	193.18	212.50

Los datos en color negro son los valores de las variables discretizadas (tiempo en la columna y el abscisado de la presa en la última fila), los valores en color rojo son los valores de frontera (obtenidos de la ecuaciones 47, 48, 49 y 50), y los valores en color azul, son los valores de cada nodo hallado (la posición del

nivel freático para un determinado tiempo y posición). Con los resultados de la tabla 8, es posible calcular el factor de seguridad con el método USACE, para cualquier tiempo que se desee analizar de desembalse.

4.2 Modelo estándar

Este fue el modelo en el que se basó todo el proyecto, debido a que sirvió de patrón de comparación de los demás modelos, sus propiedades están mostradas en la tabla 2. La altura de esta presa es de 30 metros con dimensiones de núcleo mediano (ver tabla 11). Los resultados de cada fase modelada en el programa PLAXIS, son mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de la presa del modelo estándar.

Fase	Deformación máxima [m]	F.S.
Llenado Embalse	0.174	1.622
Desembalse Rápido	0.1796	1.244
Desembalse Lento	0.1752	1.322
Desembalse E.E.	0.1475	1.645

4.3 Presa homogénea

Aunque este proyecto se enfocó exclusivamente al estudio de presas con núcleo, se aceptó la sugerencia de los directores del proyecto, de hacer una comparación de una presa homogénea y una presa con núcleo. Para que dicha comparación tuviera validez, se dejaron todos los valores exactamente igual, solo que en la presa homogénea en su parte superior se dejó toda con material de relleno; aunque en realidad esta comparación es desventajosa para la presa homogénea, debido a que no se tuvo en cuenta ningún tipo de ayuda de drenaje, como si lo tenía la presa con núcleo (su núcleo mismo es la ayuda). Los resultados obtenidos de la presa homogénea son mostrados en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados del modelo de presa homogénea.

Fase	Deformación máxima [m]	F.S.
Llenado Embalse	0.1429	1.016
Desembalse Rápido	0.1372	1.013
Desembalse Lento	0.113	1.112
Desembalse E.E.	0.117	1.705

Podemos observar que estos valores son inferiores a los de la presa con núcleo (Modelo Estándar), así que de forma general, podemos decir que en una presa con núcleo, las deformaciones máximas son mayores que en una presa homogénea; también sus factores de seguridad serán mayores, excepto cuando el desembalse sea en condiciones de Estado Estacionario.

4.4 Variación de la geometría

4.4.1 Variación en las dimensiones del núcleo

El primer estudio con varios modelos, consistió en el análisis del factor de seguridad y la deformación máxima en una presa respecto a su altura y las dimensiones de su núcleo impermeable, cabe aclarar que se dejó la cresta de la presa con una dimensión de 10 metros para todos los casos, debido a que se contempló que por dicha cresta pudiera haber tránsito de vehículos, aunque en realidad, el ancho de la cresta depende de la altura de la presa [9-10]. Las dimensiones tanto en la parte de aguas arriba, como de aguas abajo son mostradas en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores de geometría trabajados en el proyecto.

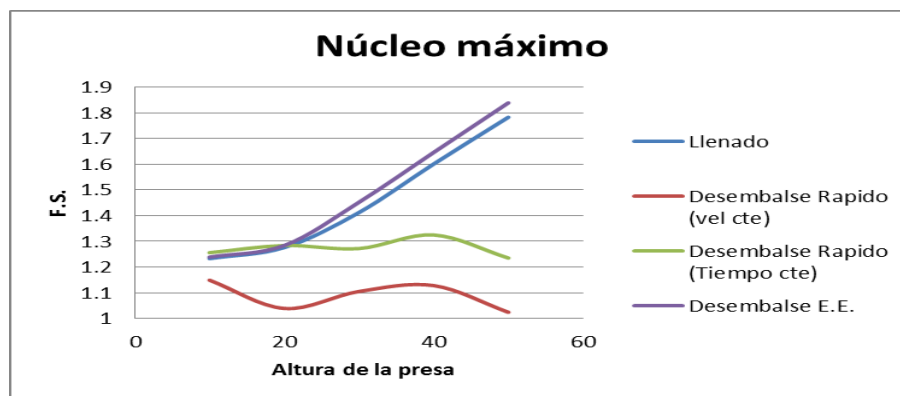
Altura	Pendiente Talud Presa	Pendiente Núcleo Máximo	Pendiente Núcleo Medio	Pendiente Núcleo Mínimo
10	2:1 - 1.5:1	1.5:1 - 1:1	1.5:1 - 1:1	0:1 - 0:1
20	2.5:1 - 2:1	2:1 - 1.5:1	1.5:1 - 1:1	0.25:1 - 0.25:1
30	3:1 - 2.5:1	2.5:1 - 2:1	1.5:1 - 1:1	1/3:1 - 1/3:1
40	3.5:1 - 3:1	3:1 - 2.5:1	1.5:1 - 1:1	0.375:1 - 0.375:1
50	4:1 - 3.5:1	3.5:1 - 3:1	1.5:1 - 1:1	0.4:1 - 0.4:1

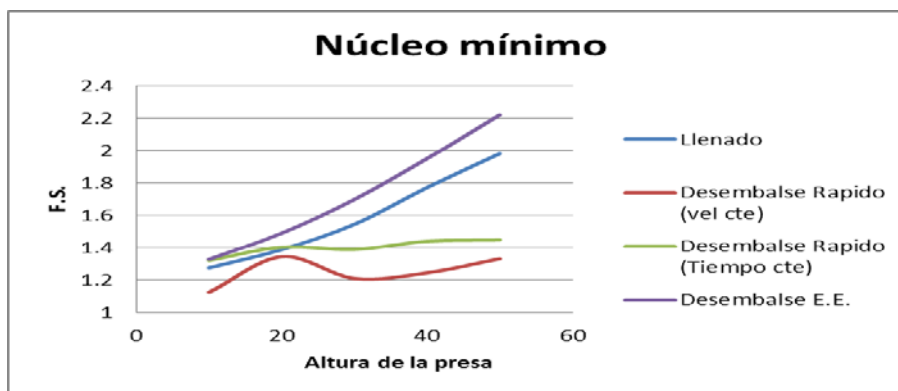
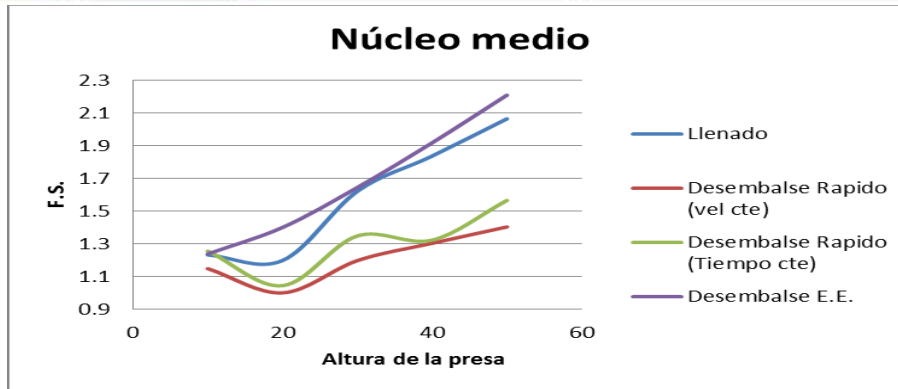
En total con estas variaciones se analizaron 15 modelos (variando la pendiente del núcleo[3], y las alturas con sus correspondientes pendientes[11]; para estos casos no se analizaron las 4 fases comentadas anteriormente, si no que se trabajó con fases distintas como: una fase de llenado de la presa, una fase con un desembalse a velocidad constante de 0.25 m/día, una fase de desembalse para un tiempo constante de 5 días y una fase de desembalse en condiciones de Estado Estacionario; esto para trabajar con las tres variables del desembalse a saber, altura, velocidad y tiempo; ya que se quiso evitar pensar que al tener una determinada velocidad o un determinado tiempo, la altura de la presa hubiera tenido una influencia en los resultados. Para cada fase se hallaron los respectivos valores de factores de seguridad y deformación.

Se supusieron todos los embalses con un llenado del 90% de la altura total de la presa y los desembalses que fueran hasta un nivel del 10 % de la altura total de la presa.

Una vez hecho esto, se graficaron los resultados para así analizarlos de una forma más clara. Los resultados son mostrados en las Fig. 7 y 8.

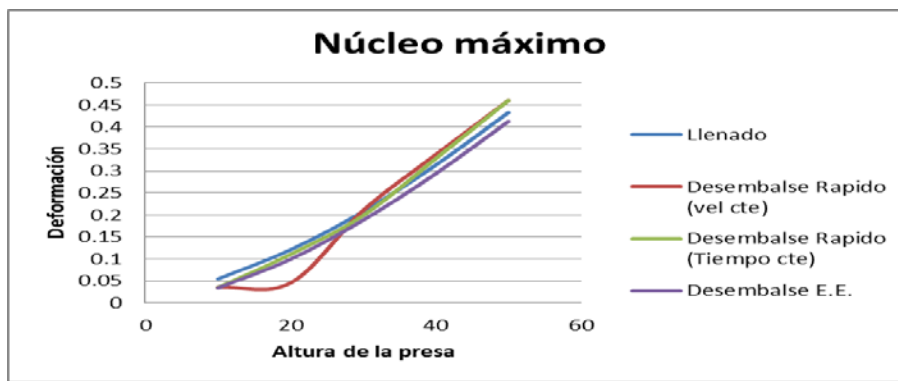
Figura 7. Variación del Factor de seguridad respecto a las dimensiones del núcleo.

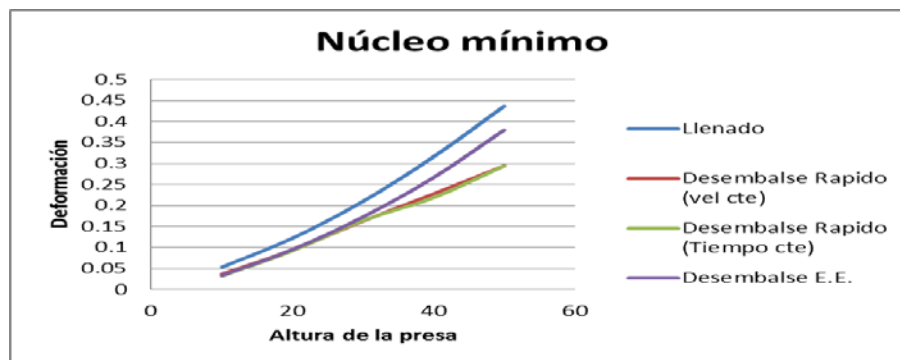
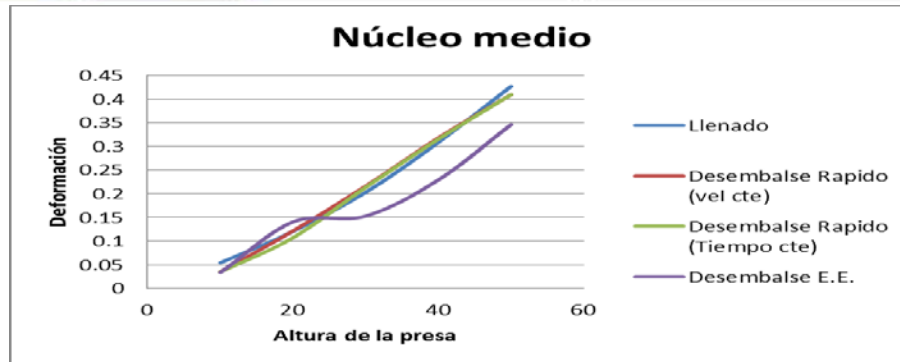




Se puede apreciar en las gráficas de las Fig. 7, tienen una clara tendencia de que el factor de seguridad es proporcional a la altura de la presa para las fases de llenado y desembalse en estado estacionario, pero para las fases de desembalse rápido es de tendencia constante, excepto en el caso donde la pendiente del núcleo es medio, puesto ahí se ve que tiende a ser proporcional con la altura, reflejando que las dimensiones medianas de núcleo son las apropiadas para aumentar el F.S. respecto a la altura de la presa.

