



**UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU"
DE LAS VILLAS
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES
CARRERA INGENIERÍA HIDRÁULICA**

TRABAJO DE DIPLOMA

**EVALUACIÓN DE RIESGOS Y SIMULACIÓN DE SOLUCIONES
TÉCNICAS PARA FILTRACIONES, CASO DE ESTUDIO: PRESA
ZAZA**

TUTORES:

DR. C. LAMBERTO ÁLVAREZ GIL

ING. MICHAEL ÁLVAREZ GONZÁLEZ

DIPLOMANTE:

GENRRY DE LA CARIDAD MURO ULLOA

-SANTA CLARA, 2016-

Pensamiento

“El país tendrá mucho más pero no será jamás una sociedad de consumo, será una sociedad de conocimientos, de cultura, del más extraordinario desarrollo humano que pueda concebirse.”

Fidel Castro Ruz

Agradecimientos

A mis padres, que siempre estuvieron cuando más los necesitaba dándome su apoyo y consejo.

A mi hermana, por compartir siempre su cariño.

A mis tutores, por toda la ayuda brindada, por la paciencia mostrada y por compartir de una forma u otra.

A mis amigos a la propia UCLV.

A TODOS.....GRACIAS.

DEDICATORIA

A mi madre, por su aliento, confianza y apoyo brindado
en todo momento.

A mi padre, por ser un ejemplo a seguir, por complacerme
y cuidarme siempre.

A mi hermana, por pelearme siempre para que sea un
poco organizado.

A mi novia, por ser paciente darme todo su cariño.

A mis amigos, que a veces te pueden sorprender.

RESUMEN

El presente trabajo de diploma realiza una propuesta de interpretación y análisis al fenómeno de las filtraciones en la presa de tierra Zaza, basada en las posibles soluciones en la propuesta de tres tipos de filtros, basados en las características históricas de las fluctuaciones de los niveles de agua contenidos en el interior del embalse. Basado en las experiencias de trabajo en equipos multidisciplinarios y los trabajos previos de modelación bidimensional usando el Método de los Elementos Finitos como una solución diferencial al problema que se estudia y su respectiva evaluación y representación en Sistemas de Información Geográfica con criterios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo asociado a presas de tierra.

Palabras claves: filtraciones, estadística, modelación físico-numérica

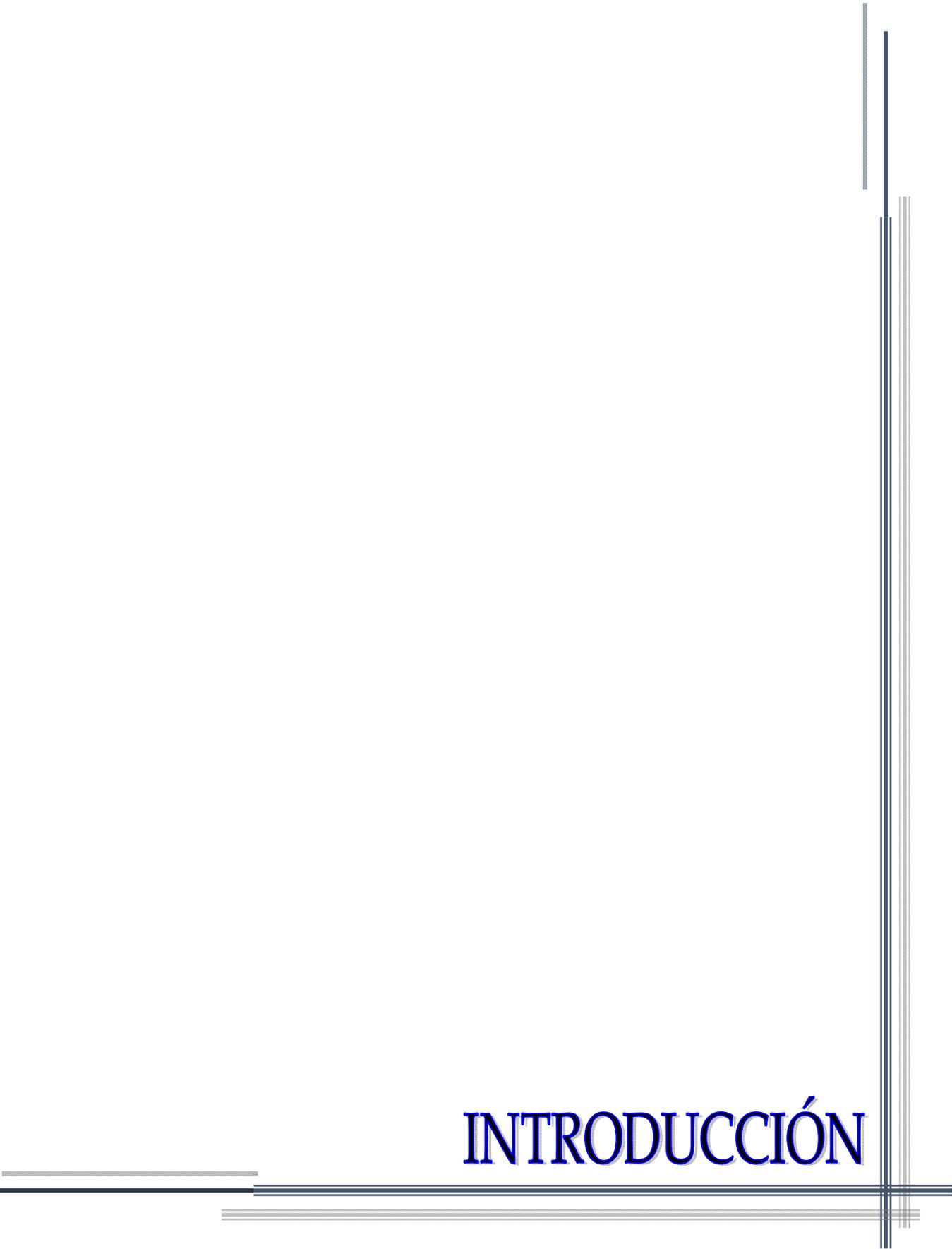
Abstract

This paper, make a proposal for interpretation and analysis of the phenomenon of seepage in the earth dam Zaza from the historical fluctuations in water levels database records and coves made the curtain of the earth dam is made. Based on the experience of multidisciplinary teams working and background of the modeling undertaken nationally and internationally, in statistical processing of databases focused on time series models data processing and linking a two-dimensional model using Finite Element Method as differential solution with the spatial representations in Geographic System Information for evaluate technician's criteria of Hazard, Risk and Vulnerability associated earth dam studied.

Key Word: seepage, statistic, physic and numeric model

Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Bases teórico-conceptuales sobre la modelación de las filtraciones en presas de tierras	
1.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA MODELACIÓN DE LAS FILTRACIONES	11
1.1.1. ANTECEDENTES EN LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE FILTRACIONES EN CORTINAS DE PRESAS DE TIERRA	13
1.2. MÉTODOS FÍSICO-NUMÉRICOS APLICADOS EN LA MODELACIÓN DE FILTRACIONES EN PRESAS DE TIERRA	16
1.2.1. PRINCIPALES ASPECTOS A MONITOREAR EN UN SISTEMA DE VIGILANCIA TÉCNICA EN PRESAS DE TIERRA	25
1.2.2. COMPORTAMIENTO DE LAS FILTRACIONES EN PRESAS DE TIERRAS.	25
1.2.3. ESTADO ACTUAL DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA APLICADO AL DISEÑO INGENIERIL Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE FILTRACIONES EN CORTINAS DE PRESAS DE TIERRA	28
CONCLUSIONES PARCIALES	32
Capítulo 2. Propuesta y análisis del diseño teórico del filtro para encausar las filtraciones	
2.1. PRINCIPALES FÓRMULAS PARA UN ANÁLISIS DEL PROCESO DE FILTRACIONES EN PRESAS DE TIERRA	33
2.1.1. ANÁLISIS Y CÁLCULO DE LA LÍNEA DE CORRIENTE SUPERIOR	37
2.2. FORMULACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS DE UN PROCESO DE FILTRACIONES EN PARED DE SUELO	50
2.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE FILTRACIONES EN UNA PARED DE SUELO	53
2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS PROPUESTAS DE SOLUCIONES PARA FILTROS EN PRESAS DE TIERRA	54
CONCLUSIONES PARCIALES.	55
Capítulo 3. Modelación de las filtraciones en presas de tierra	
3.1. DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO Y SELECCIÓN DE LA TEF PARA EL PROCESO DE MODELACIÓN.	56
3.2. PROPUESTA DE MODELACIÓN Y SECUENCIA DE ANÁLISIS PARA INTERPRETAR LOS RESULTADOS	57
3.3. RESULTADOS ALCANZADOS EN LAS MODELACIONES DE LOS DIFERENTES FILTROS	59
CONCLUSIONES PARCIALES.	65
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	



INTRODUCCIÓN

El proceso de la evaluación de riesgos y simulación de soluciones técnicas como una disciplina de rigor en el campo de las soluciones ingenieriles utilizadas como herramientas previas al proceso de restauración o reparación de obras hidráulicas es una línea de desarrollo actual por la comunidad científica mundial.

El desarrollo de la tecnología y de la informática aplicada a diversos campos de la ingeniería, hace posible que la evaluación de riesgos y simulación de una solución técnica a problemas básicos de la ingeniería sean realizados previamente en laboratorios virtuales a partir de la caracterización de los materiales utilizados en el proceso constructivo de la obra previos a su construcción; elemento este que aporta un considerable ahorro de recursos técnicos y humanos en función de una adecuación medioambiental y tecnológica al proceso constructivo en sí mismo.

El acceso al agua, por sus implicaciones biológicas y sociales, ha constituido el elemento determinante en el desarrollo posterior de toda colectividad humana dejando una huella en su suceder histórico por lo que el mundo se ha encargado de desarrollar la infraestructura hidráulica protegiendo así un recurso estratégico para la vida y desarrollo de los seres humanos y su entorno.

La conservación y explotación en condiciones adecuadas de los embalses, se convierten en una premisa fundamental para el hombre el proceso de mantenimiento de las condiciones de su reserva, aún más, si se tiene en cuenta, que al igual que muchos otros recursos, sus reservas no son infinitas, pudiendo agotarse al no renovarse en la misma cuantía que se explotan, cobrando mayor importancia frente al proceso de cambio climático con las recurrentes sequías actuales que son identificadas a nivel mundial.

Es por ello que el crecimiento exponencial de la capacidad de retención de los embalses, la seguridad del proceso de operación y el mantenimiento sistemático constituyen actualmente campos del saber que se encuentran necesariamente en constante desarrollo vinculado al proceso tecnológico de la vigilancia técnica del conjunto de la obra según comentan indistintamente en sus trabajos varios autores (Picón, *et al.*, 2006; Anónimo, 2008; Alberto, *et al.*, 2010; Anónimo, 2011).

En Cuba el proceso de monitoreo ante eventos extremos de la red de embalses, constituye uno de los lineamientos de la política nacional del Instituto Nacional de los Recursos Hidráulicos (INRH) y actualmente uno de los acápites de la Ley del Agua que se encuentra en fase de revisión y aprobación por la autoridades competentes y responsables del proceso legal. Siendo una característica cubana que la mayoría de las fuentes de abasto se caracterizan por ser del tipo superficiales, concebidas en presas de tierra de materiales locales por su fácil proceso ejecutivo y bajos gastos económicos comparados con las presas de hormigón.

Con el despertar de la voluntad hidráulica a raíz de las palabras pronunciadas por el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz (1964) en la conmemoración del II Aniversario de la Creación del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) marcó un proceso de construcción y distribución a lo largo del territorio nacional de nuevos embalses por todo el país desde la cifra de trece pequeños embalses distribuidos en cuatro provincias para un poco más de 3.000 hm³ de capacidad de almacenamiento antes de 1959 a una cifra de reservorios ascendiente a doscientos cuarenta y uno de la capacidad de almacenamiento a 8.810 hm³ a finales del 2000 (Aspiolea, 2001), cifras que aún continúan creciendo con nuevos proyectos en la actualidad.

La incertidumbre de la ocurrencia de los fenómenos naturales y los métodos de análisis y estudios actualmente desarrollados para la evaluación de las filtraciones en cortinas de presas de tierra hacen centro de atención las principales fuerzas que interactúan durante el proceso de explotación del embalse o acciones constructivas de mantenimiento y reparación que por su alcance y complejidad (Garnica, *et al.*, 2002; GEOCUBA, 2004; Barrios, 2010) sea posible evaluar bajo criterios de peligro, vulnerabilidad y riesgo previo a un posible fallo de la estructura ante la evaluación de escenarios extremos.

Es por ello que al considerar un enfoque para abordar el problema donde el proceso de las filtraciones está vinculada a un estado tenso-deformacional que complejiza las soluciones clásicas dado el alto grado de incertidumbre que se precisa al

conocer la magnitud de la fuerza de fricción entre las partículas del suelo y el agua, la presión ejercida sobre la cortina, el peso propio de la obra en su conjunto y por secciones, y el régimen de fuerzas externas actuantes a la cual está sometida la obra durante el proceso constructivo y de explotación hasta su puesta en fuera de uso finalmente.

Para el caso específico de las presas de tierra, la acción de empuje del agua embalsada provoca movimientos significativos en la cortina del embalse, incluyendo la variabilidad de los niveles de agua dentro del medio permeable que conforma la Línea de Corriente Superior (LCS) para definir un área o volumen de material que está completamente saturado, definiendo a su vez la zona de principal interés a causa de la variabilidad conductiva del medio poroso que se manifiesta en el talud de aguas abajo en filtraciones implicando a su vez la necesidad de evaluar la estabilidad y seguridad de la obra (Álvarez, 1998; Álvarez, Álvarez, Azorín, *et al.*, 2015).

En el caso de un proceso de diagnóstico y evaluación de las patologías se identifican los estudios presentados por Alvarez (1998; 2013; 2015) en varios momentos, en los cuales desarrolla una solución basada en el análisis de la estabilidad del talud en cortina de presas de tierra aplicando la teoría de seguridad, la cual se consolida posteriormente en una lista de chequeo con las modelaciones físico-numéricas correspondientes para la creación de catálogos de patologías que evalúan las características e influencias de cada una de estas en el proceso de seguridad de explotación del embalse objeto de estudio.

En este caso se identifica que solo es abordado el problema tenso-deformacional, simplificando el proceso de las filtraciones en el cuerpo del embalse y la ocurrencia de eventos extremos que puedan variar la posición de la LCS en el cuerpo de la cortina, elementos estos que fueron abordados posteriormente por varios autores (Carrazana, 2013; Cuevas, 2013; Hernández, 2015) a diferentes niveles de complejidad basados en las experiencias acumuladas en el proceso de modelación numérica desarrollados en la línea de investigación de geotecnia perteneciente a la Facultad de Construcciones en la Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas.

Con las disímiles ventajas que ofrece la computación, con todos los programas de modelación de las estructuras ahora aplicada a las obras hidráulicas podemos dar soluciones más convenientes, económicas y con gran velocidad de ejecución de las tareas una vez establecidas las propuestas de solución, donde el tiempo es dinero y necesidad, por la complejidad de estas obras y el peligro que puede constituir un fallo.

La durabilidad es una de las propiedades básicas imprescindibles que se le exigen a las construcciones y sus partes y materiales componentes, expresando esta condición, la capacidad de las obras para mantener el resto de sus propiedades durante el transcurso del tiempo, bajo los efectos de diversos factores naturales y fortuitos, lográndose a partir del aseguramiento de la calidad del diseño, selección de los materiales y ejecución, también con una correcta utilización de la obra y un mantenimiento sistemático durante su período de servicio.

Las patologías en las estructuras, se manifiestan por diversos factores como: defectos de diseño o ejecución, esfuerzos mecánicos, mala elección de materiales entre otros. El estudio de las patologías, síntomas y causas permiten definir su tratamiento y elaborar conclusiones sobre su prevención (Álvarez, 1998; Álvarez, Álvarez y Martínez, 2015). Intervenir una obra a tiempo, permitiría la devolución de su funcionamiento de forma íntegra y sin mayores complicaciones, evitando la afectación a todos los ciudadanos que se benefician de estos servicios, contribuyendo al bienestar de la sociedad y la tranquilidad de las autoridades pertinentes. Contar con presas para el almacenamiento de agua siempre es provechoso para el país, garantizar la seguridad de las mismas es tarea de todo ingeniero a cargo de su correcto funcionamiento.

En el diseño y construcción de presas de tierra los drenes tienen un papel significativo, se encargan de evacuar el agua de filtración que pasa por el cuerpo de la presa y por su cimentación. Un dren bien diseñado puede disminuir el volumen de suelo del terraplen que se encuentre saturado y por tanto aumentar la seguridad de la presa y disminuir los volúmenes de trabajo necesarios para construirla así como la disminución de riesgos.(Armas, *et al.*, 1987)

En el diseño y simulación de los drenes es importante tener en cuenta que los mismos no deben ocluirse durante la vida útil de la presa, aspecto a tener en cuenta en su diseño y construcción. De igual forma los drenes deben evitar el fenómeno de sifonamiento, por lo que resulta necesario disponer de capas de filtros en las caras de los mismos.

Durante el proceso de concepción tecnológica de un embalse se identifican los estudios presentados por (Sherald, *et al.*, 1963) fomentándose bases de gran valor para futuras investigaciones de diseño de presas de tierra contenidas en las experiencias de varios autores (Popnicolov, 1974; Dominy, 1981; Armas y Horta, 1987; Armas, 1990; Armas, *et al.*, 1994; Álvarez, 1998; Armas, 2002; MICONS, 2005a, 2005b; Botello, 2006). Estos aportaron criterios actualizados al tema mediante el empleo de formulaciones empíricas, clásicas y novedosas soluciones en su momento.

Además, en correspondencia con las constantes variaciones climáticas y la ocurrencia de eventos extremos con mayor frecuencia, se hace necesario el estudio detallado de diversas patologías en función del proceso de las fluctuaciones de los niveles de agua en los embalses y las particularidades de cada uno de estos ante el proceso de posibles grietas interiores que conduzcan a un posterior fallo estructural de la cortina de la presa.

Es por ello que evaluar soluciones técnico-ingenieriles a problemas básicos de la ingeniería desde la etapa de diseño, constituye un punto de partida necesario a desarrollar en el sector empresarial a fin del proceso de integración académica con sectores de vanguardia en ramas claves de la economía nacional.

Objeto campo y alcance de la investigación

La presente investigación se desarrolla en el campo de la ingeniería hidráulica utilizando herramientas de la modelación físico-numérica, para abordar como objeto de estudio la evaluación de proyectos en función de riesgos identificados a consecuencia de las patologías de filtraciones existentes en presas de tierra.

Problema científico

¿Cómo realizar una adecuada evaluación técnica de una solución ingenieril para la disminución de los riesgos por surgencia de la Línea de Corriente Superior en el cuerpo de una cortina de presa de tierra?

Hipótesis

Si se realiza una adecuada evaluación técnica de la solución propuesta para la disminución de los riesgos asociado al proceso de surgencia de la LCS en el cuerpo de la cortina de presa de tierra, entonces será posible simular la efectividad técnica del proyecto en condiciones de laboratorios virtuales previo al proceso constructivo, lo cual reduce el riesgo de falla del diseño en función de la solución al problema objeto de estudio en la presente investigación.

Objetivo general

1. Evaluar riesgos y simular soluciones ingenieriles para redireccionar el flujo de agua en una pared en suelo al pie del talud de una presa de tierra.

Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre las filtraciones en la pared de suelo en el cuerpo de la cortina de una presa de tierra.
2. Crear, captar y procesar la estadística elemental de las bases de datos de niveles de agua del embalse objeto de estudio.
3. Efectuar la modelación físico-numérica empleando el Método de Elementos Finitos (MEF) de las filtraciones con el diseño o propuesta de solución técnica al problema de surgencia del nivel de agua en la cortina de la presa de tierra.
4. Evaluar la técnica de la solución ingenieril para la disminución de los riesgos por surgencia de la Línea de Corriente Superior en el cuerpo de una cortina de presa de tierra por medio de criterios de Peligro Vulnerabilidad y Riesgo (PVR).

Tareas investigativas

Para poder dar respuesta a la pregunta científica asumida en la presente investigación y alcanzar cada uno de los objetivos propuestos se proponen las siguientes tareas investigativas a consideración del investigador.

1. Redactar una síntesis posterior al proceso bibliográfico en la que se comenta brevemente los principales aportes científico-técnicos, principales tendencias, personalidades y entidades corporativas líderes a nivel nacional e internacional.
2. Compilar los datos de niveles de agua del embalse objeto de estudio en una base de datos.
3. Estimar mediante técnicas estadísticas los parámetros característicos correspondientes al embalse objeto de estudio.
4. Crear el modelo teórico-conceptual por medio del MEF y modelar la propuesta de diseño en las condiciones de laboratorios virtuales.
5. Evaluar por medio de un Sistema de Información Geográfica la variabilidad espacial de los criterios de PVR previamente identificados en investigaciones anteriores.

Resultados esperados

Con el desarrollo de la presente investigación se espera alcanzar los siguientes resultados:

1. Aportar nuevos criterios en el campo de la evaluación de proyectos aplicados a diseños en condiciones de laboratorios virtuales previos al proceso constructivo.
2. Facilitar nuevas herramientas durante la integración multidisciplinaria de la información en el proceso de solución de las filtraciones en pared de suelo, aplicado en el caso específico a cortinas de presas de tierra.
3. Proponer con el desarrollo del proceso investigativo un procedimiento que contenga los elementos básicos a considerar para una adecuada evaluación de soluciones a problemas de filtraciones en cortinas de presas de tierra en laboratorios virtuales.

Estructura del trabajo de diploma

CAPÍTULO I. Bases teórico-conceptuales sobre la modelación de filtraciones en presas de tierra.

Básicamente se pretende determinar el estado actual del tema mediante la revisión bibliográfica y análisis documental; así como establecer las tendencias actuales de este aspecto para poder identificar por ende los principales líderes nacionales e internacionales, así como las correspondientes instituciones nacionales que normalizan y regulan esta actividad.

CAPÍTULO II. Propuesta y análisis del diseño teórico del filtro para encausar las filtraciones

En este capítulo se pretende captar y procesar las bases de datos de los niveles de agua de la presa Zaza para realizar correcciones al comportamiento de la LCS y establecer criterios por medio de elementos básicos de la estadística descriptiva clásica y de la geo-estadística que permitan realizar una revisión y control del comportamiento de las filtraciones a partir de la selección de una propuesta de soluciones ingenieril al problema de surgencia local de los niveles de agua en la cortina del embalse.

CAPÍTULO III. Modelación y evaluación de la propuesta del filtro en la presa Zaza.

En este capítulo se pretende realizar una modelación del filtro propuesto basado en un análisis determinado por las diferentes simulaciones del nivel de agua registrado en el embalse más escenarios virtuales de forma tal que permita evaluar el comportamiento de las filtraciones en la cortina del Embalse Zaza en base a la característica técnica de cada una de las secciones típicas propuesta del filtro y su incidencia directa sobre el comportamiento de la LCS en el cuerpo de la cortina de tierra.

Conclusiones y Recomendaciones

Serán expuestos los principales resultados alcanzados durante la investigación, así como las recomendaciones pertinentes que se consideren oportunas a criterio del autor.

Anexos

Serán incluidos todos los materiales que, por necesidad de fundamentar oportunamente criterios técnicos, tablas, gráficos, etc... en elementos puntuales para dar una lógica secuencial a la investigación siempre y cuando sean necesarios.

Cronograma de ejecución del trabajo de diploma

Nº	Tareas Científicas	Fecha de cumplimiento
1	Elaboración del Diseño Teórico- Metodológico del Trabajo de Diploma	
2	Revisión bibliográfica y definición del estado del arte (Capítulo 1) Determinar el estado actual de las soluciones de ingeniería a las filtraciones en cortinas de presas de tierra.	
3	Confección del Capítulo 2: Determinar particularidades de las Propuesta y análisis del diseño teórico del filtro para encausar las filtraciones.	
4	Confección del Capítulo 3: Redactar la Propuesta de Modelación y evaluación del filtro en la presa Zaza basados en criterios de PVR para su selección óptima.	
5	Redacción de las Conclusiones y Recomendaciones	
6	Confección final del Trabajo de Diploma y revisión por el Tutor así como otros consultantes.	
7	Entrega del Trabajo de Diploma al Jefe del Departamento de Ingeniería Civil	
10	Preparación para la defensa	

11	Exposición y Defensa del Trabajo de Diploma	
----	---	--

CAPÍTULO 1

The page features decorative elements consisting of several thin, parallel lines. A vertical line on the right side extends from the top of the page down to the bottom, where it intersects with a horizontal line that spans across the page. Additional lines are present near the top right and bottom left corners, creating a frame-like effect.

Capítulo 1 . Bases teórico-conceptuales sobre la modelación de las filtraciones en presas de tierras

1.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA MODELACIÓN DE LAS FILTRACIONES

Desde tiempos ancestrales el papel del ingeniero ha sido básicamente el mismo, tratar de conocer e interpretar los mecanismos de la naturaleza para así poder modificarla al servicio del hombre. Para ello ha utilizado sus conocimientos, intuición, experiencia y los medios naturales a los que en cada momento ha tenido disponibles.

El desarrollo en las matemáticas, la física y la ciencia, de la computación con nuevas plataformas y equipos tecnológicamente superiores y con posibilidades de asimilar un mayor costo computacional en el proceso de cálculo y solución a problemas de la ingeniería, se dispone hoy en día de grandes ventajas para abordar retos cada vez más complejos en la solución de nuevos problemas, cuyos aspectos políticos, económicos, científicos o tecnológicos pueden tener un mayor impacto en la mejora de la calidad de vida del hombre.

