Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Hidráulica

TRABAJO DE DIPLOMA

TÍTULO

Conceptualización para el Proyecto del Polígono de Modelos Físicos en Ingeniería Hidráulica en la Facultad de Construcciones

Autor: Raidiel Ronaldo Fernández Machado

Tutor: Dr. Ing. Lamberto Alvarez Gil

Santa Clara

Curso 2016-2017

"Año 59 de la Revolución."

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con todo el amor a mi madre Regla Machado y a mi padre Remberto Fernández y a mis dos hermanas quienes fueron el eje fundamental para culminar mi carrera y hacer posible que mi sueño de ser ingeniero se lograra, además a mis amigos que me apoyaron para que finalizara una parte de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas la cual me abrió sus puertas para poder seguir estudiando y terminar mi carrera, a la Facultad de Construcciones, a todos los profesores, los cuales me guiaron con sus enseñanzas y conocimientos para ser un profesional de bien en la vida.

A mi tutor el Ingeniero Lamberto Alvarez Gil cual fue mi guía para la terminación de este proyecto sabiendo transmitir sus conocimientos y sus ideas de una manera muy acertada.

A mi Padre a mi Madre y a mis hermanas por todo su apoyo durante este largo periodo.

RESUMEN

La presente tesis muestra los cálculos y resultados de la propuesta del diseño del modelo físico del conjunto hidráulico Presa Palmarito, formado por sus objetos de obras (cortina, aliviadero y toma de agua). Mediante los conceptos y teorías la escala del modelo físico fue de 1:50. A partir de los datos reales de cada objeto de obra se determinaron los croquis del modelo físico del conjunto Palmarito, de manera que a través de estos croquis y de las ecuaciones del factor de escala, se calcularon los volúmenes de trabajo de cada objeto de obra mediante las secciones transversales, y también se calculó el presupuesto para cada objeto de obra apoyándome del libro del PreCons II y de las tablas del Índice de Consumo.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

INTRODUCCIÓN 1

1.1 Generalidades. 6

1.2 Aplicación y aporte de los modelos hidráulicos. 7

1.3 Objetivos de la modelación hidráulica. 8

1.4 Clasificación general de los modelos físicos hidráulicos. 9

1.5 Ventajas de la Modelación Física y Matemática. 15

1.6 Evolución de la modelación física en la Ingeniería Hidráulica. 17

1.7 Bases de cálculo para la modelación hidráulica. 18

1.8 Ejemplos de modelos físicos en Estructuras Hidráulicas. 22

Conclusiones parciales: 27

CAPÍTULO 2: Obtención del Modelo físico para el conjunto hidráulico Palmarito. 28

2.1 Cálculos para la obtención del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito. 28

Conclusiones parciales: 44

CAPÍTULO 3: Determinación del presupuesto para la construcción del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito. 45

3.1 Determinación de los volúmenes de trabajo y presupuesto del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito. 45

Conclusiones parciales: 58

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 59

Bibliografía: 61

ANEXOS 62

Conceptualización para el Proyecto del Polígono de Modelos Físicos en la Facultad de Construcciones.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se basa en la propuesta del diseño de un modelo físico del conjunto hidráulico Presa Palmarito (maqueta), formado por tres objetos obras (cortina, aliviadero, obra de toma) en nuestra facultad. En el diseño del modelo físico del conjunto hidráulico Presa Palmarito se realizará sobre la base de los criterios de los métodos de la modelación física en Ingeniería Hidráulica. Además se determinaran los volúmenes de trabajo y el presupuesto del modelo físico de la Presa Palmarito necesario para la construcción de la maqueta de esta obra en los predios de la Facultad de Construcciones.

Es importante destacar que la modelación hidráulica al lograr representar el flujo (tridimensional) de un río o a través de una estructura o suelo con mayor fidelidad y detalle que un simple cálculo teórico, aumenta la confiabilidad de las estructuras proyectadas. Esto significa que los diseños se ajustan más a las solicitaciones reales del flujo, lo cual tiene un importante impacto económico. Por un lado se disminuye el riesgo de diseñar una obra poco resistente que colapse fácilmente con las consecuentes pérdidas económicas o lo que es peor, en vidas humanas; mientras que por otro lado también se reduce la posibilidad de un diseño sobredimensionado que requiera de inversiones innecesarias. En otras palabras la modelación hidráulica constituye una importante herramienta de optimización para el diseño de obras hidráulicas.(Lozano Gutiérrez, (2016))