Figura 8. Variación de la deformación respecto a las dimensiones del núcleo.





Al analizar las gráficas de las Fig. 8, se pueden apreciar que la deformación máxima de las presas es proporcional a la altura de la presa, lo cual es coherente conceptualmente, pues un objeto tendrá mayor deformación si es más largo o alto, si las condiciones que está sometido no varían.

4.4.2 Variación de las alturas del embalse

Este análisis consistió en la observación del factor de seguridad y la deformación máxima de la presa, respecto a la variación de la altura en un desembalse, en función del porcentaje de la altura de una presa. En otras palabras, se quiso saber cuál era el nivel de desembalse más peligroso en la presa, si un descenso grande, o un descenso pequeño; se supuso a la presa con un llenado, en el que el nivel del agua fuera del 90% de la altura de la presa, y la variación del descenso de la lámina de agua respecto a la altura de la presa fuera de 80%, 60%, 40% y 20%; por ejemplo para una presa de 10 metros, los desembalses fueron de: 9 a 8 metros, de 9 a 6 metros, de 9 a 4 metros y de 9 a 2 metros, todos estos a una velocidad constante de 0.2 m/día; esto se puede apreciar mejor en la Fig. 9. Los datos de este análisis se multiplicaron por 3, debido a que se tuvo en cuenta la variación del núcleo de la presa (ver tabla 11), con dimensiones máximas (línea azul), dimensiones medianas (línea roja) y dimensiones mínimas (línea verde).

Una vez hecho esto, se graficaron los resultados para así analizarlos de una forma más clara. Los resultados son mostrados en las Fig. 10 y 11.

Figura 9. Niveles de Variación del desembalse.

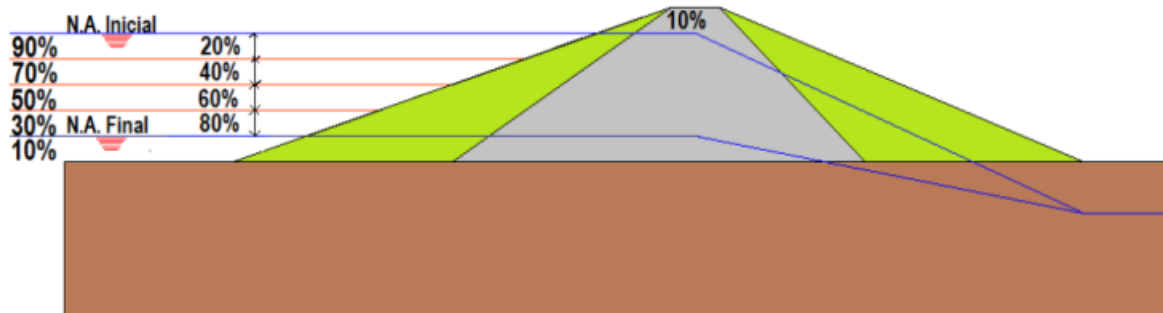
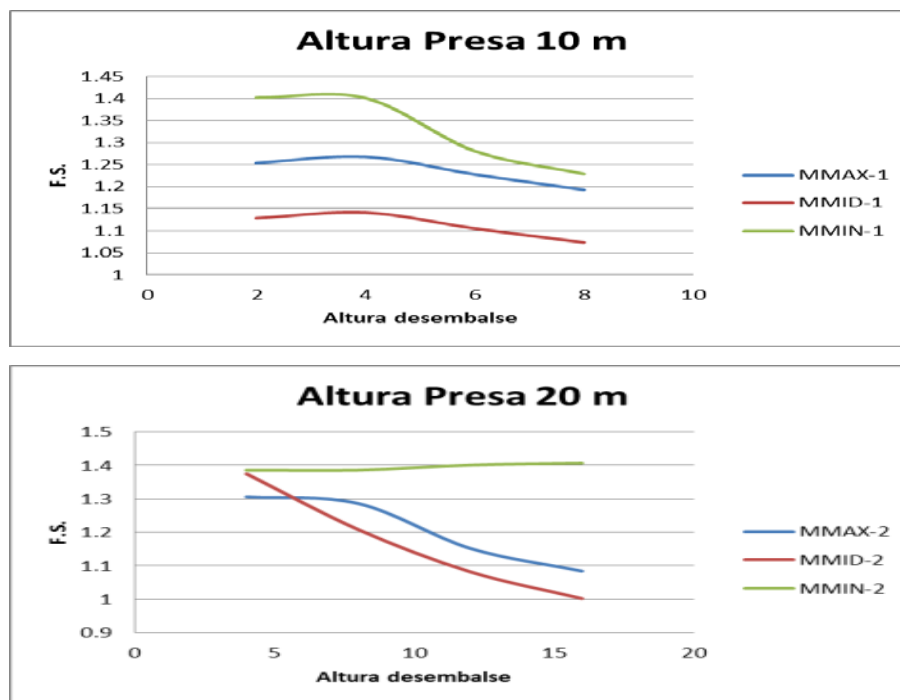
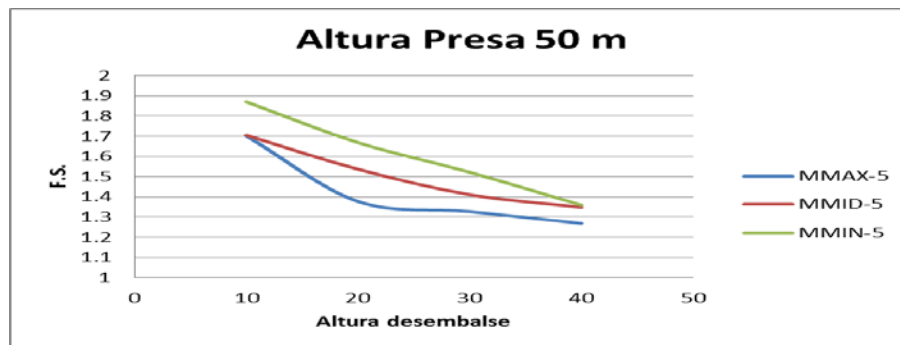
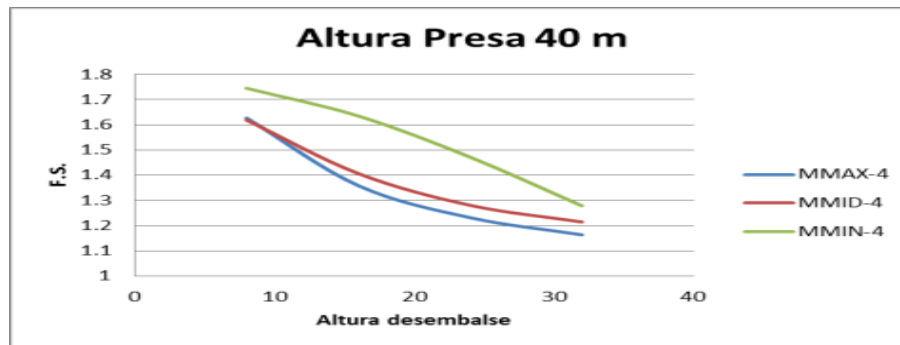
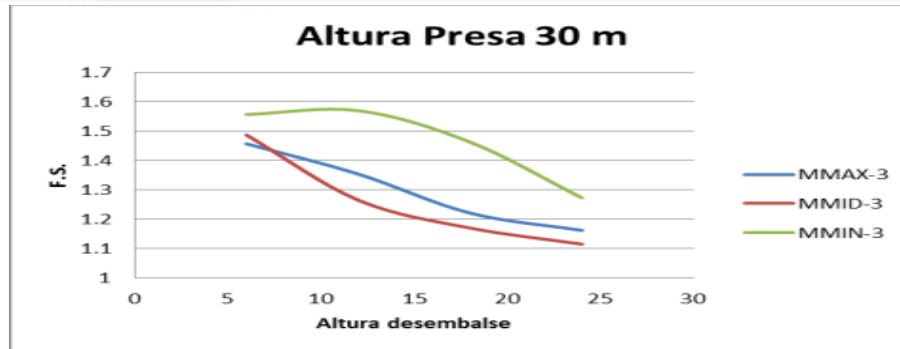


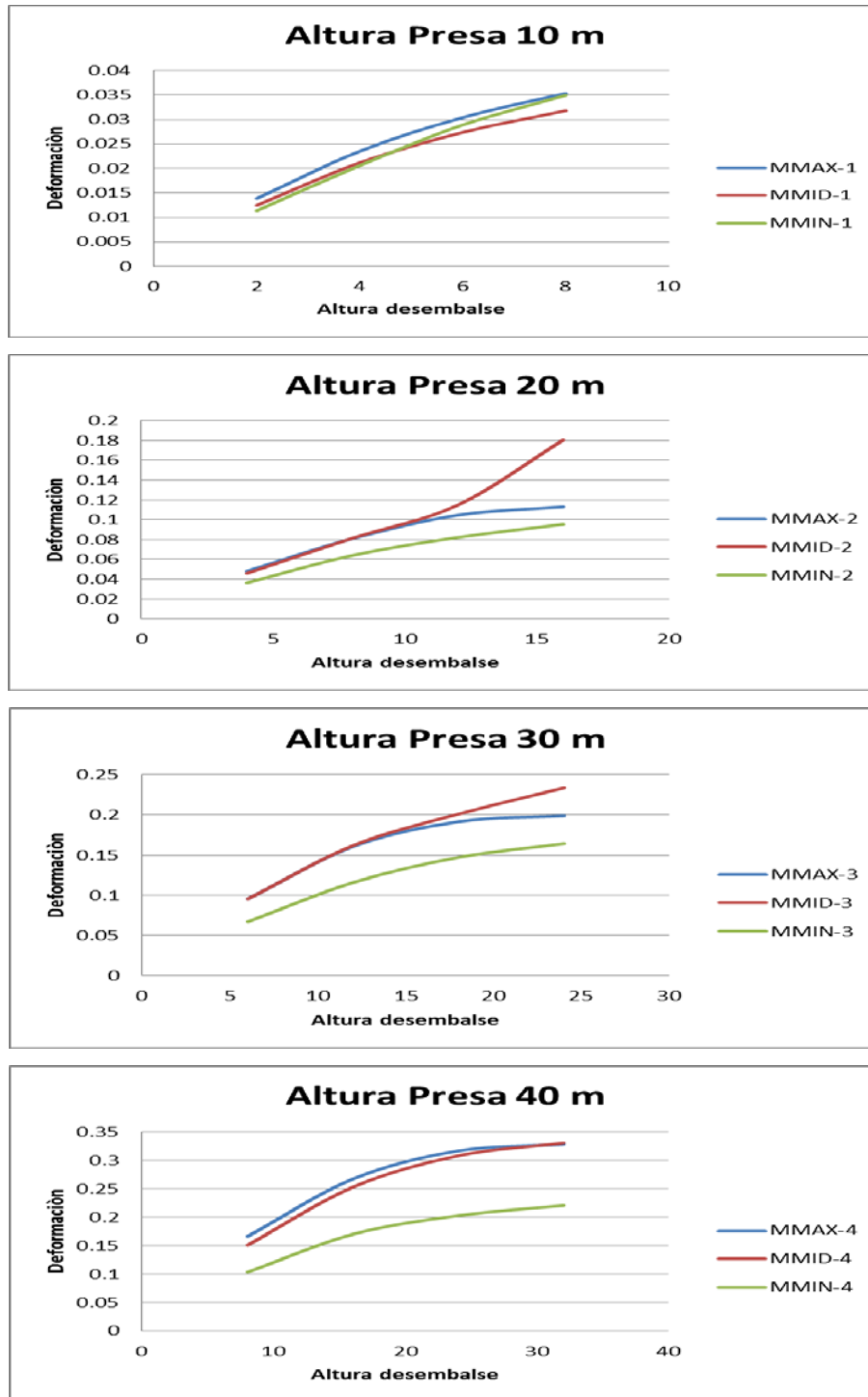
Figura 10. Variación del Factor de seguridad respecto a la altura del desembalse.

