

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FC**  
Facultad de  
Construcciones

Departamento de Ingeniería Hidráulica

## TRABAJO DE DIPLOMA

Análisis comparativo de los métodos para determinar las sollicitaciones debidas a la carga de tierras sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos

Autor del trabajo: Carlos Ruíz López.

Tutor del trabajo: Dr. Ing. Lamberto Álvarez Gil.

Santa Clara, junio 2018  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

## PENSAMIENTO

*“El precio del éxito es trabajo duro, dedicación al trabajo que estamos haciendo y la determinación de que, ganemos o perdamos, hemos aplicado lo mejor de nosotros mismos a la tarea que tenemos entre manos”*

*Vince Lombardi*

## DEDICATORIA

*A la memoria de **mí abuelo**, Enrique López, que, aunque la vida no me haya dado la oportunidad de conocerlo físicamente estoy seguro de que estaría muy orgulloso de mí...*

*En especial a **mí mamá**, Emma López Cárdenas, por siempre estar a mi lado, cuidarme, comprenderme y mostrarme siempre el mejor camino a seguir...*

*A **mí papá**, Carlos Ruíz Echeverría, quien es mi ejemplo a seguir. Por siempre velar por mi salud y bienestar, apoyarme y aconsejarme siempre...*

*A **mí novia**, Jessica Valero Acosta por su confianza, su compañía, por estar presente cuando más la necesitaba abriéndome las puertas de su corazón y dándome las fuerzas para superarme cada día a su lado...*

*A **mí familia** en general, destacando a **mí tío** Eduardo López, mi ídolo como persona...*

## AGRADECIMIENTOS

*A mí tutor, Dr. Ing. Lamberto Álvarez Gil,  
por ofrecerme sus conocimientos y experiencias durante toda la carrera  
y sobre todo durante la realización de esta investigación.*

*A la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas  
Facultad de Construcciones,  
por haberme permitido formarme durante estos cinco años y en ella  
gracias a todas las personas que fueron partícipes en este proceso.*

*A mis amigos y compañeros del grupo,  
que me acompañaron en estos maravillosos años, en los que compartimos  
gratos momentos que nunca serán olvidados.*

*A mis padres por brindarme su apoyo incondicional en todo momento,  
por ser la base de todo, por comprenderme y apoyarme en las decisiones  
por muy difíciles que fueran. Esta tesis es un logro más y sin lugar a  
dudas ha sido en gran parte gracias a ustedes.*

*A mi novia por estar siempre a mi lado brindándome su apoyo, su  
cariño, dándome fuerzas en los momentos de cansancio y a su familia por  
acogerme en su seno familiar, del que ya me siento parte y ayudarme en  
todo lo que les fue posible.*

*En fin, a todos mis familiares, amigos, a todo aquel que confió en mí y de  
una forma u otra me han ayudado a cumplir esta meta.*

*Muchas Gracias...*

## **RESUMEN**

Las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos pueden llegar a ser mayores que la presión geostática, como consecuencia del fenómeno de rozamiento negativo entre el relleno situado sobre la galería y el de los lados de esta.

En la presente Tesis se analiza el incremento de presiones de tierras debido a este fenómeno por los siguientes métodos de cálculo analíticos: Marstón, Yaroshenko y Normas Soviéticas, además se realiza la modelación por el Método de Elementos finitos para distintas hipótesis de altura de cobertura del relleno, dimensiones de la galería y relación de proyección con respecto al nivel general de cimentación.

Finalmente se comparan los resultados de los cálculos realizados, y se obtiene que los métodos analíticos resultan conservadores con respecto al resultado de las modelaciones por elementos finitos.

## **ABSTRACT**

The solicitations due to the loading of lands on galleries buried in dams of loose materials can be greater than the geostatic pressure, as a consequence of the phenomenon of negative friction between the filling located on the gallery and the one on the sides of it.

In this thesis the increase of earth pressures due to this phenomenon is analyzed by the following analytical calculation methods: Marstón, Yaroshenko and Soviet Norms, in addition the modeling by the Finite Element Method for different hypothesis of coverage height of the fill, dimensions of the gallery and projection relation with respect to the general foundation level.

Finally, the results of the calculations are compared, and it is obtained that the analytical methods are conservative with respect to the result of the finite element modeling.

## INDICE

<b>PENSAMIENTO</b> .....	<b>i</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>INDICE</b> .....	<b>vi</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: Bases teórico-conceptuales y estado del arte sobre el cálculo de las sollicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de materiales sueltos.</b> .....	<b>8</b>
1.1.    Introducción y aspectos generales.....	8
1.2.    Ejemplos reales de galerías enterradas en presas de tierra.....	10
1.3.    Cargas actuantes sobre las galerías enterradas en presas de tierra.....	12
1.4.    Breve reseña de los métodos analíticos de cálculo de presión vertical de tierra que actúa sobre una galería. ....	16
1.5.    El empleo de los modelos numéricos en la ingeniería y algunas consideraciones del programa que se va a utilizar.....	19
1.5.1.    Modelación.....	19
1.5.2.    Fundamentación del “Método de Elementos Finitos”.....	22
1.5.3.    Empleo del software Geo-Studio 2007 para la modelación. ....	25
1.6.    Algunas experiencias en el estudio del cálculo de la carga muerta sobre galerías enterradas en presas de tierra empleando el MEF.....	28
1.7.    Conclusiones parciales del capítulo.....	31
<b>Capítulo 2: Análisis paramétrico de los métodos analíticos para el cálculo de la carga muerta sobre galerías enterradas en presas de tierra</b> .....	<b>33</b>
2.1.    Métodos de cálculo analíticos.....	33
2.1.1.    Método de Marstón.....	33
2.1.2.    Método de Yaroshenko.....	38
2.1.3.    Método de las Normas Soviéticas.....	41

2.2. Análisis paramétrico en el cálculo de la carga muerta sobre las galerías empleando métodos Analíticos.....	43
2.2.1. Aspectos generales. ....	43
2.2.2. Presentación de los resultados.....	44
2.3. Conclusiones parciales del capítulo.....	50
<b>Capítulo 3: Aplicación del Método de Elementos Finitos en la modelación de galerías enterradas en presas de tierra.....</b>	<b>52</b>
3.1. Introducción. ....	52
3.2. Proceso de calibración físico-matemática del modelo numérico.....	53
3.2.1. Concepción del modelo físico. ....	53
3.2.2. Concepción del modelo matemático. Calibración matemática:.....	54
3.2.3. Obtención del modelo numérico. ....	55
3.3. Cálculo de las tenciones por peso propio sobre galerías empleando el MEF mediante el programa GeoStudio2007. ....	58
3.3.1. Aspectos generales. ....	58
3.4. Comparación de los resultados de la modelación con los del cálculo por métodos analíticos.....	59
3.5. Conclusiones parciales del capítulo.....	62
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>63</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERENCIAS BBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>66</b>

## INTRODUCCIÓN

Nuestro país no está excepto a la construcción de nuevas presas dada la importancia y necesidad de captación de agua con diversos fines como evitar inundaciones, satisfacer las necesidades de la población, las industrias, la agricultura, etc, siempre bajo un buen manejo y aprovechamiento de los recursos hídricos.

Así es expresado en el documento de actualización de los Lineamientos para el periodo 2016-2021(PCC, 2016) cuando se refiere a la Política para las construcciones, viviendas y recursos hidráulicos, específicamente el lineamiento número 237 plantea:

Continuará desarrollándose el programa hidráulico con inversiones de largo alcance para enfrentar el impacto del cambio climático y materializar las medidas de adaptación: la reutilización del agua; la captación de la lluvia; la desalinización del agua de mar y la sostenibilidad de todos los servicios asociados, que permitan alcanzar y superar los objetivos de desarrollo sostenible.

De igual manera en las condiciones actuales en que nos encontramos se plantea la necesidad de hacer más con menos, de ser más ahorrativos, eficaces y cumplir con los presupuestos asignados para las inversiones de la construcción. (PCC, 2010) Lo cual se puede lograr al evitar la construcción de obras sobre diseñadas, alcanzando un menor consumo de materiales y por tanto la disminución del costo de la obra.

Para lograr lo expresado en los lineamientos es necesario perfeccionar los métodos de diseño utilizados en la actualidad, para esto, podemos seguir diversas vías: la revisión y actualización de los métodos de diseño, la automatización mediante el empleo de la computación, la introducción de las teorías más avanzadas y la generalización de las mismas.

Dentro de los problemas esenciales asociados con la construcción de presas de materiales sueltos están los conductos enterrados en ellas. Uno de los conductos que con más frecuencia se construye, que forma parte de las obras de toma son las galerías que atraviesan la presa transversalmente y que se emplean comúnmente durante la fase de ejecución de las obras como desvío del río.

En la presente tesis se estudian específicamente las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de tierra, construidas a cielo abierto y dispuestas transversalmente al eje de presa, las cuales es necesario tenerlas en cuenta

para el dimensionamiento estructural de las galerías y el cálculo de los refuerzos ya que pueden llegar a ser mayores a la presión geostática sobre las mismas.

En Cuba indistintamente, se utilizan para el cálculo de las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de tierra: métodos analíticos, por ejemplo, uno de los más tradicionales usados a nivel mundial, el método de Marstón y otros métodos conocidos como método de Yaroshenko y Normas Soviéticas. Los cuales datan de los años 80 y se hace necesario un estudio de estos métodos a partir de investigaciones más actuales.

Esta problemática contextualiza y avala la presente investigación, que permite formular el siguiente problema científico:

¿Es factible la actualización de los métodos empleados para el cálculo de las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de materiales sueltos, para así llegar a resultados más cercanos a la realidad?

Campo de Investigación:

Análisis y diseño de secciones de hormigón armado en obras hidráulicas.

Objeto de Investigación:

Cálculo de las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías en presas de materiales sueltos.

En respuesta a la interrogante que anteriormente se menciona se define la siguiente hipótesis:

Si se realiza un estudio comparativo de las teorías y métodos de cálculo para las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de materiales sueltos, entonces se pueden obtener criterios más exactos para la selección del método de cálculo y valores de carga de tierra sobre la galería más cercanos a la realidad.

Objetivo general de la investigación: Analizar los métodos de cálculo de las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de materiales sueltos que permitan resultados más cercanos a la realidad.

#### Objetivos específicos de la investigación:

1. Determinar el estado del arte sobre métodos para el cálculo de las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de materiales sueltos.
2. Comparar los distintos métodos Analíticos para el cálculo de las solicitaciones debidas a cargas de tierra sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos.
3. Establecer un modelo numérico basado en el Método de Elementos Finitos para la obtención de las solicitaciones debidas a la carga de tierra sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos.
4. Analizar los resultados obtenidos por los métodos de cálculo analíticos y la modelación matemática del problema estudiado.

#### Tareas científicas de la investigación:

1. Elaboración del Diseño Teórico-Metodológico del Trabajo de Diploma.
2. Estudio de las normativas y métodos vigentes de cálculo de las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de materiales sueltos.
3. Diseño de las hojas de cálculo en Excel como ayudas de cálculo de los métodos analíticos para el análisis comparativo.
4. Estudio del programa de computación GeoStudio 2007 específicamente una de sus aplicaciones para modelación geotécnica SIGMAW.
5. Implementación la modelación matemática mediante el programa de computación SIGMAW de una galería dentro de una masa de suelo.
6. Realizar la comparación de los resultados de los métodos de cálculo analíticos y los de la modelación matemática para establecer consideraciones ingenieriles.

### Novedad científica:

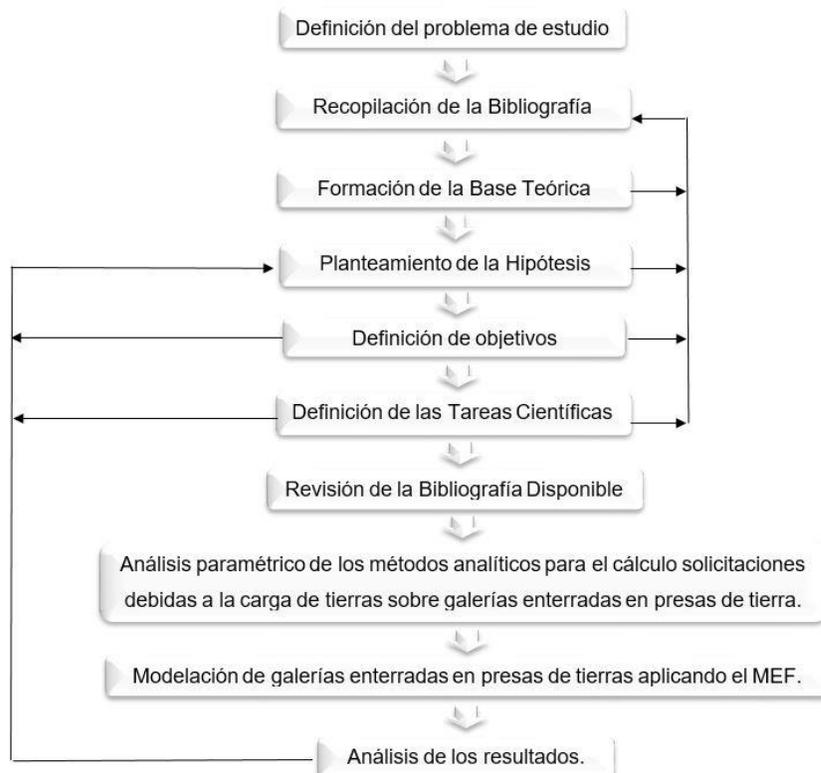
En esta investigación se analizan los métodos analíticos para el cálculo de las solicitaciones debidas a cargas de tierra sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos y se compara con modelaciones por métodos matemáticos más avanzados de Elementos Finitos utilizando el programa de computación GeoStudio 2007 específicamente el submodulo SIGMA/W en el cual brinda la posibilidad de simular la distribución de tenciones y deformaciones de una manera más cercana a la realidad.

### Importancia práctica:

Se facilita la implementación de las tecnologías más avanzadas teniendo en cuenta los estudios más actuales y detallados en la determinación de solicitaciones sobre elementos de hormigón armado enterrados en presas para su dimensionamiento y cálculo de refuerzos.

Con la utilización de tecnologías más avanzadas se podrá calcular las solicitaciones sobre las galerías más cercanas a la realidad y así evitar caer en diseños conservadores que causen un sobre-costos de la obra.

### Esquema metodológico de la investigación:



### Estructura de la tesis:

La tesis cuenta con la siguiente estructura para así darle cumplimiento al objetivo general, y a las tareas científicas que responden a los distintos objetivos específicos:

- Resumen.
- Introducción.
- **Capítulo 1: Bases teórico-conceptuales y estado del arte sobre el cálculo de las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de materiales sueltos.**

Para la elaboración del capítulo se realizó un estudio del estado del conocimiento sobre la temática hasta nuestros días. Para la adquisición de la información se realizó una revisión de la bibliografía existente en soporte papel y digital, habidas en las diferentes bibliotecas, repositorios de la universidad, sitios de internet, revistas on-line o libros y documentos proporcionados por el tutor. Se recopiló la mayor información posible sobre lo que se ha investigado a nivel nacional e internacional acerca de la determinación de las solicitaciones debidas a cargas de tierra sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos, así como las geometrías más usadas convencionalmente, una breve caracterización de los métodos de cálculos analíticos y se hace referencia, además, al programa de computación que se va a utilizar para la modelación.

- **Capítulo 2: Análisis paramétrico de los métodos analíticos para el cálculo de la carga muerta sobre galerías enterradas en presas de tierra.**

En este capítulo se realiza un estudio detallado y análisis paramétrico de los métodos de cálculo analíticos para el cálculo de la carga muerta, definiéndose las variables siguientes: altura de cobertura, ancho exterior de la galería y relación de proyección, para determinar su importancia e influencia relativa en los resultados de la carga muerta. Se emplean hojas de cálculo en Excel para realizar los cálculos de las variantes estudiadas.

- **Capítulo 3: Aplicación del Método de Elementos Finitos en la modelación de galerías enterradas en presas de tierra.**

En el capítulo se aplica un modelo de calibración matemático denominado: Calibración matemática de manera simultánea a un modelo numérico bidimensional. Dicho modelo numérico es utilizado para la obtención de las solicitaciones debidas a la carga de tierra

sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos. Los resultados de las modelaciones se comparan con los de los Métodos Analíticos estudiados en el capítulo 2. Se establecen consideraciones sobre el grado de conservadurismo de los métodos de cálculo estudiados.

- Conclusiones.
- Recomendaciones.
- Referencias Bibliográficas.
- Anexos.

CAPÍTULO 1:  
BASES TEÓRICO-CONCEPTUALES Y  
ESTADO DEL ARTE SOBRE EL  
CÁLCULO DE LAS SOLICITACIONES  
DEBIDAS A LA CARGA DE TIERRAS  
SOBRE LAS GALERÍAS  
ENTERRADAS EN PRESAS DE  
MATERIALES SUELTOS.

# **Capítulo 1: Bases teórico-conceptuales y estado del arte sobre el cálculo de las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de materiales sueltos.**

## **1.1. Introducción y aspectos generales.**

Se denomina Obra de Toma al conjunto de estructuras que se construyen con el objeto de permitir y controlar la extracción del agua almacenada en la presa en una cantidad y momento que se requiera, estas deben ser capaces de dar salida al agua con gastos que dependen de las necesidades aguas abajo de la presa.

De acuerdo con el aprovechamiento se proyectan Obras de Toma para presas de almacenamiento, presas derivadoras, plantas de bombeo y tomas directas en corrientes permanentes.

En el caso de las presas de almacenamiento, la función de la obra de toma depende de los objetivos del almacenamiento y así se tienen tomas para generación de energía eléctrica, para riego, dotación de agua potable, desvío de la corriente durante la construcción y como desagües para el vaciado rápido del vaso.

En general, una obra de toma consiste en: estructura de entrada, conductos, mecanismos de regulación y emergencias con su equipo de operación y dispositivos para disipación de energía. Esta tesis se centra solo en los conductos, que se construyen en las obras de toma, una parte sería la galería de inspección o entrega de agua, siempre a régimen forzado en la tubería instalada en su interior. (Dilla and Cano, 2007)

Existen varias formas de construcción de los conductos enterrados de las obras de toma, se pueden colocar en el lugar y cubrirlo de tierra como conducto dentro de la propia cortina de la presa, de estos, dos tipos de conductos enterrados que con más frecuencia se construyen son galerías para desagüe construidas a cielo abierto que atraviesan la presa transversalmente y que se emplean comúnmente durante la fase de ejecución de las obras como desvío del río y galerías perimetrales de trazado longitudinal ubicadas generalmente debajo del núcleo en las presas con núcleo de arcilla, para inspección, control y trabajos complementarios de inyección de la cimentación en caso necesario, también se puede disponer de la obra de toma en forma de túnel, independiente de la

presa. De lo cual se deriva la siguiente clasificación de las obras de conducción atendiendo a su distribución física. (Sáenz and Lindon., 1997)

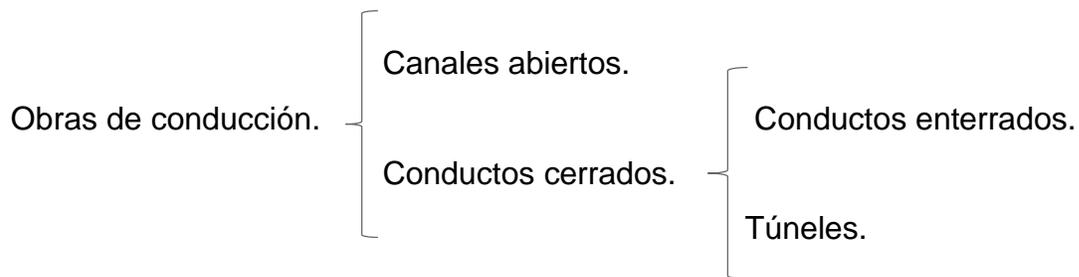


Figura 1: Clasificación de las obras de conducción.

Los túneles no quedan en contacto directo con el terraplén de la presa y por tanto constituyen un método más seguro y duradero y existen menos probabilidad de colapso de alguna parte del túnel que provoque el fallo de la presa.

Pero no siempre es posible la construcción un túnel pues condiciones de coste o plazo de ejecución y también que con toda obra subterránea existen más incertidumbres y posibilidades de condiciones no previstas en proyecto que hacen que la disposición de conductos enterrados en presas de materiales sueltos sea una solución frecuentemente adoptada, especialmente en países en vías de desarrollo.

Específicamente se utiliza este tipo de captaciones cuando se tiene alguna de las siguientes situaciones:

- Condición geológica de los estribos no apropiada para hacer un túnel.
- El diámetro necesario hidráulicamente es más pequeño que el mínimo requerido constructivamente para hacer un túnel.
- El conducto enterrado resulta más económico que el túnel.
- El tiempo disponible para la construcción de la obra es limitado.

Las galerías son conductos que se construyen a cielo abierto, por secciones, generalmente monolíticas y resulta de gran interés su análisis por ser una variante muy común en nuestro país en las presas de tierra de cierta importancia. Ya que si se colocaran las tuberías directamente en el terreno como en presas de poca importancia dedicadas al riego traería grandes desventajas debido al asentamiento no uniforme de la base que provoca la aparición de grietas en los tubos y hendiduras en sus juntas por las cuales el agua se filtraría por el cuerpo de la presa y esto traería consigo varios riesgos

como el sifonamiento en la interface de la cortina con la tubería, además la renovación de los tubos sería imposible y la reparación de los mismos solo sería posible por dentro cuando los diámetros lo permitieran.