Todas estas técnicas se implementan para efectuar el análisis de cualquier tipo de obras, es por eso que la modelación ha adquirido un carácter de método científico general. Los programas computacionales profesionales que proliferan hoy en el mundo para el análisis y diseño de estructuras son capaces de resolver prácticamente cualquier estructura por más compleja que esta sea en un tiempo y costo razonable con gran precisión; estos no dan una absoluta seguridad, pues los datos que se entran no son más que los de un modelo analítico y muchos de estos

modelos no son tan evidentes, por tanto dependen más del criterio estructural del ingeniero.(Fernández Hernández, (2008))

Una vez realizado la conceptualización del modelo físico de la Presa Palmarito se estará en mejores condiciones de poder realizar su construcción en los predios de la Facultad de Construcciones y será un medio de enseñanza de gran valor teórico y práctico para el colectivo de profesores y estudiantes de la carrera de Ingeniería Hidráulica.

Los modelos físicos junto con los numéricos constituyen el conjunto de herramientas a disposición del ingeniero para el diseño de las obras. Todas estas utilidades, lejos de ser excluyentes, constituyen un conjunto de medios complementarios, cuya aplicación ordenada permite optimizar sus capacidades y utilizar sus sinergias en aras a alcanzar la mejor solución para el problema en estudio.(Serret, (2012))

El modelo es también muy útil para ensayar las Reglas de Operación. Sabemos que la determinación de la mejor forma de operación de una estructura es un proceso de aproximaciones sucesivas. La primera versión la ofrece el diseñador. La investigación en modelo debe permitir la obtención de una segunda versión que recoja lo observado en el modelo y es la que se usará al ponerse en funcionamiento la obra. La experiencia y la observación de la estructura permitirán mejorar continuamente las reglas de operación.

En algunos casos el estudio en modelo debe formar parte del estudio de alternativas. Los diseños definitivos de estructuras que requieran de una investigación en modelo hidráulico deberían considerar el estudio en modelo dentro del contrato del estudio definitivo. Sin una verificación en modelo no es posible presentar el diseño definitivo de una estructura con las características antes señaladas.(Felices Rocha, (2003))

El presente trabajo tiene como **campo de investigación** el empleo de modelos físicos para el estudio de fenómenos de la Ingeniería Hidráulica y como **objeto de**

estudio la aplicación de los criterios de modelación física para el diseño del prototipo de la Presa Palmarito.

Teniendo en cuenta la propuesta del diseño de un modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito, se utilizará uno de los métodos para la creación de la maqueta de esta obra, que formara parte del primer polígono de modelos físicos de la carrera de Ingeniería Hidráulica de la Facultad de Construcciones, se tiene a partir de lo expresado el siguiente **problema de investigación**: ¿De qué manera el uso del método de modelo físico para el diseño del prototipo de este conjunto hidráulico, facilita la obtención de las dimensiones de los objetos de obra del conjunto hidráulico Palmarito para lograr una adecuada correspondencia con la obra real?

Como solución adelantada a este problema se tiene la siguiente **hipótesis**: Si se aplican los postulados de los métodos de modelos físicos para obtener la maqueta del conjunto hidráulico Palmarito, entonces se podrá determinar las dimensiones del modelo físico de cada objeto de obra: cortina, aliviadero y toma de agua del conjunto hidráulico Palmarito y obtener los volúmenes de trabajo para su construcción en el polígono de obras Hidráulica de la Facultad de Construcciones.

El **objetivo general** de este trabajo será:

Elaborar una propuesta de un prototipo para el Conjunto Hidráulico Palmarito, diseñado sobre la base de los criterios de los métodos de modelos físicos empleados por la Ingeniería Hidráulica, que permita obtener las dimensiones de cada uno de los objetos de obra y así poder estimar los recursos de materiales necesarios para su construcción.

Se tienen los **objetivos específicos** siguientes:

1. Confeccionar el estado del arte sobre los modelos físicos en la Ingeniería Hidráulica y temas afines con esta temática.

2. Establecer las dimensiones de las obras del conjunto hidráulico Palmarito según la aplicación de los métodos de modelos físicos.
3. Determinar los volúmenes de trabajo, listado de actividades y presupuesto de la propuesta del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito.