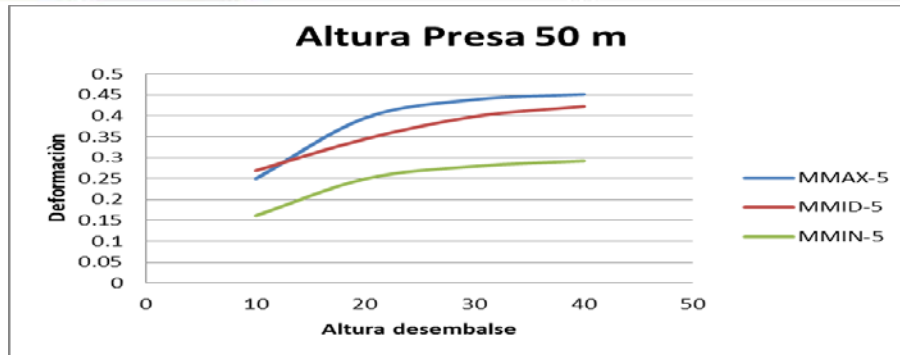




Se puede apreciar una tendencia en las gráficas de que el factor de seguridad es inversamente proporcional respecto a la altura de los desembalses, es decir, a mayor variación de la altura que ocurra en el desembalse, menor será el factor de seguridad. También se puede ver que las presas con un núcleo mínimo tienen mayor factor de seguridad, seguido de un núcleo con dimensiones máximas para presas de altura de 10,20 y 30 metros, y de núcleo con dimensiones medianas para presas de 40 y 50 metros.

Figura 11. Variación de la deformación respecto a la altura del desembalse.





De la Fig. 11 se puede ver que la deformación máxima que ocurrirá en un desembalse, es proporcional a la variación de la diferencia del nivel de desembalse.

También se puede ver que para una presa con núcleo máximo, se tendrán las mayores deformaciones máximas, seguido de una presa de núcleo con dimensiones medianas y por ultimo una con núcleo de dimensiones mínimas.

4.5 Variación de materiales (Parámetros de resistencia)

Para el caso del análisis respecto a los materiales, las variables que se analizaron fueron: la cohesión, el ángulo de fricción, la permeabilidad, el peso específico saturado, el peso específico no saturado, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson; estas variables fueron analizadas, para el relleno, el núcleo y el subsuelo de la presa del modelo estándar. Para cada caso su variación fue diferente dependiendo del caso a utilizar, tomando los valores que normalmente se utilizan para estos casos. En la tabla 12 se puede apreciar la variación de dichos valores.

Tabla 12.Valores de los materiales trabajados en este proyecto.

Material	Núcleo	Relleno	Subsuelo
Cohesión [kn/m ²]	5-25	10-90	5-50
Ángulo de fricción [grado]	24-32	25-45	25-35
Peso Esp. Sat. [kn/m ³]	14-16	19-23	18-22
Peso Esp. No Sat. [kn/m ³]	18-20	17-21	16-20
Módulo de Young [kn/m ²]	5000-10000	34500-55000	17000-34875
Poisson [-]	0.2-0.4	0.3-0.4	0.25-0.4
Permeabilidad [m/día]	1.00e-4 - 1.00e-8	1.00e-1 - 1.00e-5	1.00- 1.00e-4

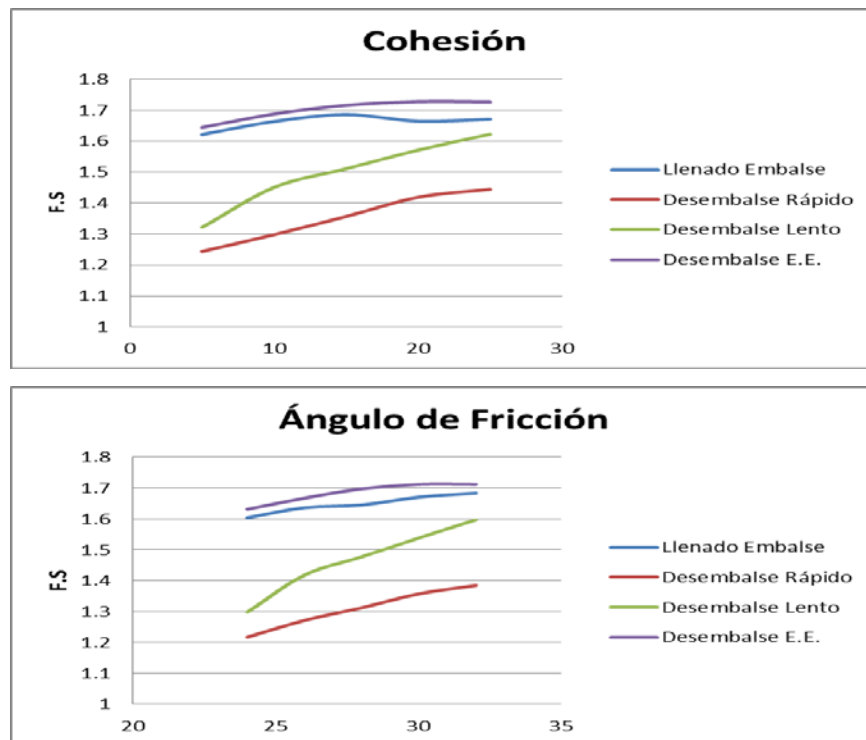
Estos valores fueron discretizados para tener un rango de 5 valores, por ejemplo, para la cohesión del núcleo, los valores fueron: 5, 10, 15, 20 y 25.

Después de esto, se hizo lo mismo que en el caso de la variación de la geometría, se graficaron los valores de los factores de seguridad y deformación máxima para cada caso correspondiente.

4.5.1 Variación en el Núcleo

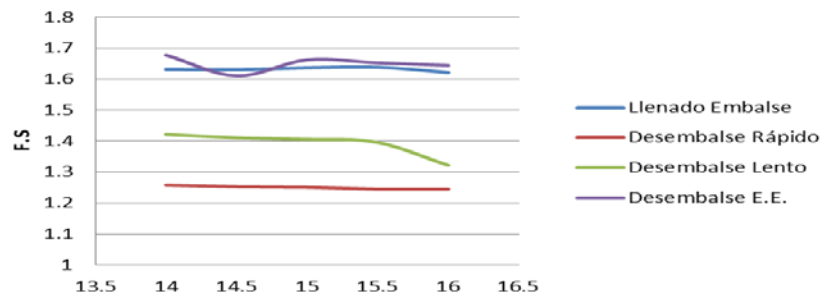
Las gráficas de las Fig. 12 y 13, muestran el comportamiento del factor de seguridad y la deformación máxima que se generan en la presa (Modelo Estándar), cuando se cambiaba una variable del material, como por ejemplo la cohesión en el núcleo, dejando como constante las demás variables. Para este caso solo se tuvo en cuenta la variación en el núcleo y no en el relleno ni en el subsuelo de la presa. Cabe resaltar que para cada modelo se trabajó con las 4 etapas descritas al inicio.

Figura 12. Variación del factor de seguridad respecto a los materiales del núcleo.