Por lo descrito anteriormente es que se emplea la variante de galería con torre en las presas de cierta importancia. Esta solución trae como ventajas que, en caso de haber alguna filtración por algún tubo a presión, el agua se desvía por la galería sin hacer daño, posibilitando también el mantenimiento y renovación total de las tuberías, así como la inspección y control del interior de la obra. Esta variante a pesar de ser un poco costosa reduce el costo de la obra puesto que la galería tiene el doble propósito de servir en época de construcción como desvió del río.

Las secciones transversales de una galería son de una o dos celdas según lo requieran las necesidades, empleándose regularmente la sección rectangular por sus ventajas constructivas, aunque pudiera tener otro tipo de sección.

## **1.2. Ejemplos reales de galerías enterradas en presas de tierra.**

En el mundo los ejemplos de presas de materiales sueltos son muy numerosos ya que por razones de topografía y económicas la construcción de este tipo de presas se hace más fácil y rentable, sobre todo en países en vías de desarrollo.

En una investigación de Alfonso Franco y J. Yagüe (1997, citado en (Sáenz and Lindon., 1997) identificaron al menos 13 presas de materiales sueltos de más de 50 m de altura con galerías enterradas en el cuerpo de la presa, con dimensiones interiores entre 2 x 2 m y 6.5 x 6.5 m, las cuales han tenido un comportamiento satisfactorio según los autores, en general debido a la cimentación de las galerías directamente sobre rocas. En nuestro país también se busca el mejor comportamiento de las galerías cimentándolas sobre rocas competentes, un ejemplo de esto es la galería de la presa La Quinta con dimensiones de 3.7 m x 7.1 m cimentada sobre una capa de porfidrita andesítica (MICONS, 1990). También expresan que Melvill (1997) presenta casos de presas sudafricanas con galerías enterradas con dimensiones exteriores entre 4 x 5 m y 7.5 x 8 m y alturas entre 40 y 59 m sobre la clave, todas tienen proyección positiva sobre el nivel general de cimentación, en algunos casos llegando al 100 % y la mayoría fueros instrumentadas con células de presión total con el fin de conocer el estado tensional respecto a la galería y compararlo con los cálculos por MEF realizados previamente. Las

mediciones que realizaron confirmaron el importante crecimiento de las presiones verticales sobre la clave de las galerías como se aprecia en la presa de Stettynakloof, terminada en el año 1982, en la que la galería tiene proyección superior al 100 %. Donde usaron una técnica de colocación del conducto parecida a la llamada por Marstón como Trinchera imperfecta a la que hizo referencia anteriormente, con el objetivo de equilibrar la rigidez de las columnas de tierra sobre la clave de la galería respecto a las de hastiales, por el procedimiento de dejar una zona de relleno sin compactar directamente sobre la clave, adoptando medidas especiales de compactación, con espesores de tongadas reducido en hastiales. A pesar de las medidas especiales de compactación tomadas las células de presión total al final de la construcción registraron lecturas de aproximadamente 1.7 veces la geostática y las presiones horizontales en los lados fueron del orden del 50 % de la vertical geostática.

En Cuba es muy frecuente la construcción de las obras de toma en el cuerpo de las presas. Según planos generales de galerías de distintas presas en Villa Clara que se encuentran bajo la jurisdicción de la empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Villa Clara se han podido identificar al menos 5 presas de materiales sueltos con galerías enterradas, de sección rectangular, de las cuales se resumen su geometría en la tabla 1, estas están apoyadas sobre roca competente y apenas el techo se eleva sobre el nivel general de cimentación, ya que están colocadas en zanjas, que por razones geotécnicas o constructivas pueden quedar con unos taludes de excavación tendidos y por tanto un ancho excesivo para la zanja en que se aloja la galería. En estos casos no es posible por cuestiones económicas enraizar hasta el nivel general de cimentación con hormigón, lo que se hace es que en estos espacios a los lados de la galería se toman medidas especiales de compactación, preferiblemente manuales con el uso de vibradores y otros equipos de compactación. No obstante, este caso se asemeja mucho a una proyección elevada sobre el terreno y cabe esperar incrementos de presiones sobre la misma.

Tabla 1: Geometría de las galerías en presas de Villa Clara. (Elaboración propia)

Presa	Dimensiones de la galería (m)	Numero de Celdas
Alacranes	4.3 x 5.45	1
La Quinta	7.1 x 3.7	2
Manicaragua	4.4 x 4.3	1
Palmarito	7.13 x 3.9	2
Santa Clara	5.9 x 3.8	1

Un ejemplo de lo que se mencionó es el mostrado por Boufous y Chraibi (1997, citado en (Sáenz and Lindon., 1997) de la presa de Al Wahda, en Marruecos, cuya construcción termino en 1997 y alberga un enorme conducto de dimensiones exteriores de 19.45 m x 31 m con proyección relativa de próxima al 50% respecto al nivel general de cimentación, 46 m de cobertura de tierra en el eje de la presa y cimentado en margas. En el proyecto consideraron un incremento de la presión de tierras de 60% sobre la geostática y además tomaron medidas especiales de compactación en los hastiales de la galería con el objetivo de conseguir una rigidez mayor y así aliviar la transferencia de esfuerzos sobre la estructura.

Según el Bureau of Reclamation (USBR), (1980, citado en (Sáenz and Lindon., 1997) “estimaba que las presiones de tierras sobre galerías con proyección positiva dentro del relleno podrían alcanzar un 50% de incremento de sobre la presión geostática.” Según Charles (1997, citado en (Sáenz and Lindon., 1997) “para las geometrías típicas la presión vertical sobre la clave de la estructura puede alcanzar el doble de la presión geostática, como se comprobó por mediciones realizadas bajo la presa de Winscar”.

### **1.3. Cargas actuantes sobre las galerías enterradas en presas de tierra.**

Las cargas a las que está sometida una galería en un terraplene varían mucho, según diversos factores relativos al terreno de cimentación, flexibilidad o rigidez de la estructura, que en este caso es totalmente rígida, también las propias características del suelo del terraplén, como ángulo de rozamiento interno ( $\varphi$ ), el peso unitario, homogeneidad, características de consolidación, cohesión y humedad. (Dilla and Cano, 2007)

Se deben tomar en cuenta todas las posibles combinaciones de estos diferentes factores para evaluar su efecto conjunto sobre la estructura. Las combinaciones de cargas que se consideren deben analizarse, no solo para el tiempo de construcción de la presa, sino, también para cuando la obra esté terminada y comience su funcionamiento: estado de explotación, y se encuentre bajo la acción de las cargas del agua represada y el terraplén saturado.

De forma general se pueden citar distintas cargas que actúan sobre la galería como la presión de tierra vertical, de tierra lateral y longitudinal, presión hidrostática externa y la reacción del terreno de cimentación.

Las combinaciones de las cargas, bajo diferentes hipótesis de ocurrencia y magnitud de las mismas, darán como resultado diferentes variantes o casos de cálculo, de donde se obtendrán los esfuerzos más críticos y por tanto el refuerzo de la sección transversal del conducto.

Esta tesis se enfoca al cálculo de las solicitaciones debidas a la carga de tierra sobre las galerías en las presas de tierra, se hace referencia a algunas de las cargas vivas a las que está sometida la galería como las presiones hidrostáticas exteriores e interiores, pero no se profundiza en su estudio ni se tienen en cuenta en los cálculos ni análisis que se realizan, solo las cargas muertas producidas por el peso del terraplén y el suelo de cimentación, específicamente el estado de final de construcción de la presa.

Presión de tierras.

La presión vertical que ejerce el peso de tierra sobre una galería es la fuerza más importante que interviene en los conductos bajo terraplén. Además de los efectos verticales, existen también presiones laterales y longitudinales a lo largo del eje de la estructura, inducidas por las propias cargas verticales.

Esta, a primera vista se diría que es igual al peso propio del material colocado sobre ella, lo cual se consideró correcto durante muchos años, sin embargo, hoy en día se sabe que el efecto del suelo sobre la estructura puede ser mayor o no que el peso propio del material de relleno y solo en casos aislados igual a este.

Lo explicado anteriormente se debe a que entre un prisma de relleno de ancho igual al de la galería situado sobre esta y prolongado hasta la superficie del terraplén y las masas de relleno ubicadas a ambos lados de este prisma, se ejercen fuerzas cortantes cuando hay alguna tendencia al movimiento relativo. Si el prisma considerado trata de bajar respecto a las masas vecinas, es decir que tenga un mayor asentamiento que estas, se genera un efecto de arco que reduce el efecto de la masa de suelo sobre el conducto, por tanto, va a ser menor que su propio peso, siendo la diferencia igual al valor de las fuerzas cortantes que se generan y estas serían hacia arriba. Por otro lado, si por alguna razón las masas de terraplén vecinas al prisma en cuestión se asientan más que el prisma, las fuerzas cortantes se producen hacia abajo sumándose su valor al peso propio del prisma por lo que el efecto de este sobre el conducto sería mayor como se puede observar en la figura 1. (Júarez and Rico, 1974)

En el caso de proyección positiva de la galería sobre el nivel general de cimentación, es decir colocación en terraplén. Como se sabe el espesor de tierra a los lados de la galería es mayor que sobre el techo la misma por lo que tienden a asentar más. En consecuencia, como se aprecia en la figura 2, se produce según una sección transversal de la galería y longitudinal respecto al eje de la presa, una transferencia de esfuerzos desde los espaldones a los lados hacia el elemento más rígido. Pronunciándose más el fenómeno cuanto mayor es la rigidez de la estructura respecto del terreno y su proyección dentro del relleno, sobre el nivel general de cimentación. (Sáenz and Lindon., 1997)

Este problema se elimina en parte con la disposición de la galería con su cara superior enrazada con el nivel general de cimentación.

Sin embargo, no es posible eliminar completamente el problema del incremento de las cargas geostática, ya que, también ocurre transferencia de esfuerzos, como podemos apreciar en la figura 3, en sentido longitudinal a la galería desde el núcleo, en la zona más próxima al eje de la presa donde la cobertura de tierra sobre el conducto es mayor hacia los espaldones adyacentes debido a la mayor rigidez de estos últimos.

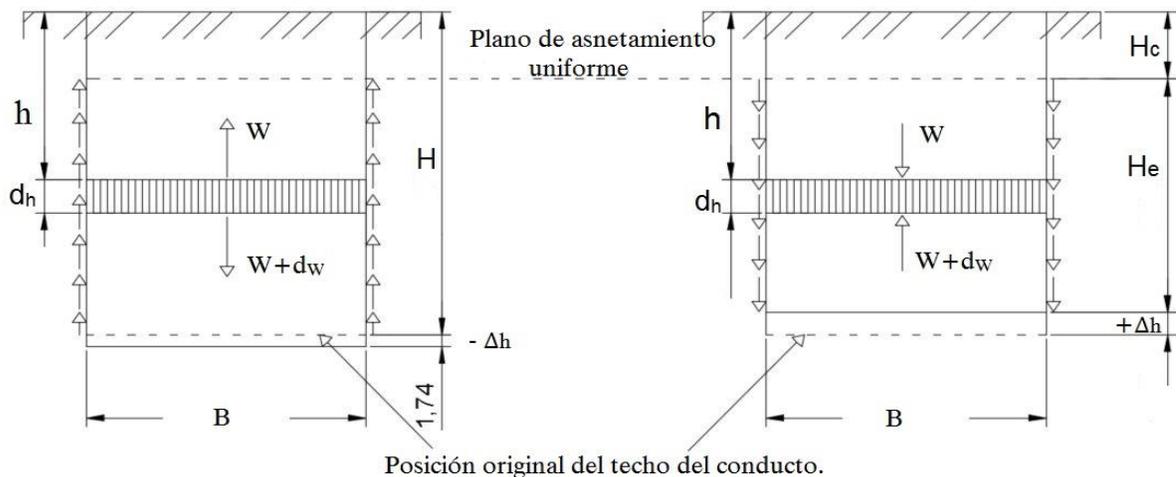


Figura 2: Fuerzas que actúan sobre un conducto. (Júarez and Rico, 1974)

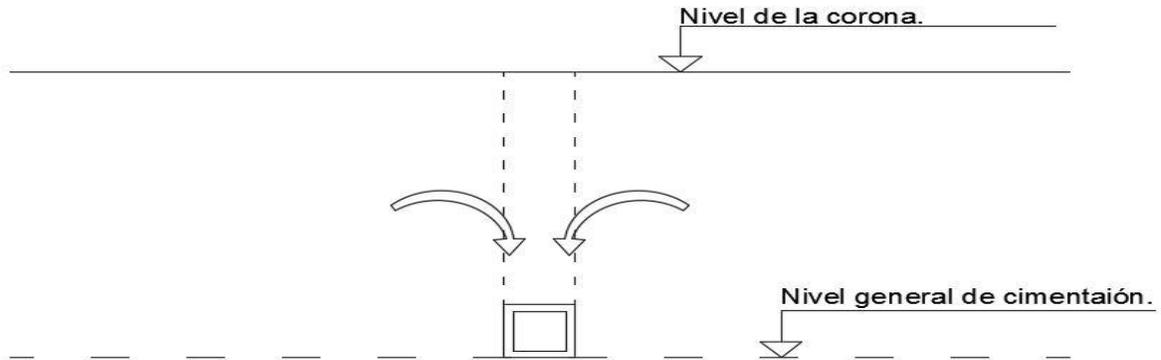


Figura 3: Sección transversal a la galería y longitudinal respecto al eje de la presa. (Elaboración propia)

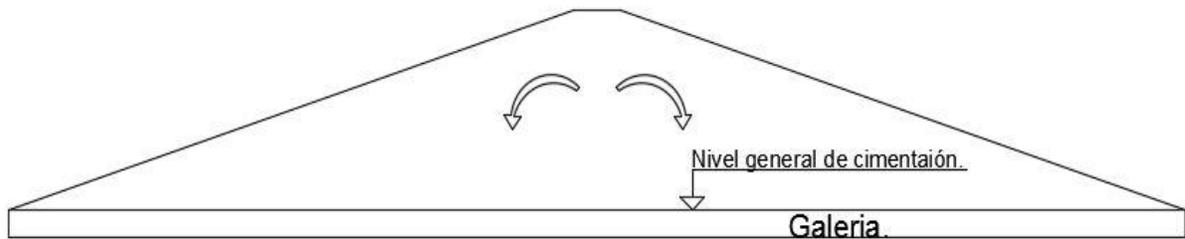


Figura 4: Sección transversal a la presa y longitudinal respecto al eje de la galería. (Elaboración propia)

Se trata de un fenómeno tridimensional y complejo. (Sáenz and Lindon., 1997) Su importancia radica no solo en la valoración de las cargas de proyecto que deben tenerse en cuenta en el dimensionamiento estructural de las galerías, sino también en la reducción de presiones totales verticales que induce en las tierras adyacentes a los hastiales de la galería, presión que puede incluso llegar a quedar por debajo de la presión intersticial con lo cual podría producirse el peligroso fenómeno de la fracturación hidráulica. Las presiones de tierra para cada tramo de galería dependerán de la altura del terraplén que exista encima de la galería siendo mayor en el tramo que se encuentre debajo de la corona de la presa que es la parte más alta y haciéndose menor a medida que avanza hacia los lados, quedando debajo de los taludes aguas abajo y aguas arriba, los cuales como todos sabemos tienen cierta pendiente.

Presión hidrostática interior.

Cuando la torre de compuertas se encuentra situada en algún punto intermedio de la galería, de este punto hacia atrás según la dirección en que corre el agua por la misma se encontrara sometida a presión hidrostática interior, dependiendo esta de le nivel del agua en el embalse. En el tramo restante de la galería al existir tuberías dentro de ella se elimina la presión hidrostática interna que se generaría al correr el agua directamente por ella. (Dilla and Cano, 2007)

Presión hidrostática exterior.

En el estado de carga de operación de la presa, generalmente en el talud aguas arriba influye tanto el peso del terraplén saturado, como el peso del agua del vaso que se encuentre arriba del terraplén.

El nivel de saturación del terraplén dependerá de la posición de la curva de filtración a través del cuerpo de la presa. Se supone generalmente, que las presiones hidrostáticas externas actúan con la misma intensidad en todas las direcciones: verticalmente hacia abajo como una carga aumentada, hacia arriba como subpresión y lateralmente en las paredes del conducto. (Dilla and Cano, 2007)

Reacción del terreno de cimentación.

La reacción vertical de la base de la galería se toma igual a la carga vertical más el peso de la estructura. En las cimentaciones de tierra es costumbre suponer que la reacción de la base esta uniformemente distribuida en toda la anchura del conducto. (Dilla and Cano, 2007)

#### **1.4. Breve reseña de los métodos analíticos de cálculo de presión vertical de tierra que actúa sobre una galería.**

La determinación de un método específico para el cálculo de las solicitaciones sobre un conducto enterrado se inició hasta después del año 1910 en la Universidad de Iowa, donde se desarrolló un método para estimar las cargas aplicadas sobre tuberías enterradas. Como ha mostrado Spangler (1941,1948,1951,1962, citado en (Gálvez, 2011) el concepto original fue desarrollado por TALBOT, A.N. (1908) y MARSTON, A. y ANDERSON, A.O. (1913). Marstón prosiguió investigando hasta 1930 que publicó “La

teoría de las cargas exteriores aplicadas a las tuberías enterradas” y, posteriormente, se unió a Spangler para continuar sus investigaciones.

En el cálculo de la carga de tierras por métodos tradicionales en estructuras enterradas se establece una diferenciación entre estructuras rígidas o flexibles. La diferencia se mide, frecuentemente, en función del parámetro de rigidez de Howard,  $S = EI/D^3$  donde  $E$  es el módulo de deformación del material que constituye la pared de la estructura por metros lineales de la misma, y  $D$  representa el diámetro en el caso de tuberías circulares y la luz o dimensión representativa del tamaño de la estructura. Considerando flexibles las estructuras con  $S < 1 \text{ Kg/cm}^2$ , rígidas aquellas en las que  $S > 2 \text{ Kg/cm}^2$  y semirrígidas las intermedias. Las galerías enterradas bajo presas de tierra caen plenamente dentro del caso rígido por el importante espesor de su pared. (Sáenz and Lindon., 1997)

Marstón, realizó un estudio completo de la magnitud de las cargas verticales sobre conductos rígidos y con el propósito de calcular las cargas muertas estableció cuatro clasificaciones principales de acuerdo con las condiciones de instalación que influyen sobre las fuerzas cortantes a que arriba se hizo referencia. Estas clases se muestran en la figura 4. (Badillo and Rodriguez, 1974)

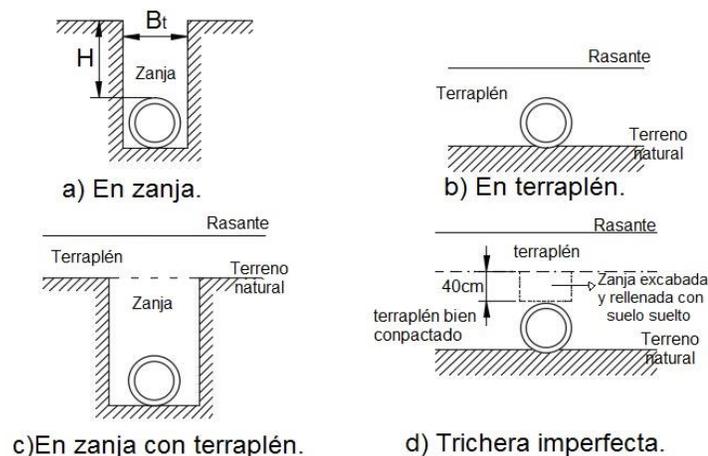


Figura 5: Clases de conductos según colocación. (Badillo and Rodriguez, 1974)

En la parte a) de la figura 4, los conductos sin terraplén, se instalan los tubos en trincheras estrechas bajo el nivel del terreno natural y sobre ellas se coloca solamente el relleno de la zanja posterior a la excavación. Los tubos con terraplén, en la parte b) y c) de la figura están colocados bajo el mismo y pueden quedar o no en una zanja dentro del terreno natural, siendo favorecidos por está, pues al estar alojados dentro de ella, la carga vertical

se reduce tanto más, mientras más suelto sea el relleno que se coloque sobre el conducto, dicho relleno no tiene necesariamente que ocupar toda la tubería, basta con una franja de 30 a 40 cm de espesor sobre el tubo para lograr un arqueo beneficioso. En la parte d) se muestra un tipo de colocación bastante favorable para reducir la carga actuante sobre un conducto instalado en un terraplén, el cual se conoce como trinchera imperfecta. Primero se coloca el tubo sobre el terreno natural sin utilizar ninguna zanja después se coloca el terraplén perfectamente bien compactado alrededor del tubo hasta una distancia de dos veces el diámetro del tubo o más, a cada lado del mismo y una altura de 40 cm sobre su clave y posteriormente se excava una zanja a lo largo del conducto de ancho igual a este, hasta una profundidad ligeramente menor que la parte superior del tubo. Esta zanja se rellena de material suelto compresible tras lo cual se prosigue con la construcción del terraplén, compactándolo normalmente. Cuanto más compresible sea el material de relleno colocado sobre la clave del conducto mayor será la reducción de la carga muerta sobre el conducto, incluso Marstón sugiere que se le añada paja u hojarasca seca al relleno para aumentar su compresibilidad. (Badillo and Rodriguez, 1974)

Según la clasificación de Marstón, las galerías enterradas en presas de tierra pertenecen de las clases b, c y d de la figura 4, ya que independientemente de la técnica de colocación, siempre va a estar presente el terraplén.