Para el logro de esta investigación se trazaron las siguientes tareas:

1- Búsqueda e información acerca de los diferentes criterios y métodos sobre modelos físicos en la Ingeniería Hidráulica y su aplicación a ejemplos de obras específicas.

2- Análisis de los datos referidos al conjunto hidráulico Palmarito mediante el estudio de la documentación del diseño disponible.

3- Estudio de las características fundamentales de los métodos de modelos físicos empleados en Ingeniería Hidráulica.

4- Cálculo de las dimensiones del modelo físico para el conjunto hidráulico Presa Palmarito mediante la aplicación de los métodos de modelos físicos empleados en Ingeniería Hidráulica.

5- Cálculos de los volúmenes de trabajo, listado de actividades y presupuesto de la propuesta del modelo físico de la Presa Palmarito.

6- Propuestas de recomendaciones constructivas para la ejecución de la construcción del modelo físico en los predios de la facultad.

Conceptualización para el Proyecto del Polígono de Modelos Físicos en la Facultad de Construcciones.

La presente investigación estará estructurada de la siguiente forma:

Capítulo I: Revisión bibliográfica.

Capítulo II: Obtención del Modelo físico para el conjunto hidráulico Palmarito.

Capítulo III: Elaboración de la documentación de diseño y recomendaciones para la construcción del modelo físico para el conjunto hidráulico Palmarito.

Referencias Bibliografía

Conclusiones y Recomendaciones

Anexo

CAPÍTULO 1: Revisión Bibliográfica.

1.1 Generalidades.

Con frecuencia, el ingeniero debe dar soluciones factibles, en base a ciertos requerimientos, a problemas ingenieriles. Debe decidir a priori el enfoque, técnicas o métodos más convenientes para cada caso en particular. Algunas veces, estas soluciones pueden ser sencillas, debido a que están bien definidas tanto la parte técnica como la parte económica, por lo que sólo basta aplicarlas.

En otros casos, los problemas son complejos o desconocidos como es el de conocer el comportamiento hidráulico del flujo de agua al pasar por una presa derivadora y al ser captada por una toma. En estos casos, se evaluará que tipo de investigación se va a adoptar. Dicha investigación se iniciará conceptualizando y esquematizando el problema, después se seleccionará la técnica física o matemática para estudiar el problema. A este proceso de abstracción se le conoce como modelación. En definitiva, la modelación implica simular un fenómeno real, conceptualizándolo y simplificándolo en mayor o menor medida, para luego, por último describirlo y cuantificarlo.(Paz Herrera Alfredo, (2004))

La modelación se ha desarrollado notablemente en el campo de la hidráulica, existen evidencias de estudios de diseños hidráulicos realizados desde tiempos antiguos, mediante pequeñas representaciones de estructuras y máquinas, por los cuales se ha llegado a enunciar principios fundamentales en la hidráulica; sin embargo hasta hace poco tiempo la experimentación hidráulica se llevaba a cabo habitualmente a escala real ya sea en vertederos, canales, tuberías y presas construidas sobre el terreno.

El sistema semejante reducido o simplificado es lo que llamamos modelo, frente a la realidad que llamamos prototipo.

Los principios en que se basa este procedimiento incluyen las teorías de similitud hidráulica. El análisis de las relaciones básicas de las diversas cantidades físicas incluidas en el movimiento y la acción dinámica del fluido denominada análisis

dimensional. En la actualidad, se diseñan y construyen pocas o ninguna estructura hidráulica importante, sin estudios preliminares de modelos, más o menos extensos.

1.2 Aplicación y aporte de los modelos hidráulicos.

En hidráulica, la modelación se usa para la simulación de situaciones reales que se producen en el prototipo y cuyo comportamiento se desea conocer; puesto que modelo y prototipo están ligados el uno con el otro, las observaciones y estudio del modelo constituyen la información necesaria para comprender la naturaleza del prototipo, debiendo para ello, estar ambos relacionados.

Debido a que las simulaciones se producen bajo condiciones controladas de laboratorio los modelos hidráulicos tienen múltiples aplicaciones.

Tenemos que los modelos hidráulicos, se usan para la solución de problemas relacionados con las estructuras hidráulicas, fenómenos de infiltración o tramos de ríos y recientemente con el transporte de sedimentos. Las principales características de cada uno de estos grupos son indicadas por sus nombres.