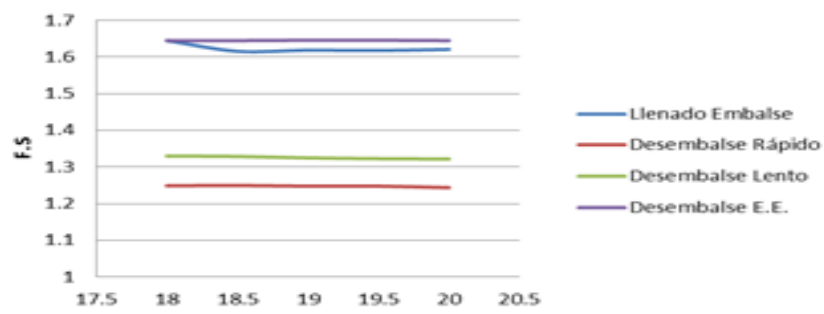




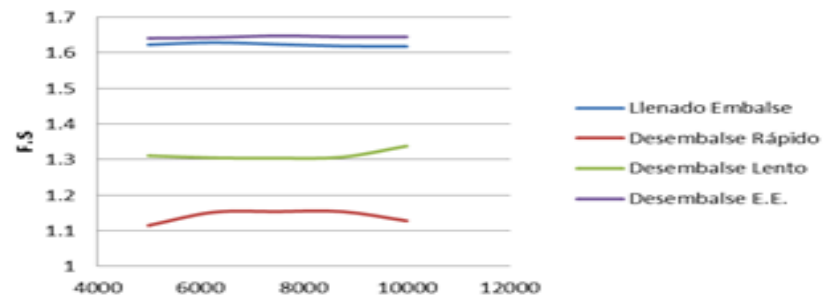
Peso Específico no saturado



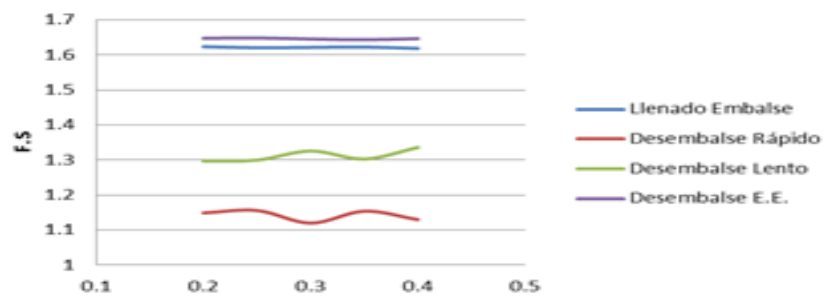
Peso Específico Saturado

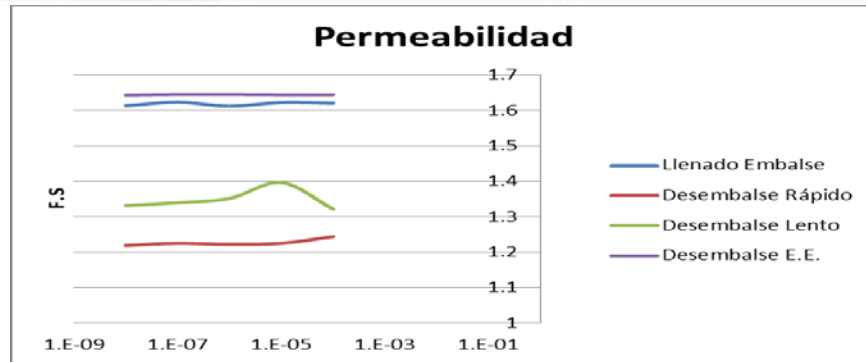


Módulo de Young



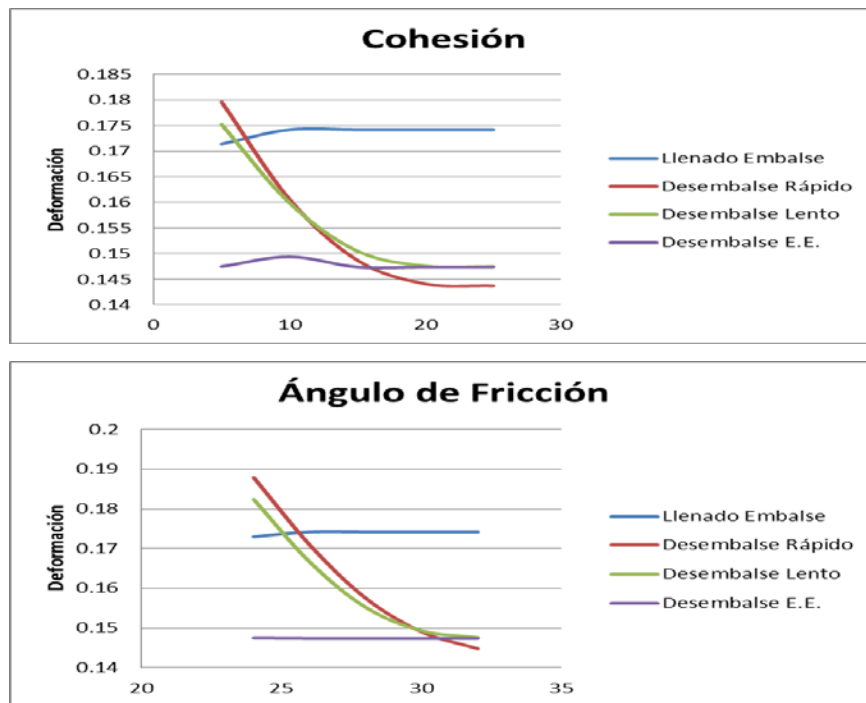
Poisson

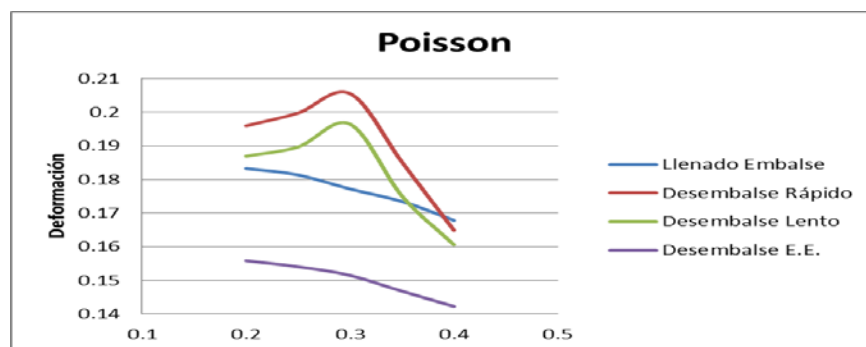
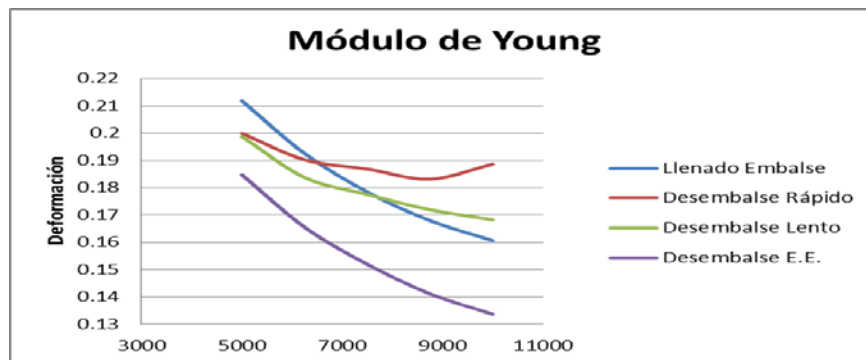
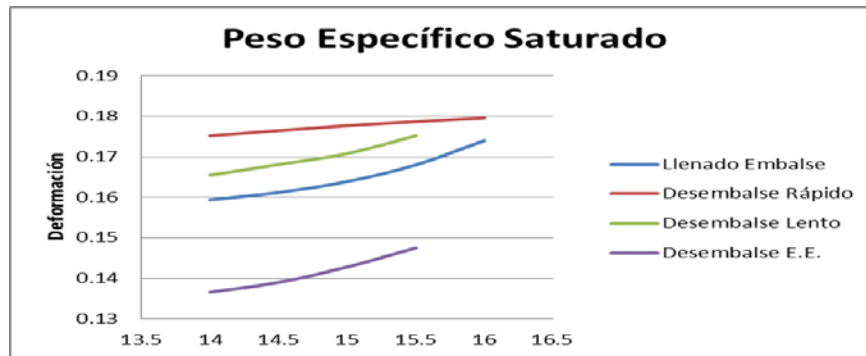
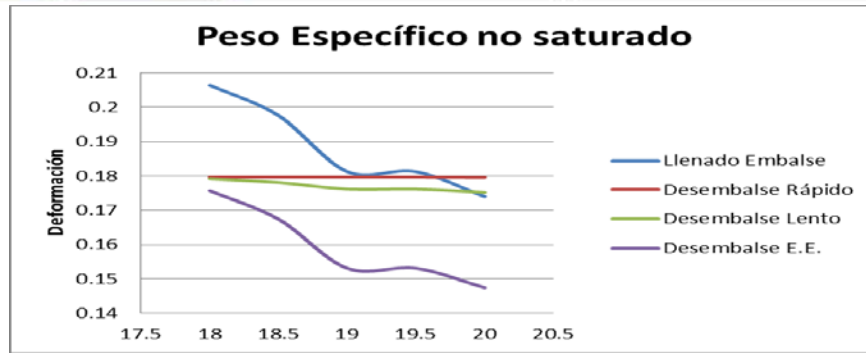


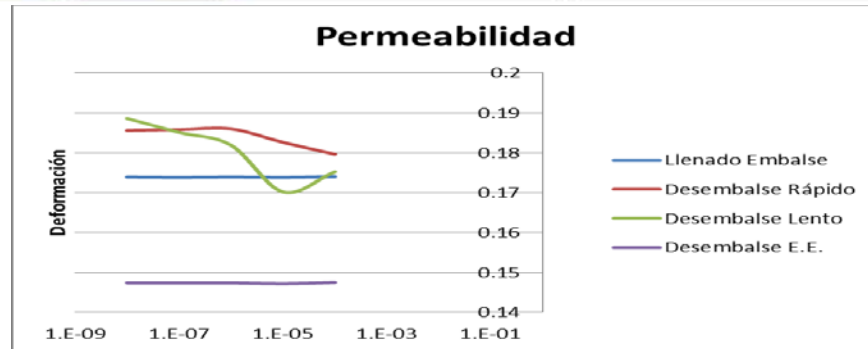


En la Fig. 12 el F.S. tiene un comportamiento proporcional en el caso de la cohesión y al ángulo de fricción, pero respecto a los demás materiales podemos decir que su comportamiento es constante, lo cual es coherente, debido a que estas dos variables son los parámetros de resistencia, que proporcionan estabilidad en una presa; también se puede observar que el mayor F.S. es para un desembalse en estado estacionario, seguidos del llenado de un embalse, un desembalse lento y finalmente un desembalse rápido; de ahí se puede apreciar cual estado en su orden es más peligroso en una presa (menor F.S.).

Figura 13. Variación de la deformación respecto a los materiales del núcleo.





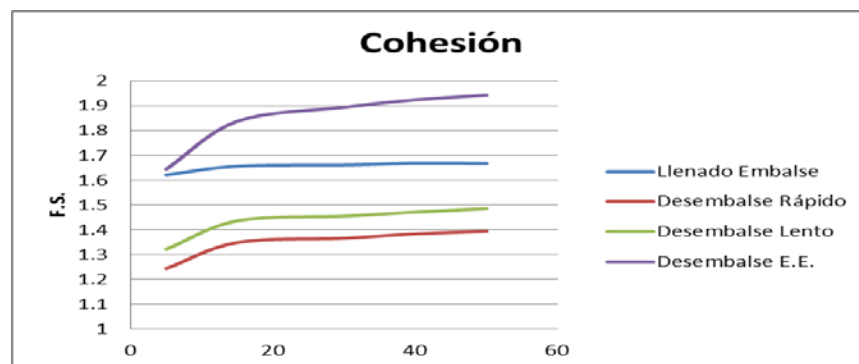


Ahora vemos que para las gráficas de las Fig. 13, las deformaciones de la presa, en las fases de desembalse rápido y lento, va disminuyendo proporcionalmente para las variables como la cohesión, el ángulo de fricción, el módulo de Young y la permeabilidad, para el coeficiente de Poisson se obtiene una máxima deformación con el valor de 0.3, y para los pesos específicos saturado y no saturados es de tendencia constante; para las fases de llenado de embalse y desembalse en estado estacionario se puede ver que para la cohesión, el ángulo de fricción y la permeabilidad son constantes, pero para Poisson, el módulo de Young y el peso específico no saturado son inversamente proporcionales, y solamente es proporcional para el caso del peso específico saturado.

4.5.2 Variación en el Relleno

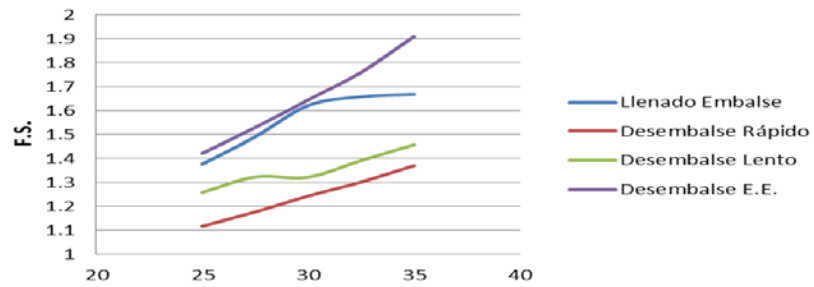
Para este análisis se hizo exactamente igual a lo que se hizo en el caso de la variación en el núcleo, excepto en que los valores fueron cambiados para el relleno y no para el núcleo. Los resultados son mostrados en las Fig. 14 y 15.

Figura 14. Variación del factor de seguridad respecto a los materiales del relleno.