Además de Marstón, otros científicos y estudiosos también se dedicaron al estudio de las cargas muertas sobre conductos enterrados, estableciendo métodos de cálculo analíticos conocidos como el "Método de Yaroshenko" y el "Método de las normas soviéticas". Métodos presentados en el libro de Szechy "The Art of Tunnelling" que han tenido poca difusión en Cuba. (Szechy 1970, citado en (Dilla and Cano, 2007)

Estos métodos tienen su cierta similitud con el de Marstón, partiendo del supuesto desarrollo de fuerzas friccionales entre las masas de tierra estacionarias y en movimiento, que como ya se ha mencionado estas pueden estar dirigidas hacia arriba o hacia abajo, en dependencia del sentido del movimiento relativo entre el conducto y el suelo adyacente.

Yaroshenko plantea, para la formulación del método de cálculo de la magnitud de la presión sobre el conducto, que las fuerzas friccionales van a ser directamente proporcionales a la presión activa de tierras y utiliza para el valor del coeficiente S en

función del tipo de cimentación, valores empíricos aproximados que dependen para estructuras rígidas si esta cimentado en roca, suelo denso o elástico. En el Método de las normas soviéticas bastante similar al anterior lo que más simple, en este caso el coeficiente S también depende del tipo de terreno de cimentación. (Szechy 1970, citado en (Dilla and Cano, 2007)

## **1.5. El empleo de los modelos numéricos en la ingeniería y algunas consideraciones del programa que se va a utilizar.**

### 1.5.1. Modelación.

La modelación es un método que es capaz de dar una solución aproximada a casos que por su complejidad matemática requiera de la aplicación de herramientas de cálculo más robustas, puede ser utilizado en la mayoría de los problemas ingenieriles, estas, han facilitado los sistemas de trabajo al permitir mayor operatividad, también han propiciado la creación de enfoques para tratar el comportamiento de los materiales, de las estructuras y del terreno, así como de las acciones que actúan sobre dichas estructuras. (Mora Rodríguez, 2003)

En el campo de la ingeniería, el hombre ha tenido que enfrentarse a un grupo de fenómenos donde por limitaciones del conocimiento o por la carencia de una infraestructura técnica adecuada, no ha podido encontrar la respuesta en el “*problema real*”. Esto ha propiciado que tenga que recurrir a su capacidad creativa y lograr una abstracción de este problema, obteniendo “*modelos*” sobre los cuales se trabajan buscando una respuesta analítica, que por muy precisa que ella sea, los resultados obtenidos serán indicativos del “*problema real*” en la medida que el “*modelo*” represente fielmente sus propiedades esenciales. (Broche Lorenzo, 2005)

Según (Meli Piralla, 1986) 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.

Para todo objeto de modelación debemos tener presente el análisis del problema real y para resolverlo se consideran tres modelos: el modelo de las cargas, del material y de la

estructura, donde estos se integren y sean resueltos mediante los métodos de diseño aplicados a la solución del modelo del problema real. A continuación, se muestra en la figura 5 el esquema o concepción general de la modelación.

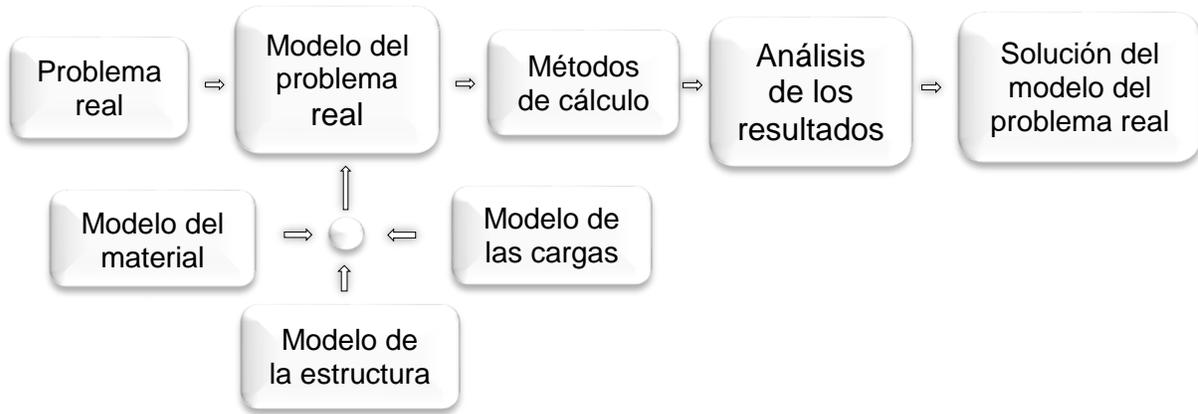


Figura 6: Esquema general de modelación.

Modelo de las cargas:

Según (Meli Piralla, 1986), por acciones se entiende lo que generalmente se denominan cargas, pero esta acepción más general incluye a todos los agentes externos que inducen fuerzas internas en la estructura, esfuerzos y deformaciones. Por tanto, además de las cargas propiamente dichas se incluyen las deformaciones impuestas, como los hundimientos de las cimentaciones y los cambios volumétricos, así como los efectos ambientales de viento, temperatura, corrosión, entre otros.

El origen de las cargas suele ser muy diverso, se tiende a clasificar estas acciones actuantes de acuerdo a su permanencia o tipo de influencia. Estas pueden ser:

- Acciones Permanentes: Aquellas que obran de forma continua sobre la estructura y cuya intensidad puede considerarse que no varía con el tiempo. (Cargas muertas, empuje estático de líquidos y tierras con carácter permanente, entre otras.)
- Acciones variables: Aquellas que obran sobre la estructura con una intensidad variable con el tiempo, pero que alcanzan valores significativos durante lapsos grandes. (Cargas vivas, efectos de cambio de temperatura y cambios volumétricos)
- Acciones accidentales: Aquellas que no se deben al funcionamiento real de la construcción y que pueden tomar valores significativos solo durante pequeñas fracciones de la vida útil de la estructura. (Sismo, viento, oleaje y explosiones.)

En el tipo de estructura que va a ser analizada, la principal carga actuante es la vertical de tierra que entra dentro de las cargas muertas y está dada como dice anteriormente por acciones permanentes y su intensidad no varía con el tiempo.

Modelo del material:

Las propiedades más importantes de un material se obtienen mediante las curvas de “esfuerzo vs. deformación” a pesar de algunas limitaciones que presentan, estas curvas se obtienen mediante ensayos uniaxiales de esfuerzos o tracción, estos brindan una relevante información sobre el comportamiento del material ante la influencia de un conjunto de acciones, formadas por fuerzas externas, suministro de calor u otro agente. La propiedad más importante que se obtiene de estos gráficos es el módulo de elasticidad (E), que define su comportamiento estructural. Este parámetro está directamente relacionado con la rigidez que puede lograr este material en una estructura y del cumplimiento de los estados límites de servicio. (Meli Piralla, 1986)

Los modelos del comportamiento de los materiales empleados para la simulación del comportamiento real de la estructura han ido evolucionando desde los más simples y alejados de lo real hasta los más complejos y que abordan en sí el comportamiento reológico del mismo. (Mora Rodríguez, 2003) Entre estos modelos encontramos los siguientes:

- Modelo elástico lineal.
- Modelo plástico.
- Modelo elasto-plástico.
- Modelos no lineales.
- Modelos reológicos.
- Modelos reológicos no lineales.

Generalmente se hace la hipótesis de comportamiento elástico lineal, aunque esta tiene limitaciones en muchos casos. El análisis también se realiza con procedimientos que implican la hipótesis de que el comportamiento de la estructura es lineal y se adoptan en el modelo propiedades elásticas representativas del comportamiento de la estructura. Esta hipótesis es aceptable y conveniente en prácticamente todos los casos, sin embargo, es necesario entender claramente en qué grado difiere el comportamiento real del elástico lineal, en qué criterio se debe basar la determinación de las propiedades

elásticas equivalentes y cuál es la magnitud de los errores que se pueden cometer con esas hipótesis. (Meli Piralla, 1986)

La mayoría de los materiales y elementos estructurales tienen un comportamiento lineal en un intervalo de esfuerzos bastante amplio, existen además diversas fuentes de no linealidad, pero la más importante es la que proviene del propio material y depende de sus características peculiares.

En este trabajo para la relación entre tensiones y deformaciones se sigue el modelo de respuesta hiperbólica, no lineal-elástico según el cual el desviador de tensiones tiende a un valor asintótico cuando aumenta la deformación. Para el hormigón se adopta un modelo lineal elástico.

Modelo de la estructura y geometría:

Plantea (Meli Piralla, 1986) que el modelo de la estructura debe especificar las condiciones de continuidad entre un elemento y otro y las de frontera entre la estructura y sus apoyos. Las condiciones de continuidad entre los elementos de una estructura dependen esencialmente del detalle constructivo con que se resuelve la conexión. Se puede lograr un nudo rígido, o sea, uno donde no existan deformaciones concentradas que permitan movimientos relativos entre los dos elementos que se conectan, o se puede detallar la conexión de manera que se libere alguna restricción sea de desplazamiento o de giro, logrando por ejemplo una articulación. La suposición que se haga en el modelo analítico debe ser congruente con el tipo de conexión que se especifique en los planos para los elementos en cuestión.

En este trabajo se modelará la estructura en 2 dimensiones (2D) ya que es un problema de deformación plana, para un mejor estudio de la distribución de tensiones y los desplazamientos cuando la estructura responda a las cargas a que está sometida.

#### 1.5.2. Fundamentación del "Método de Elementos Finitos".

Los métodos numéricos son aquellos que se emplean en problemas muy complejos donde la solución analítica se hace inapropiada por la complejidad matemática que requiere.

En ingeniería los métodos numéricos han tenido una amplia difusión con la aparición de computadoras cada vez más potentes y programas de computación modernos que implementan dichos métodos, que permiten al ingeniero analizar problemas cuya

solución analítica es inaccesible y la empírica es dudosa. Actualmente se obtiene una respuesta adecuada al aplicar estas técnicas de cálculo numérico automatizado utilizando el Método de Diferencias Finitas y el Método de los Elementos Finitos.

El Método de Elementos Finitos (MEF), es implementado hoy en día, en los distintos códigos comerciales de software, como son el ABACUS, ANSYS, PLAXIS, GEO – STUDIO, etc. los dos últimos los más empleados en los problemas con estructuras de tierra producto de la especialización del software.

A nivel conceptual, el MEF consiste en la descomposición de un medio físico continuo en un número discreto de partes o elementos que se hallan conectados entre sí por un número discreto de puntos denominados nodos. Los movimientos de estos constituyen las incógnitas fundamentales de cada problema. Dentro de cada elemento caracterizado por la región de Gauss (nodo Gaussiano), los movimientos de cualquier punto se obtienen a partir de los movimientos de los nodos del elemento. (Mesa, 2017)

Conocido el movimiento de un punto dentro del elemento se establecen las condiciones de equilibrio y compatibilidad, y dadas las relaciones constitutivas de los materiales, pueden obtenerse las variables de respuesta en cualquier punto del elemento.

Al emplear el MEF en la solución de los problemas de determinación de los desplazamientos, tensiones y deformaciones de un suelo, se pueden emplear diversos modelos constitutivos, ya sean elásticos, plásticos, elasto-plásticos, anisotrópicos, hiperbólicos, de estado crítico, etc., así como también pueden emplearse modelos con suelos homogéneos y heterogéneos. (Mesa, 2017)

Además, usar un programa de computación como los anteriormente mencionado se hace muy ventajoso, pues... las soluciones “clásicas” funcionan bien para problemas aislados, pero cuando el problema se complica, ya no funcionan tan bien. Un programa de ordenador basado en este método nos permite saber cómo se distribuyen las tensiones, dónde alcanzan sus máximos y mínimos, dónde se supera la resistencia a rotura del suelo, dónde podemos tener problemas de plastificación. Además, el MEF, es muy factible para el estudio de determinados fenómenos como la succión, expansión, colapso o hinchamiento de los suelos en diferentes etapas siempre con el objetivo de reducir los tiempos de proyectos o de puesta de producto en el mercado. Todo esto vinculado con el desarrollo de la industria de la computación. (Mesa, 2017)

La ventaja fundamental que se presenta al emplear los métodos numéricos es la rapidez con que se obtienen las soluciones una vez que el modelo se ha representado correctamente.

Varios autores en su investigación: Javier Moller, 2011; M. Mesa, 2011; L. O. Ibáñez, 2001, citado en (Mesa, 2017) recomiendan, para la solución de los problemas ingenieriles donde se emplea la modelación numérica como herramienta de solución, el empleo de elementos finitos según su forma, tipo y tamaño que mejor brindan la solución.

- Es recomendable, siempre que sea posible, que las dimensiones de los lados de los elementos estén en relación 1:1 y nunca superar la relación 4:1. Los elementos de mayor tamaño son generalmente colocados en las zonas menos solicitadas, cerca de las fronteras exteriores.
- Los elementos individuales no deberán ser distorsionados. Los ángulos entre dos lados de elementos adyacentes no deberán exceder por mucho a los  $90^{\circ}$  y nunca sobrepasar los  $180^{\circ}$ . Esto implica que los triángulos tendrán similitud, en lo posible, a los equiláteros; los cuadriláteros a los cuadrados y los hexaedros a los cubos.
- En zonas de mayor concentración de tensiones y cercanas a ellas o puntos donde es de mayor interés observar el comportamiento de la estructura, el mallado debe ser más denso que en otras zonas. La generación de malla debe ser progresiva, aumentando la densidad hacia las zonas de mayor interés.
- Siempre que la simetría en la geometría, propiedades físicas, cargas y condiciones de borde lo permitan se debe recurrir a simplificaciones para reducir el tamaño del modelo.

Otro aspecto a tener en cuenta, es la selección del Tipo de Elemento Finito (TEF), que define los siguientes aspectos fundamentalmente: (Mesa, 2017)

- El dominio de trabajo, a través de la discretización del medio.
- Las funciones de forma, que no son más que el polinomio interpolador empleado (LaGrange, Hermite, Newton, etc.), asociado a su formulación débil.
- La técnica de integración empleada (híbrida, reducida, etc.)

Un aspecto importante en la selección del TEF, es la biblioteca implementada en cada software cuya selección está en función del problema real. Existen recomendaciones para la selección del TEF, las que están en función del modelo geométrico empleado, así como en la física del problema real. A continuación, se presentan algunas: (Mesa, 2017)

- La utilización del elemento de 8 nodos o hexaedro con integración de primer orden tiene la peculiaridad, de que su mallado genera menor cantidad de ecuaciones (nodos) para un mismo volumen, lo que se traduce en menor costo computacional.

- El elemento tridimensional de 4 nodos o tetraedro tiene la ventaja indiscutible de poder adaptarse a cualquier geometría, no importa lo irregular que ésta sea [106].

Por lo tanto, la selección del TEF, debe cumplir con la aproximación numérica, así como con el criterio de selección. Para la selección correcta del TEF y la discretización del medio, es necesario realizar una calibración físico-matemática del modelo numérico que será empleado para dar solución a los problemas reales.

En el capítulo 3 de la presente investigación, se profundiza sobre la calibración fisicomatemática y se aplica un método para la calibración matemática de forma simultánea para la determinación de un modelo numérico que refleje las características del problema real.

### 1.5.3. Empleo del software Geo-Studio 2007 para la modelación.

El software Geo-Studio es una herramienta de propósito específico, que tiene implementada en su programación la solución del método de los elementos finitos para la resolución de las ecuaciones en la obtención de los estados tenso-deformacionales de obras de tierra. (López, 2010)

El software presenta ocho sub-módulos: SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W y VADOSE/W, cada uno con propósito específico para analizar en cada caso un fenómeno diferente en las obras de tierra.

En esta tesis, para la modelación de una galería se va a utilizar uno de los sub-módulos, el SIGMA/W, para la modelización de estados tensionales en el terreno y los asentamientos producidos en este.

El programa tiene fundamentalmente en su versión 2007 las siguientes características definidas a continuación: (López, 2010)

Tipos de análisis.

El programa permite realizar cálculos tensodeformacionales de las siguientes naturalezas:

- Análisis de deformaciones.
- Simulación de fases de construcción y por lo tanto de carga del terreno.

- Cálculo de exceso de presiones de poro.
- Interacción suelo estructura.
- Análisis de consolidación

Geometría y estratigrafía:

La introducción de los condicionantes geométricos son muy versátiles y se adaptan prácticamente a cualquier geometría o contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones de materiales y/o contornos.

Propiedades y Modelos del terreno:

El sub-módulo SIGMA/W tiene implementado cinco modelos constitutivos diferentes y una opción adicional que permite al usuario definir algún otro modelo. Los modelos implementados son:

- Lineal elástico.
- Anisotrópico Lineal elástico.
- No lineal elástico (hiperbólico).
- Elasto-plástico (Mohr Coulomb o Tresca).
- Soft Clay- Cam Clay modificado (estado crítico).

Los cuales se pueden observar en la figura 1.6 que se presenta a continuación.

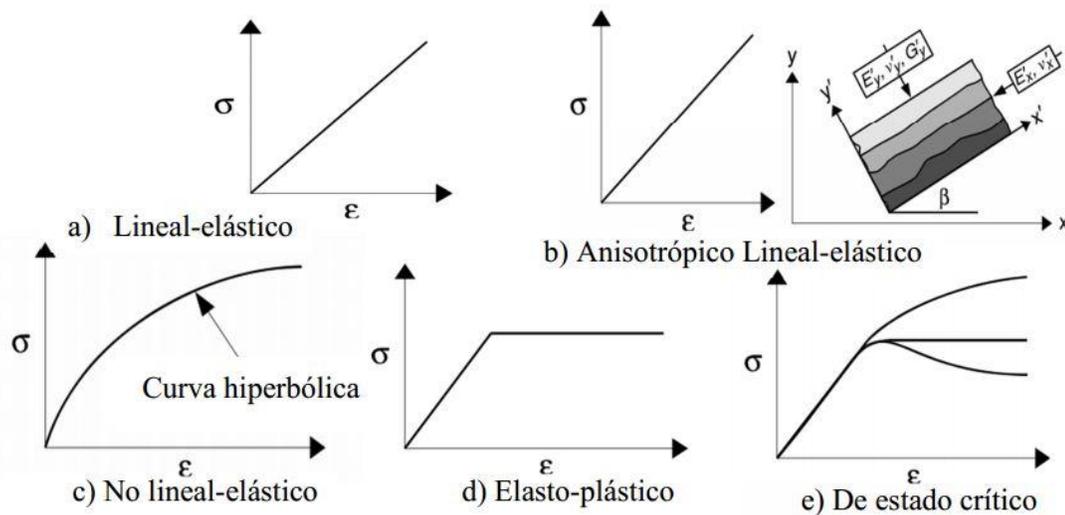


Figura 7: Modelos constitutivos implementados en el sub-módulo SIGMA/W. (Mesa, 2017)

La obtención de los parámetros necesarios para aplicar el modelo constitutivo elastoplástico bilineal de Mohr Coulomb, son de fácil obtención en la práctica ingenieril. En la Figura I-7 aparece la curva constitutiva elasto-plástica bilineal de Mohr Coulomb, donde se puede observar una zona de comportamiento elástico en la que se emplea la ecuación constitutiva elástica en estado de deformación plana, por las características de la estructura y en forma de la ecuación de Hooke ya que las deformaciones se calculan en función del estado tensional.

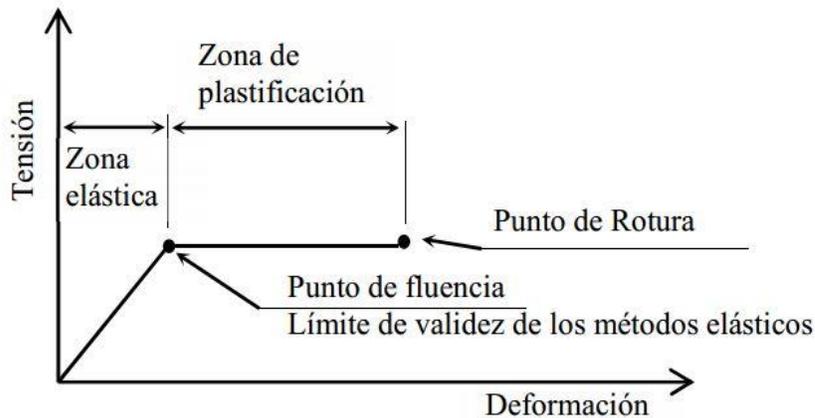


Figura 8: Curva constitutiva elasto – plástica bilineal tipo Mohr – Coulomb de un punto. (Mesa, 2017)

Condiciones de contorno del problema: (López, 2010)

Para el estudio del comportamiento del modelo además de la parametrización del terreno es necesario definir las propiedades de los contornos del modelo, para ello disponemos de las siguientes opciones.

En cuanto a modelización de cargas:

- Fuerza/Desplazamientos.
- Fuerzas de Volumen.

En lo que respecta a colocación en dominios:

- Condiciones de contorno nodales (restricciones de movimientos puntuales o cargas puntuales)
- Condiciones de contorno en caras de dominio (restricciones de movimientos o cargas sobre un contorno determinado)

### **1.6. Algunas experiencias en el estudio del cálculo de la carga muerta sobre galerías enterradas en presas de tierra empleando el MEF.**

El uso del Método de Estados Límites por medio de herramientas computacionales se ha convertido en una práctica habitual desde hace algunos años en el cálculo de las solicitaciones debidas a cargas de tierra sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos, a partir de la creación de nuevos softwares cada vez más potentes que implementan las técnicas de cálculo y simulan perfectamente el comportamiento del suelo en interacción con las estructuras. A continuación, se hará una breve reseña de la utilización de esta práctica en el mundo sin la intención de abarcar todos los casos en que se utiliza esta técnica ni todo el conocimiento acumulado en la aplicación del MEF al estudio de las cargas muertas sobre las galerías en presas de tierra.