La modelación numérica de presas es un paso importante en la evaluación de su seguridad, tanto si se está llevando a cabo mediante un enfoque tradicional como si se aplican los métodos y técnicas más modernos, dado que todos tienen por objetivo común determinar y evaluar el comportamiento de la estructura ante múltiples escenarios de Peligro Vulnerabilidad y Riesgo (PVR) basados en un grupo de fenómenos extremos y de naturaleza estocástica que por limitaciones del conocimiento o por la carencia de una infraestructura adecuada no ha podido encontrar la respuesta técnica compleja o posee una solución simplificada.

El no poder abordar estos fenómenos tan complejos, ha inducido a la comunidad científica a recurrir a su capacidad creativa y lograr una abstracción de este problema basado en el conocimiento histórico acumulado de las diferentes disciplinas técnicas y ciencias en diversas ramas del saber para combinarlas entre sí a poder acercar una concepción teórica-conceptual del fenómeno objeto de estudio lo más cercano a la realidad, obteniendo modelos matemático-físicos sobre

los cuales se busca una respuesta analítica, calibrada por los datos patrones del problema real o en condiciones de laboratorio para obtener posibles soluciones del problema real en la medida que el modelo teórico-conceptual represente fielmente las propiedades esenciales del fenómeno que se pretende modelar.

Modelar una estructura es idealizar una estructura real por medio de un modelo teórico factible de ser analizado mediante procedimientos de cálculo disponibles. La modelación incluye la definición de diversas propiedades de los elementos que componen al modelo. Esto implica la recolección de datos y la suposición de otras propiedades, como son las propiedades elásticas de los materiales incluyendo el suelo de cimentación y las propiedades geométricas de las distintas secciones.

La modelación mediante un cálculo en elementos finitos se presenta inicialmente para el estado de carga general. La caracterización para cada estado y caso de carga se realiza sobre la base de una representación gráfica simplificada del esquema de cálculo, la simulación de las cargas actuantes, el tipo y la forma a considerar el comportamiento tenso-deformacional de los suelos y los resultados que se obtienen (L. Álvarez, 1998).

Para todo objeto de modelación debemos tener presente el análisis del problema real, el modelo de las cargas, del material y de la estructura, así como los métodos de diseño y seguridad aplicados a la solución del modelo del problema real, a pesar de que en la presente investigación se pretende evaluar un problema clásico de filtraciones.

A continuación, se muestra en la figura 1.1 el esquema o concepción general de la modelación par aun proceso de filtraciones.

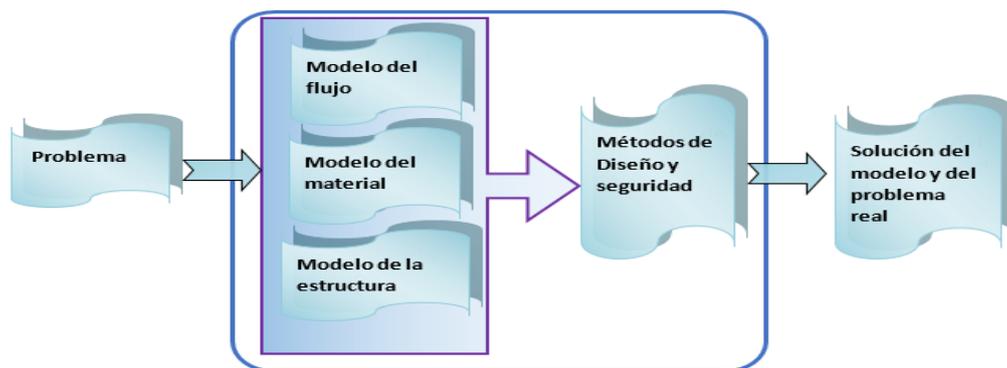


Figura 1.1. Esquema de concepción general de la modelación (fuente: Hernández (2015, p. 20)).

1.1.1. ANTECEDENTES EN LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE FILTRACIONES EN CORTINAS DE PRESAS DE TIERRA.

En presas de tierra el análisis de filtraciones se aborda habitualmente por medio de formulaciones clásicas basadas en criterios empíricos identificándose una directriz al uso del MEF como una herramienta proveniente del desarrollo de los métodos numéricos y la mecánica computacional aplicados en el campo de la ingeniería.

Según el proceso de exploración documental realizado, se identifican cuatro softwares principales para abordar este problema: Abaqus CAE, SAP 2000, Plaxy y GeoStudio; los cuales abordan diversos fenómenos en 3D y 2D problemas tenso-deformacionales, análisis dinámicos, filtraciones en pared de suelo, estabilidad de taludes, etc...

Además, basado en los datos compilados, resultados investigativos, proyectos ejecutados en las empresas territoriales y trabajos de diplomas previos se decide optar por la herramienta computacional GeoStudio v7 para abordar el problema de modelar la propuesta de solución a las filtraciones en el presente Trabajo de Diploma; considerando por demás la experiencia del grupo multidisciplinario que participó en las investigaciones previas en la Presa Zaza, además del alto nivel de compatibilidad de la información para el uso de esta plataforma con el resto de las herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Basado en el esquema de trabajo e integración de la información del GeoStudio v7 (ver figura 1.2), se pretende utilizar el Sigma/W para simular el estado tenso-deformacional actual al cual está sometido la cortina del embalse, el Seep/W para simular el comportamiento del flujo de agua por la cortina y estimar la posición teórica de la Línea de Corriente Superior (LCS) y comparar el comportamiento de la LCS en el área de interés donde se registra la patología de filtraciones y cómo se comporta su disminución en cota.

Utilizando finalmente el Slope/W para realizar una comparación de la estabilidad del talud aguas debajo de la zona de estudio de la cortina de la presa para evaluar el Factor de Seguridad (FS) ante los diferentes escenarios que se pretenden evaluar en los modelos físico-matemáticos de las secciones de estudio incluida la propuesta del lecho filtrante o *dren* al pie del talud de la cortina, además de la estabilidad del talud para la colocación del manto o lecho filtrante en la zanja de excavación.

A partir de las experiencias presentadas por Álvarez (1998), se decide asumir la formulación del sistema de ecuaciones diferenciales que rige el problema ingenieril para un proceso tenso-deformacional en el primer momento de crear una geometría de la sección transversal deformada según el estado actual acorde a los datos geodésicos registrados en la base de datos del embalse.

En el mismo estudio, se realiza una sustitución de la expresión diferencial por una expresión equivalente en término de incrementos finitos de las variables, que quedan discretizadas, por lo que se requiere la subdivisión del dominio mediante una red ortogonal y se soluciona el problema de forma incremental, con un campo de aplicación extendido homológicamente a la solución de problemas de filtración en pared de suelo, consolidación unidimensional, interacción suelo-estructura y pilotes, etc... Este supuesto permite asumir una geometría del dominio adecuada (deformada) y lo más próximo al estado actual en que se encuentra la cortina del embalse.

En los resultados presentados por Hernández (2015) se desarrolló una modelación por medio del software GeoStudio v7, utilizando el MEF a través de una plataforma computacional a partir de investigaciones precedentes en diferentes campos de la

ingeniería expuestas por varios autores (M. Álvarez, Martínez, Espinosa, *et al.*, 2014; M. Álvarez, Martínez, Pedraza, *et al.*, 2014) se aplicó un esquema de definición del modelo del cuerpo de la presa y su base para el análisis de filtraciones permitiendo calcular el abastecimiento de la capa freática, las líneas equipotenciales, líneas de corriente, líneas de carga de presión y el caudal de filtración.

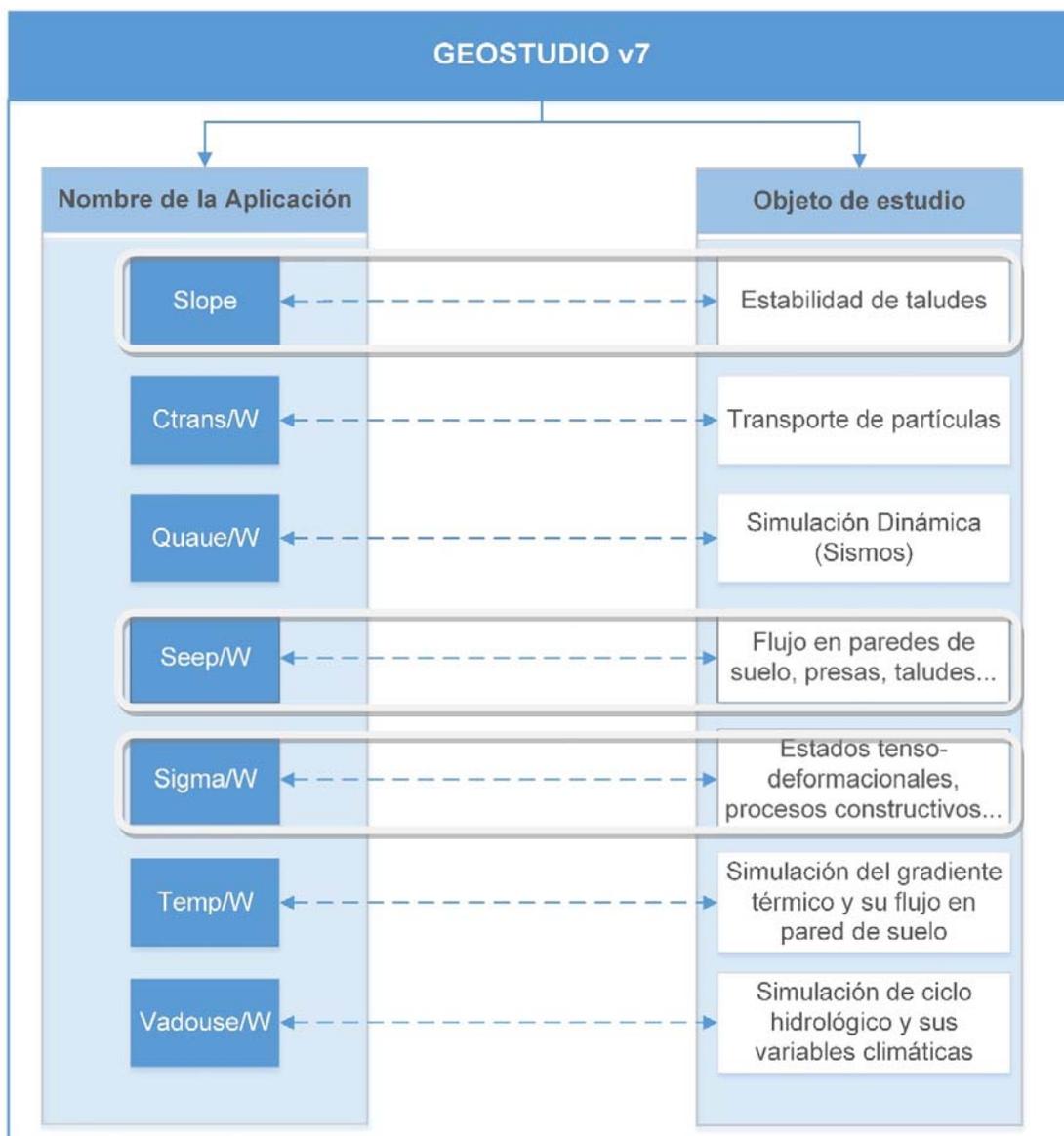


Figura 1.2. Representación gráfica del programa computacional GeoStudio (fuente: Hernández (2015, p. 13)).

Además de la realización de una caracterización estadística del comportamiento de la fluctuación de los niveles de agua del embalse con el fin de poder identificar en los datos de registros históricos un posible comportamiento o tendencia que aporte pistas de los posibles valores de filtraciones anómalos en correspondencia a los parámetro de diseño del embalse siendo estos la base para futuras modelaciones en aras de resolver los problemas de forma virtual para una mejor solución de los mismos, los cuales fueron presentados por Álvarez, L. Alvarez y Martínez (2015) posteriormente.

El problema asumido para el presente trabajo de diploma, se pretende abordarlo con la utilización del MEF, usando funciones de interpolación de elementos de ocho nodos para las incógnitas desplazamientos y las de elementos de cuatro nodos para la incógnita presión de poros, teniendo en cuenta la no linealidad física del suelo a través de un modelo elasto-plástico con datos de calibraciones provenientes del laboratorio y otros medidos en el terreno.

1.2. MÉTODOS FÍSICO-NUMÉRICOS APLICADOS EN LA MODELACIÓN DE FILTRACIONES EN PRESAS DE TIERRA.

La modelación físico-numérica ha tenido una amplia difusión a nivel mundial en ingeniería con la aparición de potentes computadoras y programas de computación modernos que implementan estos métodos. Estas herramientas, permiten al ingeniero analizar problemas cuya solución analítica es inabordable y la empírica es inexacta dada incertidumbre que posee la naturaleza del fenómeno que se estudia, por lo que actualmente se obtiene una respuesta adecuada al aplicar estas técnicas de cálculo numérico por medio de modelos físico-matemático conceptuales como maquetas virtuales.

A la hora de establecer un método numérico se deben considerar que existen muchas alternativas, por lo que se hace referencia a los cuatro métodos de mayor relevancia en Geotecnia: el Método de Diferencias Finitas, el Método de las Características, Método de las Ecuaciones Integrales y el Método de los Elementos Finitos; los cuales son comentados brevemente a continuación:

- El Método de Diferencias Finitas parte de conocer la formulación de las ecuaciones diferenciales que rigen el problema ingenieril y en el mismo se realiza una sustitución de la expresión diferencial por una expresión equivalente en término de incrementos finitos de las variables, que quedan discretizadas, por lo que se requiere la subdivisión del dominio mediante una red ortogonal y se soluciona el problema de forma incremental. Su campo de aplicación comprende la solución de problemas de filtración, de consolidación unidimensional, de interacción suelo - estructura y pilotes (L. Álvarez, 1998).
- El Método de las Características se origina con el conocimiento de la formulación de las ecuaciones diferenciales del problema y se puede aplicar cuando el sistema de ecuaciones diferenciales es de tipo hiperbólico que consiste en un cambio de coordenadas que siempre existe, de forma que dicho sistema en derivadas parciales se convierte en ecuaciones diferenciales ordinarias. Su campo de aplicación se enmarca en la solución de problemas de plasticidad bidimensional y problemas de propagación unidimensional de ondas en suelos (L. Álvarez, 1998).
- El Método de las Ecuaciones Integrales se inicia con la solución elemental de un tipo de problemas y mediante integración de la misma solucionar un problema más complejo del mismo tipo y se requiere que el problema sea lineal. Se aplica en problemas de distribución de carga para cualquier forma y tipo en casos de cargas cualesquiera, así como también la distribución de carga en el fuste de pilotes con carga vertical o carga horizontal (L. Álvarez, 1998).
- El Método de los Elementos Finitos constituye el más aplicado en Geotecnia; además es de muy fácil comprensión para los técnicos resultando un método obvio y simple. Se puede describir como un método específico del cálculo variacional, caso particular del método de Ritz - Galerkin, extensión del método de diferencias finitas o una ampliación del cálculo matricial de estructuras. Se encuentran aplicaciones prácticamente en todos los problemas de la Geotecnia actual como: la simulación de la construcción de

obras de tierra, la interacción suelo-estructura, pilotes, excavaciones subterráneas, flujo a través de medios porosos, la consolidación y otros (Chrzanowski, *et al.*, 1985; Chrzanowski, *et al.*, 1986; L. Álvarez, 1998; Szostak-Chrnowski, *et al.*, 2001; Wilkins, *et al.*, 2002; Oszczak, *et al.*, 2003; Szostak-Chrnowski, *et al.*, 2003).

En el Método de los Elementos Finitos se divide el continuo en elementos interconectados en un número finito de nudos en los cuales actúan las resultantes del sistema de cargas que solicitan al continuo. Considerando las relaciones tensión - deformación de cada uno de los elementos y suponiendo una función de acuerdo a la cual se pueden definir los desplazamientos dentro del elemento en función de los desplazamientos nodales, es posible, utilizando técnicas de análisis de estructuras, conocer el comportamiento de la estructura ensamblada.

Es evidente que el número de interconexiones en el continuo es infinito y que el método es, por tanto, más exacto mientras mayor sea el número de elementos utilizados. Sin embargo, la experiencia muestra que la mayoría de los problemas prácticos pueden ser resueltos con suficiente aproximación sin recurrir a cantidades de elementos que sean prohibitivas para la solución por computadoras.

Al diseñar una presa de tierra, se debe evaluar el factor de seguridad en relación con la posibilidad de una falla catastrófica de la obra en conjunto y la probabilidad de ocurrencia de ciertos desperfectos que reducen su utilidad: agrietamiento del núcleo impermeable, falla estructural de un dentellón de hormigón construido para limitar los gastos de filtración en la cimentación, efecto de las concentraciones de esfuerzos en la frontera entre núcleo y filtros y otros; para esto es necesario analizar el estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura.

El análisis de la presa de tierra mediante una desratización del dominio (terraplén de la cortina) y de su cimentación en elementos finitos, prueba la potencia de este procedimiento para incorporar bi o tridimensionalmente cualquier contorno, cualquier ecuación constitutiva de los suelos de la presa o para reproducir el proceso constructivo que permite una modelación adecuada, para juzgar los

principales problemas que se presentan en el proyecto y la construcción siendo las filtraciones las de mayor interés en el desarrollo de la siguiente investigación.

1.2.1 PRINCIPALES CLASIFICACIONES DE PATOLOGÍAS EN PRESAS DE TIERRA.

En las presas de tierra producto a las deformaciones que se presentan, pueden ocurrir un grupo de eventos que influyen significativamente en la estabilidad de sus taludes, lo que puede provocar una falla parcial o total de la obra.

Los fallos de este tipo de estructuras de tierra, constituye una de las principales preocupaciones del inversionista, proyectista, constructor y de todas las personas que viven aguas abajo de la obra. Dado que la rotura de un embalse no solo constituye un fracaso económico de gran magnitud, sino una amenaza a la seguridad pública (Sherald, *et al.*, 1963; Armas, 2002; Bulley, *et al.*, 2003; Bufaro, 2008).

Las fallas que ocurren en presas de tierra se originan por eventos que influyen en la estabilidad de estas debido a las deformaciones que de acuerdo a su magnitud pueden llegar a ser catastróficas convirtiéndose la misma en una amenaza para todos los sectores tanto económicos, sociales como ambientales, por ende:

Las principales causas de falla catastrófica de las presas son:

- El desbordamiento de las aguas por insuficiente capacidad del vertedor.

El desbordamiento de la presa casi siempre tiene su causa en la pobre evaluación de la avenida probable o de un diseño incorrecto de la obra. Es siempre catastrófico que el agua rebase la cortina y escurra por el talud aguas abajo, debido precisamente a la naturaleza erosionable de los materiales que intervienen en su composición.

Otra causa que puede provocar el fallo por rebase de la cortina, si no se atiende a tiempo, es el asentamiento excesivo del cimiento y el terraplén (Armas, 2002).

- Fallas por sifonamiento.

El sifonamiento se produce cuando una fuga de agua se concentra y erosiona el suelo progresivamente hasta formar un conducto que une al embalse con el pie del talud aguas abajo. Cuando el agua fluye a través del terraplén y el cimiento,

su carga hidráulica se disipa venciendo las fuerzas viscosas inducidas que se oponen al flujo en los poros del suelo; recíprocamente, el agua que fluye genera fuerzas erosivas que tienden a empujar a las partículas, arrastrándolas en la dirección del flujo. En el momento en que este arrastre se produce comienza el sifonamiento mecánico del suelo. Las fuerzas resistentes dependen de la cohesión, del acomodamiento y el peso de las partículas, así como de la existencia de filtros aguas abajo.

Según el mecanismo descrito, el sifonamiento se produce en las zonas más sueltas de un suelo, donde la cohesión sea mínima y el gradiente sea alto. El sifonamiento comenzará en la zona aguas abajo, donde se presenten estas características, creando un orificio, de donde saldrá agua y partículas de suelo.

El agujero creado se ampliará aguas arriba, hasta llegar al embalse. En general, los suelos de la base de una presa son heterogéneos y pueden presentar lentes de arena finas, los cuales son muy susceptibles al sifonamiento mecánico (GEOCUBA, 2004).

- El agrietamiento transversal.

El agrietamiento puede ser transversal al eje de la presa y longitudinal, cuando coincide con el eje de la cortina. En general las grietas se pueden propagar a lo largo de planos en cualquier dirección. Las grietas pueden tener extensiones y anchos muy variables. Las anchas y grandes, aunque peligrosas, son fácilmente detectables, siendo las finas las más peligrosas por cuanto pueden pasar inadvertidas.

El agrietamiento se produce cuando en el cuerpo de la cortina se producen esfuerzos de tracción. Estos esfuerzos tienen su origen en deformaciones diferenciales entre las distintas partes del terraplén, incluyendo su cimentación.

La geometría de la cortina y la compresibilidad de los diferentes materiales que la componen definen asentamientos diferenciales entre los mismos, que pueden producir zonas de tracción, compresión y eventualmente grietas.

Las grietas transversales resultan peligrosas pues atraviesan la cortina desde aguas arriba hasta aguas abajo, facilitando el flujo concentrado en una zona de la cortina. Se originan por asentamientos diferenciales entre tramos adyacentes de la cortina, por ejemplo, en una zona que descansa sobre el área del cauce y otra sobre el hombro rocoso. Esta situación empeora si el terreno en la zona del cauce está compuesto por estratos compresibles.

Por otro lado, el agrietamiento longitudinal no es muy peligroso y el mismo se produce con relativa frecuencia en las grandes presas con espaldones de enrocado (GEOCUBA, 2004).

- El deslizamiento del talud aguas abajo.

El deslizamiento del talud aguas abajo se produce cuando a lo largo de una determinada superficie de falla se ejercen esfuerzos mayores que la resistencia que pueda movilizar el suelo en esa misma superficie.

La falla por deslizamiento de taludes es quizá la más estudiada de todas las que frecuentemente ocurren en las presas de tierra. La razón es que, además de su importancia intrínseca, es el tipo de falla más susceptible de análisis y cuantificación con los métodos existentes para el estudio de estabilidad de taludes.

Existe un buen volumen de información estadística respecto a este tipo de falla, de la que se desprende que las fallas por deslizamiento ocurren preponderantemente en los primeros tiempos de la vida de la presa y también, ésta es sin duda una conclusión alentadora, acontecen cada vez más raramente en presas de reciente y cuidadosa construcción; de hecho parece haber evidencia suficiente para poder decir que si el diseño y la construcción de una presa, por alta que sea, se cuidan lo necesario, las técnicas de que se dispone permiten adoptar una actitud de tranquilidad ante la posibilidad de ocurrencia de estas fallas. Pueden ocurrir durante la construcción, durante la operación o después de un vaciado rápido (Armas, 2002).

- El efecto de los sismos.

Para el caso de las presas cubanas el efecto de los sismos no ha sido suficientemente estudiado y no existen datos ni elementos suficientes para hacer una valoración sobre el efecto de los mismos. No obstante a juzgar por la experiencia de (Sherald y Woodward, 1963), puede decirse que las fallas producidas por los sismos en las presas de tierra han presentado las siguientes características:

- Las fallas más frecuentes son grietas longitudinales en la corona de la presa y asentamiento en la misma.
 - Solo existe un caso en que se ha reportado la destrucción total de una presa de tierra por sismo, probablemente debido a la licuación.
 - Los daños en las presas parecen haber sido causados principalmente por la componente horizontal del movimiento sísmico en dirección transversal al eje de la cortina.
 - Existen muy pocas fallas por deslizamiento atribuibles a estos temblores de tierra, aún en cortinas deficientemente compactadas.
 - Hay ciertos indicios que permiten pensar que los sismos que causan más daños a presas tienen mayores períodos (menores frecuencias) que los que causan la máxima destrucción en edificios. Por esto, presas muy próximas al epicentro de un temblor pueden salir mucho mejor libradas que otras colocadas a mayores distancias.
 - Los espaldones granulares mal compactados (bajo peso específico seco, γ_d), o formados por fragmentos de roca muy contaminada por finos, pueden sufrir fuertes asentamientos por sismo, que provocarían dificultades al elemento impermeable. Así, la compacidad adecuada y el lavado de las rocas que lo ameriten constituyen una precaución indispensable.
 - Del sismo puede emanar el riesgo de la falla por licuación que se describirá a continuación (Armas, 2002).
- Falla por licuación.

Este fenómeno de la licuación está asociado a limos y arenas no plásticas. En el caso de una presa de tierra, la licuación de materiales en la cortina conduce a un derrame de los mismos en grandes áreas, hasta adoptar taludes irregulares y muy tendidos, que en algunos casos pueden sobrepasar el valor 10:1.

Como ya se dijo, los suelos más susceptibles a la licuación son los finos, no cohesivos, de estructura suelta y saturados. Estas características describen a las arenas finas y uniformes y a los finos no plásticos, o sus mezclas. Las arenas sueltas con $D_{10} < 0,1\text{mm}$ y coeficiente de uniformidad, $C_u < 5$ y los limos con $I_p < 6\%$ son los materiales más peligrosos, tanto en la cortina como en el terreno de cimentación de una presa de tierra (Armas, 2002, p. 6).

- Filtraciones.

En el caso de filtraciones superiores a los valores estimados en el diseño, se pueden comprometer la función principal de las presas en muy corto plazo, almacenar agua y por ende un colapso de la cortina.

La causa de la misma está asociada a la presencia de carso o cavernas en el vaso de la presa, que provocan pérdidas de agua muy superiores de las que ocurren debido a las filtraciones a través de la cortina de la presa.

Una de las principales desventajas de las presas de material suelto consiste en las filtraciones tanto en el cuerpo de la presa como en su cimentación. Las filtraciones producen distintos efectos como pérdida de agua, presiones internas con componentes opuestas al efecto estabilizador del peso, disminución de la cohesión y su resistencia al rozamiento y erosión interna progresiva (sifonamiento) de la presa o su cimentación.