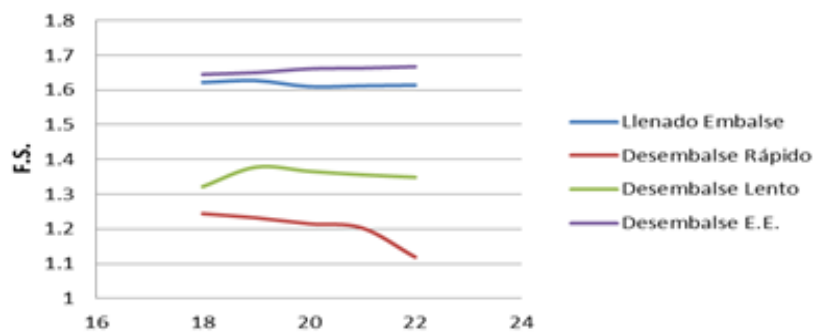




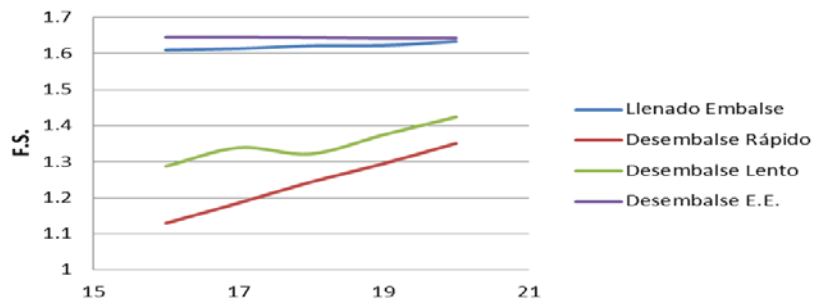
Ángulo de Fricción



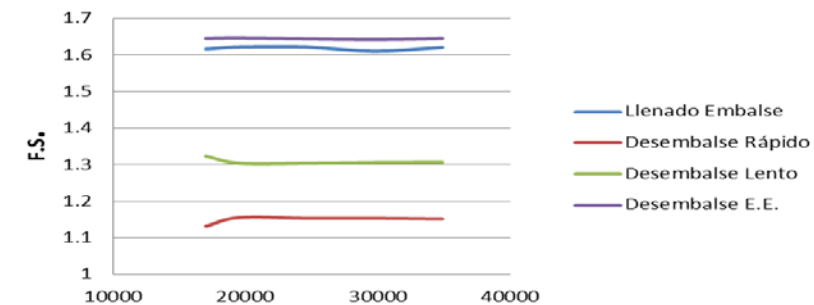
Peso Específico no saturado

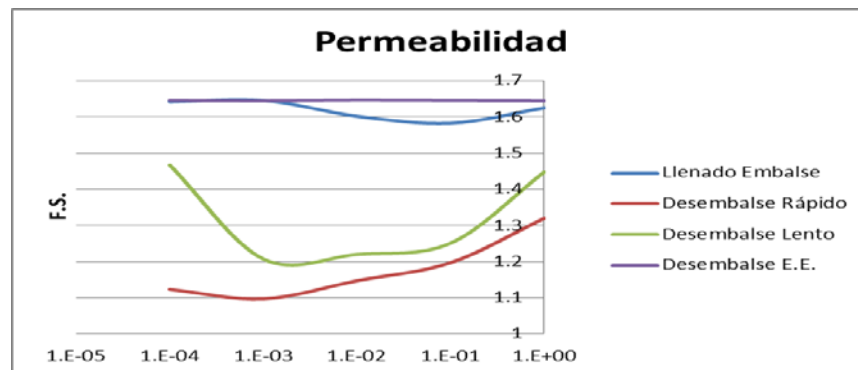
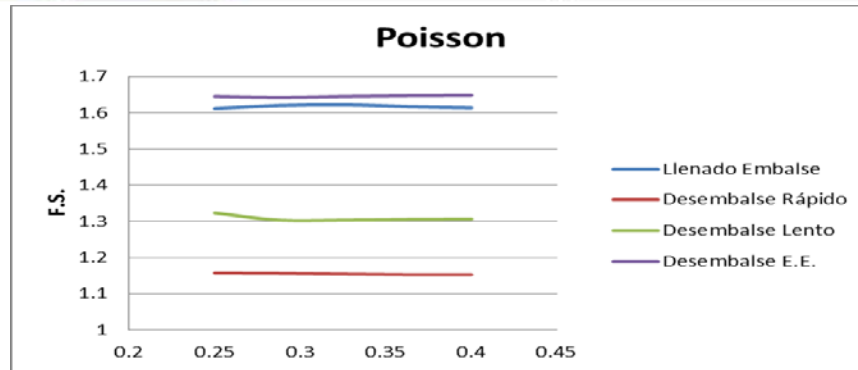


Peso Específico Saturado



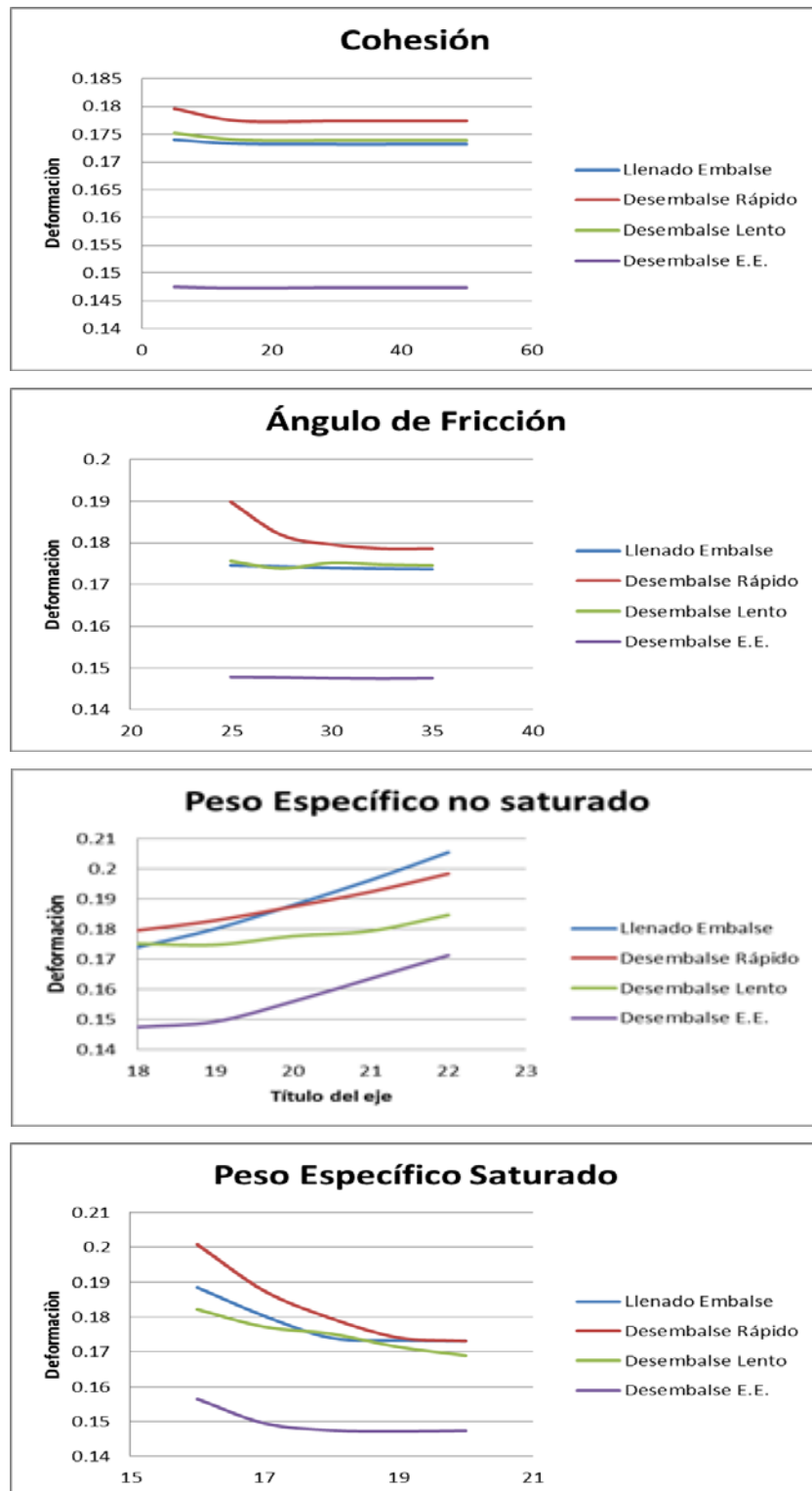
Módulo de Young

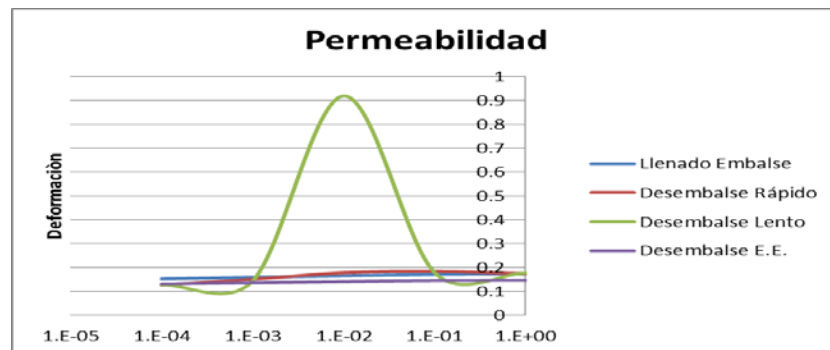
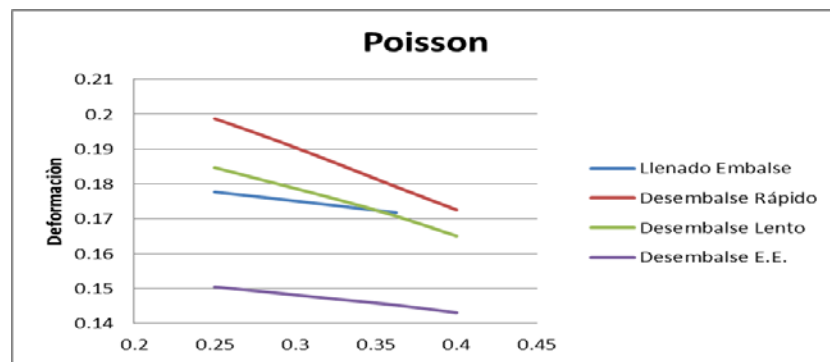
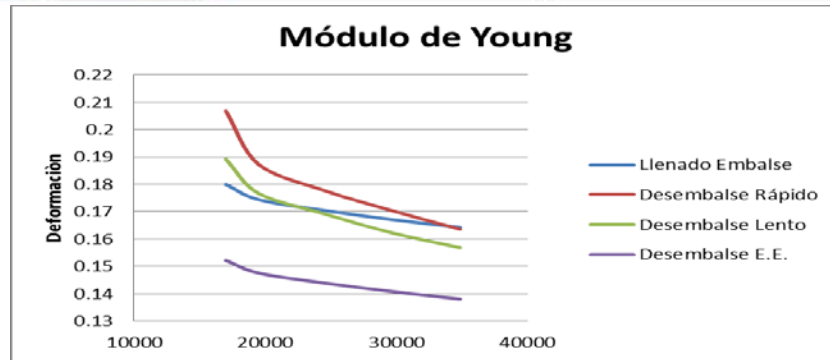




Se puede apreciar que para las fases de desembalse lento y desembalse rápido, los factores de seguridad en las variables de módulo de Young y Poisson son prácticamente constantes, pero para los casos de ángulo de fricción, peso específico saturado, permeabilidad y cohesión (en una menor forma), son proporcionales al factor de seguridad, excepto para el valor de la permeabilidad que va de $1e-4$ m/día a $1e-3$ m/día que es inversamente proporcional, resultados coherentes excepto para la permeabilidad, que se desconoce la razón de esta tendencia; se puede apreciar de una forma leve, como el factor de seguridad para la variable de peso específico no saturado es inversamente proporcional al desembalse rápido. Para las fases de llenado de embalse y desembalse en estado estacionario, los resultados son constantes para las variables de: peso específico saturado y no saturado, módulo de Young, Poisson y permeabilidad, y es proporcional para el caso de ángulo de fricción; para el caso de cohesión hay una interesante tendencia, ya que es de forma constante para llenado de embalse, pero proporcional para un embalse en estado estacionario.