En el artículo titulado: "Solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre galerías y conductos enterrados en presas de materiales sueltos", (Sáenz and Lindon., 1997) se analiza por elementos finitos el incremento de las presiones de tierra sobre las galerías producto del fenómeno de rozamiento negativo entre el relleno en hastiales y el situado sobre la galería cuando hay alguna tendencia al movimiento relativo de alguna de estas masas de suelo. Los resultados los compararon con los obtenidos por el método tradicional de Marstón, al cual se recurre cuando no hay posibilidades de aplicar el método de elementos finitos. Llegaron a la conclusión de que cuando la galería se encuentra cimentada en roca competente las presiones de tierra totales sobre la galería son entre un 10 y un 15 % mayores que la presión vertical geostática sobre la misma, también muestran que los valores del coeficiente de incremento de la presión vertical ( $C_t$ ) sobre el conducto respecto de la presión geostática, obtenidos por Marstón son claramente conservadores cuando la cobertura de tierras es elevada en relación con las dimensiones de la galería, en caso de un sustrato de cimentación más deformable la presión vertical sobre la galería puede llegar a igualar o superar la calculada por el método de Marstón, cuyo efecto es más acentuado en galerías en las que predomina la dimensión vertical sobre la horizontal puesto que el mismo efecto debido al rozamiento negativo se aplica en un ancho de galería menor. Recomiendan que para cimentaciones deformables es imprescindible el análisis detallado por elementos finitos para determinar no solamente las solicitaciones estructurales sobre la galería sino también para evaluar

la posible apertura de juntas, necesidad de refuerzos en las armaduras longitudinales, así como la posible contraflecha necesaria para absorber los posibles asentamientos.

En el artículo “Análisis comparativo de la teoría de Marstón para tuberías enterradas y la modelación numérica con elementos finitos” (Díaz and Reyes, n.d.) donde se realiza un análisis comparativo entre la teoría de Marstón para el cálculo de la carga muerta vertical sobre tuberías enterradas en condición zanja y la modelación numérica llevada a cabo por medio del programa de elementos finitos PLAXIS Ver 7.2. con el propósito de esclarecer y proporcionar un mejor entendimiento de la teoría de Marstón, llevaron a cabo un plan de modelación con elementos finitos, solucionando el problema paralelamente con la ayuda de una herramienta más robusta y haciendo comparaciones muy sencillas entre los dos métodos en sus aspectos más significativos. Concluyeron que la teoría de Marstón es conservadora para el diseño. Ese grado de conservatismo es el resultado de un proceso acumulativo que tiene lugar a lo largo de las distintas etapas del cálculo, como son: la selección del parámetro  $K\mu'$ , donde  $K$  es el coeficiente de presión lateral de tierras y  $\mu'$  es la fricción en la pared, la hipótesis de los planos rígidos, la forma de introducir el ancho de la zanja, la inclinación de la pared y finalmente el valor del Factor de Carga.

Otro ejemplo es el artículo titulado “Simulación numérica de la interacción suelo-tubería” (Feliciano and Lizcano, 2014) donde se realiza una comparación entre los métodos de diseño de tuberías flexibles enterradas que están basados en la fórmula de Spangler y esta a su vez en la teoría elástica con el método de elementos finitos usando el programa ABAQUS donde se analizó el comportamiento de una tubería enterrada usando modelos elastoplásticos y viscohipoplásticos para simular la interacción suelo tubería. Con el propósito de evaluar el efecto del comportamiento no lineal del suelo en los cálculos de deflexiones de tuberías enterradas. Los autores llegaron a la conclusión de que el análisis de tuberías rígidas con modelos elásticos es aceptable, debido a que para estos casos se trabaja en un rango de pequeñas deformaciones, donde la tubería se comporta como un material totalmente elástico. Por el contrario, para el diseño de tuberías flexibles se debe tener en cuenta el comportamiento no lineal del suelo y se deben utilizar modelos constitutivos en los cuales la relación esfuerzo deformación sea no lineal. Si para estos casos se emplean teorías elásticas las deformaciones son subestimadas con respecto a teorías elásticas perfectamente plásticas y viscohipoplásticas. También concluyeron que existe una profundidad óptima para cimentar la tubería y que en el diseño de tuberías

flexibles se debe tener en cuenta la no linealidad del comportamiento del suelo, no considerada en los métodos de diseño actuales.

En Madrid, (Gálvez, 2011), Ingeniero de caminos, Canales y Puertos, en su tesis Doctoral de título “Cálculo estructural de tuberías enterradas por el método de elementos finitos, con base en el informe técnico CEN/TR 1295-3”. Propone una generalización del uso del método de elementos para el cálculo estructural de tuberías enterradas como método común de dimensionamiento en Europa. Logra concluir que el modelo de elementos finitos que propuso en la tesis con los parámetros establecidos en la opción 1 del informe técnico CEN/TR 1295-3 es válido para establecer un nuevo procedimiento de dimensionamiento estructural de tuberías enterradas, no solo para los casos en que por su especial instalación, dimensiones o problemas derivados de una determinada puesta en obra no se encuentran recogidos en las instalaciones típicas por dicho informe técnico, sino para todos los casos, por sencillos que sean, debido a que con el nuevo procedimiento de dimensionamiento se puede ajustar el diseño de la tubería a las circunstancias reales de instalación, y realizar diseños especiales, que el informe técnico no recoge por su carácter excepcional.

Evidenciándose en los ejemplos descritos la validez y versatilidad del uso del método de elementos finitos para el cálculo de la carga muerta sobre conductos enterrados, ya sea en presas o terraplenes para carreteras, etc.

### 1.7. Conclusiones parciales del capítulo.

El estudio bibliográfico realizado sobre las solicitaciones debidas a carga de tierras sobre galerías enterradas en presas de tierra, dio cumplimiento al primer objetivo propuesto de la investigación, llegándose a las siguientes consideraciones finales:

- Mediante la revisión bibliográfica se han identificado tres métodos analíticos, para el cálculo de la carga muerta sobre galerías enterradas en presas de tierra, de manera que se define el área de trabajo para el análisis de la acción de las masas de suelo sobre la galería por medio de la aplicación de los métodos de cálculo, que parten de las tendencias americanas, el “Método de Marstón”, más tradicional y de tendencias Soviéticas el “Método de Yaroshenko” y “Método de las Normas Soviéticas”.
- Los métodos analíticos parten de que el propio peso del prisma de suelo ubicado encima de la galería, en todos los casos no es el que incide sobre esta debido a las fuerzas cortantes que se ejercen cuando hay alguna tendencia al movimiento relativo, entre dicho prisma de relleno las masas de relleno ubicadas a ambos lados de este prisma. Aunque toman distintas consideraciones en cuanto a la causa de incremento o decremento de las tensiones.
- Se ha podido determinar que la modelación matemática por el “Método de Elementos Finitos” es la mejor opción para el análisis de las solicitaciones debidas a la carga de tierra sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos. Este brinda mejores resultados que los métodos analíticos ya que han propiciado la creación de enfoques muy acertados para tratar el comportamiento de los materiales, de las estructuras y del terreno. Para la modelación por elementos finitos se usará el programa SIGMAW, el cual constituye una herramienta muy confiable en la modelación del comportamiento del suelo.

CAPÍTULO 2:  
ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LOS  
MÉTODOS ANALÍTICOS PARA EL  
CÁLCULO DE LA CARGA MUERTA  
SOBRE GALERÍAS ENTERRADAS EN  
PRESAS DE TIERRA.

## **Capítulo 2: Análisis paramétrico de los métodos analíticos para el cálculo de la carga muerta sobre galerías enterradas en presas de tierra.**

### **2.1. Métodos de cálculo analíticos.**

#### 2.1.1. Método de Marstón.

Según (Badillo and Rodriguez, 1974), en una explicación presentada de este método para conductos de sección transversal circular, la cual, se tomará como referencia para la presentación del método.

A continuación, se presenta el método y algunas consideraciones ya que se aplica a galerías rectangulares colocadas en terraplén, correspondiéndose con la forma de colocación mostrada en la parte b) de la figura 5 ya que es la forma de colocación más usa en nuestro país.

Como se mencionó anteriormente, pueden imaginarse dos planos verticales paralelos a los lados de la galería y llevados hasta la superficie del terraplén; las fuerzas cortantes que se desarrollen en esos planos como consecuencia del movimiento relativo del prisma interior respecto a las masas de suelo vecinas jugarán un importante papel en la carga que actúe sobre la misma. Si el prisma interior tiende a bajar respecto a las masas vecinas se producirá arqueado favorable y la carga sobre el conducto será menor que el peso del citado prisma interior; por el contrario, si las masas vecinas tienden a bajar con respecto al prisma, la carga sobre la galería será mayor que la correspondiente al peso de la columna de suelo sobre él.

Según Marstón para cuantificar la carga muerta que haya de obrar en un caso concreto, se considera el plano horizontal tangente al tubo en su clave, que en el caso de una galería se puede tomar dicho plano paralelo al techo de la misma, al que se llama plano crítico y se analiza el movimiento relativo de puntos de ese plano colocados precisamente en la clave del tubo o en nuestro caso en el techo de la galería y a los lados de ésta.

Marstón explica del método para un tubo circular, por lo que en algunos casos la variable  $D$ , que se refiere al diámetro del tubo va a ser alto o ancho de la galería rectangular, que es el tipo de conducto enterrado sobre el que se analiza el incremento o decremento de la presión vertical.

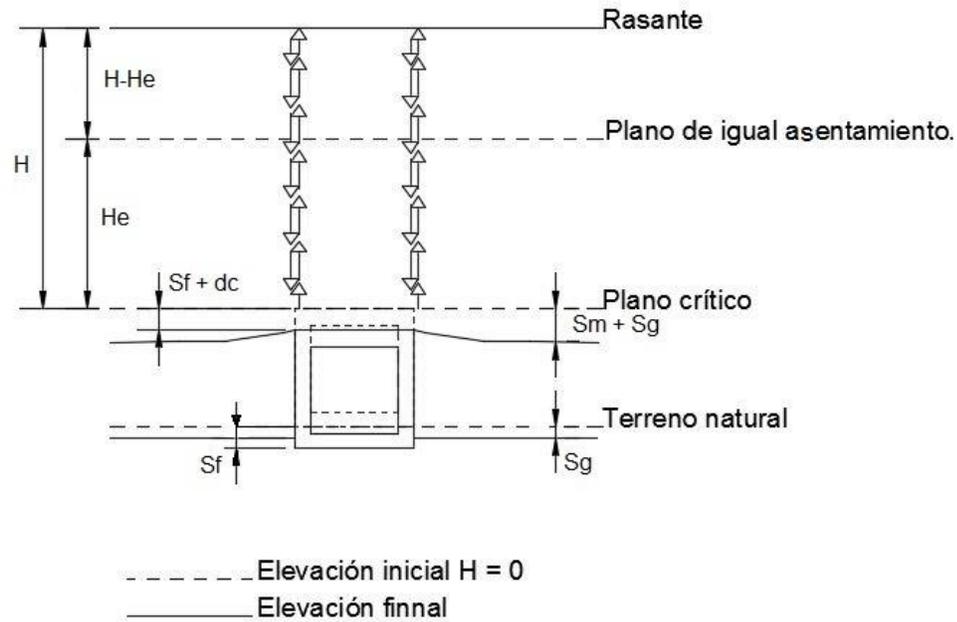


Figura 9: Galería en terraplén. (Elaboración propia)

El asentamiento del plano crítico a los lados de la galería es igual al desplazamiento que sufre la superficie del terreno natural por el peso del terraplén ( $S_g$ ), sumado al acortamiento que sufra la parte del terraplén localizada entre el terreno natural y el plano crítico ( $S_m$ ). Así, en resumen, el asentamiento del plano crítico a los lados del conducto será  $S_m + S_g$ .

Por su parte, el asentamiento que sufre el punto del plano crítico encima del techo de la galería, está también formado por dos sumandos; el primero expresa lo que baja la base de la galería,  $S_f$  (generalmente  $S_f > S_g$ , pues  $S_f = S_g +$  la incrustación que la galería pueda tener dentro del terreno natural o  $S_f = S_g$  si la galería no se incrusta en el terreno natural por ejemplo cuando se construye apoyada en una roca dura he incompresible) y el segundo, la deformación estructural propia del conducto en la dirección vertical por efecto de la carga actuante  $d_c$ , que, como es una galería totalmente rígida por su geometría y espesor de las paredes, esta difícilmente se deforma, así que es muy probable que  $d_c$  este cercano a 0. Por tanto, lo que baja el plano crítico sobre el techo de la galería es  $S_f + d_c$  como se puede apreciar en la figura 8 que se muestra a continuación.

El movimiento relativo en el plano crítico es igual a  $(S_m + S_g) - (S_f + d_c)$ .

Se define como relación de asentamiento a  $r_a$  que expresa la relación entre el movimiento relativo en el plano crítico y el acortamiento del terraplén a los lados del conducto.

$$r_a = \frac{(S_m + S_g) - (S_f + d_c)}{S_m}$$

Una relación de asentamiento positiva indica que las masas vecinas se mueven más que el prisma interior y que, por lo tanto, la carga sobre el conducto excede al peso del prisma sobre él; inversamente, la relación de asentamientos negativa es signo de arqueo favorable.

Conviene definir también la relación de proyección,  $p$ , como el cociente entre el espesor del terraplén entre el terreno natural y el plano crítico y el ancho del tubo de concreto,  $D$  o alto de la galería. Así el espesor del terraplén a los lados del conducto queda expresado por  $pD$ .

En terraplenes altos el efecto de arqueo sobre el conducto no abarca toda la altura, sino que tiende a disiparse según la elevación crece respecto a él, pudiendo definirse una altura:  $H_e$ , en la que estos efectos ya no son perceptibles. El plano horizontal que está a una altura  $H_e$  sobre dicho conducto se llama plano de igual asentamiento, pues se mueve ya lo mismo sobre el techo de la galería y a los lados de la misma; sobre el plano de igual asentamiento no hay los esfuerzos cortantes en los planos verticales imaginarios paralelos a los lados de la galería.

La fórmula a que llega la teoría de carga de Marstón para conductos rígidos alojados en terraplén es:

$$W_m = C_c * \gamma_m * D^2$$

donde:

$\gamma_m$  = peso específico del suelo en el estado en que se encuentra. (kN/m<sup>3</sup>)

$D$  = diámetro exterior del tubo rígido, en este caso ancho exterior de la galería. (m)

$C_c$  es un Coeficiente de Carga, dado por las expresiones:

$$C_c = \frac{e^{\pm 2 K \operatorname{tg} \phi H/D} - 1}{\pm 2 K \operatorname{tg} \phi}, \text{ para } H \leq H_e$$

$$C_c = \frac{e^{\pm 2 K \operatorname{tg} \phi H/D} - 1}{\pm 2 K \operatorname{tg} \phi} + \left( \frac{H}{D} - \frac{H_e}{D} \right) * e^{\pm 2 K \operatorname{tg} \phi H_e/D}, \text{ para } H > H_e$$

Los signos más deberán de usarse cuando la relación de asentamiento sea positiva y los menos cuando sea negativa.

En las fórmulas anteriores  $H_e$  indica la posición del plano de igual asentamiento y en principio puede valuarse con la expresión:

$$\left[ \frac{1}{2Ktg\phi} \pm \left( \frac{H}{D} - \frac{H_e}{D} \right) \pm \frac{r_a p}{3} \right] * \frac{e^{\pm 2Ktg\phi H_e/D} - 1}{\pm 2Ktg\phi} \pm \frac{1}{2} \left( \frac{H_e}{D} \right)^2 \pm \frac{r_a p}{3} \left( \frac{H}{D} - \frac{H_e}{D} \right) e^{\pm 2Ktg\phi H_e/D} - \frac{1}{2Ktg\phi} \frac{H_e}{D} \mp \frac{HH_e}{D_2} = \pm r_a p \frac{H}{D}$$

Ahora los signos superiores deben usarse con relación de asentamiento positiva y los inferiores con negativa.

La presión vertical (P) sobre la galería queda expresada como:

$$P = \frac{Wm}{Bc}$$

donde:

Bc = ancho exterior de la galería. (m)

En la figura 10, mostrada en el libro citado se proporciona una gráfica que da directamente el valor de Cc en función de los de la relación H/D y del producto  $r_a p$ .

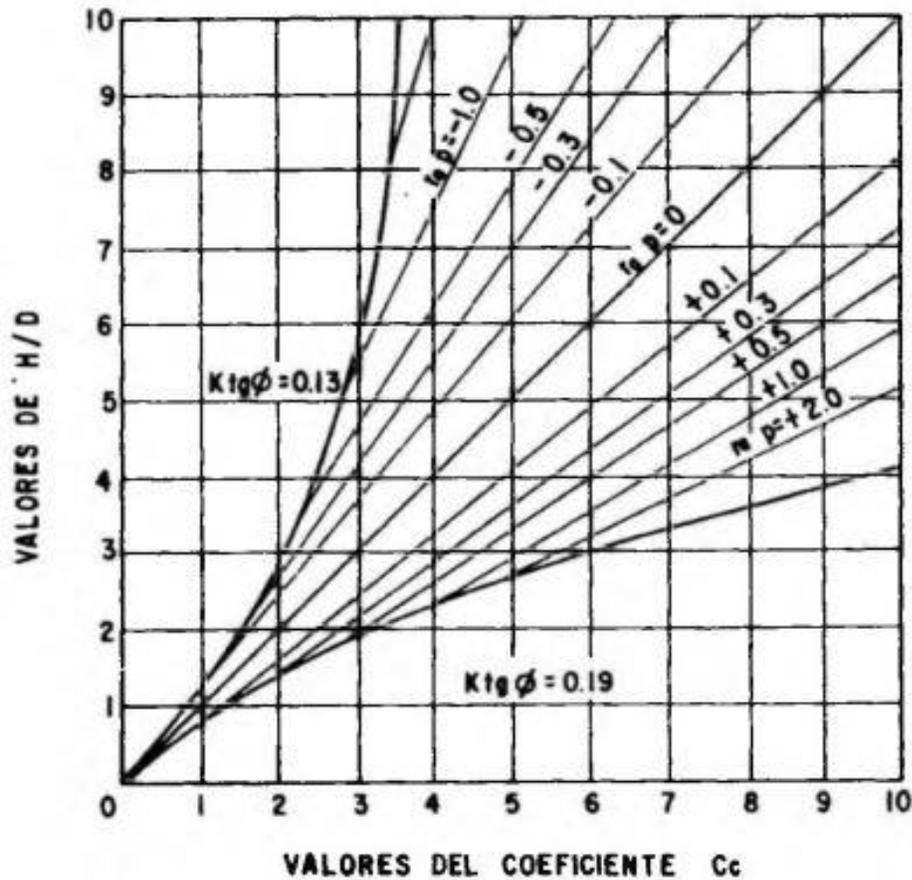


Figura 10: Valores de Cc. (Badillo and Rodriguez, 1974)

Con la gráfica se hace innecesario aplicar las fórmulas anteriores, lo que por otro lado sería engorroso, ya que proporciona directamente los valores de  $C_c$  que se requieren al aplicar la expresión de Marstón para conductos rígidos alojados en terraplén.

Cuando  $r_a p = 0$  pueden suceder dos cosas:  $r_a = 0$ , es decir que el asentamiento del plano crítico es el mismo a los lados del conducto y en su clave o bien  $p = 0$ , es decir que el conducto esté alojado en una zanja de profundidad igual al alto de la galería y por tanto el espesor entre el terreno natural y el plano crítico igual a 0. En ambos casos, la constante  $C_e$  resulta igual a  $H/D$  y la carga sobre el conducto es idéntica al peso del terraplén sobre él, en efecto:

$$W_m = \frac{H}{D} \gamma_m D^2 = \gamma_m H D$$

Para valores negativos del producto  $r_a p$ ,  $r_a$  es el negativo, puesto que  $p$  es siempre positivo, si existe y la carga sobre la galería es menor que el peso de la tierra suprayacente, pues el plano crítico se hunde más encima de la galería que a los lados de ella. En este caso el valor de  $C_c$  depende del de  $K \operatorname{tg} \phi$  y crece al decrecer el valor de este producto, por lo que es conservador calcularlo con un valor mínimo, aunque realista de  $K \operatorname{tg} \phi$ ; en la figura 9, las curvas con  $r_a$  negativa se refieren a  $K \operatorname{tg} \phi = 0.13$  que corresponde a un terraplén de arcilla. Las curvas correspondientes a  $r_a$  negativo parten de otra (trazo más grueso) que es la representación gráfica de la expresión para  $H \leq H_e$ , de tal manera que la intersección de las líneas da el valor de  $H_e$  correspondiente a cada valor de  $r_a p$  a partir de su ordenada. Cuando  $r_a$  es positivo, el producto  $r_a p$  también lo es; diferentes valores de este producto generan las líneas a la derecha de la que se trazó a  $45^\circ$  para  $r_a p = 0$ . En este caso, el valor de  $C_c$  crece con  $K \operatorname{tg} \phi$ , por lo que ahora lo conservador es calcular las líneas con un valor alto y realista del producto; en la figura 9 el valor usado fue  $K \operatorname{tg} \phi = 0.19$ , que corresponde a suelos granulares sin finos. También estas curvas parten de otra que representa la expresión para  $H \leq H_e$  para  $r_a$  positiva; nuevamente puede estimarse  $H_e$  a partir de las ordenadas de los puntos de partida. En la práctica se tiene el inconveniente de que para aplicar las ideas y gráficas anteriores no se puede tomar un valor a priori la relación de asentamiento  $r_a$  con que vaya a trabajar el conducto en proyecto. El inconveniente se supera partiendo de un valor de  $r_a$  supuesto con base en el comportamiento de alcantarillas construidas. La Tabla 6-b. I mostrada por Juárez Badillo en el libro citado da valores recomendados por la experiencia para la relación en estudio.