Basado en este último criterio se identifican una serie de soluciones contenidas en los diseños de presas de tierra que en determinado grado algunos han sido identificados en la obra objeto de estudio, los cuales son relacionados a continuación:

- Elementos de control de la filtración:
 1. Núcleo arcilloso, que reduce los caudales de filtración;

2. Filtro, que impide la erosión interna;
 3. Dren, que controla y conduce la filtración
- Soluciones de impermeabilización:
 1. Trinchera rellena con suelos arcilloso compactado
 2. Muro pantalla de hormigón.
 3. Pantalla continua flexible; excavada con lodos bentónicos para mantener las paredes, y rellena con arena-grava bien graduada.
 4. Pantalla de tablestacas; (comportamiento no demasiado satisfactorio);
 5. Pantalla de inyecciones; varias alineaciones de inyecciones.
 6. Mantos de impermeabilización horizontales, aguas arriba de la presa, y pozos de alivio, con sus filtros, en la zona de aguas abajo.

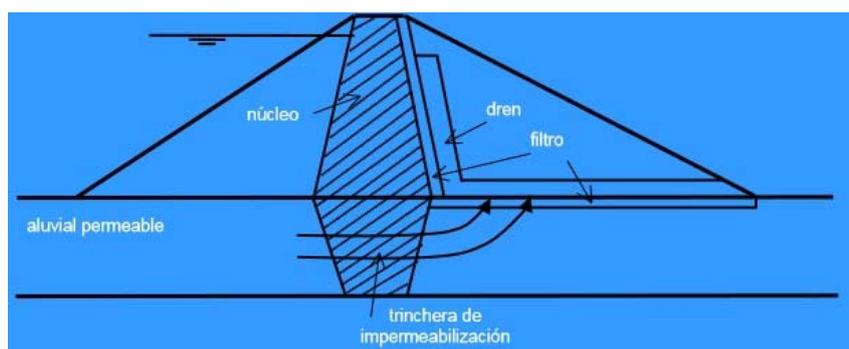


Figura 1.3. Representación gráfica de una presa de tierra con algunos elementos de control y reducción de las filtraciones

En el caso particular de las filtraciones, centra la atención el presente trabajo de diploma, por lo que se hace necesario citar las fallas estructurales en cortinas de presas de tierras para el caso cubano en las cuales han ocurrido fallas parciales por deslizamiento del talud aguas abajo o la presencia de grandes grietas con asentamientos diferenciales:

- Presa Zaza, Sancti Spíritus, 1972. Ocurrió producto del sifonamiento que se produjo al agrietarse la tubería de desvío.
- Presa Herradura, Pinar del Río.

- Presa Lebrije, Sancti Spíritus, 2002.

1.2.2 PRINCIPALES ASPECTOS A MONITOREAR EN UN SISTEMA DE VIGILANCIA TÉCNICA EN PRESAS DE TIERRA.

Autores como (Popnicolov, 1974; B.O.E, 1998) hicieron referencia a la importancia de una correcta instalación y distribución espacial de la instrumentación y de los sensores a emplear en el complejo hidráulico ante posibles fallas durante el proceso de monitoreo a partir de Sistemas Automatizados para la Vigilancia Tecnológica de los Embalses. Como resultado de la actualización de estos conocimientos se puede apreciar en los ejemplos de aplicación que desarrollo Botello (2006) en el uso de los métodos numéricos a problemas de ingeniería vinculados a un Sistema de Vigilancia Tecnológica como una alternativa viable en la ingeniería.

En el caso particular de las filtraciones, se instrumentan vertedores totalizadores en determinadas secciones aguas debajo del talud para registrar el volumen de agua que pasa por el área que se monitorea en la sección que colecta el vertedor. Creando así un registro histórico de los gastos medidos en diferentes momentos y escenarios de consideración para el monitoreo técnico del embalse.

Además, también se registran las variaciones del nivel freático de los piezómetros y pozos de alivio en el cuerpo de la cortina y al pie del talud para poder establecer una correlación histórica entre los niveles de agua del embalse y su tiempo de retardo, surgencia, permanencia y reducción de la LCS en el interior de la cortina del embalse según varios estudios (M. Álvarez, Martínez, Espinosa, *et al.*, 2014; M. Álvarez, Martínez, Pedraza, *et al.*, 2014).

1.2.3 COMPORTAMIENTO DE LAS FILTRACIONES EN PRESAS DE TIERRAS.

Las filtraciones tienen un interés intrínseco en el diseño de presas de tierra, puesto que la presa se hace para retener agua y toda pérdida de ella va contra ese objetivo fundamental; no obstante, dada las características permeables de los materiales utilizados en la construcción, se considera un diseño que filtre valores mínimos de agua a través del cuerpo de la estructura sin que este proceso desencadene posibles fallas estructurales que desencadenen el colapso de la estructura.

El comportamiento histórico de las filtraciones de un embalse también tiene un valor como índice, pues una filtración excesiva acusa un defecto que puede derivar en aumento de la presión intersticial, lavado de los materiales o de las diaclasas de la roca con repercusión creciente y creación de nuevas conexiones de tubificación y ensanchamiento de las existentes. Por eso es casi más interesante que la magnitud de la filtración su constancia o variación.

Una filtración notable, pero invariable en el tiempo puede no ser peligrosa. En cambio, puede ser alarmante una pérdida pequeña en su comienzo que va aumentando con el tiempo, porque ello es señal del lavado del material según se comentó previamente. Sobre todo, si el agua sale turbia o con altos contenidos de sales totales, lo cual denota que hay disolución o arrastre de materiales, por lo que las filtraciones han de observarse tanto integral como individualmente (González, et al., 2002).

La medida conjunta de las filtraciones da un índice del comportamiento general pero no basta. Se hace necesario observar también por zonas, para ver si algunas de ellas son causa de la mayor parte de las pérdidas.

Las observaciones se hacen en las galerías de visita, viendo en cada una el caudal de las cunetas y observando si algunos drenes dan más agua que otros (como es lo normal). De esta forma podemos inyectar la zona más permeable, atacando el mal en el sitio más agudo. La observación conjunta se puede hacer recogiendo todas las filtraciones en un canalillo colector final provisto de un vertedero triangular para poder medir con la mayor exactitud posible el caudal.

Las galerías y pozos de drenaje realizados para la observación y control de las filtraciones y presiones intersticiales en el cuerpo de la cortina, generalmente penetran la roca o suelo base en la que se encuentra cimentada la estructura. Esta acción se fundamenta en la necesidad de verificar que en el proceso de las filtraciones no haya manantiales que puedan provenir del suelo en el cimiento (González, et al., 2002).

El desarrollo de la Mecánica de Suelos en el siglo pasado permitió realizar estudios más reales de las filtraciones a través de los medios porosos con grandes

aplicaciones en el diseño de presas de tierras, algo que con anterioridad se realizaba por métodos empíricos (J. Craig, 1995; R. Craig, 1997; Christian, *et al.*, 2004; Blanco, 2005; Labra, *et al.*, 2009; Anónimo, 2011).

Puntos notables en este desarrollo fueron:

- El enunciado de la Ley de Darcy que define el gasto que pasa por un medio poroso, conocido el coeficiente de permeabilidad del mismo, el gradiente hidráulico y el área de la sección transversal por donde ocurre el flujo, considerando un análisis plano.
- Lo demostrado por Forchheimer de que la función de la carga hidráulica que gobierna el flujo en un medio poroso es una función armónica y por tanto satisface la ecuación de Laplace.
- La solución gráfica dada por el propio Forchheimer a la ecuación de Laplace a través del Método de las Redes de Flujo, continúa siendo el método práctico más utilizado para el estudio de las filtraciones a través del suelo.

Al resolver el problema práctico de las filtraciones en el diseño de las presas de tierras se obtiene información de tres aspectos fundamentales para el diseño:

- El gasto de agua de infiltración a través de la zona de flujo.
- La influencia del flujo de agua sobre la estabilidad general de la masa de suelo a través de la que ocurre.
- Las posibilidades del agua de infiltración de producir arrastres de material sólido, erosiones, sifonamientos, etc.

En las presas de tierra producto a las filtraciones que se presentan, pueden ocurrir un grupo de eventos que influyen significativamente en la estabilidad del talud, lo que puede provocar la falla parcial o colapso de la estructura.

Es por ello que en el campo de la ingeniería en realidad no se estudian solo las posibles fallas que provocan el colapso de las presas, sino también otros tipos de fallas que no conducen de inmediato a una falla general de la presas, que si no se soluciona a tiempo puede ir aumentando hasta convertirse en una falla peligrosa

que compromete el buen funcionamiento de dicha presa e implican o desencadena una serie de sucesos consecutivos que finalizan igualmente en el colapso total de la cortina de la presa a largo plazo.

1.2.4 ESTADO ACTUAL DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA APLICADO AL DISEÑO INGENIERIL Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE FILTRACIONES EN CORTINAS DE PRESAS DE TIERRA

La modelación es un método que puede ser utilizado en casi todos los problemas ingenieriles, esta es capaz de dar una solución aproximada a casos que por su complejidad matemática requiera de la aplicación del cálculo electrónico.

En el campo de la ingeniería, la solución a fenómenos donde por limitaciones del conocimiento o por la carencia de una infraestructura técnica adecuada se hace desde el enfoque empírico, por lo que no se ha podido encontrar la respuesta en el “problema real” que se pretende abordar. Esto ha propiciado la necesidad de recurrir a la capacidad creativa y lograr una abstracción de este problema, obteniendo “modelos virtuales” sobre los cuales se trabajan buscando una respuesta analítica, que por muy precisa que sea esta, los resultados obtenidos serán indicativos del “problema real” en la medida que el “modelo virtual” represente fielmente sus propiedades esenciales.

Una vez concebido el modelo virtual se parte del análisis de los esquemas de estados de cargas que pueden estar presentes y sus posibles variantes, por lo que el comportamiento elemental del material y las condiciones de contorno impuestas, se implementa el método para dar solución a todo el problema real. A pesar de que existen varias alternativas para dar este paso, donde cada una constituye un método de análisis diferente, los que se pueden agrupar en empíricos, analíticos y numéricos.

En el caso de los métodos analíticos, el cálculo consiste en la evaluación de las fórmulas matemáticas desarrolladas mediante un proceso de análisis. Los Métodos Numéricos son técnicas basadas en procedimientos numéricos de aproximación de funciones iterativas y define su campo de uso donde las soluciones analíticas son inabordables por la complejidad matemática que requieren, lo que se facilita en la actualidad con la ayuda del cálculo asistido por ordenadores (Oñate, 2009).

La aplicación de estas técnicas ha tenido una amplia difusión en el campo de la ingeniería con la aparición de computadoras cada vez más potentes y programas de computación más modernos que implementan dichos métodos, esto permite al ingeniero analizar problemas cuya solución analítica es inabordable por su complejidad y el enfoque de solución empírico es dudoso al no presentar valores ingenierilmente lógicos. En la actualidad, con la aplicación del Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de Diferencias Finitas (MDF) se obtienen respuestas apropiadas a problemas que por presentar un elevado grado de dificultad estos empiezan a jugar su papel.

Actualmente la integración del cálculo por medio de los elementos finitos (Finite Element Analysis-*FEA*), según se conoce en inglés) y el dibujo asistido por computadora (Computer Aided Design-*CAD*), son utilizados con frecuencia, con el objetivo de validar los resultados obtenidos de los proyectos previo a su puesta de producto en el mercado o en una segunda variante en la que se analizan las causas que provocan fallas desde un enfoque estructural y patológico.

Estos criterios vinculados al desarrollo de la industria de la computación y las nuevas plataformas de programación informática, ha favorecido la aparición en el mercado de sistemas profesionales basados en estos métodos numéricos con grandes potencialidades para el análisis de los problemas tensión-deformación y filtraciones en suelo asociados con los sólidos, entre los cuales se destacan: ANSYS 10.0, SDRC/IDEAS, ABAQUS, COSMOS, SAP2000, STAAD, GEOSTUDIO, etc...(Hernández, 2008)

Las bondades ofrecidas por estos sistemas, inciden en la apertura de nuevos horizontes al campo de la modelación estructural y su uso no solo se enmarca en la solución de problemas complejos donde los métodos analíticos y empíricos son insuficientes.

Para poder obtener resultados técnicamente válidos y resolver el problema de modelación que se pretende abordar en la presente investigación se hace necesario realizar un estudio desde un enfoque algebraico, donde el conjunto infinito de números que representan la función o funciones incógnitas en el continuo (dominio),

es reemplazado por un número finito de parámetros incógnita mediante un proceso de discretización aproximada.

En el presente trabajo de diploma se pretende aplicar el MEF a la modelación de las filtraciones en la Presa Zaza por lo que se dará una panorámica más amplia acerca de los aspectos relacionados con su aplicación en el campo de la ingeniería en cuanto a la generación del mallado o discretización del dominio y a los posibles errores en el proceso de calibración del modelo que se puedan cometer en cuanto a la formulación del modelo y la interpretación de los resultados desde un punto de búsqueda de la reducción del costo computacional.

Este proceso se basa en establecer una expresión en términos de incrementos finitos de las variables que sea equivalente y que a su vez sustituya a la expresión diferencial original. En este problema todas las variables quedarán discretizadas y junto a la discretización de las ecuaciones diferenciales se podrán obtener expresiones que relacionan los valores de las variables y sus incrementos diferenciales, lo que permite dar una solución de forma incremental aproximada.

Es por ello que el medio continuo se divide en elementos interconectados en un número finito de nodos en los cuales actúan las resultantes de los sistemas de cargas que solicitan al continuo. Considerando las relaciones tensión-deformación de cada uno de los elementos y suponiendo una función de acuerdo a la cual se pueden definir los desplazamientos dentro del elemento en función de los desplazamientos nodales, se hace posible utilizando técnicas de análisis de estructuras y se logra conocer el comportamiento de la estructura ensamblada (Álvarez Gil, 1998).

Aplicando la variante similar para el flujo de agua por un medio poroso, representado por un elemento bidimensional diferencial, sujeto a ecuaciones en derivadas parciales que gobiernan el flujo de entrada y salida de elemento diferencial que se interconecta a los demás elementos que le circundan en el dominio.

Es por ello que se conoce que en un elemento continuo la cantidad de interconexiones es infinita por lo que mientras más amplio sea el número de interconexiones más exacto será valor calculado en el método. No obstante se ha

demostrado que para resolver problemas prácticos no es necesario implementar modelos con una elevada densidad de elementos que imposibiliten la obtención de resultados de forma computacional, por los altos costos necesitados en el proceso de cálculo, por lo que es necesario establecer previamente un proceso de selección de la discretización óptima para la aplicación del método numérico que se va a emplear en las etapas de modelación de las estructuras (J. Álvarez, et al., 2012).

Debido al carácter de la aproximación de elementos finitos, la solución se ve afectada por diversas fuentes de error, siendo estas las más usuales relacionadas a continuación según comentó Broche (2005) en su trabajo:

- El error de discretización es inherente al carácter polinómico de la aproximación de elementos finitos. Se puede demostrar que el error es proporcional al gradiente de deformación o tensiones, por lo que debe evitarse colocar un elemento pequeño contiguo a uno grande en dependencia a la zona donde se encuentre y el proceso de refinado que se pretenda realizar.
- El error de aproximación de la geometría: en ocasiones los contornos de la estructura no son reproducidos de forma exacta por funciones polinómicas o lo que es frecuente, puede que ni siquiera se conozca la expresión analítica de la geometría, disponiéndose únicamente de las coordenadas de una serie de puntos aislados del contorno, por lo que se refina la malla para evitar este problema.
- El error en el cálculo de las integrales del elemento: el cálculo analítico de las integrales del elemento puede revestir cierta dificultad y se recomienda utilizar integración numérica. Es necesario escoger el orden de integración adecuado o se cometerá un error al evaluar por defecto estas integrales.
- Los errores en la solución del sistema de ecuaciones: la principal causa del mal condicionamiento se debe a la existencia de un elemento o grupo de elementos de gran rigidez conectados a otro u otros elementos de baja rigidez.

Por lo que la adecuada discretización del dominio, minimiza la propagación de los errores previamente mencionados, los cuales serán abordados en detalles en capítulos posteriores.

CONCLUSIONES PARCIALES

Al concluir el proceso de revisión documental se arriba a las siguientes conclusiones:

1. Se identifica que la aplicación de los métodos de PVR en el campo de la simulación numérica aplicada a presas de tierra se hace cada vez más frecuente su utilización en los estudios de simulación de fenómenos.
2. La utilización de los métodos numéricos, con el desarrollo computacional se hace cada vez más frecuente su utilización en la solución a problemas clásicos en la ingeniería hidráulica.
3. Se logra identificar los principales autores y centros investigativos, así como empresas o corporaciones y programas computacionales, a partir de los documentos científicos e investigaciones relacionadas con las patologías de filtraciones en presas de tierra a nivel nacional e internacional que fueron compilados.
4. Con la revisión documental se logra identificar los principales antecedentes aplicados a la modelación del proceso de filtraciones en presas de tierra, así como la complejidad de los fenómenos abordados y la tendencia a nivel nacional e internacional.

CAPÍTULO 2

The page features a decorative design of thin, parallel lines. A vertical line on the right side is composed of several parallel lines, extending from the top to the bottom. At the bottom, there are several horizontal lines of varying lengths and thicknesses, some overlapping the vertical line.

Capítulo 2 . Propuesta y análisis del diseño teórico del filtro para encausar las filtraciones

2.1. PRINCIPALES FÓRMULAS PARA UN ANÁLISIS DEL PROCESO DE FILTRACIONES EN PRESAS DE TIERRA.

Darcy (1856) demostró empíricamente, que en el flujo de agua en suelos porosos existía linealidad entre la velocidad y el gradiente hidráulico, la expresión que desarrolló fue la descrita a continuación.

$$V = ki = k(H_1 - H_2)/L \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

V → Es la velocidad media de filtración en el medio poroso.

K → Es la permeabilidad del suelo.

i → Gradiente hidráulico

H_1-H_2 → Es la diferencia de alturas piezométricas entre los dos puntos por donde circula el flujo.

L → Es la distancia que recorre el flujo.

La formulación de la ley de Darcy supuso un trabajo muy importante y complicado para la época en la que se realizó. A partir de aquel momento muchos investigadores analizaron su validez, y fruto de esos trabajos se determinó que dicha ley era válida para todo tipo de flujo en suelos, aunque dejaba de tener validez para velocidades de flujo muy elevadas.

En suelos que iban desde limos hasta arenas medias se demostró que era totalmente válida, mientras que para suelos de mayor permeabilidad a las arenas medias era necesario determinar experimentalmente la relación entre velocidad y gradiente

a) Fórmulas no lineales de flujo en medios porosos. utilizadas generalmente en presas con régimen turbulento analizados en el Informe Técnico (2009).

1. Ergun en 1952 presentó la siguiente ecuación

$$i = \frac{[150V(1 - \varepsilon)^2 + V^2 1.75d(1 - \varepsilon)]}{[dg\varepsilon^3]} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

ε → Porosidad.

d → Tamaño medio del grano.

g → Aceleración de la gravedad.

2. Wilkins en 1956 analizó el flujo a través de presas de escollera.

$$V_p = Wm^{0.5}i^{0.54} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

V_p → Velocidad promedio del agua a través de los poros.

W → Parámetro función del factor de forma, rugosidad de las partículas y viscosidad del fluido.

m → radio hidráulico medio i gradiente hidráulico.

3. Mc. Corquodate en 1978, también obtuvo su fórmula de resistencia no lineal.

$$i = \left[\frac{70v}{g\varepsilon m^2} \right] V_p + \left[\frac{0.54}{g\varepsilon^{0.5}} \frac{1 + f_e}{2 f_0} \right] V_p^2 \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

f_e → Factor de fricción efectivo de Darcy-Weisbach para roca.

f_0 → Factor de fricción del ábaco de Moody que hidráulicamente tenga la misma superficie y el mismo Re.

i → Gradiente hidráulico.

4. Stephenson en 1979 recopiló los datos de varios investigadores, obteniendo las ecuaciones de flujo descritas a continuación que se ajustan a su diagrama f-Re (coeficiente de fricción/número de Reynolds).

$$i = \left(\frac{800}{Re} \right) \frac{V^2}{2dg\varepsilon^2} \quad \text{Válida para flujo laminar.} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$i = \left(\frac{800}{Re+ft} \right) \frac{V^2}{2dg\varepsilon^2} \quad \text{Válida para zona de transición.} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$i = ft \frac{V^2}{2dg\varepsilon^2} \quad \text{Válida para flujo turbulento.} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde:

ft → Coeficiente de fricción.

Re → Número de Reynold.

5. Martins en 1990 presentó su fórmula para flujo turbulento,

$$V_p = \left(\frac{C}{Cu^\alpha}\right)\sqrt{2gedi} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

C → Constante igual a 0,56 para partículas angulares y 0,75 para redondeadas.

Cu → Coeficiente de uniformidad ($Cu=D60/D10$).

α → Exponente empírico igual a 0,26.

e → Índice de poros.

6. Por último, Gent en 1991 obtuvo la fórmula definida

$$i = V(1207.06 \frac{v(1-\varepsilon)^2}{g\varepsilon^3 d^2} + V^2(1.209 \frac{1-\varepsilon}{dg\varepsilon^3}) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde:

v → Viscosidad cinemática del fluido.

Ergun, McCorquodale y Gent presentan fórmulas cuadráticas, mientras que las fórmulas presentadas por Wilkins, Stephenson y Martins son exponenciales.

b) Ecuaciones del flujo de filtración en régimen permanente.

Asimismo, el análisis de la filtración permite establecer la pérdida de agua del embalse por filtración.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde:

h → Es la carga hidráulica.

k_x y k_y → Son las direcciones principales de permeabilidad.

x e y → Son los ejes coordenados.

Esta ecuación puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\text{div}([K] * \overline{\text{grad}} * h) = 0 \quad \text{Ecuación 2.11}$$

En el caso de medio isotrópico, la matriz de permeabilidad se simplifica (K)= K (I) reduciendo la Ecuación 2.11a la conocida como ecuación de Laplace:

$$\Delta * h = 0 \quad \text{Ecuación 2.12}$$

El caudal específico que fluye a través del segmento de longitud ds , es el flujo del vector velocidad a través de éste segmento:

$$dq = \bar{V} * \bar{n} ds \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Siendo v_x y v_y los componentes del vector velocidad. Los componentes del vector $\bar{n} ds$ normal al segmento ds son $(-dy, dx)$. Por lo tanto:

$$dq = -v_x dy + v_y dx \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Por lo cual es posible definir una función $\Psi(x, y)$, tal que:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = v_y \quad \text{Ecuación 2.15}$$

y

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = -v_x \quad \text{Ecuación 2.16}$$

La existencia de Ψ es la garantía del hecho que es consistente con la ecuación de continuidad:

$$\text{div } \bar{V} = 0 \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.15 y 2.16 en la ecuación 2.14, se tiene:

$$d\Psi = dq \quad \text{Ecuación 2.18}$$

La ecuación 2.18 expresa el hecho que la variación de Ψ entre dos puntos, representa el caudal específico del flujo de filtración entre estos dos puntos. Las ecuaciones 2.15 y 2.16 producen:

$$\bar{V} * \overline{\text{grad}} \Psi = 0 \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Aplicando la Ley de Darcy y considerando que el tensor de permeabilidad es simétrico $(K)^t = (K)$, la ecuación 2.19 se transforma en:

$$\{\overline{\text{grad}} h\}^t [k] \overline{\text{grad}} \Psi = 0 \quad \text{Ecuación 2.20}$$

La diferenciación de la ecuación. 2.20 se produce la siguiente expresión:

$$\text{div}([K]\overline{\text{grad}h})\{\overline{\text{grad}\Psi}\} + \{\overline{\text{grad}h}\}\text{div}([K]\overline{\text{grad}\Psi}) = 0 \quad \text{Ecuación 2.21}$$

La cual, de acuerdo a la ecuación 2.2, reduce a:

$$\text{div}([K]\overline{\text{grad}\Psi}) = 0 \quad \text{Ecuación 2.22}$$

Es decir, h y Ψ satisfacen la misma ecuación diferencial, representadas por las ecuaciones 2.11 y 2.22 respectivamente.

2.1.1. ANÁLISIS Y CÁLCULO DE LA LÍNEA DE CORRIENTE SUPERIOR

Para un primer análisis se realiza la determinación de la Línea Superior de Flujo y Línea de Descarga. En el caso de flujo no confinado, deben definirse en primer lugar la línea de saturación y la de descarga libre acorde a los distintos métodos existentes para la determinación de ambas líneas. Se muestran a continuación los distintos métodos propuestos por el norma norteamericana (U.S, 1986).