Figura 15. Variación de la deformación respecto a los materiales del relleno.





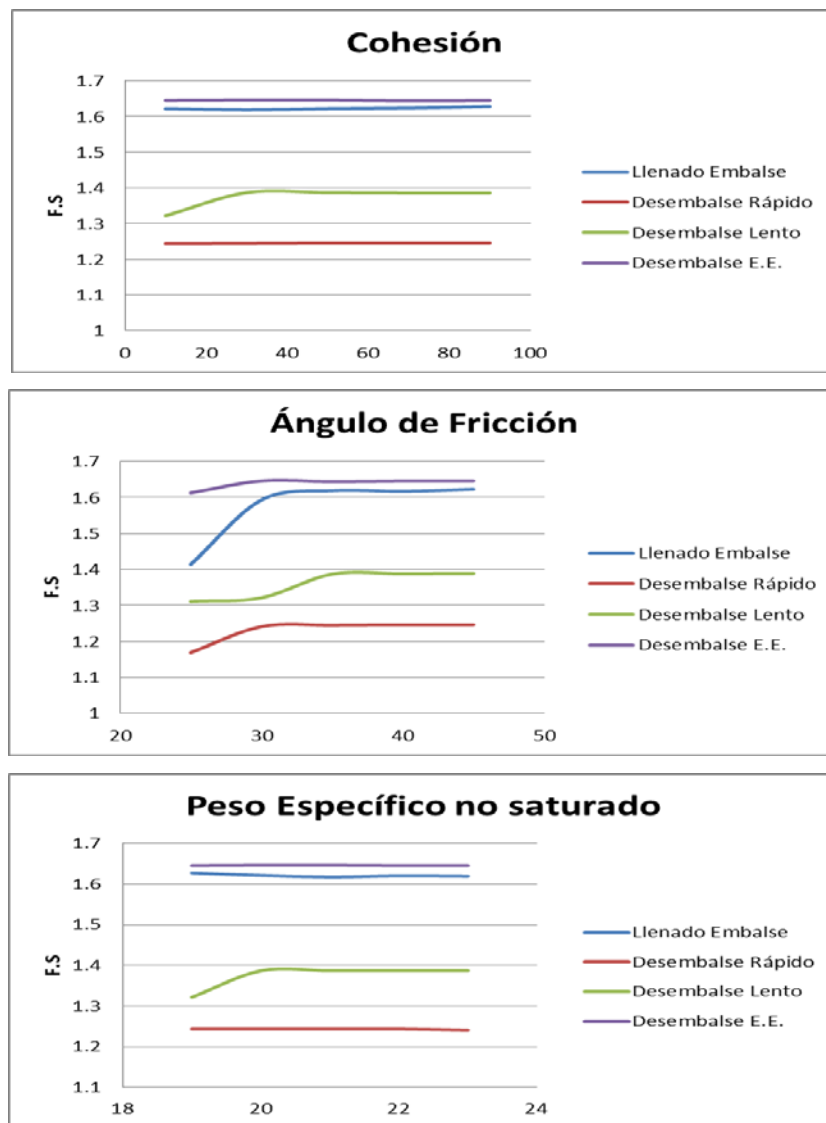
Se puede apreciar que para las fases de desembalse lento y desembalse rápido, las deformaciones máximas, son constantes para la variable de la cohesión, excepto para valores de menor de 20 KPa, que resulta ser inversamente proporcional, para la variable de peso específico no saturado, las deformaciones son proporcionales, y para los valores de peso específico saturado, módulo de Young y Poisson, son inversamente proporcionales a la deformación máxima. Existen dos casos interesantes, el del ángulo de fricción, que para desembalse lento es constante, pero para el desembalse rápido es inversamente proporcional, y para el caso de la permeabilidad, se puede apreciar una variación extraña del grafico para una permeabilidad de 0.01 m/día, que da un valor muy superior a los demás, sin saber el porqué de este suceso. Respecto a las otras dos fases (Llenado de embalse y desembalse en estado estacionario), para las variables de cohesión, ángulo de fricción, son

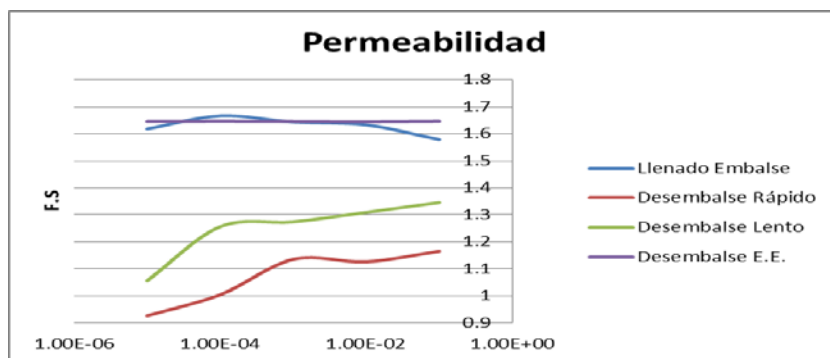
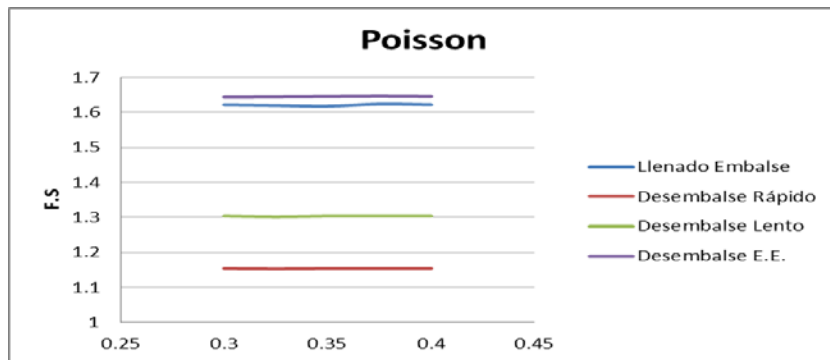
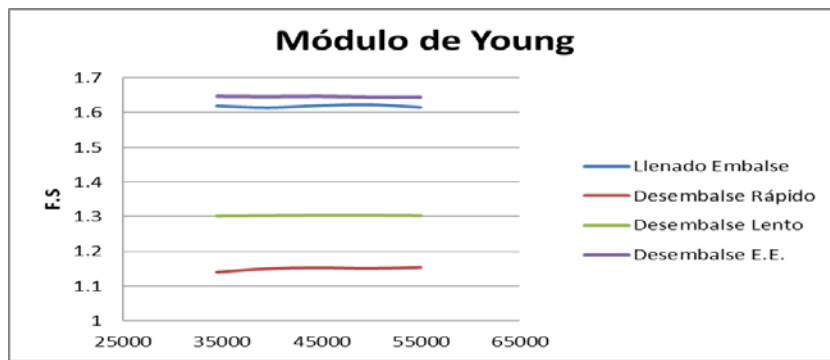
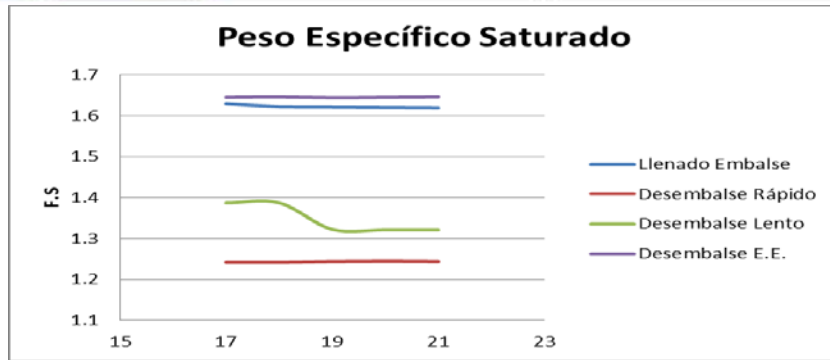
constantes, pero para las variables de peso específico no saturado y permeabilidad, son proporcionales, y para las variables de peso específico saturado, módulo de Young y Poisson son inversamente proporcionales.

4.5.3 Variación en el subsuelo

Para este análisis se hizo exactamente igual a lo que se hizo en el caso de variación en el núcleo y relleno, excepto en que los valores fueron cambiados para el subsuelo. Los resultados son mostrados en las Fig. 16 y 17.

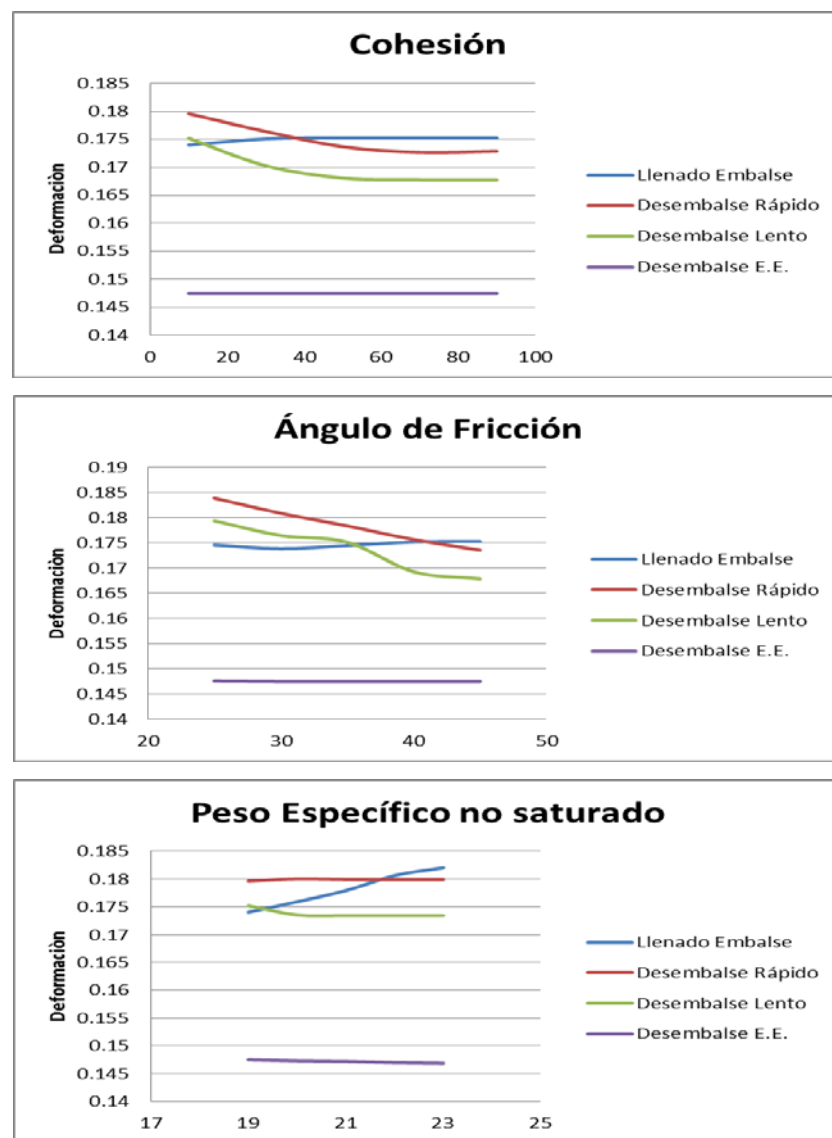
Figura 16. Variación del factor de seguridad respecto a los materiales del subsuelo.