**TABLA 6-b.1**  
**VALORES DE  $r_a$  PARA PROYECTO**

<i>Condiciones prevalecientes</i>	$r_a$
Tubo rígido sobre roca o suelo no cedente	+ 1.0
Tubo rígido sobre suelo común	+ 0.5 a + 0.8
Tubo rígido sobre suelo compresible	0 a + 0.5

### 2.1.2. Método de Yaroshenko.

Para mostrar los métodos de “Yaroshenko” y “Normas Soviéticas” se toma como referencia los análisis mostrados por Szechy citado en (Dilla and Cano, 2007).

Como ya se explicó en el capítulo 1 este método tiene su cierta similitud con el de Marstón, partiendo del supuesto desarrollo de fuerzas friccionales entre las masas de tierra estacionarias y en movimiento, que como ya se ha mencionado estas pueden estar dirigidas hacia arriba o hacia abajo, en dependencia del sentido del movimiento relativo entre el conducto y el suelo adyacente.

En este método se plantea que las fuerzas friccionales solamente se distribuyen a lo largo de la altura  $H$  por encima del conducto, si la columna de tierra por encima de este, fuese incompresible. Por tanto, es de esperar que las fuerzas friccionales se desarrollen solo en aquella parte de la altura  $H$  en que tenga movimientos diferenciales. Se denomina  $H_e$  a la altura de la columna de tierra donde ocurre el asentamiento total, entonces existirá una zona por encima de esta,  $H_c$ , donde no hay movimiento relativo de las partículas del suelo, ni redistribución de esfuerzos debido a la fricción. Este plano situado a una profundidad  $H_c$  se le llama plano equivalente.

También expresan que, continuando con el razonamiento antes expuesto, es de esperar que, si las galerías y tubos son rígidos o construidos sobre terrenos de cimentación rígidas, el asentamiento de las masas de suelo adyacentes al prisma de tierra por encima del conducto sea mayor y consecuentemente la presión de tierra sobre el conducto sea mayor que  $\gamma_s * H$ . Por otro lado, si las estructuras y suelos de cimentación son flexibles, la presión vertical será menor que  $\gamma_s * H$ .

Yaroshenko plantea, para la formulación del método de cálculo de la magnitud de la presión de incremento o decremento sobre el conducto, que las fuerzas friccionales van

a ser directamente proporcionales a la presión activa de tierras como se puede apreciar en la figura 10, de acuerdo con esto, la fuerza friccional a una profundidad  $Z$  es:

$$\gamma_s * Z * K_a * \tan \phi$$

donde:

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2): \text{Coeficiente de presión activa de tierras.}$$

$\phi$ : Ángulo de fricción interna.

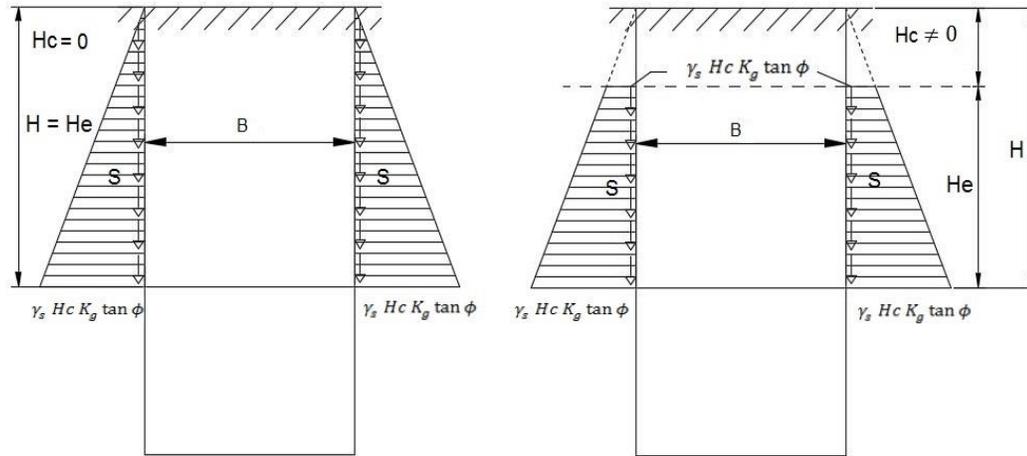


Figura 11: Fuerzas que actúan sobre un conducto rígido según Yaroshenko. (Dilla and Cano, 2007)

Bajo la hipótesis anterior, la fuerza vertical por metro lineal sobre un conducto rígido, de ancho  $B$  y altura  $D$ , se determina de la siguiente manera: (Dilla and Cano, 2007)

1. Si  $H_c = 0$ :

$$W_m = \gamma_s H B + 2S$$

$$S = \int_0^H \gamma_s Z K_a \tan \phi dz = \gamma_s \frac{H^2}{2} K_a \tan \phi$$

Donde:

$$W_m = \gamma_s H B + \gamma_s H^2 K_a \tan \phi$$

$$W_m = \gamma_s B^2 \left[ \frac{H}{B} + \frac{H^2}{B^2} K_a \tan \phi \right]$$

Introduciendo una notación similar a la de Marstón.

$$C_t = \frac{H}{B} \left[ 1 + \frac{H}{B} K_a \tan \phi \right]$$

$$W_m = C_t \gamma_s B^2$$

2. Si  $H_c > 0$ :

$$S = \int_{H_c}^H \gamma_s Z K_a \tan \phi \, dz$$

$$S = \gamma_s \frac{H^2}{2} K_a \tan \phi - \gamma_s \frac{H_c^2}{2} K_a \tan \phi$$

$$W_m = \gamma_s HB + \gamma_s H^2 K_a \tan \phi - \gamma_s H_c^2 K_a \tan \phi$$

$$W_m = \gamma_s B^2 \left[ \frac{H}{B} + \frac{H^2}{B^2} K_a \tan \phi - \frac{H_c^2}{B^2} K_a \tan \phi \right]$$

Y haciendo:

$$C'_t = \frac{H}{B} \left[ 1 + K_a \tan \phi \left( \frac{H}{B} - \frac{H_c^2}{BH} \right) \right]$$

$$W_m = C'_t \gamma_s B^2$$

La presión vertical (P) sobre la galería queda expresada de la siguiente forma:

$$P = \frac{W_m}{B}$$

Solo queda pues determinar el valor de  $H_c$  para resolver el problema. El autor a través de una deducción un poco extensa pudo demostrar que:

$$\frac{H_c}{H} = 1 - \frac{\alpha}{H^3}$$

donde:

$$\alpha = \frac{3E B \Delta h}{\gamma_s K_a \tan \phi} \quad (2.1)$$

Por tanto, para determinar el valor de  $H_c$  es necesario conocer el valor de asentamiento diferencial  $\Delta h$  entre el terraplén y el conducto en la elevación del techo o corona de este.

El valor  $\Delta h$  puede expresarse como sigue:

$$\Delta h = \Delta t' + \Delta t - \Delta D' - \Delta D$$

donde:

$\Delta t'$ : es el asentamiento del terraplén.

$\Delta t$ : es el asentamiento del suelo bajo en terraplén.

$\Delta D'$ : es la deformación estructural propia del conducto en la dirección vertical producto de la carga actuante.

$\Delta D$ : es el asentamiento del suelo bajo el conducto.

En el libro de Szechy se deduce para el valor de  $\alpha$  de la fórmula para hallar  $H_c$  la siguiente expresión aproximada:

$$\alpha = \alpha S \frac{3B DH}{K_a \tan \phi} \quad (2.2)$$

donde:

$a = \frac{aD}{D}$  : relación de proyección.

aD: es la proyección del conducto por encima del terreno natural.

$$S = \frac{\Delta h}{\Delta t'}$$

En la expresión anterior solo se desconoce el valor de S para el cual se utilizan los valores aproximados siguientes:

Estructura rígida cimentada en roca, S = 1.0

Estructura rígida cimentada en suelo denso, S = 0.7

Estructura rígida cimentada en suelo elástico, S = 0.3

Estructura flexible en cualquier tipo de suelo, S = 0.0

De disponer el valor de  $\Delta h$  a partir de otras pruebas o ensayos, obtendríamos el valor de  $\alpha$  por la ecuación 2.1, y los valores de  $H_c$ ,  $C'_t$  y  $W_m$  se calculan fácilmente. De no ser así se aproxima  $\alpha$  por la ecuación 2.2 empleando los valores propuestos para S.

### 2.1.3. Método de las Normas Soviéticas.

La presión vertical sobre el conducto viene expresada por:

$$\frac{W_m}{B} = \gamma_s H(1 + AK_a \tan \phi)$$

donde:

$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$  : es el coeficiente de presión activa de tierras según Rankine.

$$A = \frac{S(aD)}{H} \left[ 2 - \frac{SB(aD)}{H^2} \right]$$

aD: es la proyección del conducto por encima del terreno natural.

Si ocurre que  $\frac{S(aD)}{H} \geq \frac{H}{B}$ , entonces  $A = \frac{H}{B}$ , o sea, equivale al primer caso ( $H_c = 0$ ) en el método de Yaroshenko, si, no ocurre lo descrito en este párrafo se calcula A por la formula anteriormente mostrada.

En este método, S es un coeficiente que depende del tipo de terreno de cimentación y recomiendan lo siguientes valores:

Terreno de cimentación de roca, S = 15

Arenas compactas, arcillas y arcillas arenosas duras, S = 10

Arenas no compactas, arcillas y arcillas arenosas poco plásticas, S = 5

Observaciones de Szechy:

1. En los métodos presentados, Yaroshenko y Normas Soviéticas, el valor de  $a$  es siempre positivo y varía de 0 a 1. En caso de encontrarse la galería en una zanja estrecha y profunda, debe suponerse en el análisis el caso c) de la clasificación que hace Marstón y tomar el método del mismo para este caso.

2. Si el ancho de la trinchera  $B_t$ , es mayor que aproximadamente 1.5 veces el ancho exterior del conducto, la carga sobre el conducto deberá analizarse con la condición de conducto en terraplén, de igual forma para trincheras con taludes muy extendidos.

En los métodos analíticos desarrollados intervienen distintas variables, las cuales se resumen en la tabla 2 a continuación.

Tabla 2: Variables de los métodos de cálculo analíticos: (Elaboración propia.)

Métodos	Variables	
	Independientes	Dependientes
Marstón	$\gamma_m$	$W_m$
	D	
	$C_c \left\{ \begin{array}{l} H/D \\ r_a p \end{array} \right.$	
Yaroshenko	$\gamma_s$	$W_m$
	B	
	$C_t \text{ o } C'_t \left\{ \begin{array}{l} H_c \\ \alpha \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} a \\ D \\ S \end{array} \right.$	
Normas Soviéticas	$\gamma_s$	$W_m$
	B	
	H	
	aD	
	S	

Leyenda:

$W_m$  = carga muerta actuante sobre el conducto rígido en su clave.

$\gamma_m$  o  $\gamma_s$  = peso específico del suelo en el estado en que se encuentra.

D o B = ancho exterior de la galería.

H = altura de cobertura del relleno del terraplén.

S = coeficiente que depende del tipo de suelo de la cimentación.

$C_c, C_t$  o  $C'_t$  = coeficientes de carga.

## 2.2. Análisis paramétrico en el cálculo de la carga muerta sobre las galerías empleando métodos Analíticos.

### 2.2.1. Aspectos generales.

Para la realización del análisis paramétrico se pretende calcular la presión vertical sobre una galería enterrada en una presa de tierra, utilizando los tres métodos analíticos de cálculo en cuestión para cada variante.

En el análisis se varían parámetros como la altura de cobertura del relleno, el ancho de la galería y la razón de asentamiento (relación entre el espesor desde el terreno natural hasta el plano crítico y el alto de la galería).

Se asume que el terreno de cimentación en todos los casos será sobre roca o suelo no cedente, ya que en nuestro país regularmente se cumple con esta condición en las construcciones de presas de cierta importancia por razones de seguridad y económicas, evitándose la necesidad de inyección en la cimentación.

Los datos con que se realizan los cálculos se muestran a continuación en las tablas 3 y 4 y se muestra el esquema de la galería en la figura 10.

Tabla 3: Variación de parámetros.

Parámetro	Variantes		
	Altura de cobertura: H. (m)	10	25
Ancho de la galería: B. (m)	4	6	9
Relación de proyección.	1	0.5	0

De acuerdo a la bibliografía consultada, se consideran, para el análisis un suelo de relleno con comportamiento puramente friccional y de esta forma se garantiza un caso de cálculo simple para estudiar la variación del valor de la carga sobre el conducto ya que, para otros tipos de suelo, la aplicación de estos métodos es muy complejo incluso en la bibliografía consultada solo se aplican para suelos puramente friccionales.

Tabla 4: Propiedades físico-mecánicas y deformacionales del suelo de relleno.

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Rf	C (kPa)	$\Phi$ (°)	Ei (kPa)
Suelo 1	22	0.9	0	45°	70000

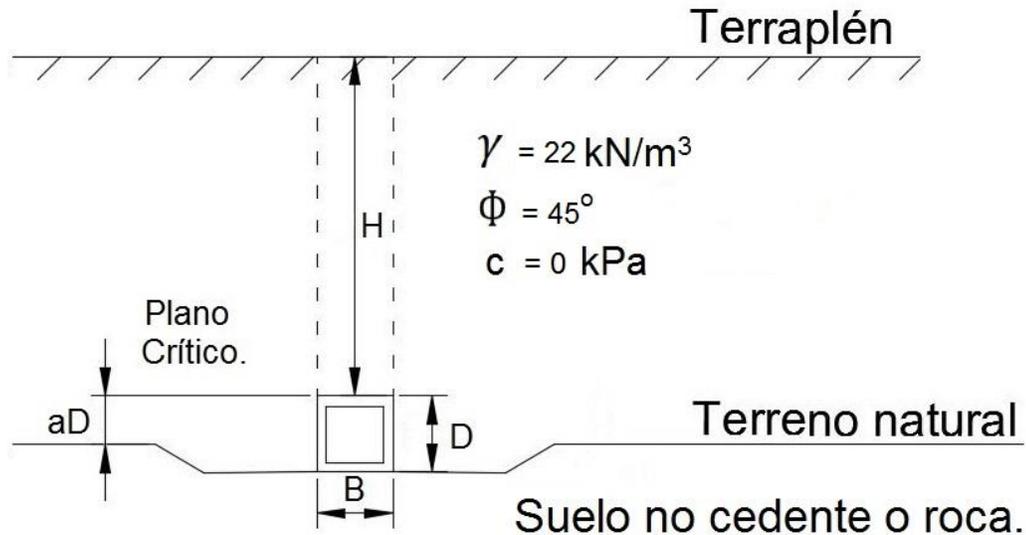


Figura 12: Esquema de la galería enterrada. (Elaboración propia)

Teniendo estos datos de partida se procede a hacer el cálculo de la presión vertical de 162 variantes resultantes de las combinaciones de los parámetros mencionados anteriormente. Haciendo uso del Excel como una herramienta de cálculo de gran utilidad para la ingeniería en nuestros días.

### 2.2.2. Presentación de los resultados.

Con los resultados de los cálculos por los métodos analíticos de cada una de las combinaciones se puede analizar la variación de la presión vertical para distintas condiciones de altura de terraplén, ancho de la galería y relación de proyección.

Realizando comparaciones sencillas se comprueba el buen funcionamiento de los métodos de cálculo, por ejemplo, que, manteniendo los demás parámetros constantes, al aumentar la altura de cobertura del terraplén aumenta la presión vertical sobre el conducto, también se pudo comprobar que al usar galerías más anchas resultan valores más pequeños de presión vertical ya que el ancho de la galería es inversamente proporcional a la presión vertical y que al disminuir la relación de proyección, es decir al encontrarse mayor parte de la galería por debajo del nivel general de cimentación disminuye la presión vertical hasta quedar igual a la presión geostática para relación de proyección igual a cero, es decir que la clave de la galería coincida con el nivel general de cimentación. Lo descrito en este párrafo se muestra en las siguientes figuras.

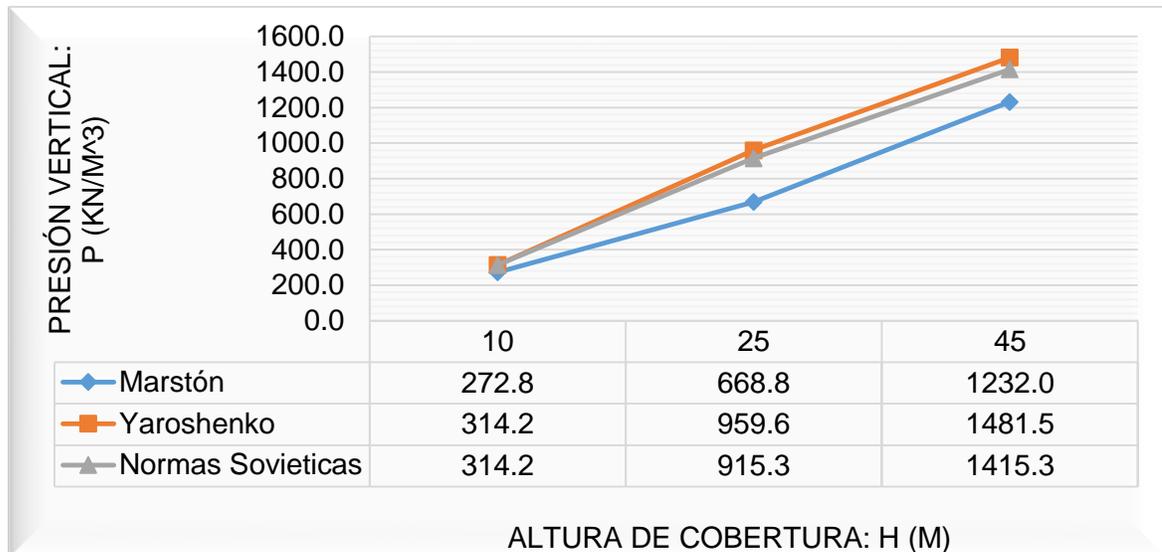


Figura 13: Variación de la presión vertical con la altura de cobertura (H), con relación de asentamiento igual a 1 y B = 4 m.

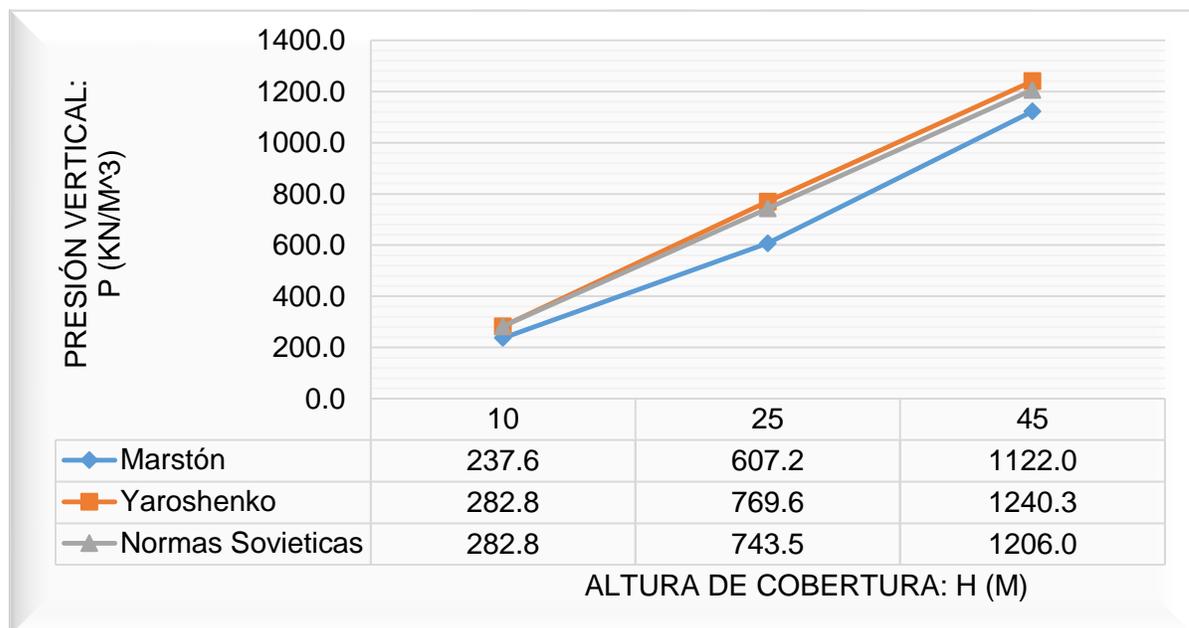


Figura 14: Variación de la presión vertical con la altura de cobertura (H), con relación de asentamiento igual a 0.5 y B = 6 m.

En las figuras 13 y 14 se aprecia el incremento de la presión vertical al aumentar la altura de cobertura, y que los resultados de los métodos soviéticos son más conservadores que el de Marstón.