- **Hipótesis de Dupuit**

Para la solución de problemas de flujo no confinado (Dupuit, 1863) propuso las siguientes dos hipótesis de trabajo:

1. Para pequeñas inclinaciones de la línea de infiltración, las líneas de corriente son horizontales y las equipotenciales se aproximan a la vertical.
2. En cada sección vertical, el gradiente es igual a la pendiente de la línea superior de flujo e invariante con la profundidad.

$$i = \frac{dy}{dx} \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Donde i es el gradiente y el caudal “ q ” por unidad de profundidad para una sección vertical de la presa será:

$$q = -ky \frac{dy}{dx} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

e integrando

$$qx = -k \frac{y^2}{2} + C \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Introduciendo en la ecuación 2.25 las condiciones de frontera, cuyo significado físico se observa en la Figura 1 (para $x = 0$, $y = h_1$; para $x = d_0$, $y = h_2$), se obtiene para el caudal q la fórmula de Dupuit

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2d_0} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

y para la línea superior de flujo la ecuación

$$y^2 - h_1^2 = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{d_0} x \quad \text{Ecuación 2.27}$$

que define la llamada parábola de Dupuit (ver figura 2.1). Es obvio que la ecuación anterior no representa correctamente la línea superior de flujo, pues no cumple las condiciones de entrada ni de salida; más aún, para $h_2 = 0$ la parábola de Dupuit intersecaría la línea de flujo representada por la frontera impermeable AB. A pesar de estas desviaciones y, en general, de las hipótesis simplistas de Dupuit, se sabe que:

- para presas con taludes verticales, la fórmula de Dupuit es una expresión rigurosa del caudal;
- para presas con taludes cualesquiera, la misma fórmula da valores del caudal suficientemente aproximados para fines prácticos. Empíricamente se sabe que en este último caso se obtiene una mejor aproximación si se sustituye por d en la ecuación 2.26 de Dupuit (ver figura 2.1), quedando

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2d} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

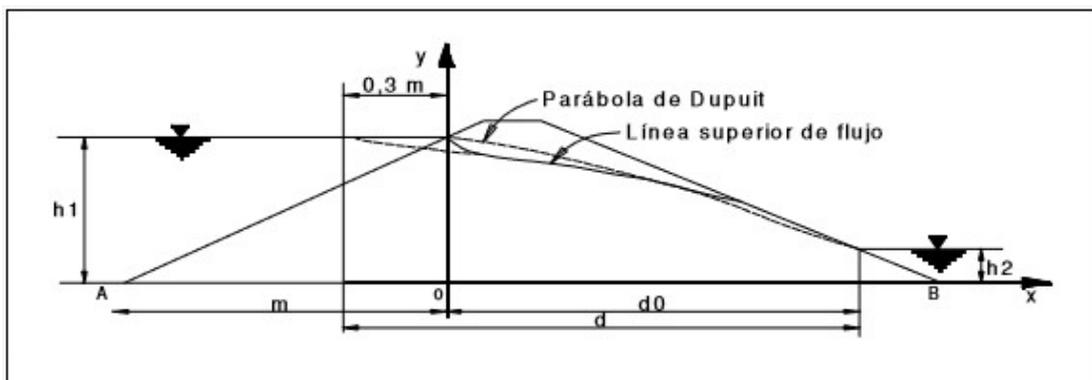


Figura 2.1: Parábola de Dupuit y Cálculo del caudal según la fórmula de Dupuit.

- **Según Schaffernak-Van Iterson**

En la figura 2.1 puede verse que la mayor desviación entre la línea superior de flujo y la parábola de Dupuit se debe a que no se satisfacen las condiciones de entrada y de salida. En vista de esto, Schaffernak y van Iterson propusieron en 1916, independientemente, determinar la posición de la línea superior de flujo y mantener las dos hipótesis de Dupuit, pero imponiendo la condición de salida correcta, como se indica en la figura 2.2 para el caso de tirante nulo aguas abajo de la presa. Así, se obtiene que la línea superior de flujo es la parábola C'D' (ver figura 2.2). Mantiene para la línea superior de flujo la ecuación

$$y^2 - h_1^2 = \frac{h_2^2 - h_1^2}{d_0} x \quad \text{Ecuación 2.29}$$

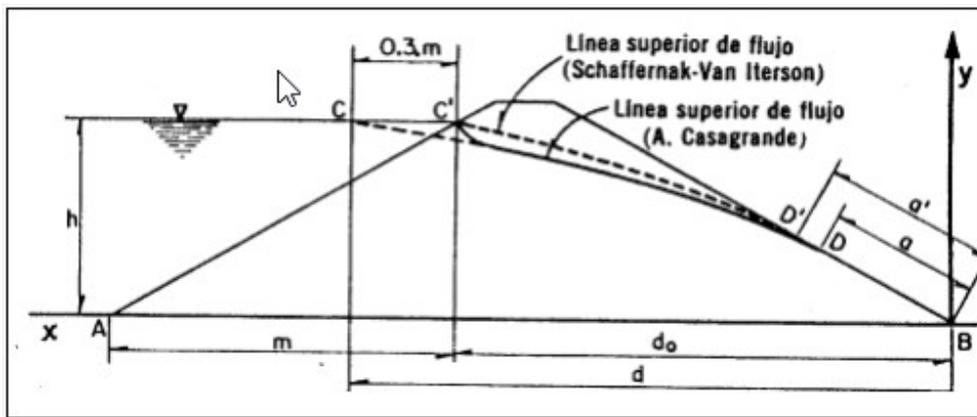


Figura 2.2: Solución de Schaffernak-Van Iterson modificada por Casagrande.

Cumpliendo la condición de salida con:

$$a' = \frac{d_0}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d_0^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad \text{Ecuación 2.30}$$

Donde α es el ángulo del talud aguas abajo de la presa. Y el caudal infiltrado, función de la pendiente del talud aguas abajo es

$$q = k a \operatorname{sen} \alpha \tan \alpha \quad \text{Ecuación 2.31}$$

Esta ecuación da valores suficientemente aproximados para fines prácticos

- **A. Casagrande**

Mantiene las dos hipótesis de Dupuit. La línea superior de flujo resulta

$$y^2 = \frac{-h_1^2}{d} x + h_1^2 \quad \text{Ecuación 2.32}$$

Sugiere que, a fin de satisfacer la condición de entrada, con: $d=0.3 \text{ m} + d_0$, el punto de arranque de la parábola se tome en C y no en C', corrigiendo después localmente la parábola a la entrada, como se muestra en la figura 2.2

Cumple las condiciones de salida, y como en el caso de la fórmula de Dupuit, en la que resulta de las hipótesis de Schaffernak-Van Iterson debe entonces sustituirse d_0 por d , de modo que, finalmente.

$$\alpha = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad \text{Ecuación 2.33}$$

Y el caudal

$$q = Ky \frac{dy}{dx} = k a \operatorname{sen} \alpha \tan \alpha \quad \text{Ecuación 2.34}$$

Donde el caudal resulta dependiente de la inclinación del talud de aguas abajo. Ambas ecuaciones son aproximadamente válidas para $0 < \alpha < 30^\circ$.

Casagrande (1937) proporciona los siguientes consejos a ingenieros inexpertos y a los estudiantes a la hora de trazar las líneas de flujo citadas en (Hernán , *et al.*, 2014):

1. Úsense todas las oportunidades posibles para estudiar la apariencia de las redes de flujo bien hechas, tratando después de repetirlas sin tener a la vista el modelo, hasta obtener dibujos satisfactorios.
2. Usualmente es suficiente trazar la red de flujo con una cantidad de canales comprendidos entre cuatro o cinco. El uso de muchos canales dificulta grandemente en trazo y desvía la atención de los aspectos esenciales.
3. Debe siempre obtenerse la apariencia de la red en conjunto, sin tratar de corregir detalles, hasta que toda ella esté aproximadamente bien trazada.
4. Frecuentemente hay partes de la red en que las líneas de flujo deben ser aproximadamente rectas y paralelas; en ese caso los canales son más o menos del mismo ancho y los cuadrados deben resultar muy parecidos. Puede facilitar el trazo de la red el comenzar por esa zona.

5. Las redes de flujo en áreas confinadas, limitadas por fronteras paralelas (especialmente la superior y la inferior) son frecuentemente simétricas, y las líneas de flujo y las equipotenciales son, entonces, de formas parecidas a las elípticas.
6. Un error común en los principiantes es el de dibujar transiciones muy bruscas entre las partes rectas y las curvas de las diferentes líneas. Debe tenerse presente que las transiciones deben ser siempre muy suaves y de forma parabólicas o elípticas; el tamaño de los diferentes cuadrados debe ir cambiando también gradualmente.
7. En general, el primer intento conduce a una red de cuadrados en toda la extensión de la región de flujo. La caída de potencia entre dos equipotenciales sucesivas correspondientes a un cierto número de canales con el que se intentó la solución, no suele ser una parte entera exacta de la pérdida total de potencial, de manera que al terminar la red suele quedar una última hilera de rectángulos entre dos líneas equipotenciales en la que la caída de carga es una fracción de la Δh que haya prevalecido en el resto de la red. Generalmente esto no es perjudicial y esta última hilera puede tomarse en cuenta para el cálculo de n_e , estimando qué fracción de caída ha resultado. Si, por razones de presentación, se desea que todas las hileras de cuadrados queden con el mismo Δh , podrá corregirse la red, cambiando el número de canales de flujo, bien sea por interpolación o empezando de nuevo. No debe intentarse convertir la hilera incompleta en una de cuadrados por correcciones locales puramente gráfica, a no ser que el faltante o sobrante de espacio en la hilera incompleta sea muy pequeño.
8. Una superficie de salida en la red, en contacto con el aire, si no es horizontal, nunca es ni línea de flujo ni equipotencial, de manera que los cuadrados limitados por esa superficie no pueden ser completos.

Métodos Analíticos

1. Transformaciones, mapeos

El uso de transformaciones y mapeos para transferir la geometría de un problema de filtración en un plano complejo en otro plano. De esta manera, la geometría de un problema puede tomarse de un plano donde la solución es desconocida a un plano donde la solución es conocida. Mientras este método se ha usado para obtener las soluciones de problemas generales, no es frecuentemente usado para las soluciones de problemas de infiltración específicos, ya que requiere del uso de teorías sobre variables complejas y la elección de funciones apropiadas para la transformación.

Estas transformaciones o mapeos son del tipo $w = f(z)$, donde w y z son complejos

Sea la función f definida en la vecindad de un punto z_0 por medio de la ecuación $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$

Si existe $f'(z)$ en un punto $z_0 = x_0 + iy_0$, entonces las derivadas primeras parciales de u y v con respecto a x e y existen en (x_0, y_0) y satisfacen las ecuaciones de Cauchy-Riemann en dicho punto.

Es decir, se satisfacen:

$$\left(\begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x}(x_0, y_0) = \frac{\partial v}{\partial y}(x_0, y_0) \\ \frac{\partial u}{\partial y}(x_0, y_0) = -\frac{\partial v}{\partial x}(x_0, y_0) \end{array} \right) \quad \text{Ecuación 2.35}$$

Que resultan de igualar las derivadas en cada una de las direcciones (ec. de Cauchy-Riemann)

$$\left(\begin{array}{l} f'(z) = \frac{\partial u}{\partial x}(x_0, y_0) - \frac{\partial v}{\partial x}(x_0, y_0) \\ f'(z) = \frac{\partial v}{\partial y}(x_0, y_0) - \frac{\partial u}{\partial y}(x_0, y_0) \end{array} \right), \text{ además} \quad \text{Ecuación 2.36}$$

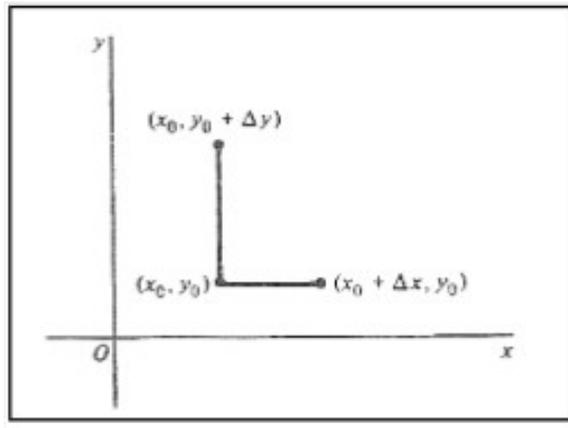


Figura 2.3: Incrementos del Punto z_0 en x e y .

Las ecuaciones de Cauchy-Riemann (ecuación 2.1.1.13), son necesarias para la existencia de $f'(z_0)$, se suelen utilizar frecuentemente para localizar puntos donde una función no tenga derivada. Es decir que se verifica el no cumplimiento de las ecuaciones de Cauchy-Riemann.

Ahora bien, una función de valor real h de dos valores reales x e y es armónica en un dominio dado del plano xy , si en todo punto de ese dominio tiene derivadas parciales (primera y segunda) continuas y satisface la ecuación diferencial parcial de Laplace

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) = 0 \quad \text{Ecuación 2.37}$$

Si una función $f(z) = u(x,y) + iv(x,y)$ es analítica en un dominio D , se demuestra que las funciones componentes u y v son armónicas en D . Expresamente si una función de una variable compleja es analítica en un punto, se cumple que sus partes real e imaginaria tienen derivadas parciales de todos los órdenes, continuas en dicho punto.

Ya que f es analítica en D , las primeras derivadas parciales de sus componentes satisfacen las ecuaciones de Cauchy-Riemann en todo punto D , es decir

$$\left(\begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x} \end{array} \right)$$

Ecuación 2.38

Al diferenciar los dos miembros de estas ecuaciones respecto a x, se tiene

$$\left(\begin{array}{l} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} = \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \end{array} \right)$$

Ecuación 2.39

De igual manera al diferenciar respecto a y, se obtiene

$$\left(\begin{array}{l} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \end{array} \right)$$

Ecuación 2.40

Y al aplicar el teorema del cálculo de variables reales, la continuidad de las derivadas parciales asegura que $\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} = \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}$ y $\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x}$. Por lo tanto, de las ecuaciones 2.39 y 2.40, resulta:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, y) + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}(x, y) = 0 \quad y \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}(x, y) + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}(x, y) = 0 \quad \text{Ecuación 2.41}$$

Es decir que, $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$ si es analítica en un dominio D, sus funciones componentes u y v son armónicas en D. Un ejemplo de solución analítica a la ecuación de Laplace por mapeo es el encontrado por Kozeny (1971) quien toma como función analítica de mapeo, $z=Cw^2$. Kozeny resuelve el problema para infiltración en una presa de tierra sobre una superficie impermeable con un dren ubicado al pie de la misma, aguas abajo.

El objeto del dren es controlar la infiltración en el cuerpo de la presa. En el dren se ubican conductos colectores del agua que luego descargan o en el vertedero de la

presa o directamente en el río. El coeficiente de conductividad hidráulica del dren es mayor que el del cuerpo de la presa.

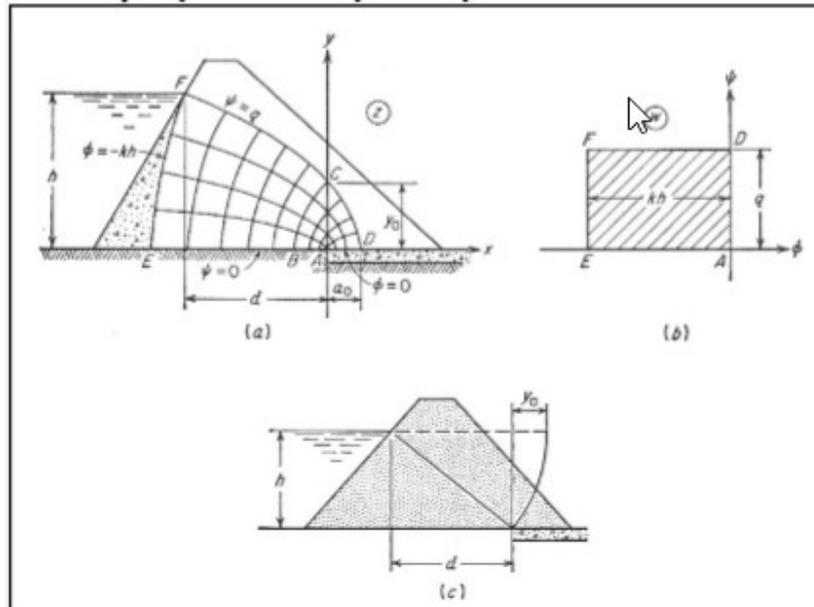


Figura 2.4: Mapeo con la función $z = w^2$, parábola de Kozeny.

Para el análisis del escurrimiento la línea entre el cuerpo de la presa y el dren es una línea equipotencial. Así la región de flujo queda delimitada por una superficie equipotencial en parábola de la presa aguas arriba y a lo largo del dren AD, y de líneas de corriente en la superficie libre FCD y del borde impermeable AE de la figura 2.4. De esta forma, la región de flujo en el plano w resulta: $0 = \phi$ a lo largo de AD, $\phi = -kh$ a lo largo de EF (donde h es la pérdida de carga total en el cuerpo de la presa), $\psi = 0$ a lo largo de AE, $\psi = q$ en la superficie libre FD. Tomando como función de mapeo, $z = Cw^2$, donde C es una constante; y a lo largo de la superficie libre, $\phi = -k$ y $\psi = q$

Recordando:

$$w = \phi + i\psi$$

$$z = Cw^2 = x + iy$$

Reemplazando

$$C = (\phi + i\psi)^2 = x + iy$$

$$C = (\phi^2 + i 2\phi\psi - \psi^2) = x + iy$$

$$\Rightarrow x = C(\phi^2 - \psi^2) \quad e \quad y = -2C\phi\psi$$

Que reemplazado por $\varphi = -k$ y $\psi = q$

$$\Rightarrow x = C(k^2y^2 - q^2) \quad \text{e} \quad y = -2 C k y q$$

y despejando C de la segunda ecuación 2.42,

$$C = \frac{1}{2kq} \quad \text{Ecuación 2.42}$$

Y la ecuación de la superficie libre, llamada Parábola de Kozeny es:

$$x = -\frac{ky^2}{2q} + \frac{q}{2k} \quad \text{Ecuación 2.43}$$

Para $x = 0$ en la ecuación 2.43, y llamando y_0 a la intersección de la superficie libre de escurrimiento con el eje y, el caudal por unidad de longitud de la presa es, despejando:

$$q = ky_0 \quad \text{Ecuación 2.44}$$

Y combinando las ecuaciones 2.43 y 2.44.

$$y^2 - y_0^2 + 2y_0x = 0 \quad \text{Ecuación 2.45}$$

Y despejando y_0 , se obtiene:

$$y_0 = x \pm \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{Ecuación 2.46}$$

Y tomando los valores de coordenadas en el punto de ingreso aguas arriba, $x = d$, $y = h$ de la figura 2.4a se obtiene

$$y_0 = \sqrt{d^2 + h^2} - d \quad \text{Ecuación 2.47}$$

En la figura 2.4c, se muestra la solución gráfica de la ecuación 2.47. Si $y = 0$ en la ecuación 2.46, la distancia focal también llamada longitud mínima de dren, resulta:

$$a_0 = \frac{y_0}{2} \quad \text{Ecuación 2.48}$$

Diferenciando la ecuación 2.45, $y^2 - y_0^2 = -2y_0x$ respecto a y

$$2ydy = -2y_0dx \quad \text{Ecuación 2.49}$$

$$\frac{dx}{dy} = -\frac{2y_0}{2y} \Rightarrow \frac{dx}{dy} = -\frac{y_0}{y} \quad \text{Ecuación 2.50}$$

Se obtiene que $-y_0/y$ es la pendiente de la tangente en cualquier punto de la superficie libre de escurrimiento. Por lo tanto, la superficie libre entra al dren verticalmente ($y = 0$), y su pendiente en $y = y_0$ es -45°

De esta manera se observa que se requiere de toda la información disponible para dar una solución analítica del problema.

2. Semi empírico. Método de los fragmentos

En Bron (1993) se compilan estudios presentados por Pavlovsky en 1936 y 1956, donde propone comenzar con el estudio de un método analítico que daba los caudales en forma aproximada para flujo confinado en un sistema de profundidad finita. Desarrolló este método aproximado, llamado Método de los fragmentos, que permite separar en tramos el problema de flujo para desarrollar la filtración en su totalidad.

El método de los fragmentos es un método de aproximación analítica para el cálculo de los caudales y presiones para aguas subterráneas. La hipótesis de este procedimiento se basa en el supuesto de que las líneas equipotenciales en diversos lugares críticos en la región de flujo son rectas verticales. Estas líneas equipotenciales dividen la región del flujo en partes o fragmentos. Otros supuestos inherentes al método de fragmentos son: (a) la ley de Darcy es válida, (b) se ha alcanzado el estado permanente, y (c) el suelo se aproxima a un estrato homogéneo e isotrópico o una serie de capas isotrópicas y homogéneas.

Este método permite resolver problemas de infiltración bastante complicados fraccionándolos en partes, analizando los modelos de flujo para cada una, y volviendo a montar las partes para proporcionar una solución global. Presenta la explicación del trabajo de Pavlovsky.

Conceptos básicos. El caudal a través de un único fragmento se calcula como:

$$q = \frac{khi}{\Phi_i} \quad \text{Ecuación 2.51}$$

Dónde>

k → coeficiente de conductividad.

hi → Pérdida de carga a través del fragmento.

Φ_i → Factor de forma adimensional, debido a que los bordes de los fragmentos consisten en líneas equipotenciales, el flujo a través de cada fragmento debe ser igual al total del flujo a través del sistema.

Así:

$$q = \frac{kh_1}{\Phi_1} = \frac{kh_2}{\Phi_2} = \dots \dots \frac{kh_n}{\Phi_n} \quad \text{Ecuación 2.52}$$

Dado que la suma de las pérdidas de carga en cada fragmento es igual a la pérdida total, el caudal total puede ser expresado como

$$q = \frac{kh}{\sum_{i=1}^n \Phi_i} \quad \text{Ecuación 2.53}$$

Donde h es la pérdida total de carga a través de la sección. En la misma línea, la pérdida de carga en cada fragmento puede calcularse a partir de

$$h_i = \frac{h\Phi_i}{\sum_{i=1}^n \Phi_i} \quad \text{Ecuación 2.54}$$

La pérdida de carga a lo largo de toda la frontera impermeable de un fragmento se asume que cambia en forma lineal. El concepto básico del método de los fragmentos es fraccionar la región de flujo en partes para las que el factor de forma toma las expresiones que se muestran en la figura 2.6 en el anexo 1.

Hay nueve diferentes tipos de fragmentos desarrollados. De estos, los seis primeros son para flujo confinado, mientras que los tres últimos son para flujo no confinado.

Para analizar nuestros casos de estudio usaremos la aproximación de Pavlovsky quien considera la presa dividida en 3 partes

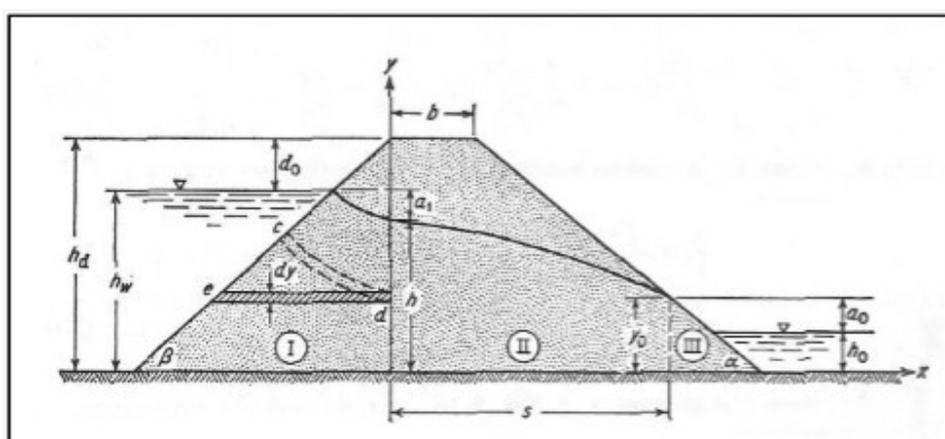


Figura 2.7: Aproximación de Pavlovsky

En la zona (I) las líneas de corriente se asumen horizontales de longitud equivalente e-d, flujo en dirección horizontal

El caudal infiltrado resulta

$$\frac{q}{k} = \frac{h_w - h}{m} \ln \frac{h_d}{h_d - h} \quad \text{Ecuación 2.55}$$

En la zona (II) usa la fórmula de Dupuit

El caudal infiltrado resulta

$$\frac{q}{k} = \frac{h^2 - (a_0 + h_0)^2}{2s} \quad \text{Ecuación 2.56}$$

En la zona (III) para $h_0=0$, el caudal infiltrado resulta:

$$\frac{q}{k} = \frac{a_0}{m_1} \quad \text{Ecuación 2.57}$$

Y teniendo en cuenta la geometría

$$s = b + m_1[h_d - (a_0 + h_0)] \quad \text{Ecuación 2.58}$$

Las incógnitas son: h, a_0, s, q , las que se obtienen combinando las ecuaciones anteriores, resultando las siguientes funciones:

$$a_0 = \frac{b}{m_1} + h_d - \sqrt{\left(\frac{b}{m_1} + h_d\right)^2 - h^2} \quad \text{Ecuación 2.59}$$

$$a_0 = \frac{m^1}{m} (h_w - h) \ln \frac{h_d}{h_d - h} \quad \text{Ecuación 2.60}$$

Las que graficadas permiten obtener los valores de h y a_0 , como se muestra en el ejemplo de la figura 2.8.

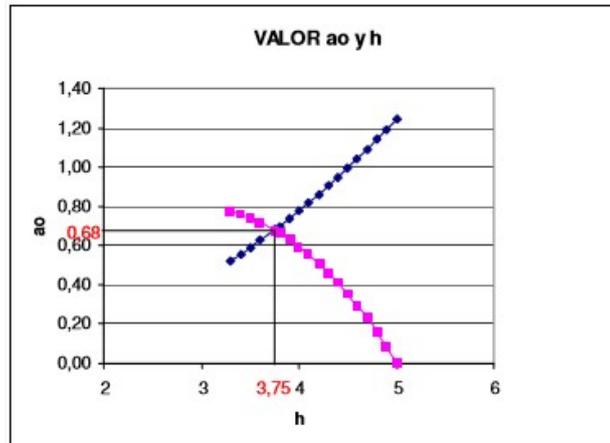


Figura 2.8: Ejemplo para obtener los valores de h y a_0

3. Soluciones Cerradas

Las soluciones cerradas resuelven el problema de infiltración para casos especiales en términos de funciones y condiciones de contornos particulares. Las soluciones cerradas existen para condiciones de infiltración más simples y se hallan usando las técnicas de mapeo o por el método de los fragmentos, que en síntesis son métodos analíticos para encontrar soluciones al problema de infiltración. Ejemplos de ellas son la expresión de Pavlovsky para una presa impermeable con pantalla para flujo confinado. Los problemas de infiltración asociados a presas típicas requieren soluciones aproximadas debido a las complicadas condiciones del flujo

2.2. FORMULACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS DE UN PROCESO DE FILTRACIONES EN PARED DE SUELO

El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también llamada discretización.

Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se

conoce como malla. Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas), la matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Etapas para solucionar problemas mediante el Método de los Elementos Finitos

Las siguientes etapas comprenden los pasos básicos para formular problemas mediante el método del elemento finito.

Fase de preproceso

- Crear y discretizar la solución dominio en elementos finitos, esto es, subdividir el problema en nodos y elementos.
- Asumir una función forma a representar el comportamiento físico de un elemento, que es, una función continua aproximada que se asume para la solución del elemento.
- Desarrollar las ecuaciones para el elemento
- Armar los elementos a representar en el problema completo, construir la matriz global de rigidez.
- Aplicar condiciones de frontera, condiciones iniciales y cargas.

Fase de solución

- Resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales simultáneas para obtener resultados globales; tal como valores de desplazamientos y temperaturas en diferentes nodos.

Fase de postproceso

- Con base en los resultados globales obtenidos, se puede volver en el proceso de solución para conocer los valores de desplazamiento o temperatura locales en diversos nodos.

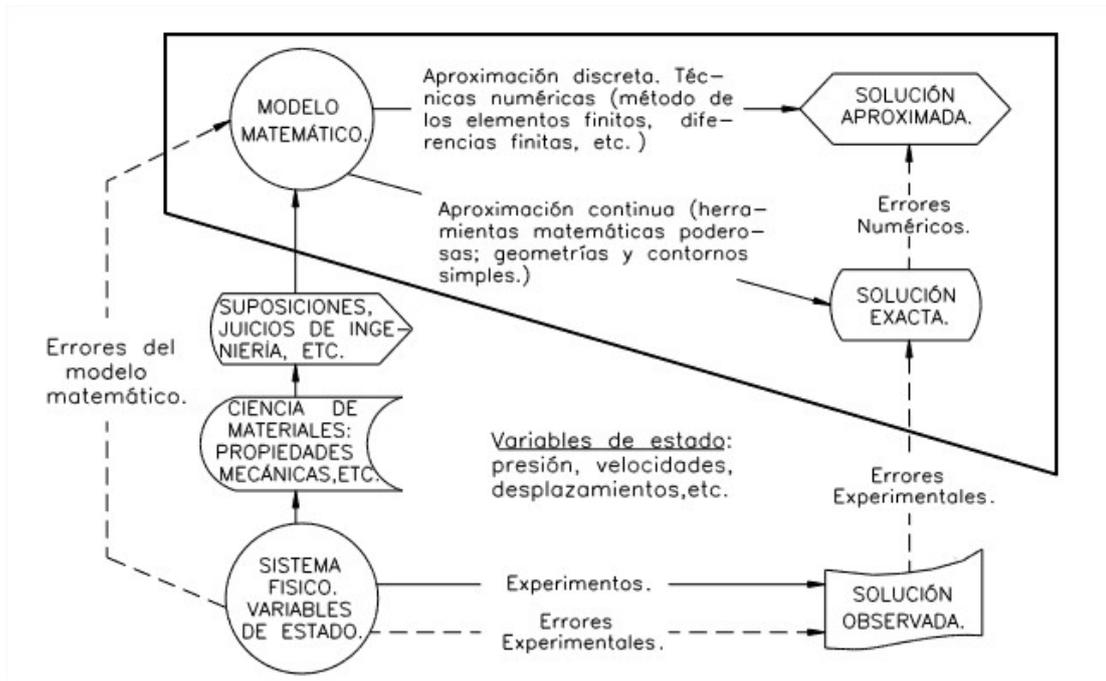


Figura 2.9: Diagrama esquemático del modelaje matemático de un problema

_____ proceso deductivo/analítico.

----- fuentes de discrepancia: realidad/modelo matemático.

Realizando un estudio de las filtraciones por métodos de elementos finitos se estima la siguiente formulación.

Definiendo el vector \bar{W} como:

$$\bar{W} = [K] \overline{\text{grad}} \Psi \quad \text{Ecuación 2.61}$$

La ecuación 2.22 es decir, la ecuación diferencial que rige el flujo de filtración en el cuerpo y base de la presa, puede ser reescrita como:

$$\text{div} \bar{W} = 0 \quad \text{Ecuación 2.62}$$

Introduciendo las funciones de los elementos finitos N_i , $i=1,2,\dots, 4$, y aplicando el teorema de Green $N_i \bar{W}$, se tiene:

$$\oint_{\text{Contorno } B} N_i \bar{W} * \bar{n} ds = \oint_{\text{Elemento } e \text{ con Contorno } B} \text{div}(N_i \bar{W}) dA \quad \text{Ecuación 2.63}$$

ya que,

$$\operatorname{div}(Ni\bar{W}) = Ni\operatorname{div}\bar{W} + \left\{ \frac{\partial Ni}{\partial x} \frac{\partial Ni}{\partial y} \right\}^t * \bar{W} \quad \text{Ecuación 2.64}$$

y

$$\Psi = \{N\}^t \{\Psi\}_e \quad \text{Ecuación 2.65}$$

siendo, (N) el vector de valores de carga nodal. El conjunto de ecuaciones relativo al elemento e puede ser escrito como:

$$\int_{\text{Elemento } e} \left[\left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial y} \right\}^t [K] \begin{pmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{pmatrix} \right] \{\Psi\}_e dA = \oint_{\text{Contorno } B} \{N\} \{W\}^t \{n\} ds \quad \text{Ecuación 2.66}$$

la cual, después de ensamblarlo dentro del modelo global, toma la expresión de:

$$[H]\{\Psi\} = \{F\} \quad \text{Ecuación 2.67}$$

Donde, H es la matriz de transmisibilidad hidráulica del dominio discretizado del flujo de filtración.

2.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE FILTRACIONES EN UNA PARED DE SUELO

Las presas de materiales sueltos son el tipo de presa más antiguo en la historia del hombre. Estas presas tienen la ventaja de que pueden ubicarse en todo tipo de sitios. Una de las principales desventajas de las presas de material suelto consiste en las filtraciones tanto en el cuerpo de la presa como en su cimentación. La filtración produce distintos efectos como pérdida de agua, presiones internas con componentes opuestas al efecto estabilizador del peso, y erosión interna progresiva (sifonamiento).

Por lo que el presente trabajo estará encaminado al estudio de las filtraciones en presas de materiales sueltos por medio de Métodos Analíticos y Métodos Numéricos tomando como objeto de estudio la presa Zaza según varias experiencias que anteceden la presente investigación (ver anexo 2.2 y 2.3).

Estas tienen un interés intrínseco, puesto que la presa se hace para retener agua y toda pérdida de ella va contra ese objetivo fundamental. Pero también tienen un valor como índice, pues una filtración excesiva acusa un defecto que puede derivar

en aumento de la presión intersticial, lavado de la fábrica o de las diaclasas de la roca etc. con repercusión creciente. Por eso es casi más interesante que la magnitud de la filtración su constancia o variación. Una filtración incluso notable, pero invariable puede no ser peligrosa. En cambio, puede ser alarmante una pérdida pequeña en su comienzo que va aumentando con el tiempo, porque ello es señal del lavado del material. Sobre todo, si el agua sale turbia, denota que hay disolución o arrastre, con lo que el camino de la filtración se va agrandando. Las filtraciones han de observarse tanto integral como individualmente (González, et al., 2002).

La medida conjunta de las filtraciones da un índice del comportamiento general pero no basta. Hay que observar también por zonas, para ver si algunas de ellas son causa de la mayor parte de las pérdidas. Las observaciones se hacen en las galerías de visita, viendo en cada una el caudal de las cunetas y observando si algunos drenes dan más agua que otros (como es lo normal). De esta forma podemos inyectar la zona más permeable, atacando el mal en el sitio más agudo. La observación conjunta se puede hacer recogiendo todas las filtraciones en un canalillo colector final provisto de un vertedero triangular para poder medir con la mayor exactitud posible el caudal.

Al hablar de filtraciones y sub-presiones no nos referimos sólo a la presa, sino a la roca, pues ya sabemos que ésta es tan importante o más que aquella. Las galerías y pozos de drenaje y observación deben penetrar en la roca. En cuanto al embalse, sus filtraciones tienen el mismo interés general, pero su observación ha de hacerse por medios más indirectos. Basta comprobar que no hay manantiales que puedan provenir de él (González, et al., 2002).

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS PROPUESTAS DE SOLUCIONES PARA FILTROS EN PRESAS DE TIERRA

La utilización de filtros en presas de tierra es una solución habitual para salvaguardar suelos protegidos de granulometrías diferentes o para encausar las filtraciones que constituyen una de las patologías más desfavorables y habituales en este tipo de embalses. Las mismas pueden provocar el fenómeno del sifonamiento producido por el arrastre de partículas provocando oclusión del dren y

por tanto fluctuaciones del nivel de las aguas dentro del cuerpo del embalse por lo que se han realizado estudios para la determinación de la granulometría de los mismos pudiendo utilizarse el d_{85} del suelo (solo el 15% de las partículas de suelo son mayores) y el D_{15} del filtro, reafirmando el criterio $D_{15}/d_{85} \leq 5$ que es notablemente conservador en un alto por ciento de los casos.

Siempre debe tenerse en cuenta que la permeabilidad del filtro debe ser mayor que la del suelo protegido y para garantizar esto debe tenerse en cuenta que no debe presentar más de un 5% de partículas menor que el tamiz No. 200 y que las mismas no sean plásticas. El espesor de los mismos queda establecido generalmente por requerimientos constructivos y el comportamiento de los equipos existentes por lo que es necesario especificar espesores que garanticen el trabajo del filtro.

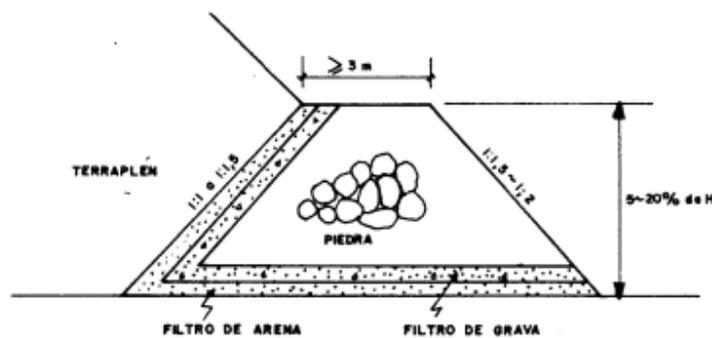


Figura 2.14 Ejemplo de un filtro ubicado alrededor de un suelo protegido.

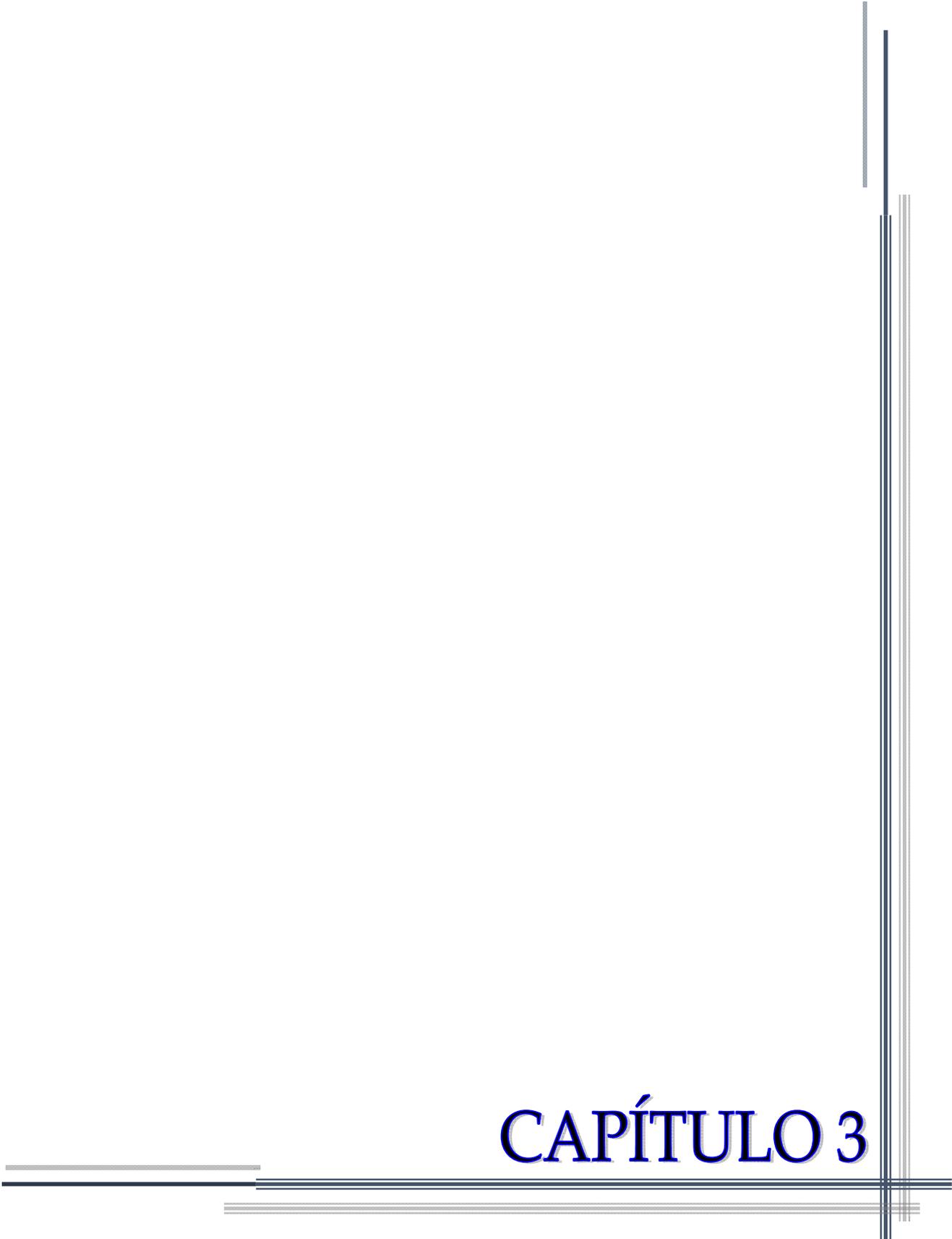
CONCLUSIONES PARCIALES

Luego de haber realizado una revisión de las principales formulaciones y métodos de cálculo para determinar el proceso de flujo del agua en una pared en suelo se proponen las siguientes conclusiones:

1. Es definida la formulación a utilizar acorde al tipo de filtro que se pretende usar en la base de la cortina para redireccionar el flujo de agua hacia una zona de descarga específica cercana a la PCHE.
2. Son definidos los parámetros relacionados al proceso de filtraciones que condicionan el comportamiento de la LCS en el cuerpo de la estructura al paso del agua en un medio poroso en pared de suelo.

3. Se definen las características principales del proceso de filtraciones identificadas en los estudios anteriores para evaluar una serie de propuestas de filtros con diferentes tipos de geometría en su sección transversal durante la modelación del funcionamiento del filtro en condiciones de explotación del embalse.

CAPÍTULO 3

The page features decorative elements consisting of several horizontal lines at the bottom and a vertical line on the right side. The horizontal lines are located at the bottom of the page, with a thick dark line and several thinner lines above and below it. The vertical line is on the right side, extending from the top to the bottom, and is composed of multiple parallel lines of varying thicknesses.

Capítulo 3 . MODELACIÓN DE LAS FILTRACIONES EN PRESAS DE TIERRA

3.1. DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO Y SELECCIÓN DE LA TEF PARA EL PROCESO DE MODELACIÓN

Para la selección de la sección típica transversal de la obra que defina la zona de interés y la estrategia de integración de la información en el área de estudio, se determina el proceso de redistribución de las tensiones para el comportamiento de la sección típica correspondiente al área de estudio (ver figura 3.1) segmentada en tres secciones transversales para abarcar una franja de 58.71 m de ancho en la cortina de la presa y comenzar a pasar por cada una de las etapas previamente indicadas en el esquema (tensión-deformación, datos de la fluctuación de los niveles de agua y análisis de la estabilidad del talud aguas abajo).

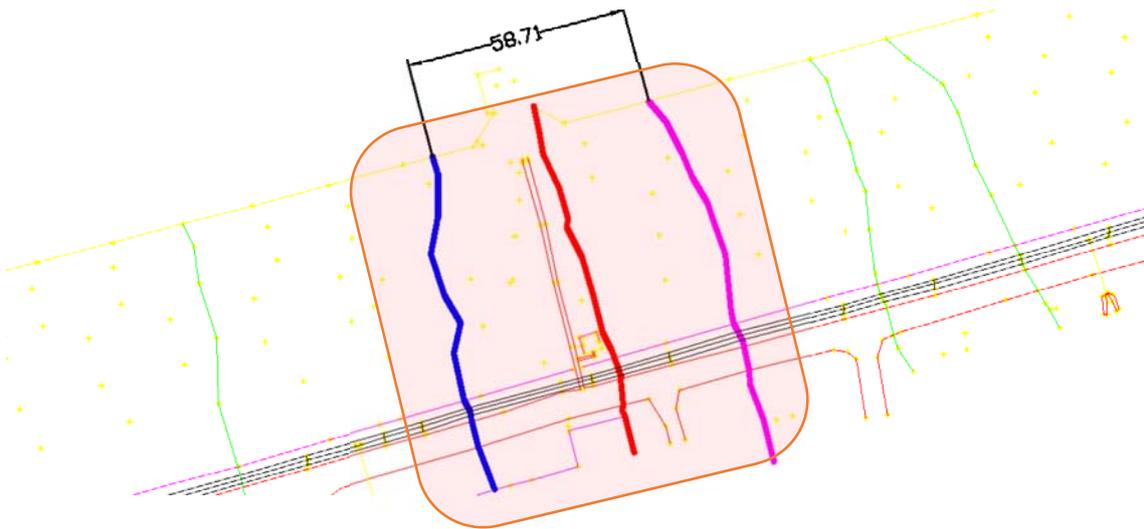


Figura 3.1. Área de estudio para el presente trabajo de diploma.

En el caso de las secciones transversales se asume primeramente la sección central desplazada unos 3 m aproximadamente a la izquierda de la galería acorde al sistema de referencia local del embalse, una sección fuera de la zona de la influencia de las anomalías y otra sección coincidente con la zona de la influencia de las anomalías para poder establecer patrones de comparación de resultados.

En el caso del estudio de la calibración numérica para que un modelo se comenta en el anexo los detalles del proceso dado que la presente investigación es la

continuidad de una serie de trabajos previos con similares modelos ya previamente calibrados numérica y físicamente (ver anexo 3.1).

3.1. PROPUESTA DE MODELACIÓN Y SECUENCIA DE ANÁLISIS PARA INTERPRETAR LOS RESULTADOS

En la presente investigación, buscando dar solución a la problemática y objetivos planteados, así como para lograr un correcto y eficiente proceso de modelación fue usado el programa computarizado GeoStudio v.2007: el cual se recomienda para el proceso de modelación bidimensional de los estados tenso-deformacionales en condiciones de un análisis elástico lineal y de segundo orden de estructuras, por medio del Método de los Elementos Finitos que incluye un pos procesador gráfico para la visualización de resultados.

El programa además, permite una visualización gráfica de la distribución de los valores tensionales, esfuerzos y deformaciones. Para ello está compuesto por una serie de subprogramas integrados en uno solo para conformar un solo paquete tecnológico en dependencia del uso e interrelación que se pretenda alcanzar. En este caso fue empleado en un primer momento el SIGMA/W que permite trabajar diferentes modelos de materiales (lineal-elástico, elasto-plástico, superficie de deslizamiento, etc.), y determinar que para un valor de carga existe una deformación correspondiente inicial, así como un estado tenso-deformacional asociado al mismo.

Este programa tiene una base matemático-física fundamentada en el MEF acorde a lo antes planteado donde su algoritmo de trabajo permite que el sistema parta de un estado tensional inicial y por sucesivos incrementos internos de la carga se alcanzan valores límites que pueden ser o no admisibles al realizar la comparación con el comportamiento en el terreno.

Además, este módulo cuenta con un preprocesador para introducir todos los datos y seleccionar geometría modelos, etc. y un pos-procesador que brinda la información referente a cada incremento de carga en cuanto a tensión y deformación en dependencia del interés del operador y del dominio que posea en el uso de esta herramienta computacional.

En un segundo instante con el uso del programa SEEP/W se analizó la curva de filtración y las redes de flujo dentro de la cortina con el objetivo de obtener el comportamiento de las mismas y poder conocer el gasto de agua aproximado que fluye por el interior de la estructura y el comportamiento del material empleado en el modelo en condiciones de semi-saturado y saturado.

Posteriormente, se procede a realizar en una tercera fase, donde se recurre nuevamente a un análisis del comportamiento tenso-deformacional con todos los resultados previamente obtenidos en los modelos anteriores volcados como datos iniciales en un nuevo modelo dentro del SIGMA/W al cual le son impuestas las cargas generadas por las fluctuaciones del agua y las deformaciones medidas por técnicas de la geodesia.

En un cuarto momento se analizó la estabilidad de los taludes en suelos heterogéneos con el uso del programa SLOPE/W basado en la aplicación de métodos numéricos e incluye el análisis del método sueco por diversos métodos, dentro de los cuales podemos encontrar el método clásico de Fellenius, el método de Bishop y el método de Janbu de acuerdo a las diferentes formas de superficies de falla.

Además de la realización de diversas fases recurriendo nuevamente a los modelos del SEEP/W para el comportamiento del flujo del agua para un nivel de aguas máximas seguidos de diferentes niveles para ser evaluado cada escenario en los modelos del SLOPE/W para la determinar la estabilidad del talud aguas abajo y de los filtros durante el proceso de excavación en las tres secciones transversales que se modelaron. Presentando una misma secuencia para un nivel de aguas en las que aparece la patología (ver figura 3.6) según los parámetros físico-mecánicos de los materiales utilizados en la cortina del embalse (ver anexo 3.2).

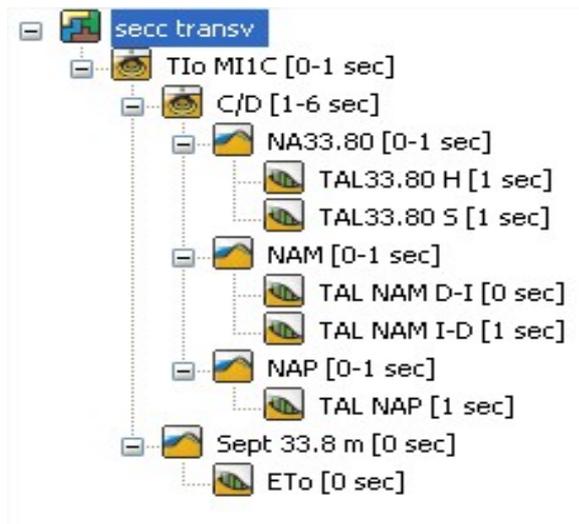
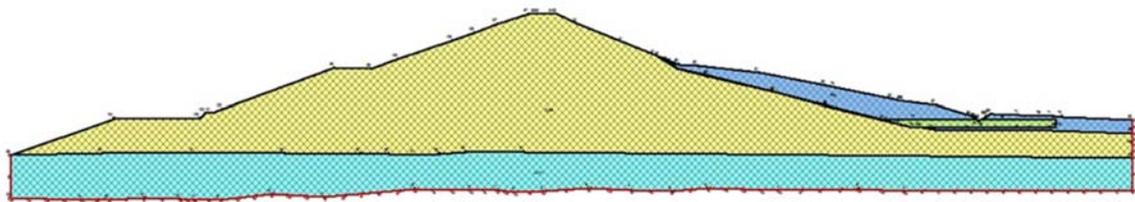


Figura 3.6 Esquema de modelación empleado en el estudio del embalse Zaza mediante el programa computacional GeoStudio 2007

3.2. RESULTADOS ALCANZADOS EN LAS MODELACIONES DE LOS DIFERENTES FILTROS

Para la realización de las diferentes modelaciones se parte de un modelo de tensiones iniciales al que posteriormente se le irán introduciendo las diferentes secciones transversales que arrojarán resultados que validaran su uso (ver figura 3.7).



Leyenda

-  Condición de borde con restricción en el movimiento
-  Condición de borde con restricción de desplazamiento en las componentes vertical y horizontal.

Figura 3.7. Condiciones iniciales del modelo TI_0 .

Se realizará un estudio para los modelos de secciones transversales con forma trapezoidal, triangular y circular (ver figura 3.8). comenzando con un proceso de redistribución de las tensiones iniciales por medio del modelo TI_0 para el comportamiento de las fuerzas interiores que son calculadas en la sección típica correspondiente al área de estudio (Ver figura 3.9).