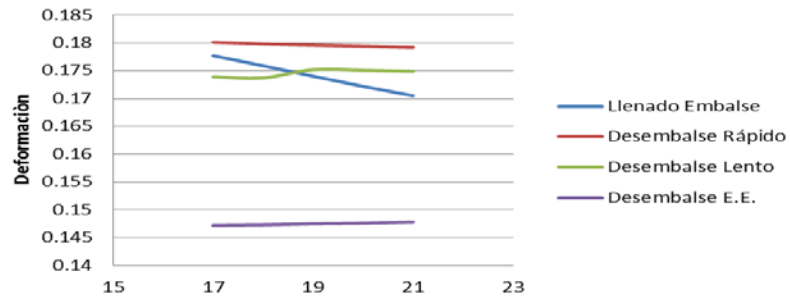
Se puede decir que para la mayoría de casos, las variables no afectan al factor de seguridad, es decir, son constantes, pero existen casos como el de la variable del ángulo de fricción, que es proporcional para un valor menor de 30 grados, pero después es constante, probablemente la razón de comportamiento, se deba por las pendientes de la presa (taludes 3:1-2:1). Para los valores de peso específico saturado y no saturado en la fase de desembalse rápido ocurre algo curioso, ya que para valores menores de 20 kn/m^3 , estas variables son inversamente proporcionales y proporcionales respectivamente, sin saber el porqué. Para la variable de permeabilidad, es proporcional para las fases de desembalse lento y desembalse rápido.

Figura 17. Variación de la deformación respecto a los materiales del subsuelo.

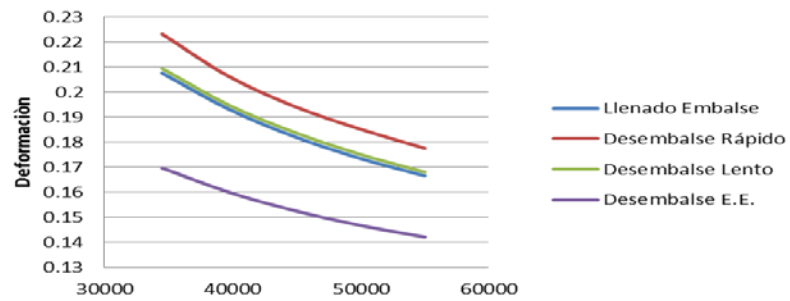




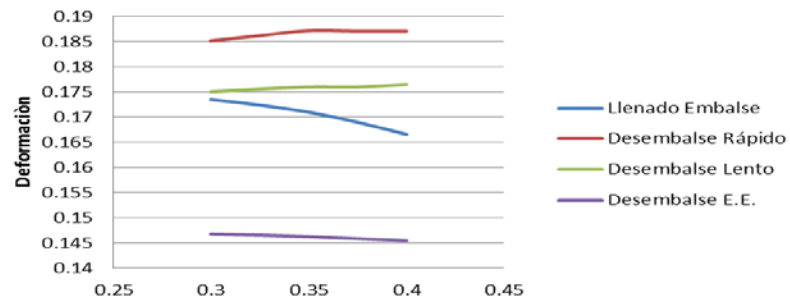
Peso Específico Saturado



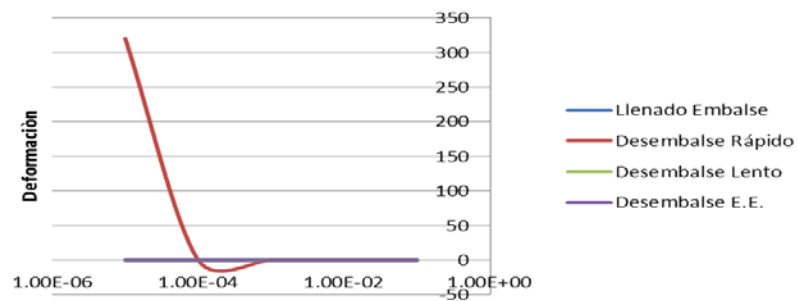
Módulo de Young

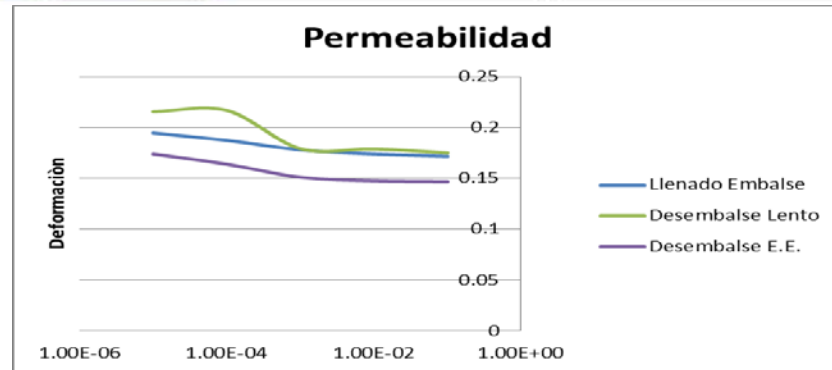


Poisson



Permeabilidad





Se puede apreciar que para las fases de desembalse rápido, las variables de la cohesión, el ángulo de fricción, el módulo de Young son inversamente proporcionales, en cambio para los pesos específicos saturado y no saturado son constantes, y para la variable Poisson es levemente proporcional. Respecto al llenado del embalse, para las variables de cohesión, ángulo de fricción, tienen tendencias constantes, pero para los valores de peso específico saturado, Poisson, módulo de Young y permeabilidad, son inversamente proporcionales, y siendo el peso específico no saturado la única variable que es proporcional. Para las fases de desembalse lento y desembalse en estado estacionario, en la mayoría de las variables se tienen valores constantes, excepto para la cohesión y el ángulo de fricción que son inversamente proporcionales para el desembalse lento; para la permeabilidad en desembalse estacionario es inversamente proporcional, y en el módulo de Young ambas fases son inversamente proporcionales.

En la gráfica de permeabilidad podemos notar una excesiva deformación cuando se tiene un valor de $1e-6$ m/día.

4.6 Variación del desembalse

Otro caso analizado en este proyecto, fue sobre la variación del factor de seguridad y las deformaciones para diferentes tiempos de desembalse en una presa.

4.6.1 Variación de los tiempos de desembalse

Este análisis consistió sobre la variación del factor de seguridad y la deformación máxima respecto al tiempo que dura un desembalse; cabe decir que para que este ejercicio fuera valido se tomó todos los datos de un solo modelo (Modelo Estándar), con una diferencia de desembalse de 20 metros, ya

que al principio el embalse tenía 25 metros de nivel de agua y al final se reducía a 5 metros.

Figura 18. Variación del factor de seguridad respecto al tiempo del desembalse.



La figura 18 describe el comportamiento que tiene el factor de seguridad a diferentes días de desembalse. Se puede ver que el factor de seguridad crece linealmente los primeros 10 días de desembalse, pero para desembalses más prolongados el F.S. crece de una forma irregular.

Figura 19. Variación de la deformación respecto al tiempo del desembalse.

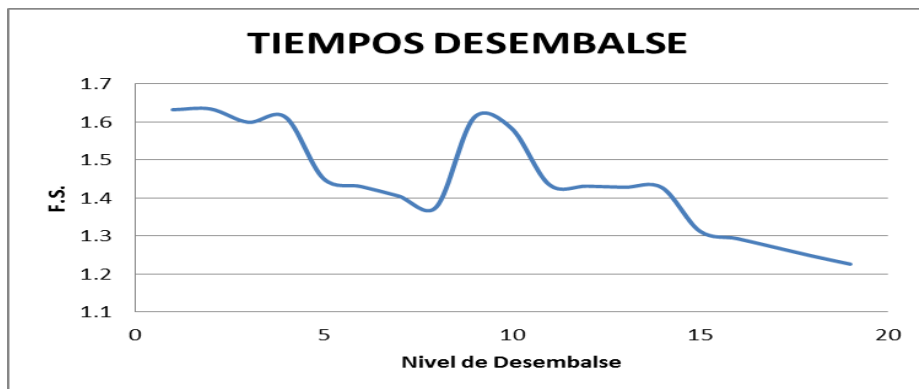


En la Fig. 19 se puede observar que las deformaciones son prácticamente constantes, hasta que llega a los 75 días, pues de ahí se presenta una pequeña disminución en la deformación máxima, para que luego tenga un aumento considerable en esta, sin tener una idea clara del porqué de este comportamiento.

4.6.2 Variación de los niveles de embalsamiento

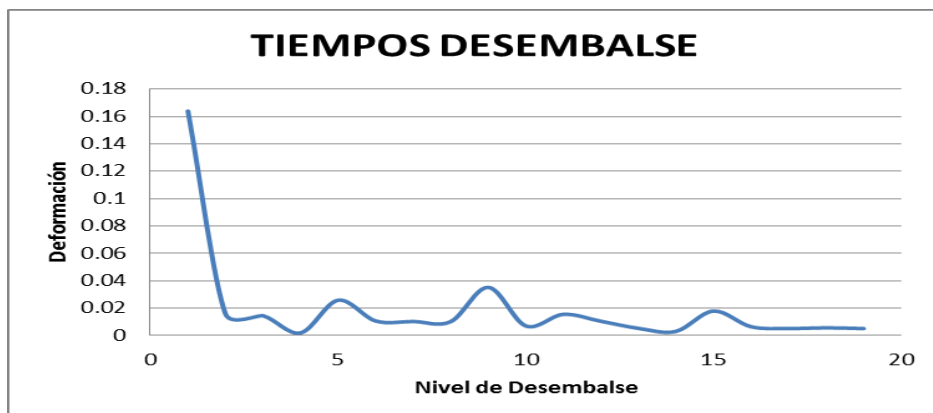
Este análisis consistió sobre la variación del factor de seguridad y la deformación máxima en una presa a una determinada altura, con un determinado tiempo; para esto se hizo lo mismo que el caso anterior, se escogió el modelo estándar y se hizo un desembalse de una altura de 25 metros a una altura de 5 metros y el tiempo escogido de desembalse fue de 5 días, teniendo una velocidad constante a lo largo de la presa de 0.25 m/día. La discretización del nivel de desembalse fue de un metro, esto quiere decir que se obtuvieron los valores de factor de seguridad y deformación para cada metro de desembalse.

Figura 20. Variación del factor de seguridad respecto al nivel de desembalse.



La figura 20, muestra que el factor de seguridad va disminuyendo de una forma irregular, a medida que el desembalse va aumentando, obteniendo el máximo factor de seguridad cuando ha ocurrido la mitad del desembalse.

Figura 21. Variación de la deformación respecto al nivel de desembalse.



En la gráfica de la figura 21, podemos ver una disminución en forma radical de la deformación (no acumulada) a un nivel de desembalse de 2 metros, para que luego siga disminuyendo en una forma más o menos senoidal.

4.7 Soluciones

El último análisis de este proyecto, consistió en probar con 3 métodos diferentes la forma de mejorar el drenaje en el talud de la presa (Modelo Estándar), para analizar de qué manera alteraba los resultados, cuando era afectado por las 4 fases ya comentadas. Los métodos fueron:

- Colocar un dentellón a la presa.
- Colocar 2 filtros horizontales aguas arriba de la presa (colocados en forma simétrica).
- Colocar una pantalla de material muy impermeable aguas arriba de la presa.

Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 13 y tabla 14.

Tabla 13. Resultados de F.S. de los modelos soluciones.