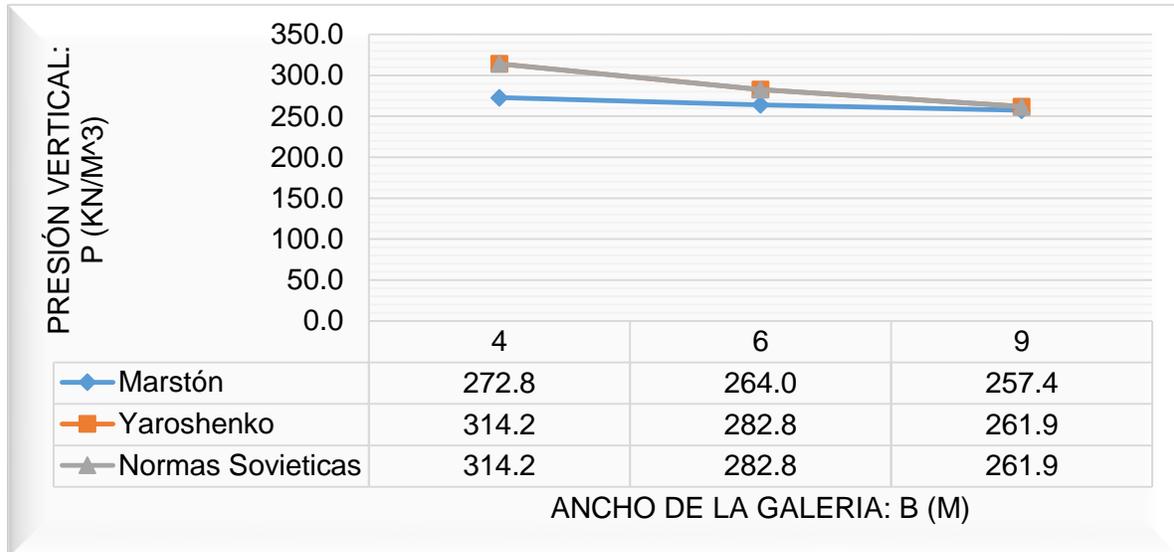


Figura 15: Variación de la presión vertical con el ancho de la galería (B), para relación de asentamiento igual a 1 y H = 10 m.

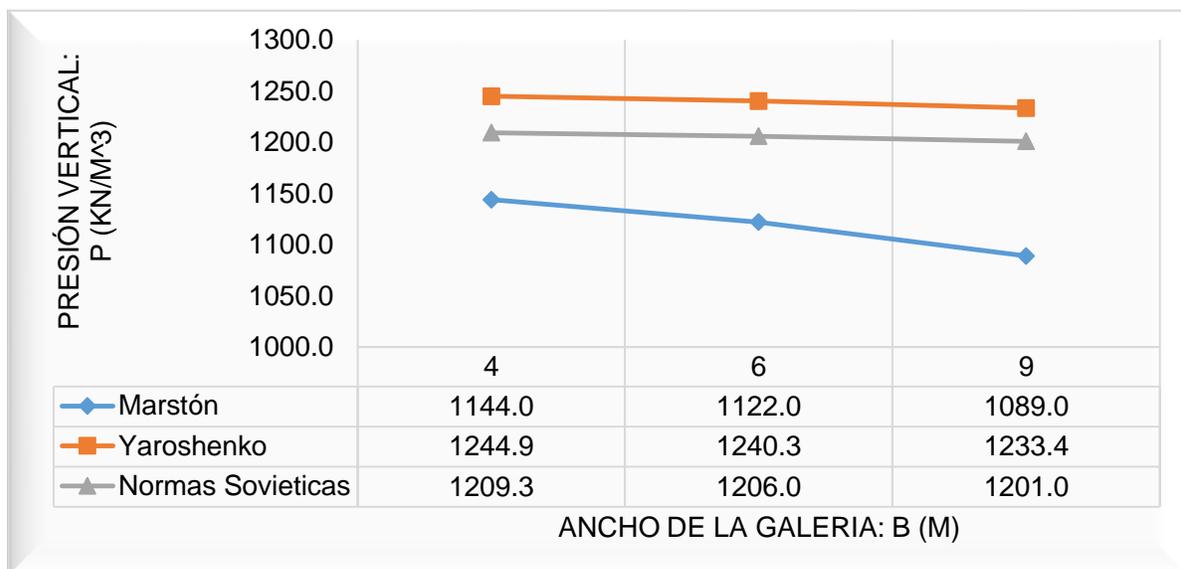


Figura 16: Variación de la presión vertical con el ancho de la galería, para relación de asentamiento igual a 0.5 y H = 45 m.

En las figuras 15 y 16 se aprecia la disminución de la presión vertical (P) al aumentar el ancho de la galería (B), también podemos notar que, en la que se utiliza H = 10 m el Método de Yaroshenko y de Normas Sovieticas tienen resultados iguales, ya que en el Método de Normas Sovieticas se cumple que  $\frac{S(aD)}{H} \geq \frac{H}{B}$ , entonces  $A = \frac{H}{B}$ , y equivale al primer caso ( $H_c = 0$ ) en el método de Yaroshenko.

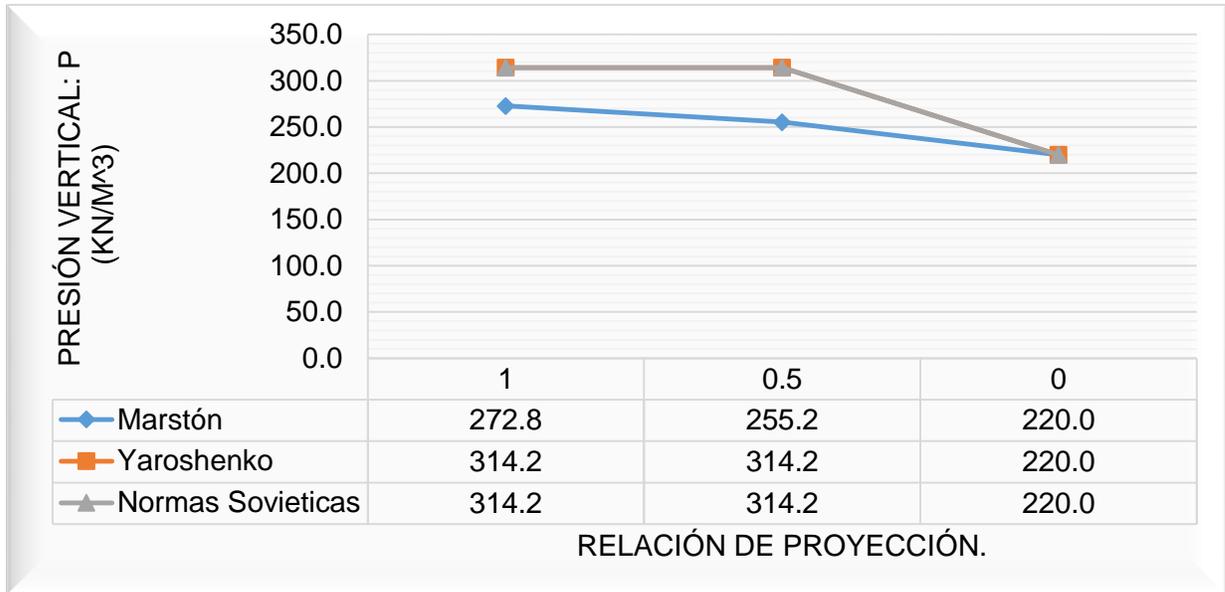


Figura 17: Variación de la presión vertical con la relación de proyección. Para B = 4 m y para H = 10 m.

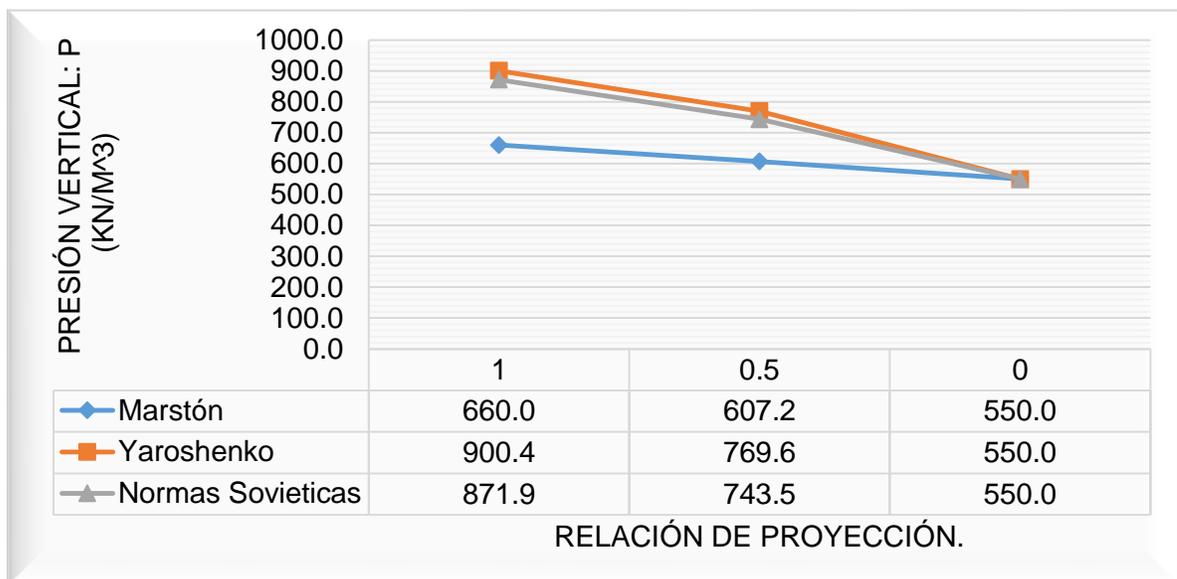


Figura 18: Variación de la presión vertical con la relación de proyección, para B = 6 m y para H = 25 m.

En las figuras, 17 y 18 se aprecia la disminución de la presión vertical cuando hay mayor parte de la galería por debajo del nivel general de cimentación, se observa además que para relación de proyección igual cero los cálculos por los tres métodos tienen el mismo resultado que es igual a la presión geostática  $\gamma * H = 22 \frac{kN}{m^3} * 10 m = 220 \frac{kN}{m^2}$  para la

presión geostática  $\gamma * H = 22 \frac{kN}{m^3} * 10 m = 220 \frac{kN}{m^2}$  para la

figura 17 y  $22 \frac{kN}{m^3} * 25 m = 550 \frac{kN}{m^2}$  para la figura 18. También podemos apreciar en la figura 15 que los resultados de los métodos de Yaroshenko y Normas Soviéticas son iguales debido a lo explicado anteriormente de que en el Método de Normas Soviéticas se cumple que  $\frac{S(aD)}{H} \geq \frac{H}{B}$ , igualmente estos métodos tienen los mismos resultados para relación de asentamiento igual 1 y 0.5 porque para 10 m de altura de relleno caen en el primer caso ( $H_c = 0$ ) en el método de Yaroshenko donde no tienen en cuenta la relación de asentamiento.

Para una mejor interpretación del incremento de presiones sobre la geostática que resulta al aplicar los Métodos Analíticos se puede calcular el coeficiente de incremento de la presión vertical (C) sobre el conducto respecto de la presión geostática, que se obtiene dividiendo la presión vertical media P por la presión geostática  $\gamma * H$ .

En la gráfica 19 se presentan los valores del coeficiente de incremento de la presión verticales función de la cobertura relativa (H/B) donde se aprecia la diferencia entre los resultados de los cálculos para cada método y la superioridad de los valores de presión vertical calculados por el Método de Yaroshenko al tener valores mayores del coeficiente que los otros.

Las coberturas relativas H/B que se presentan en la gráfica 19 corresponden a las combinaciones de las alturas de cobertura con los espesores de la galería que se muestran a continuación.

Tabla 5: Coberturas relativas H/B.

H	10	25	45	10	25	45	10	25	45
B	4	6	9	6	9	4	9	4	6
H/B	2.50	4.17	5.00	1.67	2.78	11.25	1.11	6.25	7.50

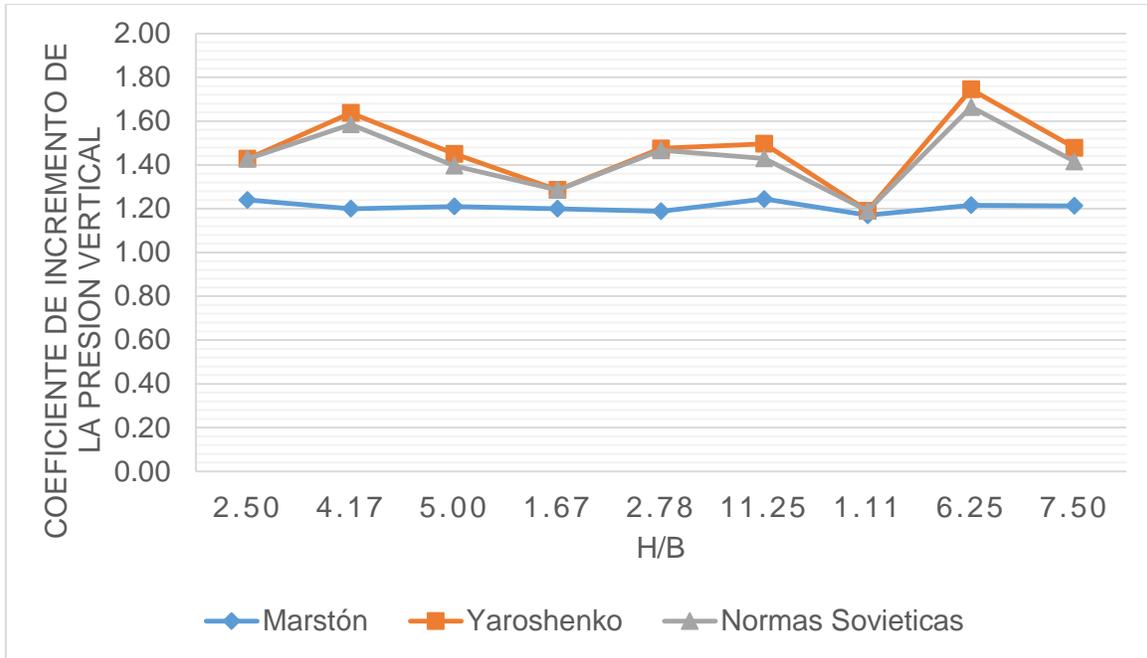


Figura 19: Variación del coeficiente de incremento de las presiones respecto a la geostática con la cobertura relativa H/B, relación de proyección igual a 1.

### **2.3. Conclusiones parciales del capítulo.**

El estudio realizado permitió conocer a fondo los métodos de cálculo analíticos, así como sus características y procedimientos para su implementación.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el Análisis Paramétrico realizado en el presente capítulo, se dio cumplimiento al segundo objetivo planteados en la investigación, obteniéndose las siguientes consideraciones finales:

- Se demuestra que los métodos funcionan bien, ya que la presión vertical aumenta con el aumento de las variables que son directamente proporcionales como la altura de cobertura y disminuye al aumentar las variables inversamente proporcionales como el ancho de la galería.
- Se comprueba que al disminuir la relación de proyección baja la presión vertical sobre el conducto, hasta llegar a ser igual a la geostática cuando la relación de proyección es igual a cero.
- De manera general podemos apreciar que hay diferencia entre los resultados de los métodos de cálculo, ya que en todos los cálculos realizados se aprecian diferencias, las mayores están entre un 10 y un 14 %.
- De los métodos de cálculo analizados el Método de Yaroshenko es el más conservador, ya que da mayores resultados de presión vertical sobre la galería que el método de Normas Soviéticas y el de Marstón en todos los casos, excepto en los que coincide con los resultados del Método de Normas Soviéticas.
- Según la investigación realizada se aprecia que las presiones de tierra verticales sobre la galería según los métodos analíticos son entre un 17 y un 74% mayores que la presión geostática, para relación de proyección igual a 1 resultando mayores porcentos de diferencia para presas más altas y entre un 4 y 43% mayores que la presión geostática para relación de proyección iguala 0.5. Lo que evidencia que a medida que mayor parte de la galería se encuentra por encima del Nivel General de Cimentación resultan mayores valores de presión vertical sobre la galería.

CAPÍTULO 3:  
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE  
ELEMENTOS FINITOS EN LA  
MODELACIÓN DE GALERÍAS  
ENTERRADAS EN PRESAS DE  
TIERRA.

## Capítulo 3: Aplicación del Método de Elementos Finitos en la modelación de galerías enterradas en presas de tierra.

### 3.1. Introducción.

En la modelación de un problema real, en la que se emplean métodos numéricos para la solución de dicho problema la solución que se obtiene es aproximada y para que este modelo numérico presente cierto grado de fiabilidad, debe ser sometido a un proceso de calibración numérica, la cual, suele separarse en dos procesos, la calibración matemática y la calibración física o constitutiva. Esta calibración se caracteriza a través de un modelo físico y un modelo matemático entre los que existe un vínculo que interrelaciona los aspectos de cada uno de ellos. Tal y como se muestra en la figura 18 a continuación, donde se señalan los aspectos de cada modelo y donde se interrelacionan. (Mesa, 2017)

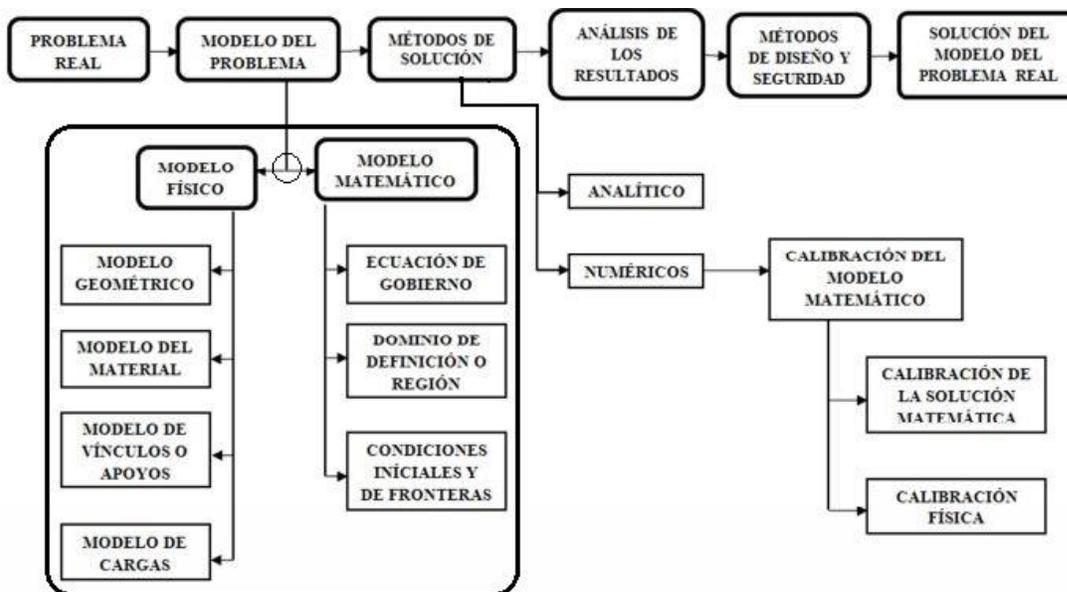


Figura 20: Flujo metodológico de cálculo para la solución a un problema real. (Mesa, 2017)

El problema real a modelar en esta investigación es la sección de los terraplenes de las presas donde se encuentran enterradas las galerías que forman parte de las obras de toma de agua de las presas, variando la altura de la presa, las dimensiones de las galerías, la posición de las galerías con respecto al nivel general de cimentación y asumiendo que la presa es homogénea, que el suelo de relleno es puramente friccional y que la cimentación sobre la que se construye siempre va a ser suelo no cedente o roca,

que son las condiciones que a menudo se buscan en nuestro país para el cimiento las presas de cierta importancia, por razones de seguridad y económicas evitando la necesidad de inyecciones de la cimentación como ya se mencionó anteriormente.

### **3.2. Proceso de calibración físico-matemática del modelo numérico.**

#### 3.2.1. Concepción del modelo físico.

Para la confección del modelo físico del objeto de estudio se tienen en cuenta otros modelos que deben reflejar las condiciones del problema real: modelo de forma (geometría), modelo de vínculos o de apoyo (condiciones de borde), modelo de los materiales y modelo de cargas. La concepción del modelo es bidimensional por ser un problema típico de deformación plana, a continuación, se exponen las consideraciones generales que se tienen en cuenta para la confección del modelo físico: (Mesa, 2017)

- **Modelo geométrico:** En este se definen las dimensiones principales del modelo como la altura de cobertura del relleno que está en función de la cota de la corona de la presa y del nivel general de cimentación, las dimensiones de la galería que está en función del caudal de diseño a evacuar y por especificaciones de diseño, el espesor de los muros que conforman la misma y la cota de construcción de la toma de aguas que depende del nivel de aguas muerto de la presa, por lo que la galería puede quedar por debajo o no del nivel general de cimentación.

Para la calibración se usará una presa de 29 m de alto desde el nivel general de cimentación, la galería tiene dimensiones exteriores de 4 x 4 m, con un espesor de los muros de 0.5 m y un ancho a cada lado de la galería de 25 m, tal y como se muestra en la figura 21.

- **Modelo de vínculos o apoyos (condiciones de frontera):** Para la modelación de las condiciones de frontera es necesario tener en cuenta las condiciones de borde o de contorno implementadas en la herramienta computacional, en este caso se implementaron las condiciones de contorno de apoyos con ligaduras lineales verticales y horizontales.

En la literatura clásica universal se utilizan para impedir los desplazamientos en los ejes X e Y, restringiendo en los laterales los desplazamientos lineales en X, permitiendo que pueda asentarse y en la profundidad los desplazamientos lineales en X y en Y, ya que en

la profundidad el terreno no se asienta debido al tipo de cimentación, o sea imponiendo los desplazamientos lineales nulos en los extremos del problema. (Mesa, 2017)

En el modelo también se restringen los desplazamientos lineales en el contorno de la galería con el objetivo de apreciar solo el comportamiento del suelo.