Los modelos de estructuras son usados para resolver problemas hidráulicos en conexión con una variedad de estructuras hidráulicas o ciertas partes de ellas como por ejemplo determinar la capacidad hidráulica, reducir las pérdidas de carga en entradas a canales o tuberías o en secciones de transición; desarrollar métodos eficaces de disipación de energía en la corriente, al pie de las presas de sobreflujo, reduciendo de ese modo la erosión del lecho de los cauces de ríos; determinar coeficientes de descarga para presas de sobreflujo; desarrollar el mejor diseño de vertederos de presas, de sifones y pozos y de estructuras de salida de los embalses; diseñar puertos, incluyendo determinar la mejor sección transversal, altura y ubicación de los rompeolas, así como la posición y ubicación de la entrada; diseñar esclusas, incluyendo los efectos sobre los barcos de las corrientes establecidas debido al funcionamiento de las esclusas, etc.

Dichos modelos se plantearán cuando conduzcan a una solución más económica y segura o cuando sean imprescindibles. Se han visto casos en los cuales por no realizar un modelo, el prototipo - que es muy costoso comparándolo con el modelo - ha quedado inutilizado en un tiempo relativamente corto al no poder prever los fenómenos con anticipación y corregirlos de antemano. En este sentido, hay que tomar conciencia de la necesidad de hacer un modelo hidráulico cuando las circunstancias así lo ameriten.(Paz Herrera Alfredo, (2004))

1.3 Objetivos de la modelación hidráulica.

La modelación hidráulica es la reproducción, a escala reducida, de fenómenos, estados o procesos relevantes del flujo del agua. Las magnitudes físicas o hidrodinámicas en el "modelo hidráulico" deben corresponder a las magnitudes en la naturaleza, bajo determinadas leyes, que reciben el nombre de "escalas". La acertada la selección de las magnitudes más relevantes en la representación del fenómeno hidráulico analizado, permitirá una aplicación inmediata de los resultados en la solución de los problemas de saneamiento básico.

Un modelo hidráulico satisface los requerimientos de la similitud geométrica, de la similitud cinemática y, en último término, de la similitud dinámica. En la mayoría de los casos de la ingeniería hidráulica, no es factible económica ni técnicamente la similitud dinámica completa; sin embargo, es posible y científicamente justificable el utilizar los criterios de la similitud dinámica restringida. Esto significa, que el ingeniero debe seleccionar las fuerzas predominantes en determinado fenómeno hidráulico y garantizar, con el diseño y la operación en el modelo, que exclusivamente dichas fuerzas se encuentran simuladas en la escala correspondiente y en forma apropiada.

Es inevitable, sin embargo, la existencia de fenómenos de importancia secundaria que en el modelo no pueden ser simulados en forma exacta. Esta aparente limitación

en la técnica de la modelación hidráulica se conoce como “efectos de escala”, y marca diferencias entre los resultados del modelo con el comportamiento real en el prototipo. El análisis de los efectos de escala es de igual manera parte relevante de la preparación y de la operación de los ensayos experimentales en laboratorio.

De igual modo, en el caso de los modelos numéricos, el esquema de solución de las ecuaciones planteadas debe ser seleccionado cuidadosamente, considerando el grado de aproximación requerido en los valores experimentales y en las dificultades de estabilidad y convergencia del esquema, los mismos que dependen de los objetivos y del alcance del plan de cálculos y de la meta en la investigación. La comparación de los valores obtenidos por mediciones en la naturaleza, en ningún caso, conduce a una coincidencia absoluta con los valores numéricos obtenidos del modelo. Las hipótesis planteadas para la derivación del sistema de ecuaciones representan, así, los “efectos de escala” de la modelación numérica.(Marco & Ximena, (2005))

1.4 Clasificación general de los modelos físicos hidráulicos.

Modelo físico.

Es la simulación física de un fenómeno hidráulico, que ocurre en relación con una obra de ingeniería, en un sistema semejante simplificado que permite observarlo y controlarlo con facilidad, además confirmar la validez del diseño de la obra, optimizarla o tomar nota de los efectos colaterales, que deberán ser considerados durante la operación de la misma.(Paz Herrera Alfredo, (2004))

En la (tabla1) se sintetizan la clasificación con respecto a las características propias de los modelos físicos y sus definiciones.