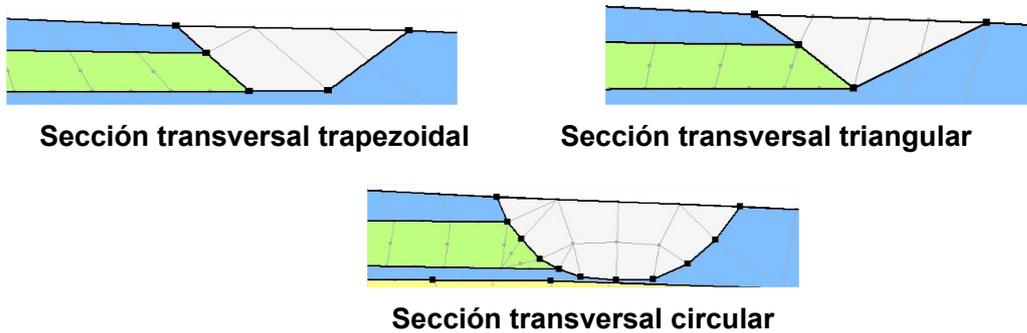


Figura 3.8. Secciones transversales modeladas

Para el análisis de los resultados de los niveles de agua (NA) se determina la LCS teórica en el cuerpo de la cortina basada en las formulaciones del MEF y en el Método de Cálculo de Casagrande, estimando el comportamiento de la curva de filtraciones (ver figura 3.10) arrojando una diferencia a partir de estudios realizados por (Hernández, 2015)(ver figura 3.9) no menor de 0.1m en los diferentes puntos de control (ver tabla 3.1)

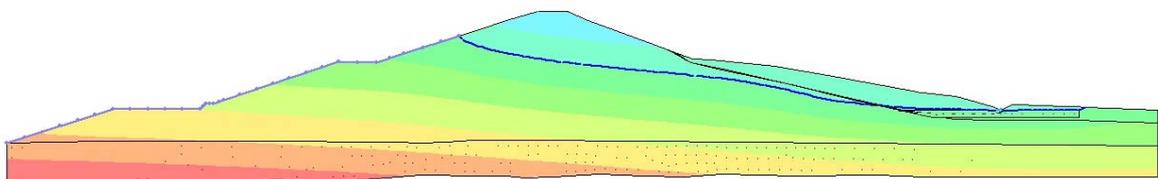


Figura 3.9 Comportamiento de la LCS sin filtro tomado de (Hernández, 2015)

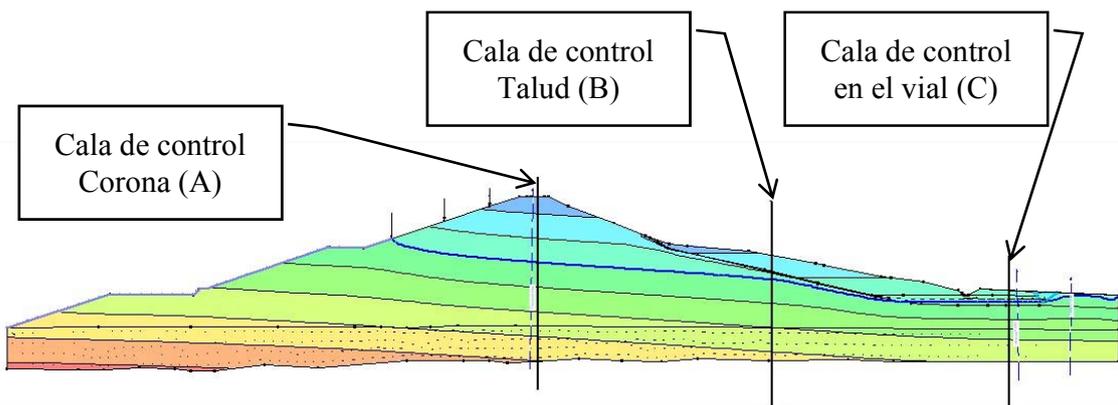


Figura 3.10 Comportamiento de la LCS en las diferentes calas de control una vez diseñado el filtro.

Tabla 3.1 Variación de la LCS de las diferentes secciones transversales en las calas de control estimados.

Calas de Control	Sin filtro	Secciones transversales con filtro					
		Trapezio	Diferencia	Triángulo	Diferencia	Círculo	Diferencia
LCS_CC_1_Corona (A)	13.73	13.69	-0.03	13.71	-0.01	13.60	-0.12
LCS_CC_2_Talud (B)	9.51	9.49	-0.02	9.52	0.01	9.05	-0.46
LCS_CC_3_En el vial (C)	5.90	5.34	-0.56	5.34	-0.56	5.00	-0.90

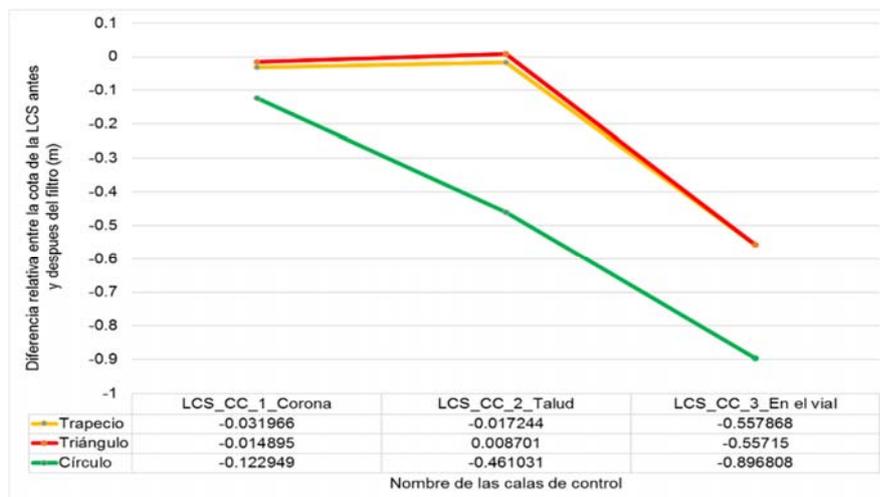


Figura 3.11 Diferencias de la LCS en las diferentes calas de control una vez diseñado el filtro.

Los gastos fueron estimados antes y después del filtro (ver figura 3.10) para evaluar los valores de reducción de caudal y estimar la factibilidad del filtro en las diferentes secciones transversales quedando los mismos como se muestra en la tabla 3.2 con una reducción del volumen en el cuerpo de la cortina del embalse, por lo que se logra corroborar la hipótesis inicial de la investigación al lograr utilizar un filtro aguas abajo del embalse que permita reducir la cota de la LCS en el interior de la estructura.

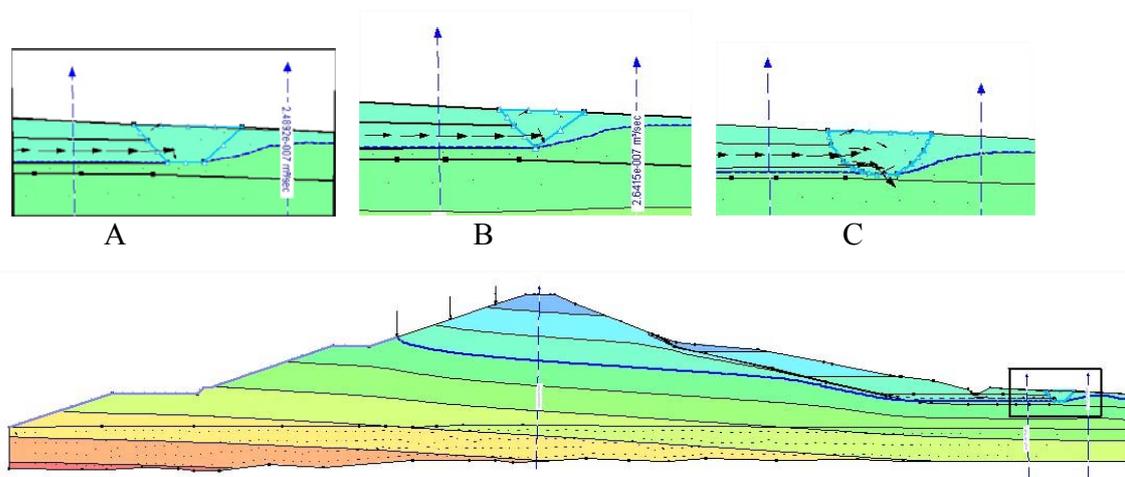


Figura 3.12 Estimación de los gastos para las diferentes secciones transversales.

Luego de haber realizado una evaluación del comportamiento de los filtros y haber modelado la reducción en cota que presenta la LCS en el interior de la cortina del embalse se decide realizar una evaluación de control al comparar los valores de riesgo que fueron previamente identificado por otros investigadores en años previos (Álvarez, *et al.*, 2014; Álvarez, *et al.*, 2015; Hernández, 2015).

Inicialmente se decide partir de los datos de control utilizados en las modelaciones que sirvieron de base común de datos para poder contrastar los resultados con iguales condiciones de contorno de los modelos teóricos matemáticos a fin de eliminar cualquier proceso de simplificación o normalización del fenómeno al realizar similar análisis con diferentes condiciones de contorno.

Basado en la comparación mostrada en la figura 3.13 se identifica que para todos los casos modelados, una reducción en la cota de los niveles de agua en el interior de la estructura (o del nivel freático en los piezómetros y/o calas) y por consecuencia los valores que se identificaban como un nivel de peligro al sobre pasar los límites superiores de los niveles de agua pronosticados para cada cala en función de los registros de piezometría en la cortina del embalse y su posición espacial, son adecuados en consecuencia al rango promedio de los valores iniciales obtenidos por el modelo de pronóstico LC_P11(junio/agosto/septiembre) según los parámetros condicionantes de cada modelo evaluado en el tiempo (mes).

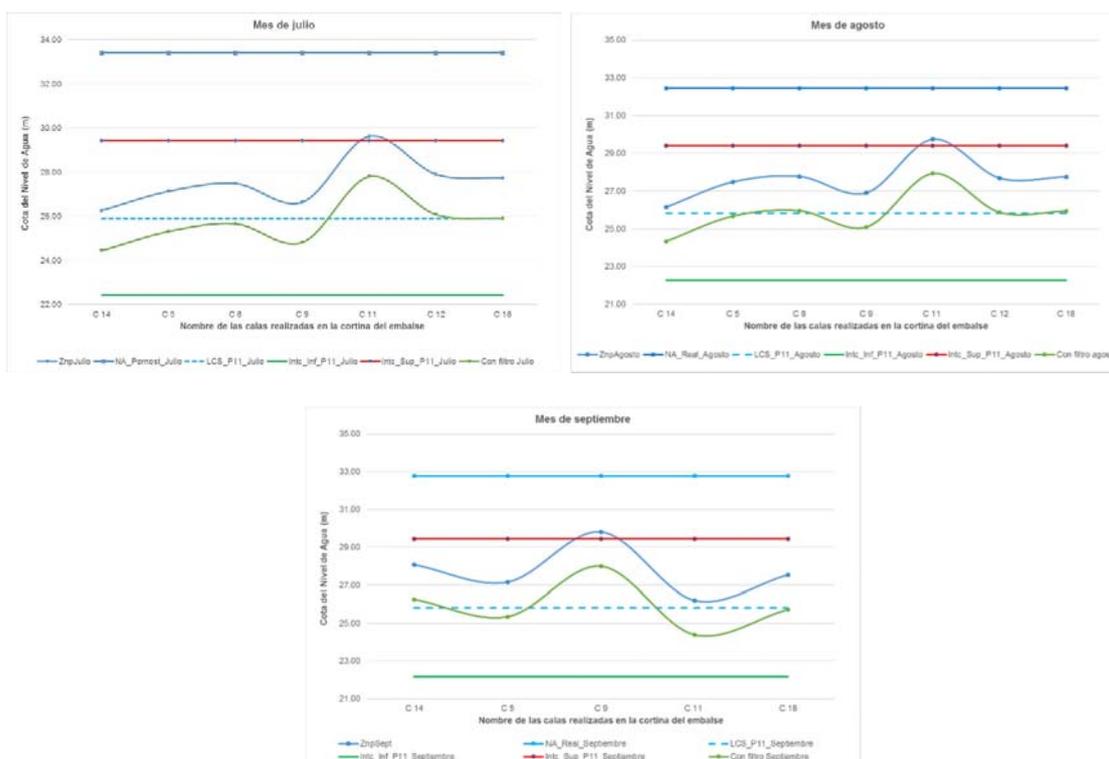


Figura 3.13 Evaluación de la efectividad del filtro con los resultados previos.

Por lo que al acercarse el posible comportamiento ideal (LCS_P11(mes)) desde un enfoque teórico de la LCS ante un correcto proceso de drenaje del agua contenida en la estructura se logra con la ubicación de los filtros un valor promedio del comportamiento esperado al modelo conceptual hipotético del funcionamiento de la obra.

Tabla 3.2 Comportamiento de los gastos para las diferentes secciones transversales después del filtro.

Tipo de sección transversal	Gastos en las secciones (m ³ /s)		
	Antes del filtro	Después del filtro	Diferencia
Trapezio	2.81E-06	2.49E-07	2.56E-06
Triángulo	2.80E-06	2.64E-07	2.53E-06
Círculo	2.85E-06	2.17E-07	2.64E-06

Es por lo cual, también se decide realizar un recalcu de control al comportamiento de los gastos para las diferentes secciones transversales propuestas en el proceso de la modelación (ver tabla 3.2) en la cual se logra la mayor evacuación de aguas

en el interior de la estructura con la geometría de tipo triángulo, recomendándose la construcción del trapecio dada la complejidad técnica de la construcción de los otros tipos de geometrías analizados en la presente investigación.

Para el análisis de los resultados del modelo Estabilidad de Taludes (TAL) se chequean los coeficientes de seguridad y estabilidad de los taludes en las secciones objeto de estudio, principalmente en la sección central por ser la sección que geográficamente se encuentra frente a la Hidroeléctrica que es donde comienzan a surgir las filtraciones. Tomando como proceso conceptual el mostrado en la figura 3.14 como resultante del análisis para la cota donde aparecen las filtraciones.

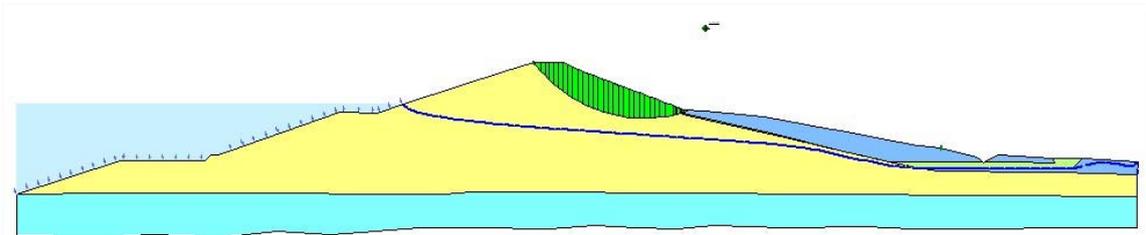


Figura 3.14. Comportamiento de la estabilidad del talud en el modelo TAL para la cota donde aparecen las patologías de filtraciones (37.56 m).

Comportándose las condiciones de estabilidad de taludes para los diferentes escenarios que se consideran asumiendo un Límite Mínimo de Factor de Seguridad: 1.2 (Método de Bishop) siendo superado en más de 0.2 unidades en el caso más desfavorable (Método de Jambu) por lo que es identifica en todo momento una mejora a la estabilidad del talud.

Tabla 3.3. Relación de los Factores de Seguridad calculados.

Método de cálculo del FS	Antes del filtro	Después del Filtro					
		Trapezio	Diferencia	Triángulo	Diferencia	Círculo	Diferencia
Bishop	1.609	1.606	-0.003	1.606	-0.003	1.606	-0.003
Jambu	1.462	1.495	0.033	1.495	0.033	1.495	0.033
Ordinario	1.501	1.524	0.023	1.524	0.023	1.524	0.023

Conclusiones PARCIALES

Al concluir los análisis de la modelación de datos y parámetros físico-mecánico de la estructura en función del fenómeno objeto de estudio se proponen las siguientes conclusiones:

- 1- Al comparar los resultados teóricos obtenidos en función del comportamiento de los niveles de surgencia de la LCS después de la colocación del filtro, en contraste a los estudios previos realizados, se obtuvo resultados superiores a -1.00 m de disminución del nivel del agua teórico registrado en las diferentes calas de control.
- 2- En las modelaciones de los diferentes filtros, se alcanza una reducción del caudal que pasa por la estructura de la cortina y la base de cimentación medidos delante del filtro respecto a las realizadas después de la colocación del mismo, obteniendo resultados no menores de $2.5E-06 \text{ m}^3/\text{s}$ de diferencia como evidencia del proceso de redireccionamiento del flujo por el correcto funcionamiento de la propuesta de los nuevos filtros.
- 3- Al realizar el análisis de la estabilidad de taludes para los diferentes escenarios se obtienen resultados que superan el valor normativo como criterio mínimo para el FS del talud, por lo que se ratifica como válida la solución ingenieril empleada en el talud aguas abajo de la cortina en el embalse Zaza.

Conclusiones y recomendaciones

The page features a decorative footer consisting of several horizontal lines of varying thickness and a vertical line on the right side that intersects them, creating a stylized border.

CONCLUSIONES GENERALES

Con el desarrollo del presente trabajo de diploma, basado en las experiencias anteriores y al ser esta una investigación de continuidad se proponen las siguientes conclusiones:

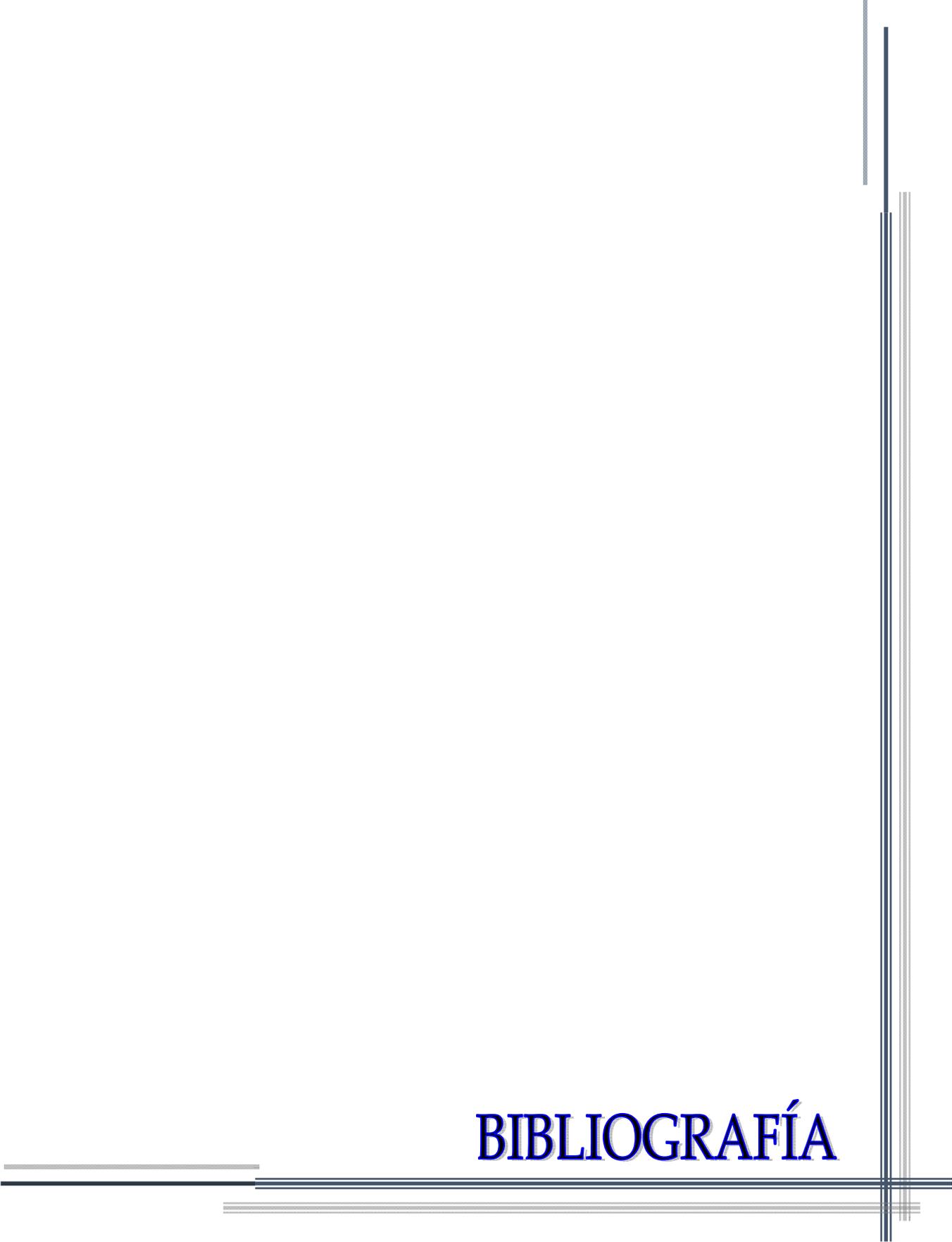
1. En la revisión bibliográfica y documental que fue realizada por parte del autor, se logró identificar con claridad las experiencias nacionales e internacionales en la aplicación del MEF a diversos problemas en el campo de la ingeniería hidráulica, a partir de los principales resultados evidenciados en el sector empresarial y educacional mediante la unión estratégica de la empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC) con la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, a partir de la utilización de diferentes plataformas de aplicaciones computacionales como herramientas de modelación a problemas del flujo de agua en paredes de suelo.
2. Se logra identificar toda la formulación necesaria para calcular el proceso de filtración del agua en una pared de suelo, además de poder establecer los métodos de cálculo adecuados a cada geometría del tipo de filtro para evaluar en el proceso de modelación y evaluación de los resultados.
3. El esquema propuesto para el análisis, modelación y procesamiento de los datos resultantes de los modelos físico-matemáticos y estadísticos en un entorno geoespacial en el dominio del tiempo resultantes de la presente investigación y combinada con los estudios previos, permiten interpretar el comportamiento histórico del embalse y su evaluación gráfica a partir de gráficos simples bajo criterios de peligro, vulnerabilidad y riesgo.
4. Al modelar el proceso de las filtraciones en la cortina del embalse Zaza bajo la premisa de antes y después de la colocación de los nuevos filtros, se logró evidenciar una mejora de la estabilidad del FS en el talud aguas abajo durante el proceso de reducción de agua contenida en el interior de la estructura.
5. La correlación obtenida en estudios anteriores de la fluctuación de los niveles de agua y su probable comportamiento histórico, permitió establecer criterios valorativos de los escenarios para categorías de Vulnerable y no de Riesgo como constaban estudios previos, al obtener valores de Vulnerables en el entorno espacial objeto de estudio correspondientes a las calas de control y monitoreo; identificándose el área de concentración de las anomalías de filtraciones en el entorno de la Cala C11 con una reducción significativa de la cota de la LCS a su valor teórico conceptual normal.

RECOMENDACIONES

A partir de las aplicaciones y resultados alcanzados se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Extender la aplicación de esta propuesta de interpretación a otros tipos de fenómenos que se manifiestan actualmente en las empresas del país que se encargan de gestionar el agua a nivel nacional.
2. Presentar los resultados contenidos en el presente trabajo de diploma como base para la creación de nuevas líneas de trabajo científico en la facultad de construcciones.
3. Publicar los resultados alcanzados en revistas científicas y de interés para el sector de la hidráulica y la construcción.

BIBLIOGRAFÍA

The page features a decorative design of multiple thin, parallel lines. A vertical line runs down the right side, and several horizontal lines run across the bottom, intersecting to form a grid-like pattern in the lower right corner.