- Modelo del material o constitutivo: Los materiales escogidos para las zonas del terraplén deberán cumplir con las características recomendadas por las normativas de diseño empleando un modelo constitutivo homogéneo, estacionario y de preferencia hiperbólico no lineal-elástico, a continuación, se muestran las características físico-mecánicas de los materiales usados en la calibración.

Tabla 6: Características físico-mecánicas del material usado.

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Rf	C (kPa)	$\Phi$ (°)	Ei (kPa)
Suelo 1	22	0.9	0	45°	70000

- Modelo de cargas: El modelo de cargas esta dado solamente por el peso propio del terraplén, como una masa de suelo que actúa sobre la galería y la cimentación.

### 3.2.2. Concepción del modelo matemático. Calibración matemática:

Cuando se emplea el Método de Elementos Finitos en la solución del modelo matemático de diversos problemas de ingeniería, la solución que se obtiene es aproximada y discreta. Por esta razón como ya se había mencionado se hace necesario, para que los modelos numéricos presenten cierto grado de fiabilidad tienen que ser sometidos a un proceso de calibración numérica, que suelen dividirse en dos subprocesos, uno matemático y otro físico. (Mesa, 2017)

La calibración matemática, básicamente es el proceso de selección del tipo de elemento finito (TEF) y la densidad de malla óptima (DMO) de un modelo numérico. Garantizando que las variables de respuesta (campo de desplazamiento, campo de deformaciones, campo de tensiones, etc.) que se obtengan a partir del modelo numérico calibrado, respondan a una aproximación numérica deseada, además de contar con la estabilidad del modelo numérico. Esto puede lograrse ya sea con el empleo de resultados experimentales (patrón experimental) o sin ellos (patrón de alto costo computacional) y con el uso correcto de las normas de errores (teoría de errores) como medida de la dispersión de los resultados. (Mesa, 2017)

Una vez calibrado matemáticamente el modelo, la calibración física tiene como objetivo determinar el modelo físico o constitutivo que mejor responda a los resultados experimentales que se disponen. Debido al carácter estocástico que presentan los parámetros que caracterizan al modelo constitutivo, se hace necesaria la construcción de una superficie de respuesta para cada variable independiente que se desea calibrar. (Mesa, 2017)

### 3.2.3. Obtención del modelo numérico.

Para la obtención del modelo numérico, se aplicó la metodología para la calibración matemática de manera simultánea con el objetivo de determinar el tipo de elemento finito (TEF) y la densidad de malla óptima (DMO) para la solución en problemas de deformación plana. (Mesa, 2017)

Para efectuar la calibración matemática del modelo en la variable de respuesta desplazamiento, se obtuvo el resultado en un punto en la corona de la presa justo encima del medio de la galería empleándose las normas de error que cuantifican la medida de dispersión para uno y varios puntos.

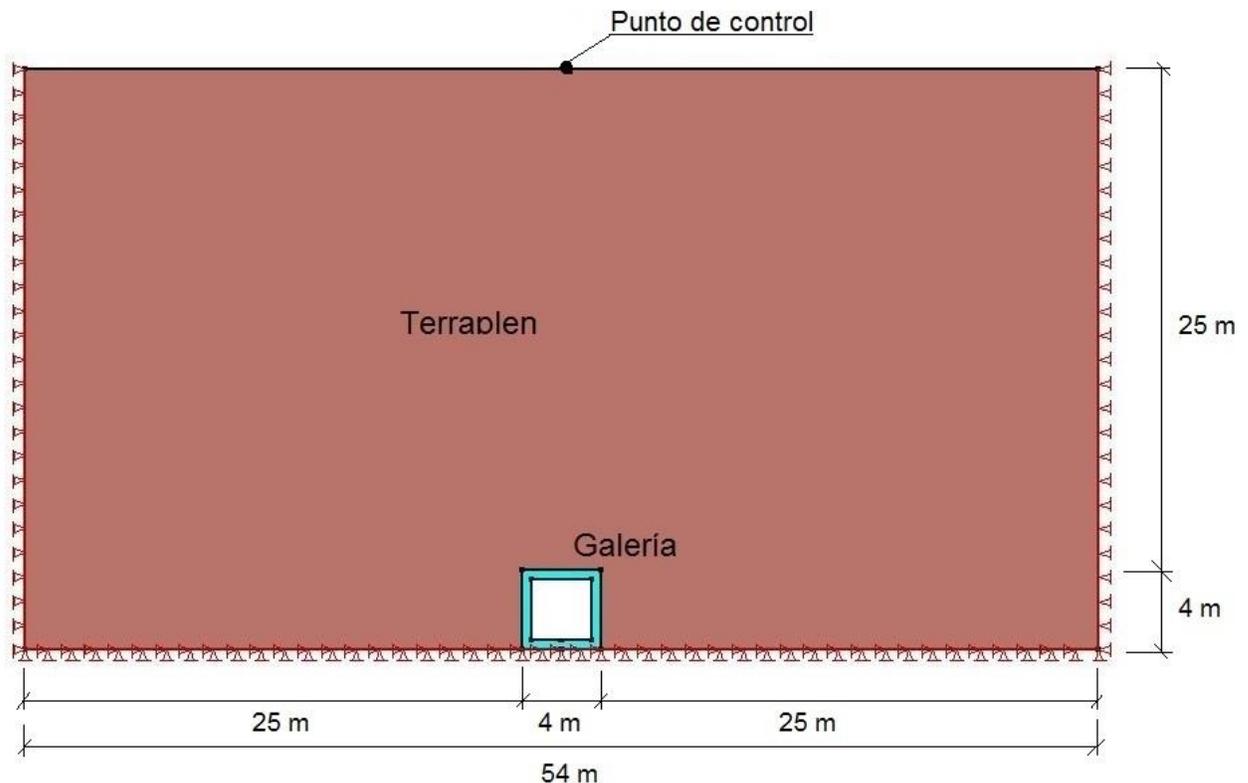


Figura 21: Modelo numérico y punto de control empleado en la modelación.

Tabla 7: Normas para el cálculo del error en uno y varios puntos. (Recarey, 1999)

Error cometido en un punto	
Error Absoluto (EA)	$E_A =  Q_{e(i)} - Q_{n(i)} $
Error Relativo (ER)	$E_R = \frac{ Q_{e(i)} - Q_{n(i)} }{Q_{e(i)}}$
Error cometido en varios puntos	
Error según la norma de espacio euclidiano (ENE)	$E_{ENE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{e(i)} - Q_{n(i)})^2}$
Error medio cuadrático (EMC)	$E_{MC} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{e(i)} - Q_{n(i)})^2}{n_p}$
Porcentaje de error medio absoluto (PEMA)	$E_{PEMA} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{e(i)} - Q_{n(i)}}{Q_{e(i)}} \right)}{n_p}$

Donde:

$Q_{e(i)}$ : Es el resultado patrón.

$Q_{n(i)}$ : Es el resultado obtenido en el modelo numérico.

$n_p$ : Es el total de puntos analizados.

Para la selección de la Densidad de malla óptima (DMO) y del Tipo de elemento finito (TEF), se realizó un diseño de experimento  $3^2$  como de aprecia en la figura 22, en donde el factor (DD) se varió a tres niveles, obteniéndose resultados con tres grados de refinamiento del dominio numérico (50 cm, 75 cm y 100 cm) para cada tipo de elemento finito (cuadrilátero de ocho nodos + triángulo de seis nodos, rectangular de cuatro nodos y triangular de tres nodos); a los cuales se les aplicó las normas de error relativo, tomando como patrón no experimental los resultados del post proceso de la discretización del dominio con un tamaño de los elemento finito de 40 cm para cada TEF.

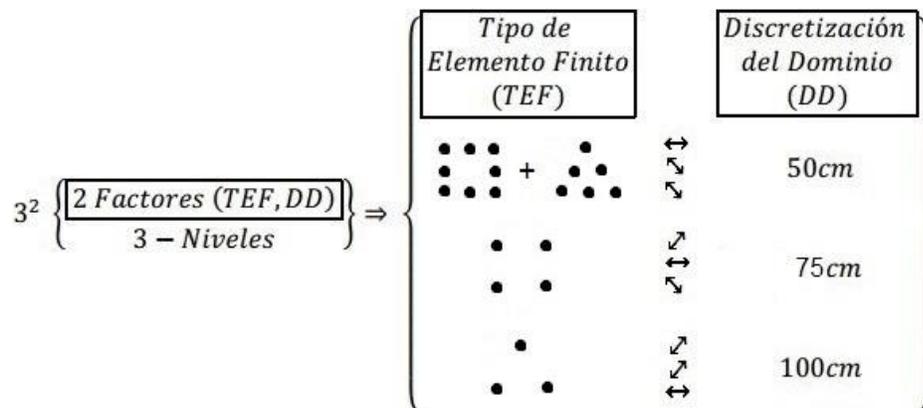


Figura 22: Diseño de experimento  $3^2$  para la calibración matemática de manera simultánea.

Para la obtención de la discretización patrón del elemento finito no experimental de 40cm, se modeló un terraplén de 29 m de altura con un peso específico de  $22 \text{ kN/m}^3$ , siendo conocido que, en la base del terraplén las tensiones por peso propio debían dar 638 kPa. Con una discretización del dominio de 40cm, las tensiones resultantes por peso propio resultaron ser de 634.167 kPa, siendo el error relativo de 0.6 %, además que, con discretización del dominio menores, el costo computacional se elevó notablemente, ya que aumentó el número de elementos finitos y los errores alcanzados con respecto a la discretización de 40 cm no fueron significativos.

Por lo descrito anteriormente se decidió escoger la discretización del dominio como patrón no experimental 40 cm. Se consideró como criterio de aproximación deseado el centímetro, obteniéndose de esta forma el gráfico de refinamiento o densidad de la malla (@) vs error relativo en un punto para cada TEF.

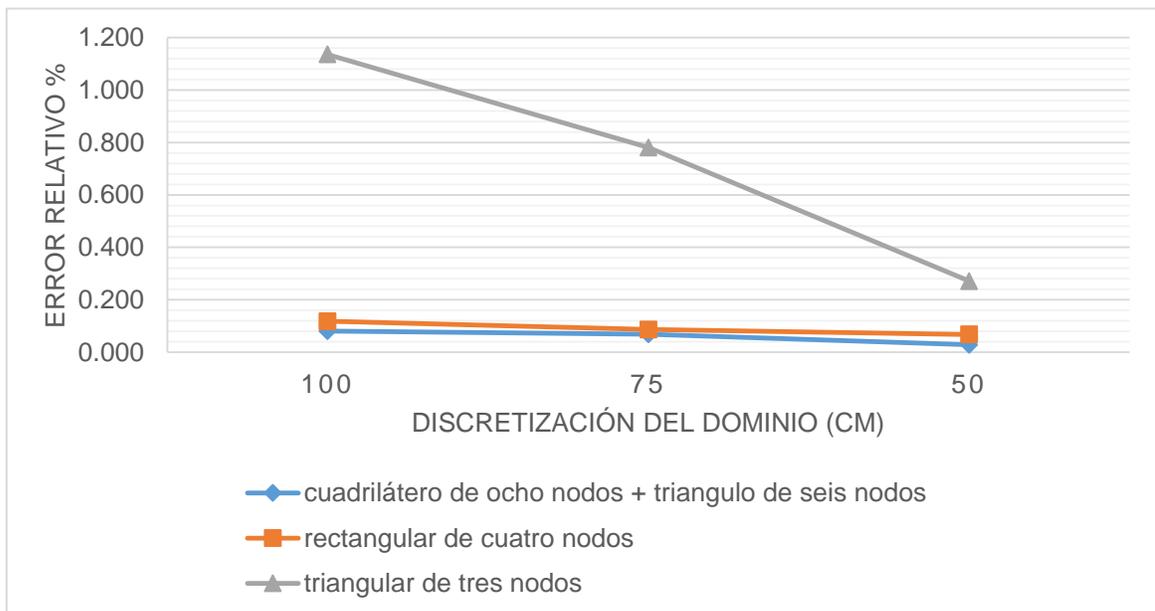


Figura 23: Gráfico de refinamiento o densidad de la malla (@) vs error relativo en un punto para cada TEF.

Una vez analizados los resultados en el proceso de calibración matemática de manera simultánea y teniendo en cuenta la variable del tiempo de computación (costo computacional) empleado en las simulaciones numéricas, se llegó a la conclusión que el refinamiento adecuado del dominio para el problema en cuestión es de 50 cm y el tipo de elemento finito cuadrilátero de ocho nodos + triángulo de seis nodos, los cuales se pueden apreciar en la figura 24.

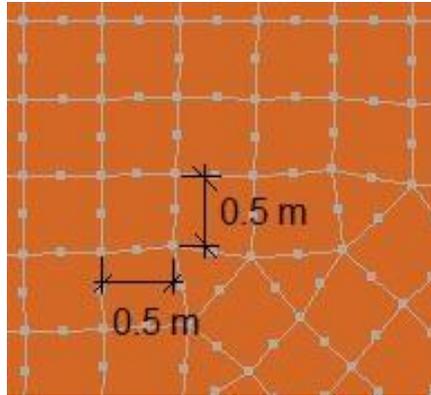


Figura 24: Imagen ampliada del TEF y discretización del dominio.

### 3.3. Cálculo de las tensiones por peso propio sobre galerías empleando el MEF mediante el programa GeoStudio2007.

#### 3.3.1. Aspectos generales.

Con el fin de establecer una comparación entre los resultados del cálculo por métodos analíticos y por MEF se realizan modelaciones de galerías enterradas en presas de tierra usando el TEF y la DMO resultantes del proceso de calibración, variando los mismos parámetros que en el análisis paramétrico realizado en el Capítulo 2. Los cuales se muestran a continuación.

Tabla 8: Variación de los parámetros geométricos del modelo.

Parámetro	Variación		
Altura de cobertura: H. (m)	10	25	45
Ancho exterior de la galería: B. (m)	4	6	9
Relación de proyección.	1	0.5	0

La modelación se realizará usando dos tipos de suelo de relleno, uno cohesivo y otro friccional, el suelo del cimiento se asume que es suelo no cedente o un sustrato rocoso indeformable.

Tabla 9: Propiedades físico-mecánicas y deformacionales del suelo de relleno.

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Rf	C (kPa)	$\Phi$ (°)	Ei (kPa)
Suelo 1	22	0.9	0	45°	70000

Teniendo en cuenta los datos mencionados anteriormente se procede a realizar la modelación de 54 variantes resultantes de las combinaciones de los parámetros.

### 3.4. Comparación de los resultados de la modelación con los del cálculo por métodos analíticos.

Con los resultados del modelo de elementos finitos se calculó la presión vertical sobre la galería para todas las hipótesis de altura del relleno, ancho de la galería y relación de proyección. Lo que permite establecer comparaciones entre la presión vertical calculada por el método de elementos finitos y las obtenidas por métodos analíticos.

Para establecer la comparación se incluyen los resultados del MEF en la comparación realizada en el Capítulo 2 de cada método de cálculo analítico.

Los rasgos más significativos de la comparación se recogen en las figuras de la 25 hasta la 28, en las que se representa en el eje de las ordenadas la altura de cobertura del relleno y en abscisas la variación del parámetro.

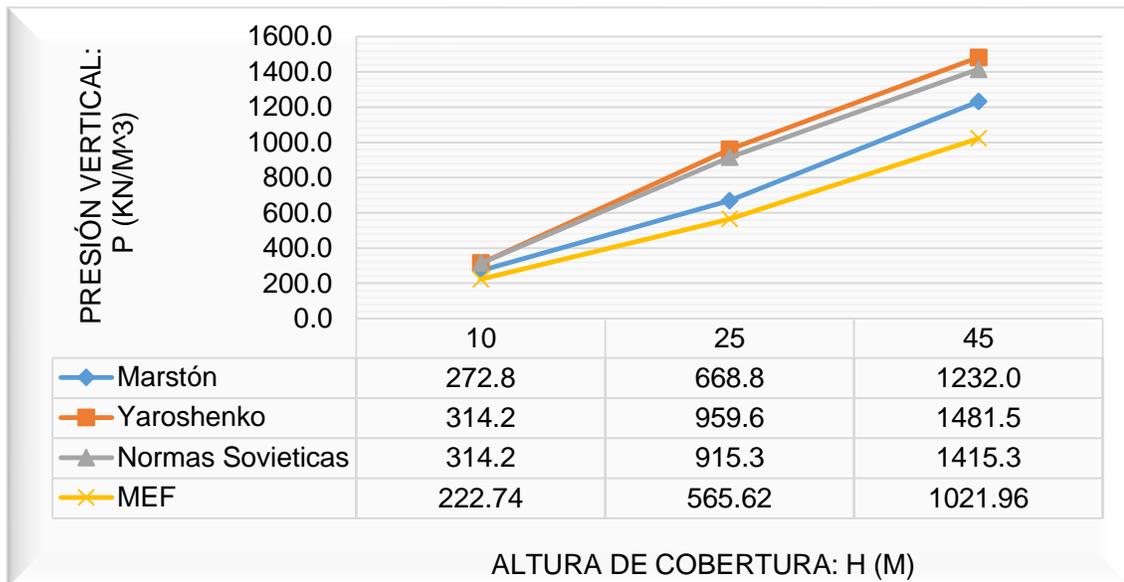


Figura 25: Variación de la presión vertical con la altura de cobertura (H), con relación de asentamiento igual a 1 y B = 4 m.

En la figura 25 se aprecia que los resultados de los cálculos por métodos analíticos son mayores que los del MEF y mientras mayor es la altura de relleno mayor es la diferencia entre los resultados, es decir que a medida que aumenta la altura de relleno los métodos analíticos dan resultados más conservadores.

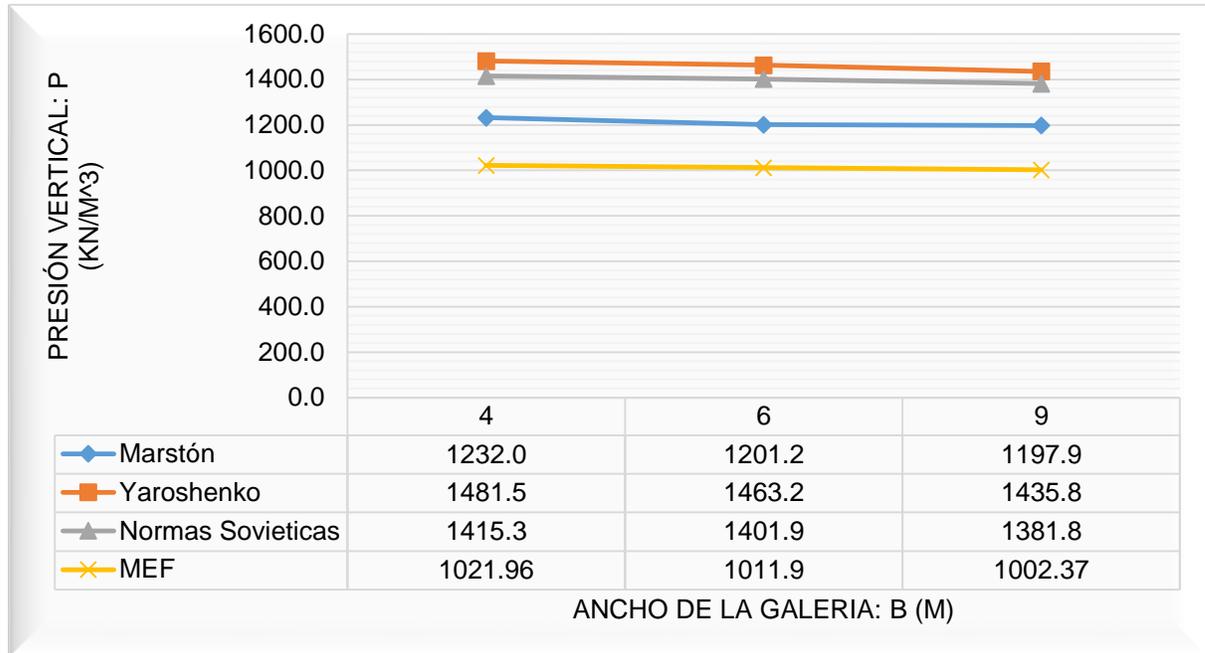


Figura 26: Variación de la presión vertical con el ancho exterior de la galería, con relación de asentamiento igual a 1 y  $H = 45$  m.