Factor de Seguridad				
	Llenado Embalse	Desembalse Rápido	Desembalse Lento	Desembalse E.E.
Dentellón	1.638	1.195	1.322	1.653
Filtro Horizontal	1.621	1.227	1.296	1.654
Pantalla	1.623	0.899	1.001	1.646

Tabla 14. Resultados de deformación de los modelos soluciones.

Deformaciones				
	Llenado Embalse	Desembalse Rápido	Desembalse Lento	Desembalse E.E.
Dentellón	0.2429	0.2173	0.2171	0.1989
Filtro Horizontal	0.1744	0.1731	0.1702	0.1478
Pantalla	0.1523	0.06393	0.05264	0.128

En estas tablas podemos ver que para llenado de la presa y un desembalse lento (50 días de duración), el método más seguro es colocar un dentellón, y para un desembalse en estado estacionario y desembalse rápido (5 días de duración), la mejor opción es colocar filtros horizontales. La pantalla



impermeable resulta no ser una muy buena opción para los desembalses, debido a que cuando ocurre el desembalse, por ser tan impermeable, impide que el agua evacue en el talud de la presa, y por lo tanto genere una mayor inestabilidad, pero es el caso que menores deformaciones máximas registra.

5 CONCLUSIONES

El fenómeno del desembalse rápido es una condición crítica en el estudio de una presa, que debe ser tenido en cuenta durante su operación, en especial en el talud aguas arriba de la presa.

Si analizamos el factor de Seguridad y las deformaciones máximas que se obtuvieron en las gráficas, variando las propiedades de la presa como la geometría, tasa de desembalse, soluciones y los materiales en las secciones como las del núcleo, el relleno y el subsuelo para diferentes fases, podemos concluir que:

- El factor de seguridad para una presa por desembalse rápido obtenido mediante el método de USACE 2003, es 62% mayor al del programa PLAXIS.
- Una presa homogénea tiene por lo general un menor factor de seguridad en el análisis por desembalse rápido y llenado, que una presa con núcleo, pero menores deformaciones.
- Las presas con un núcleo de dimensiones mínimas tienen mayor factor de seguridad en los desembalses, seguido de un núcleo con dimensiones máximas para presas de altura de 10,20 y 30 metros y de núcleo con dimensiones medianas para presas de 40 y 50 metros.
- Las deformaciones de una presa con alturas menores de 20 metros no se ven muy afectadas por las dimensiones de su núcleo; pero para mayores alturas, una presa con núcleo mínimo tiende a tener menores deformaciones.
- Los valores de factor de seguridad se presentan mayores para el caso de desembalse en estado estacionario, seguido del llenado de la presa, desembalse lento y finalmente desembalse rápido.
- Las deformaciones máximas en una presa son proporcionales a la altura de esta, es decir a mayor altura de la presa, mayor será la deformación.
- El factor de seguridad de una presa es proporcional a la cohesión y al ángulo de fricción en el núcleo.
- El factor de seguridad de la presa no se afecta por los valores de peso específico saturado y no saturado, módulo de Young, Poisson y permeabilidad en el núcleo.
- El factor de seguridad es proporcional a los valores de ángulo de fricción y cohesión para las fases de desembalse lento, desembalse rápido, llenado del embalse y desembalse en estado estacionario en el relleno, en cambio para los valores de peso específico no saturado, Modulo de Young y Poisson es constante.
- El factor de seguridad para las fases del llenado de la presa y desembalse en estado estacionario son constantes para las variables de permeabilidad y peso específico saturado para el caso del relleno, pero son proporcionales a las fases de desembalse rápido y desembalse lento, excepto cuando la

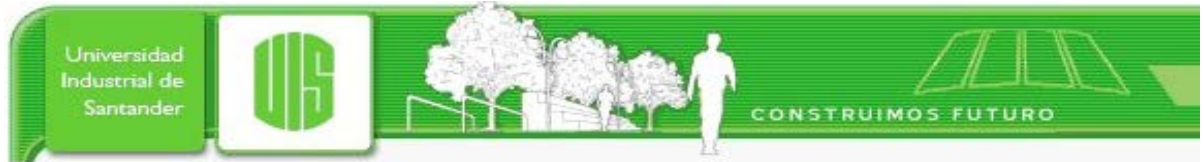
permeabilidad tiene valores menores de $1e-3$ m/día, ya que ahí es inversamente proporcional.

- La deformación máxima en las cuatro fases estudiadas para las variables en el relleno como: Poisson, peso específico saturado, Modulo de Young son inversamente proporcionales, en cambio para los valores de cohesión y ángulo de fricción son constantes, siendo el peso específico no saturado la única variable que es proporcional a la deformación.
- Los valores de F.S. para el subsuelo de la presa solo se ven afectados, para ángulos de fricción menores de 30 grados de forma inversamente proporcional, para las cuatro fases estudiadas; para la permeabilidad en las fases de desembalse lento y desembalse rápido es de forma proporcional; las demás variables son constantes respecto al F.S.
- La deformación máxima en una presa solo se ve afectado inversamente proporcional para la variable de módulo de Young para las cuatro fases. Para las demás variables, su variación no es importante, excepto de forma inversamente proporcional para los valores de cohesión y ángulo de fricción en las fases de desembalse rápido y desembalse lento, y los pesos específicos no saturados y saturados para la fase de llenado de la presa, de forma proporcional e inversamente proporcional respectivamente.
- Para valores muy bajos de permeabilidades en el subsuelo (menores de $1e-4$ m/día) para el caso de desembalse rápido, las deformaciones se vuelven excesivamente grandes y la presa falla.
- El F.S. en una presa es proporcional al tiempo que demore un desembalse.
- La deformación máxima en una presa no se ve afectada por el tiempo de desembalse, excepto de forma proporcional para valores mayores de 75 días.
- El F.S. en una presa es inversamente proporcional al nivel de desembalse, pues a mayor nivel de desembalse, menor será el F.S.
- Las deformaciones son inversamente proporcional al nivel de desembalse para niveles menores de 3 metros; para mayores niveles son más o menos constantes.
- El mejor método de ayuda de drenaje para una presa para los casos de llenado y desembalse lento, es colocar un dentellón, y para un desembalse en estado estacionario y desembalse rápido es la colocación de filtros horizontales.
- Una pantalla impermeable en una presa no es una buena opción de refuerzo para casos de desembalses, debido a que no drena el agua y vuelve inestable a la presa por dicha razón, pero es el caso que menores deformaciones tiene.



CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Suarez Diaz, J. (1998). *Deslizamientos Y Estabilidad De Taludes En Zonas Tropicales*. Bucaramanga: Publicaciones UIS.
- [2] US Army Corps of Engineers. (2003). *Slope Stability*. Washington, DC.
- [3] CADENA ESCOBAR, M. A. Análisis de Estabilidad de Taludes en condiciones de desembalse rápido. Trabajo de Investigación. Maestría en Geotecnia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil, 2005.
- [4] PLAXIS. (s.f.). *YouTube*. Recuperado el 15 de Febrero de 2013, de http://www.youtube.com/watch?v=Z_yti_IZ81M&feature=c4-overview-vl&list=PLF7F3CDD69090AF3A
- [5] Rapid Drawdown Analysis. (2003). *Keystone Retaining Wall Systems*, 25.
- [6] US Army Corps of Engineers. (2003). *Slope Stability*. Washington, DC.
- [7] Chen, X., & Huang, J. (2011). Stability analysis of bank slope under conditions of reservoir impounding and rapid drawdown. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 429-437.
- [8] Veléz Otálvaro, M. V., Ortiz Pimienta, C., & Vargas Quintero, M. C. (2011). *Las Aguas Subterranas Un Enfoque Práctico*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- [9] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010). *Manual on small earth dams*. Roma: FAO publications.
- [10] Fredlund, M., Lu, H., & Feng, T. (2011). Combined Seepage and Slope Stability Analysis of Rapid Drawdown Scenarios for Levee Design. *Geo-Frontiers*, 1595-1604.
- [11] BUREAU OF RECLAMATION. (1987). *Design Of Small Dams* (Tercera ed.). Washington, DC, USA: Water Resources Technical Publication.



BIBLIOGRAFIA

Angelone, S. (2012). *GEOLOGIA Y GEOTECNIA*.

Armas Novoa, R., & Horta Mestas, E. (1987). *Presas de Tierra*. La Habana: Ispjae.

BUREAU OF RECLAMATION. (1987). *Design Of Small Dams* (Tercera ed.). Washington, DC, USA: Water Resources Technical Publication.

Cadena Escobar, M. A. (2005). *Análisis de Estabilidad de Taludes en condiciones de desembalse rápido*. Bogotá.

Chen, X., & Huang, J. (2011). Stability analysis of bank slope under conditions of reservoir impounding and rapid drawdown. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 429-437.

De Cea Azañedo, J. C. (s.f.). *PRESAS DE NUCLEO CENTRAL, CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO Y SEGURIDAD*. Madrid.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010). *Manual on small earth dams*. Roma: FAO publications.

Fredlund, M., Lu, H., & Feng, T. (2011). Combined Seepage and Slope Stability Analysis of Rapid Drawdown Scenarios for Levee Design. *Geo-Frontiers*, 1595-1604.

Government of Western Australia. (2003). GUIDE TO THE DESIGN OF BRIDGE APPROACH EMBANKMENTS SUBJECT TO INUNDATION. *Engineering Road Note No. 6*.

Jalil, A. (2011). The Analysis Slope Stability Reservoir Keuliling with Finite Element Methods. *Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 239-250.

Karstunen, M. (s.f.). *DAMS AND EMBANKMENTS*.

Kerkes, D., & Fassett, J. (2006). RAPID DRAWDOWN IN DRAINAGE CHANNELS WITH EARTHEN SIDE SLOPES. *Proceedings of the ASCE Texas Section Spring Meeting, Beaumont*.



Pinyol, N., & Alonso, E. (s.f.). Slope stability under rapid drawdown conditions.

PLAXIS. (s.f.). *YouTube*. Recuperado el 15 de Febrero de 2013, de http://www.youtube.com/watch?v=Z_yti_IZ81M&feature=c4-overview-vl&list=PLF7F3CDD69090AF3A

PLAXIS. (n.d.). *YouTube*. (n.d.). Retrieved Agosto 16, 2012, from http://www.youtube.com/user/plaxistv?feature=results_main

Rapid Drawdown Analysis. (2003). *Keystone Retaining Wall Systems*, 25.

S. M. Ali Zomorodian, S. Mehdi Abodollahzadeh, & Shiraz University. (2010). Effect of Horizontal Drains on Upstream Slope Stability During Rapid Drawdown Condition. *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOLOGY*, 85-90.

Suarez Diaz, J. (1998). *Deslizamientos Y Estabilidad De Taludes En Zonas Tropicales*. Bucaramanga: Publicaciones UIS.

Tran, T. (s.f.). STABILITY PROBLEMS OF AN EARTHFILL DAM IN RAPID DRAWDOWN CONDITION. *Grant Project*.

US Army Corps of Engineers. (2003). *Slope Stability*. Washington, DC.

VandenBerge, D. (s.f.). *Application of Finite Element Method to Rapid Drawdown Analysis*. Virginia Tech.

Veléz Otálvaro, M. V., Ortiz Pimienta, C., & Vargas Quntero, M. C. (2011). *Las Aguas Subterranas Un Enfoque Práctico*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Viratjandr, C., & Michalowski, R. (2006). limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown. *Can. Geotech. J. Vol 43*, 802-814.

YouTube. (s.f.). (PLAXIS) Recuperado el 16 de Agosto de 2012, de http://www.youtube.com/user/plaxistv?feature=results_main