1. Alberto, C., Dip, O. y Galíndez, E. (2010). Relevamiento de patologías estructurales en presas hidráulicas de la región Noa de la República Argentina. San Miguel de Tucumán, Argentina: Instituto de Estructuras «Ing. Arturo M. Guzmán» Universidad Nacional de Tucumán.
2. Álvarez Gil, L. (1998). La estabilidad de cortinas de presas de tierra mediante la solución de los estados tenso-deformacionales y la aplicación de la teoría de seguridad Tesis presentada para optar por el grado científico de doctor en ciencias técnicas, Marta Abreu, Santa Clara.
3. Álvarez, J., Mesa, M. y Recarey, C. (2012). Técnicas de Calibración Numérica para problemas de ingeniería. Ciudad de la Habana. Cuba: Departamento de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría de la Habana (ISPJAE), Centro de Investigación de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMCNI). Universidad Central «Marta Abreu» de las Villas.
4. Álvarez, L. (1998). La estabilidad de cortinas de presas de tierra mediante la solución de los estados tenso-deformacionales y la aplicación de la teoría de seguridad. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Santa Clara.
5. Álvarez, M. y Álvarez, L. (2013). Catálogo de las patologías del Embalse «Palmarito». Orígenes, causas y recomendaciones para la intervención. En IPH y UCLV (Eds.), Caso de estudio Palmarito. Santa Clara Villa Clara, Cuba: Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH), UEB de Investigaciones, Departamento de Topografía y Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas (UCLV), Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil
6. Álvarez, M., Álvarez, L., Azorín, R. y Hernández, A. (2015). La estabilidad de taludes, experiencias en su análisis y solución en la ingeniería. La Habana, Cuba: Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba (UNAICC), Palacio de las Convenciones (CUBAGUAS 2015).
7. Álvarez, M., Álvarez, L. y Martínez, J. E. (2015). Simulación de patologías a obras hidráulicas, caso de estudio presa Zaza. La Habana, Cuba: Palacio de las Convenciones, GEOCIENCIAS' 2015.
8. Álvarez, M., Martínez, E., Espinosa, L. y San Roman, N. (2014). Simulación de patologías a obras hidráulicas, caso de estudio Presa Zaza. Informe Final. Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC).
9. Álvarez, M., Martínez, E., Pedraza, A. y San Roman, N. (2014). Simulación de patologías a obras hidráulicas, caso de estudio Presa Zaza. Informe Primero. Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC).
10. Anónimo. (2008). A New Approach for Structural Monitoring of Large Dams with a Three-Dimensional Laser Scanner, Tomado de: <http://www.mdpi.org/sensors/papers/s8095866.pdf>
11. Anónimo. (2011). State of Rivers and Dams in Maine - State of Maine 2009 - Colby College Wiki, Tomado de: <https://wiki.colby.edu/display/stateofmaine2009/State+of+Rivers+and+Dams+in+Maine>

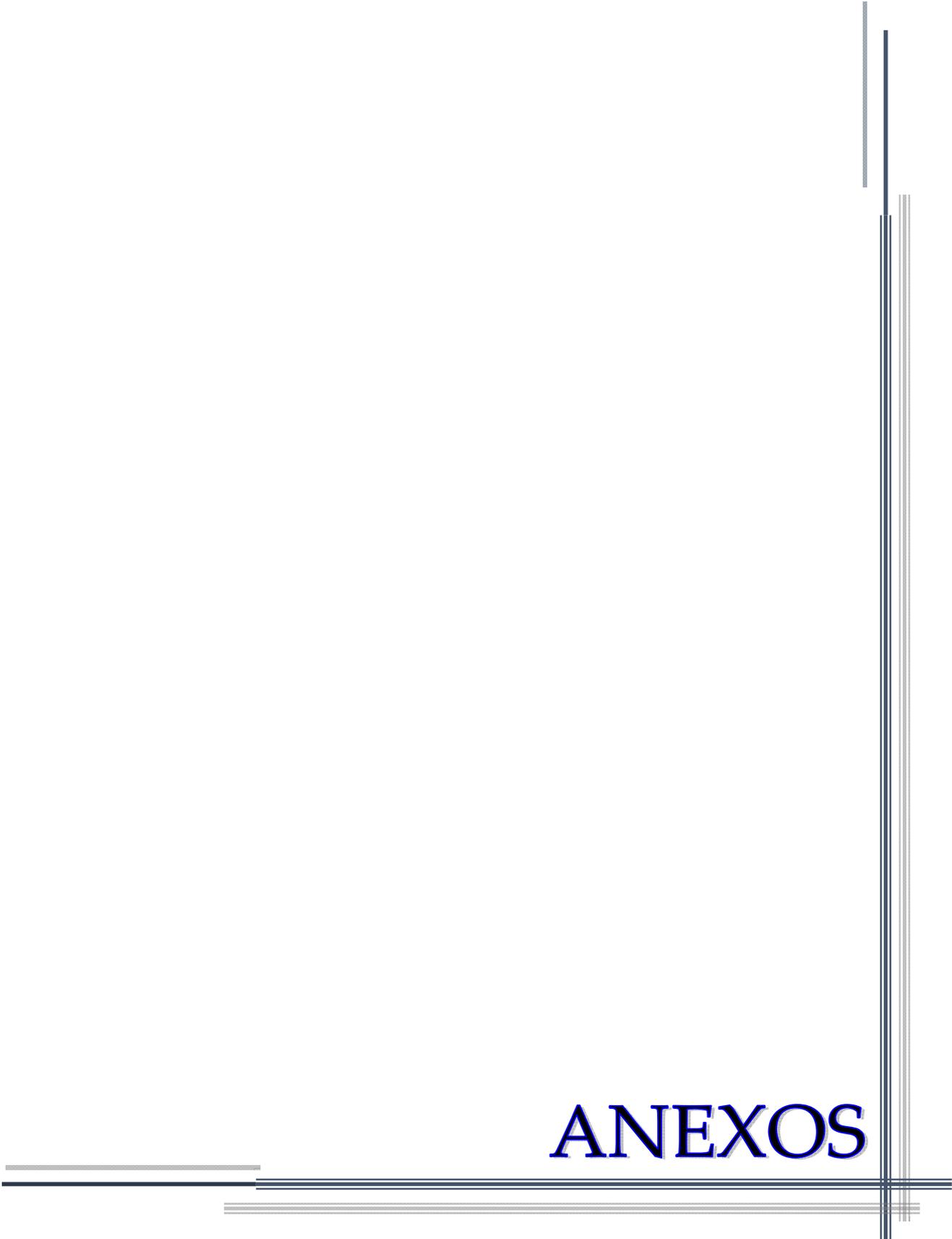
12. Armas, R. (1990). Guidelines for the design of earth dams: priority and sequence. Ciudad de La Habana, Cuba: Civil Engineering Faculty, Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echervarría» (ISPJAE).
13. Armas, R. (2002). Criterios para diseñar presas de tierra: prioridad y secuencia Taller Nacional sobre fallos de presas de tierra. Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
14. Armas, R., Echemendía, A. y Garcías, C. (1994). Causas de fallas por sifonamiento de la presa «Las Cabrerías»: Caso histórico. Ciudad de La Habana, Cuba: Facultad de Ingeniería Civil del Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echervarría» (ISPJAE).
15. Armas, R. y Horta, E. (1987). Presas de tierra (pp. 4-27). Ciudad de la Habana, Cuba: Facultad de Ingeniería Civil del Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echervarría» (ISPJAE), Editorial ISPJAE.
16. Aspiolea, J. (2001). Breve panorámica de los recursos hidráulicos en Cuba. En INRH (Ed.), Voluntad Hidráulica (pp. 16). Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).
17. B.O.E. (1998). Obras hidráulicas. Construcciones civiles. Presas. Subpresión. Estabilidad y deslizamiento. Materiales. Desagües profundos. Desvío de ríos. Excavaciones y cimientos. Disponible en:
18. Barrera, M., Trejos, A. y Carvajal, P. (2006). Integración Montecarlo. Scientia Et Technica, Vol. XII (No. 32), pp. 331-334.
19. Barrios, I. (2010). Evaluación de las patologías existentes en una obra Hidráulica: Caso de Estudio Embalse «Palmarito». Trabajo de Diploma Ingeniería Civil Universidad Central «Marta Abreu» Las Villas, Santa Clara, Villa Clara.
20. Blanco, R. (2005). Problemas actuales de la mecánica de roca en minería.
21. Botello, S. (2006). Ejemplos de Aplicación de los Métodos Numéricos a Problemas de Ingeniería. Guanajuato, México: Centro de Investigación en Matemáticas A.C. (CIMAT).
22. Broche Lorenzo, J. L. (2005). Conceptualización del comportamiento estructural de las cimentaciones superficiales aisladas aplicando técnicas de modelación numérica. Tesis presentada para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Marta Abreu, Santa Clara.
23. Brown, W. D. (1993). Seepage analysis and control for dams. Washington, DC 20314-1000 Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers.
24. Bufaro, P. (2008). La «Puesta Fuera de Servicio» y eliminación de presas y obras hidráulicas Conferencia presentada en la Jornada Técnica de Puesta Fuera de Servicio de Presas y Embalses (pp. 3-14). Madrid, España: Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.
25. Bulley, B., Wark, B. y Somerford, M. (2003). Dams in the darling range The Engineering Geology or Perth. Australia: Australian Gemechanics Symposium.
26. Carrazana, D. (2013). Aplicación de una pared en suelo para solucionar filtraciones en presas de tierra (Caso de estudio Zaza). Trabajo de Diploma Ingeniería Civil Universidad Central «Marta Abreu» Las Villas, Santa Clara, Villa Clara.
27. Castro, F. (1964). Discurso pronunciado por el Comandante Fidel Castro Ruz, Primer Ministro del Gobierno Revolucionario y Primer Secretario del Partido Unido de la Revolución Socialista de Cuba, en la conmemoración del II Aniversario de la Creación del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos Departamento de versiones

- taquigráficas del Gobierno Revolucionario. Ciudad de La Habana, Cuba: Editorial Periódico «Granma».
28. Craig, J. (1995). *Instrument of Embankment Dams and Levees Engineering and Design*. Washington, DC, United State of America: Department of the Army U.S., Army Corps of Engineers.
 29. Craig, R. (1997). *Soil Mechanics (Sixth ed.)*. New York, United Estate of America: Department of Civil Engineering University of Dundee, E & FN SPON.
 30. Cuevas, Y. (2013). *Análisis de las deformaciones en cortinas de presas de tierra: Caso de Estudio Embalse «Palmarito»*. Trabajo de Diploma Ingeniería Civil Universidad Central «Marta Abreu» Las Villas, Santa Clara, Villa Clara.
 31. Christian, J. y Hon, M. (2004). *Geotechnical Engineering Reliability: How Well Do We Know What We Are Doing?* *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (Vol. 130).
 32. Chrzanowski, A. y Chen, Y. (1986). *An overview of the physical interpretation of deformation measurements*. MIT Deformation Measurements Workshop.
 33. Chrzanowski, A., Chen, Y., Secord, J. y Romero, P. (1985). *Integration of geodetic and geotechnical deformation surveys in the geosciences*. *Tectonophysics*, Vol. 130, pp. 369-383.
 34. Darcy. (1856). *Comprehensive principles of quantitative hydrogeology established*
 35. Dominy, F. (1981). *Diseño de Presas pequeñas*. Ciudad de la Habana, Cuba: Editorial Orbe.
 36. Dupuit, J. (1863). *Etudes Theoriques el Pratiques Mouvement des aux Dams les Canaux Decouverts et a Travers les Terrains Pemeables*. Paris, Francia. .
 37. Engineers, U. S. A. C. o. (1993).
 38. Faulín, J. y Juan, Á. A. (2006). *Simulación de Monte Carlo con Excel Simulation and the Monte Carlo Method*
 39. Fellow, M., Guštar, M. y Tikalsky, P. (1993). *Monte Carlo Simulation-Tool for better understanding of LRFD* *Journal of Structural Engineering* (Vol. 119).
 40. Garnica, P. y Pérez, N. (2002). *Control de las deformaciones permanentes acumuladas en suelos compactados sometidos a cargas repetidas*. Ciudad de México, México: Investigador, Instituto Mexicano del Transporte.
 41. GEOCUBA, G. E. (2004). *Metodología para el control de deformaciones de obras a partir de métodos geodésicos MET 30-27:2004* (pp. 1-2, 3-8,9-12). Ciudad de La Habana, Cuba: Grupo Empresarial GEOCUBA Investigación y Consultoría (GEOCUBA IC), Filial Villa Clara-Sancti Spíritus.
 42. González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*
 43. Hernán, A. y Alejandro Andino, J. (2014). *Análisis comparativo en la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico entre las pantallas contra filtración y la geomembrana en presas de tierra homogénea* Ingeniero civil, Universidad de CUENCA, Ecuador.
 44. Hernández, D. (2008). *Modelación estructural de edificios históricos. Caso de estudio: Convento de Santa Clara de Asís —CENCREM*. Trabajo de Diploma para el Título de Ingeniería Civil, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Ciudad de Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
 45. Hernández, L. (2015). *Modelación de las filtraciones en obras hidráulicas, caso de estudio: Presa Zaza*. Ingeniero Hidráulico, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Ciudad de Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

46. Informe Técnico, C. I.-. (2009). Análisis numérico del proceso de filtración en presas de escollera
47. Labra, C., Oñate, E. y Rojek, J. (2009). Avance en el Desarrollo del Método de los Elementos Discretos para Simulación de Problemas Geomecánicos (pp. 176). Barcelona, Spain: Métodos Numéricos en Ingeniería, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).
48. MICONS. (2005a). Manual Práctico de Hidráulica Tomo I. Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto de Hidroeconomía, Ministerio de la Construcción (MICONS).
49. MICONS. (2005b). Manual Práctico de Hidráulica Tomo II. Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto de Hidroeconomía, Ministerio de la Construcción (MICONS).
50. Oñate, E. (2009). Structural Analysis with the Finite Element Method Linear Statics. Volume 1. Basis and Solids (Primera ed., Vol. I). Barcelona, Spain: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Springer.
51. Oszczak, S., Wasilewski, A., Rzepecka, Z., Szostak-Chrnowski, A. y Chrzanowski, A. (2003). Ten years of deformation study and proposed research program for the area of Polish Copper Basin Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements. Santorini, Greece, Warmia and Mazury University in Olsztyn, Poland, University of New Brunswick, Canada.
52. Picón, J., Bisbal, A., Casaverde, M., Jáuregui, F., Anchayhua, R. y Masana, M. (2006). Manual Básico para la Estimación del Riesgo Disponible en: www.indeci.gob.pe
53. Popnicolov, A. I. (1974). Proyectos y ejercicios prácticos de complejo hidráulicos (Primera Ed., Segunda Reimpresión, 1982 ed.). Ciudad de La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación.
54. Recarey, C. (1999). Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Undiversified Central «Marta Abreu» de Las Villas, Facultad de Construcciones, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
55. Sherald, J. y Woodward, R. (1963). Earth and earth-rock dams. Ciudad de La Habana, Cuba: Edición Revolucionaria, Instituto del Libro.
56. Silva R., C. (1969). Nociones sobre conjuntos ordenados, teoría combinatorias y probabilidades Rudimentos de Matemática Moderna. Ciudad de La Habana, Cuba: Ciencia y Técnica.
57. Szostak-Chrnowski, A., Chrzanowski, A. y Massiera, M. (2003). Use of geodetic monitoring measurements in solving geomechanical problem in structural and mining engineering Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements. Santorini, Greece: Canadian Centre for Geodetic Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., E3B 5A3 Canada, Faculté d'Ingénierie (Génie Civil), Université de Moncton, Moncton, E1A 3E9; Canada.
58. Szostak-Chrnowski, A., Massiera, M., Chrzanowski, A. y Hill, C. J. (2001). Use of geodetic monitoring surveys in verifying design parameters of large earthen dams at the stage of filling the reservoir Session V: Deformation monitoring and modeling of large dams. Santorini, Greece: The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements.

59. U.S, A. C. o. E. (1986). Seepage Analysis and Control for Dam. Washington, EM 1110-2-1901.
60. Wilkins, R., Bastin, G., Chrzanowski, A. y Smith, P. (2002). A Precise, Reliable, and Fully Automatic Real Time Monitoring System for Steep Embankments. CIM. Disponible en: <http://www.aca-ltd.com>, <http://ccge.unb.ca>

ANEXOS



Anexo 2.1. Aplicación del concepto básico del método de los fragmentos.

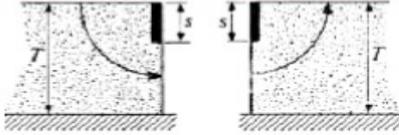
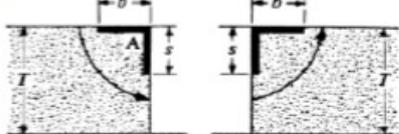
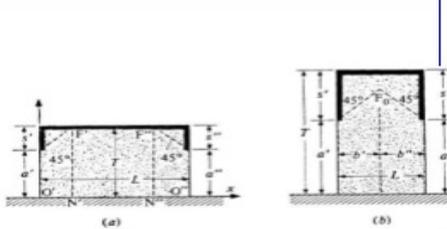
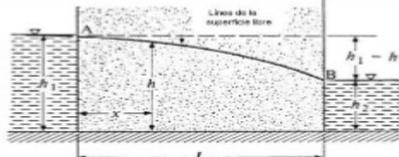
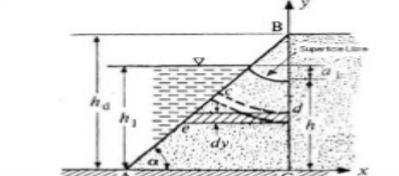
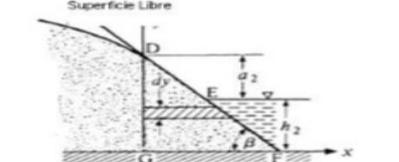
FRAGMENTO O TIPO	ILUSTRACIÓN	FACTOR DE FORMA ϕ (h es la pérdida de carga a través del fragmento)
I		$\Phi = \frac{L}{a}$
II		$\Phi = \frac{l}{2} \left(\frac{Kh}{Q} \right)$
III		$\Phi = \frac{K}{K'}$ $m = \cos \frac{\pi s}{2T} \sqrt{\tanh^2 \frac{\pi b}{2T} + \tan^2 \frac{\pi s}{2T}}$
VI		$\Phi = \ln \left[\left(1 + \frac{S'}{a'} \right) \left(1 + \frac{S''}{a''} \right) \right] + \frac{L - (S' + S'')}{T}$ $\Phi = \ln \left[\left(1 + \frac{b'}{a'} \right) \left(1 + \frac{b''}{a''} \right) \right] \text{ donde}$ $b' = \frac{L + (S' - S'')}{2}$ $b'' = \frac{L - (S' - S'')}{2}$
VII		$\Phi = \frac{2L}{h_1 + h_2}$ $q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}$
VIII		$q = k \frac{h_1 - h_2}{\cot \alpha} \ln \frac{h_d}{h_d - h}$
IX		$q = \frac{k a_2}{\cot \beta} \left(1 + \ln \frac{a_2 + h_2}{a_2} \right)$

Figura 2.5: Resumen de tipos de fragmentos y factores de forma, adaptado de (BROWN, 1993)

<p style="text-align: center;">IV</p>		$b \leq S$ $\Phi = \ln\left(1 + \frac{b}{a}\right)$ $b \geq S$ $\Phi = \ln\left(1 + \frac{S}{a}\right) + \frac{b - S}{T}$
<p style="text-align: center;">V</p>		$L < 2S$ $\Phi = 2\ln\left(1 + \frac{L}{2a}\right)$ $L > 2S$ $\Phi = 2\ln\left(1 + \frac{S}{a}\right) + \frac{L - 2S}{T}$

Figura 2.5: Continuación.

Anexo 2.2. Análisis de regresión general: Cota de registro de las Filtraciones versus Nivel de agua

Para esta ecuación fueron utilizados 92 casos, donde 32 casos contienen valores faltantes por no estar registrados en los datos consultados

Coefficientes de la ecuación estimado por el modelo de regresión

Término	Coef.	EE del Coef..	T	P
Constante	-44.4995	2.99653	-14.8503	0.000
Nivel de agua	1.5874	0.08830	17.9778	0.000

Resumen del modelo

S = 2.56319 R-cuad. = 78.22% R-cuad.(ajustado) = 77.98%
 PRESS = 619.343 R-cuad.(pred.) = 77.19%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
Regresión	1	2123.41	2123.41	2123.41	323.201	0.000000
Nivel de agua	1	2123.41	2123.41	2123.41	323.201	0.000000
Error	90	591.29	591.29	6.57		
Falta de ajuste	84	546.45	546.45	6.51	0.870	0.658322
Error puro	6	44.84	44.84	7.47		
Total	91	2714.70				

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs.	Filtraciones	Ajuste	Residuo EE de ajuste	Residuo	Estándar	
2	0.86	7.9338	0.275757	-7.07376	-2.77586	R
13	5.88	11.1721	0.289788	-5.29215	-2.07800	R
15	22.24	16.9981	0.511511	5.24194	2.08707	R
22	23.33	14.7121	0.408528	8.61786	3.40570	R
89	7.10	12.7278	0.332964	-5.62784	-2.21440	R
117	0.00	-2.6069	0.706816	2.60685	1.05806	X
118	0.00	-3.3530	0.745402	3.35295	1.36721	X
119	0.00	-3.3530	0.745402	3.35295	1.36721	X
120	0.00	-2.2894	0.690499	2.28936	0.92746	X
122	5.82	11.6960	0.302256	-5.87600	-2.30856	R

R denota una observación con un residuo estandarizado grande.

X denota una observación cuyo valor X le concede gran apalancamiento.

Estadístico de Durbin-Watson = 1.21004

Anexo 2.3. Enfoque de tratamiento de la fluctuación de los Niveles de Agua de la Presa Zaza según Álvarez, Martínez, Pedraza y otros autores (2014; 2015)

Las series cronológicas o series temporales surgen a partir de los datos recogidos de la observación organizados cronológicamente. Una serie temporal $z(t)$ es un conjunto de observaciones secuencialmente generadas en el tiempo, de modo que le corresponde un valor z_t a cada instante t observado. En este caso se presta especial interés a analizar el caso en que los valores de la serie estén influenciados o no por factores aleatorios. Por ello, formalmente hablando una serie temporal puede ser considerada como una colección de variables aleatorias $\{Z_t, t \in T\}$ donde T es un conjunto de índices, por lo general el conjunto de los números naturales.

Así, los valores de la serie pueden ser vistos como salidas de un proceso estocástico, de tal manera que cada valor z_t de la serie temporal puede ser considerado como una observación de una de las variables aleatorias Z_t que integran el proceso y la serie temporal de n observaciones sucesivas $(z_1(t), z_2(t) \dots z_n(t))$, puede ser considerada como una muestra de una población de series temporales $(Z_1(t), Z_2(t) \dots Z_n(t))$ que podían haber sido generadas por el proceso estocástico estudiado. Por esta sencilla razón, en este trabajo se utiliza indistintamente el concepto de proceso o el de serie cronológica luego de haber demostrado que los registros de los niveles de agua no presentan un comportamiento estocástico.

Además, solo se pretende considerar la posible generación de escenarios estocásticos acorde a su comportamiento histórico estacional a las fluctuaciones de los niveles de agua en un periodo de hasta cinco años, en el cual se desea crear valores que oscilen ± 2 m en referencia a la cota de los Niveles de Aguas donde son apreciadas las Filtraciones como un valores más probables de ocurrencia y como valores extremos son considerados solo valores próximos al Nivel Máximo (incluso superiores sin que rebase la cota de corona, asumiendo que en la práctica nunca va a permanecer esta cota de nivel de agua por más de 15 días por cuestiones de seguridad en el proceso de explotación del embalse; por lo que se reduce aliviando

por medio de las compuertas al Nivel de Aguas Normales) y Mínimo de las Aguas como casos poco probables de ocurrencia en la práctica.

Por lo que se procede a desestacionalizar la serie de Niveles de Agua para obtener los factores estacionales correspondientes que caracterizan la función de estudio en la Presa Zaza (ver tabla 2.1 y su representación gráfica).

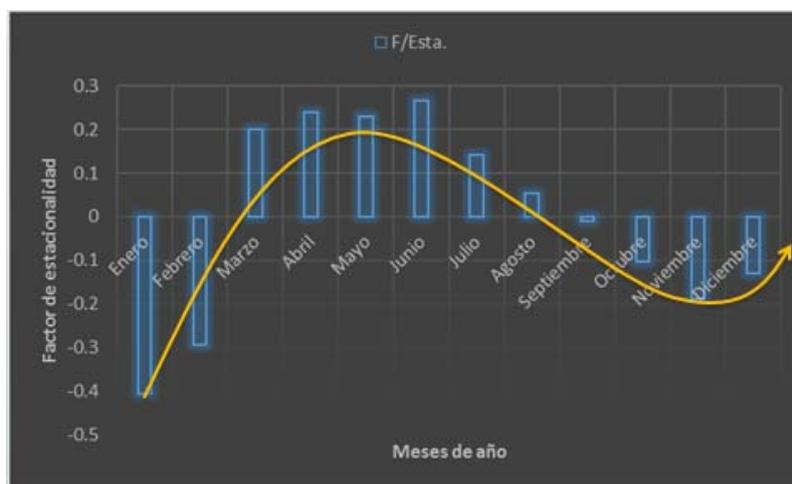
Tabla 2.1. Autocorrelaciones parciales de la serie Niveles de Agua y su representación gráfica.

Factores estacionales

Nombre de la serie:

Nivel Agua

Período	Factor estacional
1	-.40678
2	-.29247
3	.20020
4	.24006
5	.22900
6	.26571
7	.14059
8	.05406
9	-.00945
10	-.10230
11	-.18900
12	-.12962



Como resultado de la descomposición de factores estacionales del comportamiento del Nivel de Agua registrado en el embalse, se identifica qué es lo que ocurre con los valores registrado de la serie *Nivel Agua* en cada uno de los meses del año, pudiendo determinar que en el mes de enero (1) se aprecia una reducción del nivel de agua en 0.41m aproximadamente y en el mes de junio (6) se registra un aumento del nivel del agua en 0.27m en su forma genérica acorde a los registros históricos consultados, presentando una tendencia general de la función representada en una curva color anaranjada como una tendencia histórica del comportamiento anual del nivel de agua acorde a los factores de estacionalidad estimados a partir de la muestra empleada para el estudio que se presente en este informe.

Para la determinación de la función de mejor ajuste se realiza la estimación de una ecuación general que represente el comportamiento, obteniéndose los siguientes resultados mediante el empleo de modelo ARIMA (M. Álvarez, Martínez, Pedraza, *et al.*, 2014; Álvarez, Álvarez y Martínez, 2015):

1. Representación en gráficos de la variación de los niveles de agua, segmentando la base de datos a una primera sección de generación del modelo cronológico, continuada de una segunda sección de control, reservada para comparar los errores del pronóstico de los diferentes niveles de agua que componen los escenarios a evaluar estadísticamente en comparación con los datos reales medidos en el embalse (ver figura 2.10).

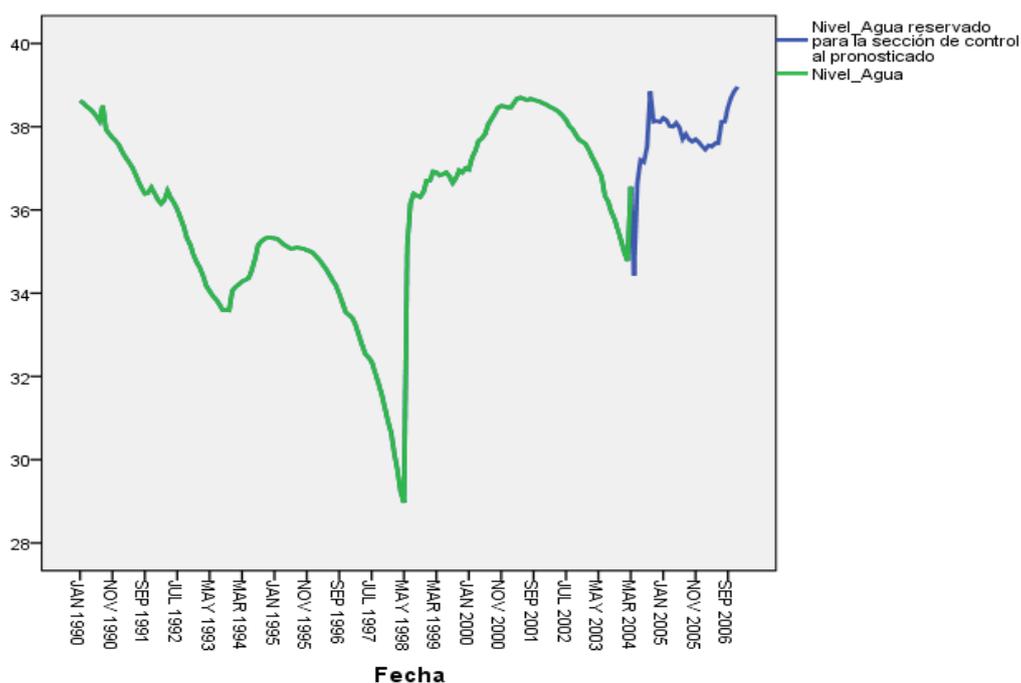


Figura 2.10. Gráfica de los niveles de agua registrados desde el mes de enero/1997 hasta septiembre/2007.