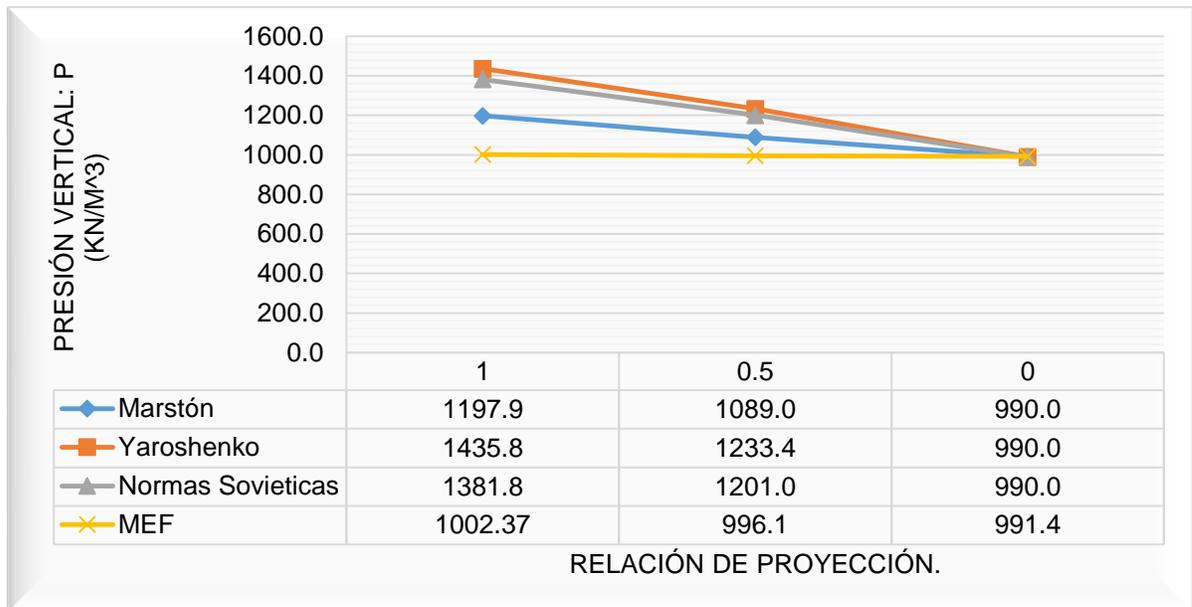


Figura 27: Variación de la presión vertical con la relación de proyección, con  $B = 9$  m y  $H = 45$  m.

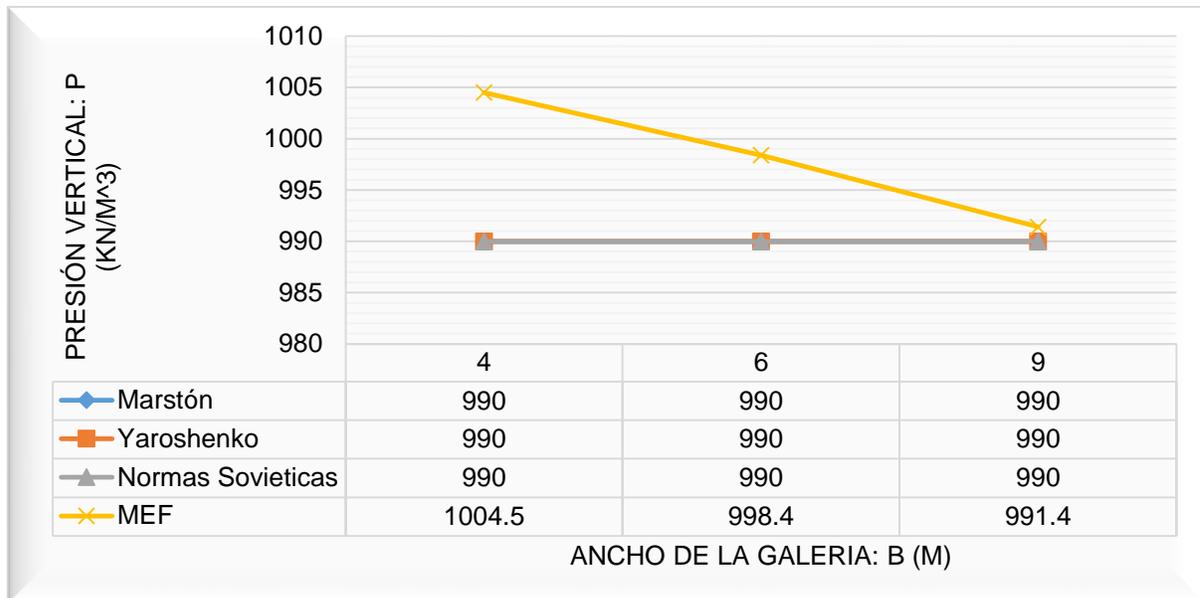


Figura 28: Variación de la presión vertical con el ancho exterior de la galería, utilizando, relación de asentamiento igual a 0 y  $H = 45$  m.

En las figuras 26 y 27 también se aprecia la superioridad de los resultados de los métodos analíticos sobre el MEF, en la figura 26 al variar el ancho de la galería para altura del terraplén igual a 45 m, las variaciones de la presión vertical están dentro del rango de 195 a 211 kPa con respecto al método de Marstón y más de 300 kPa con respecto a los métodos de Yaroshenko y Normas Soviéticas.

En la figura 27 también podemos apreciar un aumento en el grado de conservatismo de los métodos analíticos para mayores valores de relación de proyección, es decir al encontrarse menor parte de la galería por debajo del nivel general de cimentación, no siendo así para relación de proyección igual a 0, lo cual se aprecia con mayor claridad en la figura 28, donde resultan mayores valores de presión vertical sobre la galería del método de elementos finitos que de los analíticos, esto se debe a que en los métodos analíticos se cumple que para relación de proyección igual 0 la carga vertical sobre la galería va a ser igual a la presión geostática, lo que evidencia que para esta condición de proyección de la galería los métodos analíticos dejan de ser conservadores y dan resultados más cercanos a la realidad.

### 3.5. Conclusiones parciales del capítulo.

Según los resultados de las comparaciones realizadas en el presente capítulo se les dio cumplimiento al tercer y cuarto objetivos planteados en esta investigación, arrojando las siguientes consideraciones finales en cuanto a la modelación numérica empleando el MEF y la comparación de este con Métodos Analíticos:

- El modelo matemático que mejor se aproxima a la solución en el cálculo de la presión vertical sobre galerías enterradas en presas de tierra es el tipo de elemento finito cuadrilátero de 8 nodos combinado con el triángulo de 6 nodos con una discretización del dominio de 50cm.
- La presión vertical sobre una galería enterrada en una presa de tierra calculada por Métodos Analíticos resulta notoriamente conservadora respecto a la que se obtiene al aplicar el Método de Elementos Finitos, obteniendo resultados más conservadores a medida que aumenta la altura de cobertura del relleno y para relaciones de proyección mayores, es decir al encontrarse mayor parte de la galería por encima del nivel general de cimentación.
- Para relaciones de proyección igual a cero los Métodos Analíticos no arrojan resultados muy conservadores, ya que la presión vertical sobre la galería resulta igual a la geostática y al aplicar el Método de Elementos Finitos se obtienen resultados aproximados, con mayores diferencias para grandes coberturas de tierra.

## CONCLUSIONES

Una vez finalizada la presente investigación, se manifiestan las conclusiones, donde se sintetizan los resultados más significativos alcanzados.

1. Existen varios métodos para el cálculo de las solicitaciones debidas a la carga de tierra sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos, los cuales se clasifican en métodos analíticos como el de Marstón, Yaroshenko y Normas Soviéticas y métodos numéricos más avanzados como la modelación matemática empleando el MEF.
2. Se obtuvo un modelo numérico que caracteriza el estado tenso-deformacional de presas de tierra en estado de deformación plana. Con el tipo de elementos finitos cuadriláteros de 8 nodos y triangulares de 6 nodos y una discretización del dominio de 50 cm.
3. Se demuestra que los Métodos Analíticos son válidos para los cálculos realizados, de estos el Método de Yaroshenko es el más conservador, ya que da mayores resultados de presión vertical sobre la galería que el método de Normas Soviéticas y el de Marstón en todos los casos.
4. La presión vertical sobre una galería enterrada en una presa de tierra calculada por Métodos Analíticos resulta notoriamente conservadora respecto a la que se obtiene al aplicar el Método de Elementos Finitos, obteniendo resultados más conservadores a medida que aumenta la altura de cobertura del relleno y para mayores relaciones de proyección. Por tanto la modelación matemática por el “Método de Elementos Finitos” es la mejor opción para el análisis de las solicitaciones debidas a la carga de tierra sobre galerías enterradas en presas de materiales sueltos ya que se analiza el problema con toda generalidad y se obtienen resultados más cercanos a la realidad.

## RECOMENDACIONES

1. Continuar abordando el tema de las solicitaciones debidas a la carga de tierras sobre las galerías enterradas en presas de tierras, empleando para el estudio datos reales de presiones verticales sobre galerías, por ejemplo, mediante la colocación de células de presión total en el relleno cercano a la galería o en el contacto entre el hormigón y la tierra.
2. Aplicar en todos los casos siempre que sea posible el Método de elementos finitos ya que este presenta la enorme ventaja de poder analizar el problema con toda generalidad incluida la interacción suelo estructura.
3. Realizar análisis y comparaciones para el caso de presas cimentadas sobre suelos deformables y para rellenos de distinta naturaleza.
4. Realizar modelaciones en tres dimensiones (3D) de galerías enterradas en presas de tierra donde se tomen en cuenta efectos tridimensionales que incrementan las presiones verticales transmitidas a la galería.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BADILLO, E. J. & RODRIGUEZ, A. R. 1974. *Mecanica de Suelos Mexico*.
- 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.
- DÍAZ, H. & REYES, G. n.d. Análisis comparativo de la teoría de marston para tuberías enterradas y la modelación numérica con elementos finitos. Colombia.: Universidad Nacional de Colombia.
- DILLA, F. & CANO, J. 2007. *Estructuras Idráulicas* La Habana.
- FELICIANO, A. M. & LIZCANO, A. 2014. Simulación numérica de la interacción suelo-tubería. *ResearchGate*.
- GÁLVEZ, D. 2011. *Cálculo estructural de tuberías enterradas por el método de elementos finitos, con base en el informe técnico CEN/TR 12995-3*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- JÚAREZ, E. & RICO, A. 1974. *Mecánica de suelos, Flujo de agua en suelos.*, Mexico D. F., Limusa.
- LÓPEZ, G. 2010. Introducción a la modelización de tensiones y deformaciones en el terreno mediante el uso del programa sigma/w 2007. Córdoba.: Universidad de Córdoba.
- MELI PIRALLA, R. 1986. Diseño Estructural.
- MESA, M. 2017. *“Empleo de la modelación para el diseño de terraplenes altos de carretera”*. UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS.
- MORA RODRÍGUEZ, L. Y. C. P., A. 2003. *Análisis y modelación de edificios multifamiliares*. Trabajo de Diploma, Marta Abreu.
- PCC 2010. *Lineamientos del PCC*
- PCC 2016. Actualización de los Lineamientos de la política económica y social del partido y la revolución para el periodo 2016-2021 aprobados en el 7mo. congreso del partido en abril de 2016 y por la asamblea nacional del poder popular en julio de 2016.
- RECAREY, C. A. 1999. *Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo*. Tesis presentada para optar por el grado de doctor en ciencias técnicas., Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas (UCLV).
- SÁENZ, F. & LINDON., M. 1997. Solicitaciones debidas a la carga de tierra sobre Las galerías y conductos enterrados en presas de materiales sueltos *Revista de obras públicas* 163.

## ANEXOS

Anexo 1: Resultados del análisis paramétrico.

Se muestran tablas con los resultados de los cálculos de la presión vertical sobre galerías enterradas en presas de tierra para distintas hipótesis de altura de relleno, la naturaleza de este, ancho de la galería y relación de proyección para cada método de cálculo.

Tabla A1: Propiedades físico-mecánicas y deformacionales del suelo de relleno.

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Rf	C (kPa)	$\Phi$ (°)	Ei (kPa)
Suelo 1	22	0.9	0	45°	70000

Tabla A2: Presiones verticales sobre las galerías.

B	Relac de Proj.	4	6	9	6	9	4	9	4	6
		10	25	45	10	25	45	10	25	45
Marstón	1	272.8	660.0	1197.9	264.0	653.4	1232.0	257.4	668.8	1201.2
	0.5	255.2	607.2	1089.0	237.6	594.0	1144.0	227.7	611.6	1122.0
	0	220.0	550.0	990.0	220.0	550.0	990.0	220.0	550.0	990.0
Yaroshenko	1	314.2	900.4	1435.8	282.8	811.6	1481.5	261.9	959.6	1463.2
	0.5	314.2	769.6	1233.4	282.8	747.4	1244.9	261.9	784.4	1240.3
	0	220.0	550.0	990.0	220.0	550.0	990.0	220.0	550.0	990.0
normas Soviéticas	1	314.2	871.9	1381.8	282.8	806.8	1415.3	261.9	915.3	1401.9
	0.5	314.2	743.5	1201.0	282.8	727.2	1209.3	261.9	754.3	1206.0
	0	220.0	550.0	990.0	220.0	550.0	990.0	220.0	550.0	990.0
MEF	1	222.7	559.7	1002.4	219.7	554.8	1022.0	217.1	565.6	1011.9
	0.5	220.8	555.4	996.1	218.6	551.6	1011.3	216.7	559.7	1003.9
	0	220.2	552.7	991.4	218.4	549.5	1004.5	216.7	556.3	998.4



Anexo 3. Resultados del post-proceso de la calibración matemática en un punto.

En el presente anexo se muestran los resultados obtenidos en el proceso de calibración matemática de forma simultánea, realizado para la obtención del modelo numérico.

Tabla A4: Resultados del proceso de calibración.

<b>Tamaño malla (mm)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Desplazamiento (m)</b>	<b>Error absoluto (m)</b>	<b>Error relativo (%)</b>
<b>cuadrilátero de ocho nodos + triangulo de seis nodos</b>				
100	00:39	0.00734232	0.00000588	0.07999460
75	00:56	0.00734321	0.00000499	0.06789912
50	01:37	0.00734613	0.00000207	<b>0.02813289</b>
30	03:51	0.00734820	0.0	0.0
<b>rectangular de cuatro nodos</b>				
100	00:30	0.00733562	0.00000867	0.11803456
75	00:36	0.00733795	0.00000634	0.08630651
50	00:56	0.00733934	0.00000495	0.06738433
30	01:44	0.00734429	0.0	0.0
<b>triangular de tres nodos</b>				
100	00:35	0.00724680	0.00008327	1.13600518
75	00:42	0.00727283	0.00005724	0.78092000
50	01:12	0.00731022	0.00001985	0.27079133
30	02:35	0.00733007	0.0	0.0

Anexo 5: Ejemplos del resultado de la modelación matemática.

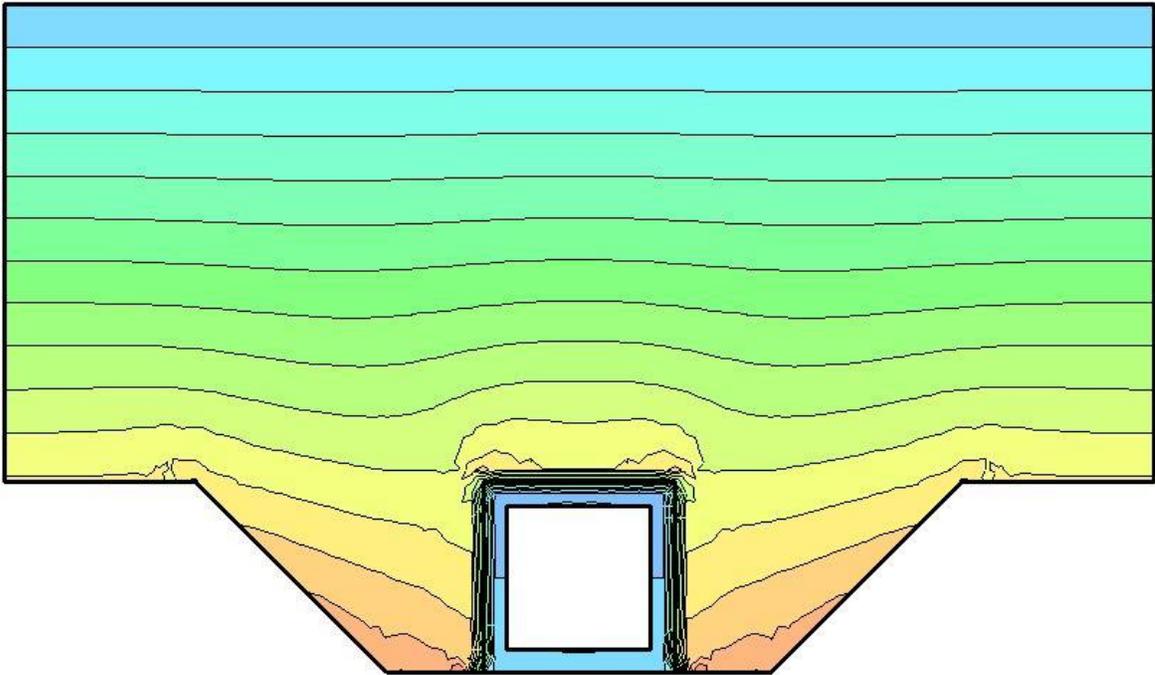


Figura A1: Isobaras del estado tensional vertical para el modelo de 10 m de altura con, galería de 4 m de ancho, relación de proyección igual 0.

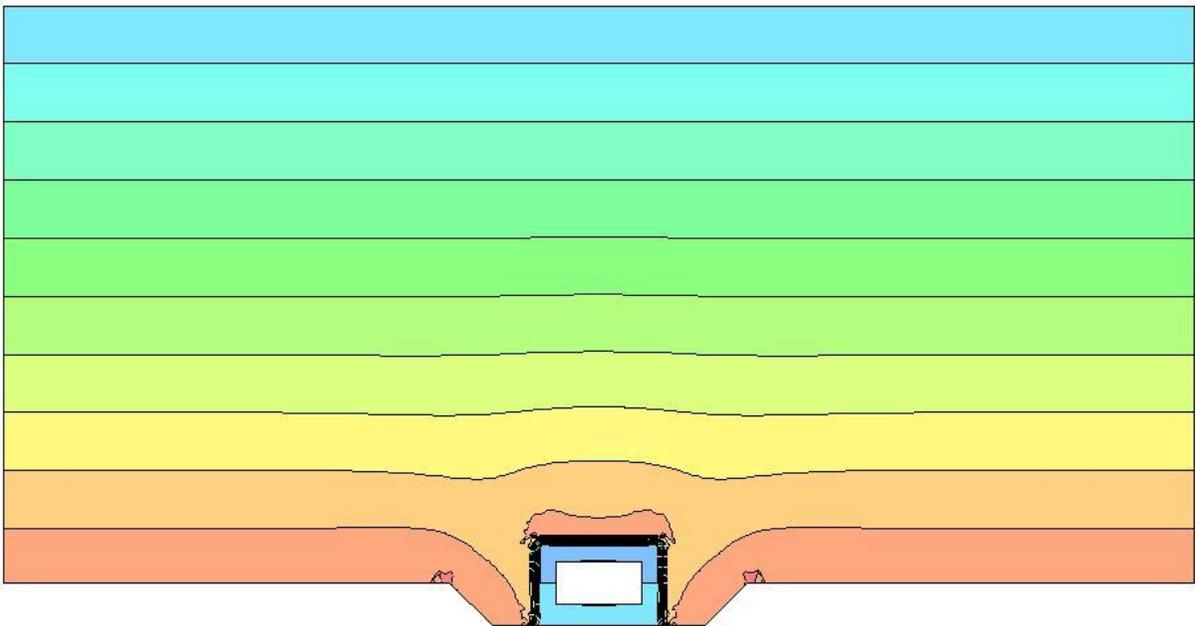


Figura A1: Isobaras del estado tensional vertical para el modelo de 25 m de altura con, galería de 6 m de ancho, relación de proyección igual 0.5.

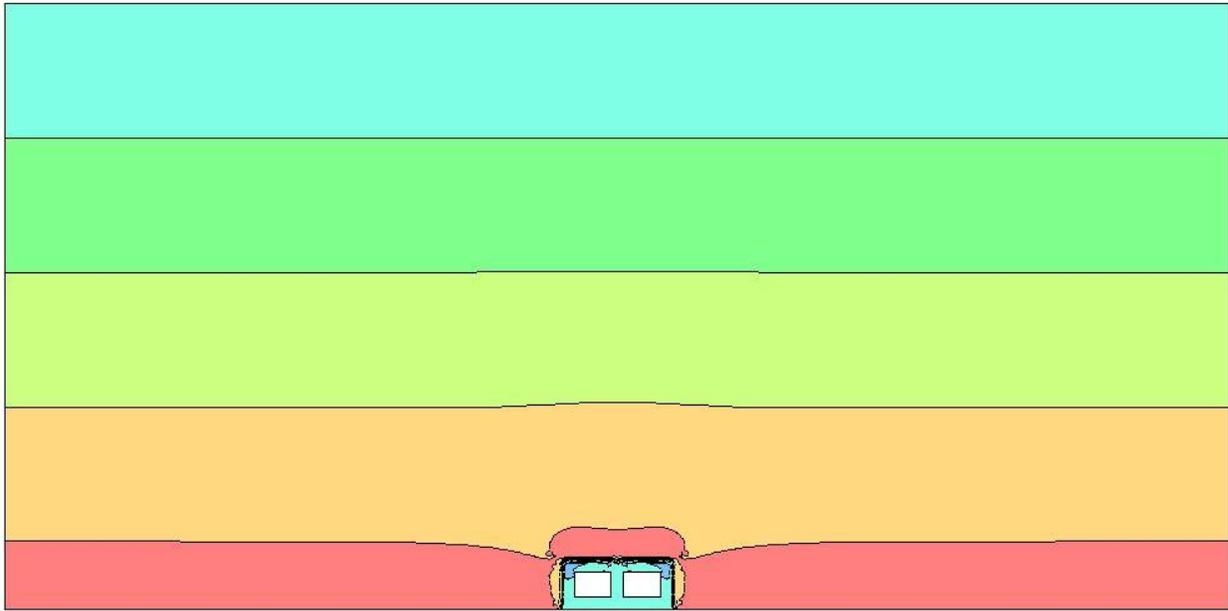


Figura A3: Isobaras del estado tensional vertical para el modelo de 45 m de altura con, galería de 9 m de ancho, relación de proyección igual 1.