Una vez establecido los periodos de control y pronóstico de la función a estimar para el comportamiento de los parámetros de los niveles de agua se procede a general por técnicas estocásticas y una serie de mediciones aleatorias de las cotas de la función *Nivel Agua* con una distribución normal de una función continua que garantiza un 95% de datos aleatorios concentrados en el área de probable ocurrencia con respecto a la media aritmética de la base de datos

analizada, quedando solo un 5% para casos extremos en los que se controla solamente el cumplimiento de la condición de que en ningún momento los niveles de agua rebasen la cota de la corona acorde a los estudios realizados por Silva (1969) en el campo de conjuntos ordenados, teorías combinatorias y probabilidades, y que son reducidos durante el cálculo al Nivel de aguas Normales.

El proceso de generación de datos estocásticos fue realizado por técnicas de Monte-Carlos acorde a varias experiencias alcanzadas en esta temática (Fellow, *et al.*, 1993; Recarey 1999; Barrera, *et al.*, 2006; Faulín, *et al.*, 2006), como resultado del proceso de generación se muestra la figura 2.8, asumiendo como fecha de inicio de la data el mes de febrero del 2007 hasta enero del 2020.

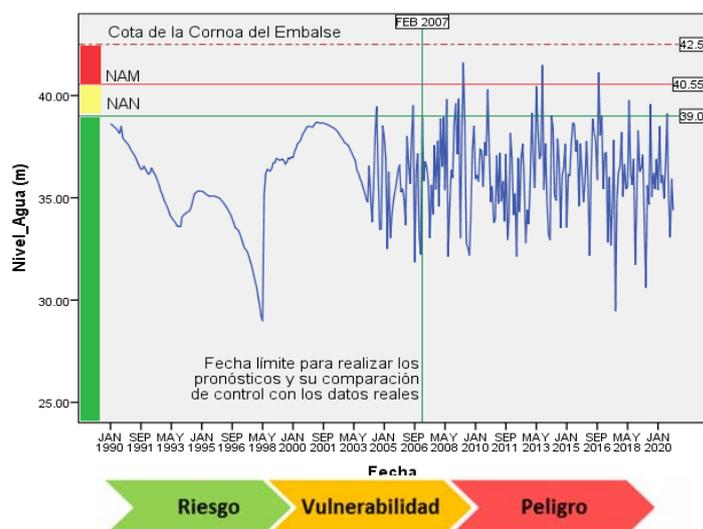


Figura 2.11. Gráfica de la generación de datos estocásticos de los niveles de agua hasta enero/2020 y las consideraciones de los escenarios de análisis secuenciales.

Con la ocurrencia de tres fenómenos atmosféricos extremos que rebasan la cota de los Niveles de Aguas Máximas del Embalse (NAM) sin superar la cota de corona y una serie de eventos regulares que son precedidas por periodos de sequía para poder establecer los escenarios pesimistas en todos los casos que la fluctuación de los niveles de agua rebasan el NAM, escenarios de consideración para los valores de nivel de agua comprendido entre el Nivel de Aguas Normales (NAN) y el NAM y como escenarios optimistas la fluctuación

de los niveles de agua comprendidos entre la cota de los Niveles de Agua Muertas y el NAN del embalse.

2. Determinación de la ecuación dependiente del tiempo relacionada con el comportamiento de la variable Nivel de Agua y las filtraciones.

Inicialmente se decide aplicar la prueba de las rachas que se utiliza generalmente para determinar si una muestra de observaciones es aleatoria o no, basado en la hipótesis nula de que las observaciones de una determinada secuencia son independientes entre sí. Obteniendo el resultado de negación en la prueba (ver tabla 2.2) para la variable de la serie temporal *Nivel Agua*, las observaciones no son aleatorias (son tiempo-dependientes): acorde a lo que ocurre con una observación cualquiera que depende, generalmente, de las características de alguna observación anterior.

Tabla 2.2. Resultados de la aplicación de la Prueba de Hipótesis de las Rachas

Resumen de prueba de hipótesis				
	Hipótesis nula	Test	Sig.	Decisión
1	La secuencia de valores definida por Nivel_Agua ≤ 34.63 y >34.63 es aleatoria.	Prueba de ejecuciones de una muestra	.000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La secuencia de valores definida por Filtraciones ≤ 9.62 y >9.62 es aleatoria.	Prueba de ejecuciones de una muestra	.000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es .05.

Una vez aplicada la prueba estadística se obtiene un total de 7 rachas con un valor de $Z = -13.476$ para que satisfaga la condición de encontrarse en la región crítica de la prueba de hipótesis ($Z < -1.64$), por tanto, se desecha entonces la hipótesis nula de que el comportamiento de los niveles de agua y de las filtraciones es aleatoria, por lo que se corrobora que el comportamiento de los niveles de agua del embalse poseen una dependencia del tiempo al igual que la patologías de la filtraciones asociadas a la fluctuación de los niveles de agua, aspecto que se verifica nuevamente al presentar un valor tan pequeño (*menor que 0.05*), en su nivel crítico de significación de los resultados (*Significación*

asintótica bilateral=0.000), comprobada por dos métodos diferentes tal como se muestra en el resumen de la tabla 2.2.

En este paso se valoran todas las funciones estimadas por las diferentes técnicas de regresión empleadas para Modelos ARIMA, prestando especial atención a las tablas ANOVA, donde los ajustes son significativos para la condición (*Sig.* < 0,05) y el valor más próximo a 1 del Residuo al cuadrado corregido representa una mejor correlación con los parámetros de la función estimada, por cuanto se decide que al verificar el doble condicionamiento impuesto al paquete de funciones resultante como parte del proceso de estimación, asumir el modelo (ver ecuación 2.68) por cumplir la condición de significación y poseer un residuo corregido con valores de máximo ajuste de la función a los datos reales.

$$Y_c(t) = -0.289 * (Nivel_Agua_t - Nivel_Agua_{t-1}) + 0.08e^{-7} \text{ Ecuación 2.68} \\ * Nivel_Agua_t + \varepsilon_t$$

Donde:

$Y_c(t)$ → Representa el comportamiento vertical de la Línea de Corriente Superior en la berma del embalse en términos de cotas absolutas.

$Nivel_Agua_t$ → Es la cota del nivel de agua en el embalse registrada en el tiempo (t) durante la sucesión cronológica.

ε_t → Es el error residual asociado a la función de estimación el cual siempre se procura que sea menor que cero (0) para garantizar que sea un error blanco o despreciable en el proceso de conformación de los coeficientes de la ecuación y la diferencia con los datos reales.

Cuando se desee predecir consideramos la estacionalidad constante periodo a periodo y el ruido cero, con la particularidad de que el ruido es aleatorio, impredecible, y tiene media cero, de manera que la mejor previsión que se recomienda es hacer de él un valor cero (0) en la práctica, de esta forma tal que para pronosticar se realiza un ajuste de tendencia con el fin de obtener un

modelo extrapolable, y se le añade la estacionalidad de la función referente a la media móvil de la función.

Posteriormente se procede a elaborar el pronóstico de la fluctuación de los Niveles de Agua del embalse empleando un complemento de Microsoft Excel Simula v.4, el cual emplea la simulación de datos aleatorios por el Método de Monte Carlo, seleccionando una distribución del tipo normal (ver figura 2.12) en la que son mostrados el total de escenarios de fluctuación de los Niveles de Agua generados en función de la amplitud de la desviación estándar de la muestra empleada a partir de la data histórica registrada en el embalse.

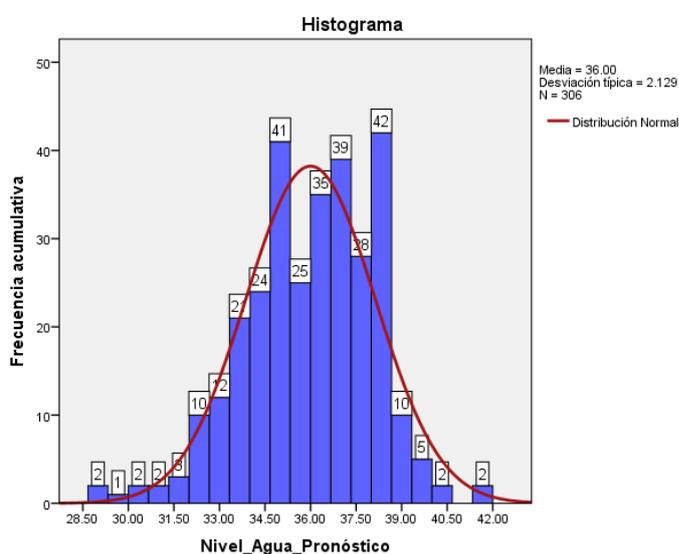


Figura 2.12. Gráfica de frecuencia acumulativa del pronóstico del Nivel de Agua mediante el Método de Monte Carlos.

Además, no solo se pretende asumir como valor más probable de ocurrencia que el Nivel de Agua alcance un total de 35 veces un valor muy próximo a la cota 36.00 m, sino que por la influencia de eventos extremos y la incertidumbre de los factores naturales y antrópicos que condicionan la fluctuación del nivel de agua y a decisión del equipo multidisciplinario, se asume como variable independiente (como elemento que contiene implícita la respuesta a los factores antes mencionados) y única el Nivel de Aguas del embalse; para poder garantizar eventos posiblemente válidos en los extremos de la Campana de Gauss, que por tener una probabilidad de ocurrencia tan baja se deciden

evaluar al final de la investigación, siempre que los resultados intermedios para los valores más probables evaluados den como escenarios resultantes de criterio Riesgo o al menos de Vulnerabilidad, de lo contrario se decide anular este último paso de análisis.

Siempre que se hayan establecido los valores de pronóstico se realiza un primer acercamiento a la obtención de la ecuación del comportamiento de la fluctuación de los Niveles de Agua registrados en el embalse por medio de modelos ARIMA en los que se parte del concepto del modelo aditivo acorde a la ecuación 6 para obtener finalmente un sistema de ecuaciones en la que consideran los comportamientos estacionales característicos para el embalse objeto de estudio (ver sistema de ecuaciones 2.69).

$$Y_t = T_t + S_t + \varepsilon_t \quad \text{Ecuación 2.69}$$

$$= \begin{cases} 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 - 0.40678 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Enero} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 - 0.29247 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Febrero} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 + 0.20020 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Marzo} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 + 0.24006 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Abril} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 + 0.22900 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Mayo} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 + 0.26571 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Junio} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 + 0.14059 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Julio} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 + 0.05406 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Agosto} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 - 0.00945 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Septiembre} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 - 0.10230 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Octubre} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 - 0.18900 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Noviembre} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2}t^2 - 5.875e^{-6}t^3 - 0.12962 & \text{si } \varepsilon_t = \text{Diciembre} \end{cases}$$

Donde:

$Y_t \rightarrow$ Representa el comportamiento vertical de la Línea de Corriente Superior en la berma del embalse en dependencia de la estacionalidad y del tiempo.

$T_t \rightarrow$ Representa la componente de «tendencia» de la función.

$S_t \rightarrow$ Representa la componente de «estacional» de la función.

$\varepsilon_t \rightarrow$ Representa una serie de tiempo estacionaria (factor de estacionalidad).

En este paso, para poder comparar la coincidencia o no del modelo de predicción asumido para la presente investigación; al realizar un control de los datos recolectados en las mediciones realizadas de las cotas piezométricas desde el mes de julio hasta septiembre a las calas en la cortina del embalse por el grupo de hidrogeología se realiza una comparación gráfica (ver figura 2.13).

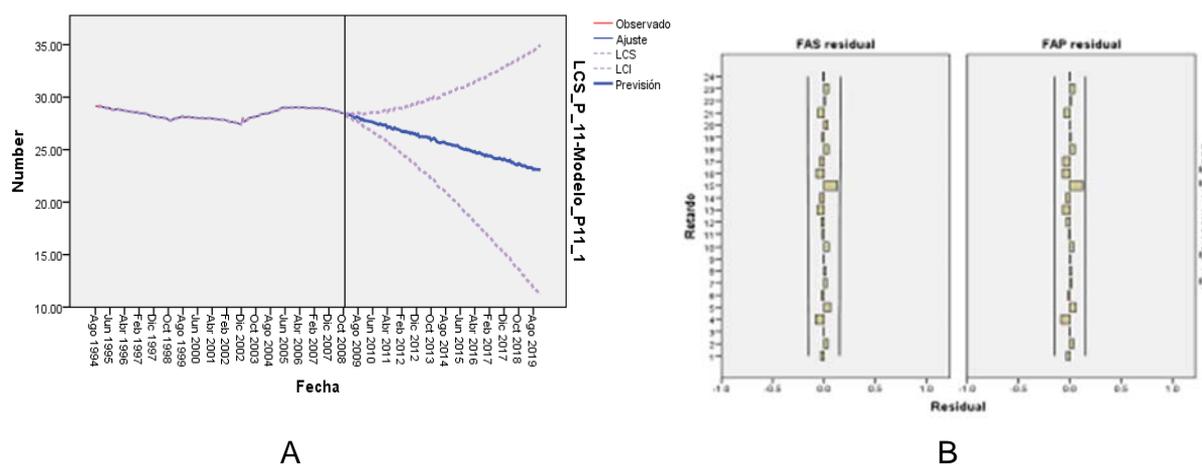


Figura 2.13. Gráfica del pronóstico de la LCS en la Berma (P_11_1) [A] en contraste con los datos reales del Piezómetro 11 (P_11) en su análisis residual [B].

Por lo que se logra obtener una función cronológica que se ajusta a las particularidades históricas con tendencias no lineales de la función objeto de estudio.

3. Evaluación de los posibles escenarios a partir del pronóstico realizado por el modelo ARIMA para la LCS en la berma.

En este punto se pretende abordar los resultados a obtener en el proceso de las corridas de los modelos virtuales de conjunto a la distribución espacial por medio de Sistemas de Información Geográfica y los valores reales provenientes de las mediciones realizadas en el cuerpo de la cortina de la presa, por lo que será abordado en otro momento.

Anexo 3.1. Selección de la Tecnología de elemento, discretización del dominio y calibración numérica.

En el caso del estudio de la calibración numérica para que un modelo llegue a presentar cierto grado de fiabilidad, debe ser sometido a un proceso de calibración el cual se separa en dos componentes, el matemático y físico respectivamente.

El MEF en su esencia responde a su formulación débil asociada al mismo, por tal razón, cuando se emplea un Tipo de Elemento Finito (TEF), responde a su formulación fuerte determinada por (Euler-Bernoulli, Timoshenko, Love-Kirchhoff, Reisner-Mindlin, Vlasov, etc.), por lo que se hace necesario regular la separación de los nodos restantes, con respecto al punto de Gauss (Grado de refinamiento adecuado), así como el tipo de función interpoladora a emplear siendo ese el papel a desempeñar por la calibración matemática.

Dónde el proceso de selección del TEF y la Densidad de Malla Óptima (DMO), para una variable determinada por el campo de desplazamiento, campo de deformaciones, campo de tensiones, la cual garantiza una aproximación numérica adecuada y la estabilidad de la solución calculada.

La aproximación numérica adecuada, será aquella densidad de malla límite o grado de refinamiento adecuado, en donde se establezcan las diferentes fuentes de errores, referente a un patrón, la cual depende del orden de precisión requerido por el investigador (J. Álvarez, *et al.*, 2012)

Siendo determinada la aproximación numérica adecuada, acorde a la densidad de malla límite o grado de refinamiento adecuado, cuando se establezcan las diferentes fuentes de errores, referente a un valor patrón, el cual depende del orden de precisión requerido o previamente establecido por el investigador.

El criterio de selección fue realizado a través de la conjugación de los aspectos: aproximación numérica que refleja el empleo de las diferentes normas de cuantificación del error y el costo computacional que viene dado por tiempo empleado para cada simulación según recomienda Álvarez y otros (2012) en su trabajo (ver figura 3.3).

Se obtiene para cada TEF (i):

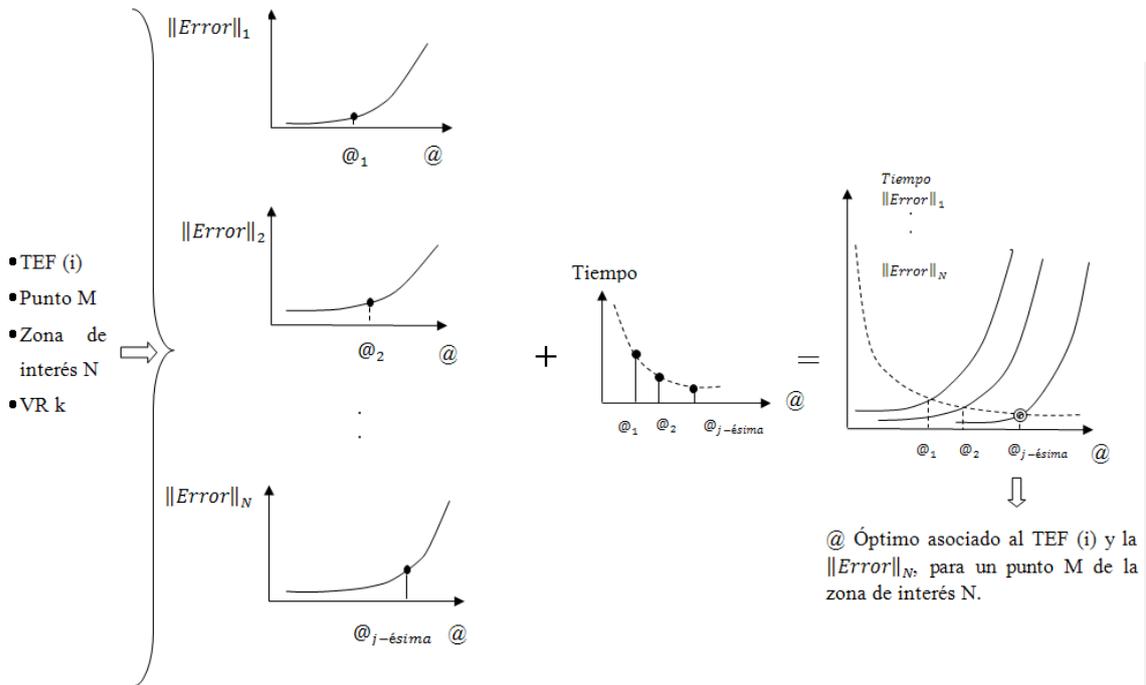
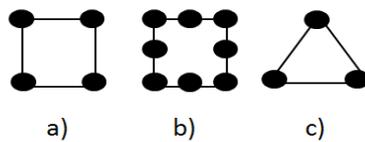


Figura 3.3. Procedimiento para la obtención de la densidad de malla óptima, para un tipo de elemento finito (J. Álvarez, et al., 2012).

Para determinar la estabilidad del modelo físico-numérico a utilizar en el proceso de modelación evaluando el costo computacional, así como el TEF a seleccionar se realiza un paso de calibración para garantizar la convergencia numérica en función de la reducción del costo computacional, tipo de elemento numérico, error asociado a la tecnología y tiempo de convergencia (ver figura 3.4).



- a) Elemento cuadrilátero de 4 nodos
- b) Elemento cuadrilátero de 8 nodos
- c) Elemento triangular de 3 nodos

Figura 3.4. Gráfico de los TEF utilizados en el proceso de selección [fuente: (J. Álvarez, et al., 2012)].

Luego de aplicado los pasos recomendados previamente fueron obtenidos los siguientes resultados (ver figura 3.5):

En el proceso de selección de la forma geométrica del TEF fue descartado el uso del elemento a por no ajustarse correctamente a zonas en la distribución geométrica y calcular un error en la plataforma utilizada al no poder realizar una malla con los requisitos previamente determinados por el autor durante el proceso de selección de la TEF.

El uso del elemento c fue válido para las dimensiones de malla utilizados pero con un crecimiento exponencial del tiempo de convergencia muy superior al resto de los demás elementos con un valor de error asintótico a 0.19 m por lo que decidió hacer una representación solo de las dimensiones de la maya hasta los 3 segundos, dado que los demás modelos sobrepasan el minuto en el proceso de cálculo y o solución del problema objeto de estudio.

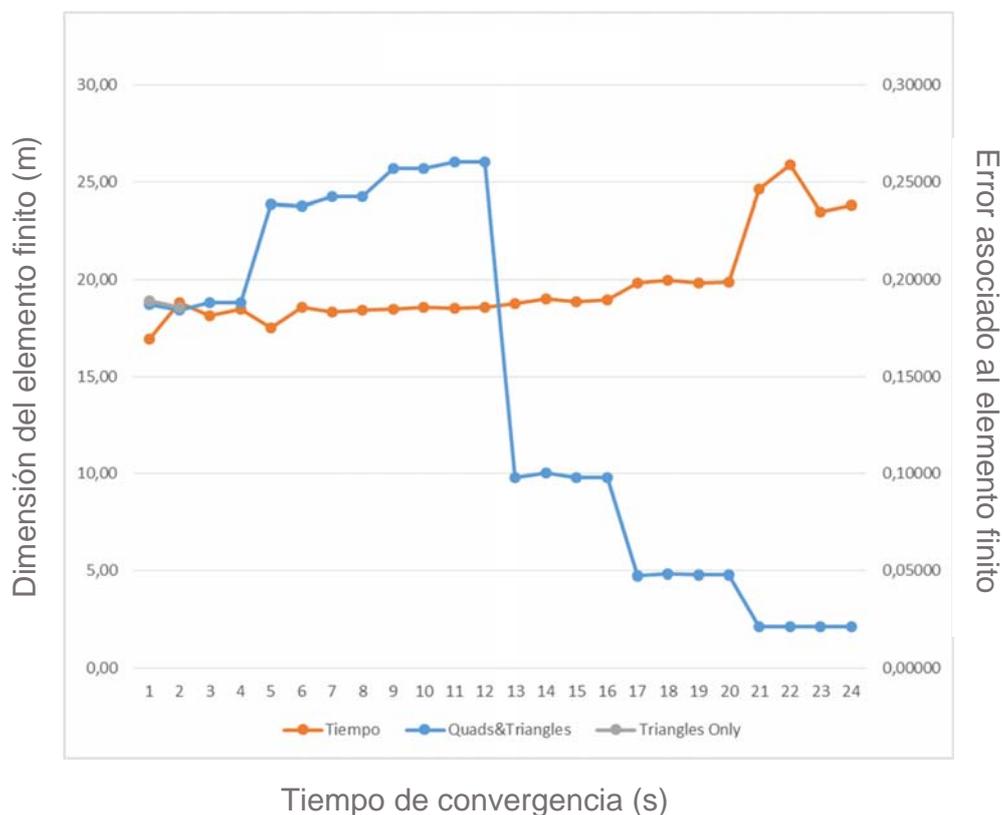


Figura 3.5. Gráfico para la selección de la densidad de malla óptima y TEF.

La combinación de los elementos b y c como TEF a utilizar fue representada en el gráfico 3.2 para el cual si se pudo realizar el estudio completo de las dimensiones

de la malla en función del tiempo de convergencia y el error obtenido durante el proceso de comparación del valor patrón.

En este caso, el proceso de refinado y distribución de la malla a lo largo de todo el dominio objeto de estudio se ajusta correctamente permitiendo una continuidad de los elementos geométricos seleccionados en las zonas donde fallaron los elementos previos seleccionados. Por lo que se decide optar por la combinación *b-c* para el proceso de discretización del dominio a lo largo de toda la sección transversal de la cortina de la Presa Zaza.

En el estudio anterior presentado por Hernández (2015) representativo de las filtraciones de agua en la presa y su base que permitieron calcular el abastecimiento de la capa freática, líneas de corriente líneas de carga a presión, líneas equipotenciales y el caudal de filtración en el cuerpo y base de la presa siendo estos parámetros afectados por un proceso de consolidación del suelo, se procede en el presente trabajo a la evaluación y modelación de un filtro para disminuir esta patología.

Anexo 3.2. Propiedades físico-mecánicas de los materiales.

En la tabla 3.1 son listados los parámetros fundamentales utilizados en el proceso de modelación de las filtraciones de la Presa Zaza.

Tabla 3.1. Parámetros físico-mecánicos de los materiales.

Material	Característica									Sigla	Observaciones
	Categoría	Modelo	Total E - Modulus (Kpa)	C (Kpa)	Phi (Ø) [°]	Unit Weight (kN/m ³)	Mv (Kpa ⁻¹)	Poisson's Ratio	Saturated Conductivity (m/sec)		
Material de la Cortina	Total Stress Parameters	Elástico-Pástico	19613	15.3	15.62	20.54	0.020	0.49	1.16E-07	COR	Arcilla Margosa
Material Filtrante	Total Stress Parameters	Elástico-Pástico	40000	20	20	20.2	0.001	0.35	5.00E-05	FIL	Gravo Arenoso
Tereno Natural	Total Stress Parameters	Elástico-Pástico	12748	20	17.6	20.33	0.013	0.39	5.79E-06	NAT1	-
Material de la Banqueta	Total Stress Parameters	Elástico-Pástico	28000	20	20	17.5	0.025	0.40	1.14E-07	RO	Gravo Arenoso