Tabla 1. Clasificación de los modelos físicos.

Según las características propias de los modelos se pueden clasificar en:	**Modelos**	**Definición**
Clasificación respecto de la semejanza geométrica prototipo:	Modelos geométricamente Semejantes.	Son aquellos en los que se conserva la semejanza de todas las variantes geométricas. Existe un único factor de reducción o amplificación, llamado escala, de todas las magnitudes geométricas y las que se derivan de ellas, además de la igualdad de ángulos correspondiente entre el modelo y el prototipo.
	Modelos geométricamente Distorsionados.	Se conserva la semejanza con el prototipo, pero los factores a usar de reducción o ampliación son distintos para diferentes dimensiones del mismo. Es frecuente que las dimensiones horizontales tengan una escala o factor y las dimensiones verticales, otras. El uso de distorsiones resulta muchas veces, necesario cuando el factor único produce una reducción demasiado grande en las dimensiones verticales, lo cual originaría efectos significativos en fuerzas que en el modelo son despreciables o inexistentes en el prototipo.

Tabla 1. Clasificación de los modelos físicos. (Continuación)

Según las características propias de los modelos se pueden clasificar en:	**Modelos**	**Definición**
Clasificación respecto de la movilidad y deformabilidad del contorno:	Modelos de contorno fijo.	Hay casos en la que la deformabilidad del contorno no es relevante al fenómeno escrito, por tanto, puede representarse simplificamente en el modelo como si fuera fijo o indeformable. Los modelos de este tipo serían, por ejemplo, sistemas de presión, canales revestidos o cursos naturales donde el fondo no experimente muchos cambios.
	Modelos de contorno móvil.	Existen situaciones en que el modelo debe representar el contorno móvil en una forma fiel y confiable, ya que los fenómenos que ocurren, caso del escurrimiento vienen determinado por la movilidad y deformabilidad de la sección. Estos casos son frecuentes sobretodo en obras hidráulicas.

Por último un modelo físico es una representación a escala de un escenario con un flujo hidráulico según aparece en la figura 1. En la modelización, tanto las condiciones de contorno (lecho, paredes de un canal, una estructura hidráulica), como las condiciones de flujo aguas arriba y/o aguas abajo, así como el campo de velocidades debe escalarse de un modo adecuado.

Figura1. Modelo Físico.

Modelos analógicos.

Es la reproducción de un fenómeno en estudio de un prototipo en un sistema físico diferente al original, pero que aprovecha la similitud de las leyes matemáticas que gobiernan el fenómeno en ambos sistemas. Su uso es muy frecuente en la actualidad.(Paz Herrera Alfredo, (2004))

Es común que uno de los dos fenómenos sea de menor dificultad, por lo que éste se emplea para resolver el otro. Lo anterior ofrece una posibilidad de resolver problemas hidráulicos basándose en mediciones hechas sobre un fenómeno análogo, siendo los más comunes:

Analogía entre un flujo a través de medios permeables y flujo laminar en capas delgadas.

Analogía entre flujo laminar y flujo turbulento.

Analogía entre un flujo a través de medios permeables y la deformación de una placa elástica bajo carga.

Modelos matemáticos.

Son aquellos en la que se hace uso de las ecuaciones o expresiones matemáticas que definen de una manera simplificada el fenómeno en estudio que ocurre en el prototipo.

En la tabla 2 se resumen los tipos de modelos matemáticos y sus definiciones.

Tabla 2. Tipos de modelos matemáticos y sus definiciones.

Tipos de Modelos.	Definición.
Modelos determinísticos.	Los procesos físicos involucrados se expresan a través de relaciones funcionales determinísticas en los que no se considera la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.
Modelos estocásticos.	Los procesos físicos se representan haciendo uso de variables aleatorias, probabilísticas que involucran el fenómeno en estudio.
Modelos de simulación matemática.	Son modelos en los que se emplea, principalmente, ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales de borde, que son resueltos utilizando técnicas de análisis numérico, tales como métodos de diferencias finitas y elementos finitos.

Los métodos de diferencias finitas son capaces de simular algunos procesos que son imposibles de resolver con el simple cálculo. Ambos métodos resuelven las ecuaciones que tienen dominio continuo mediante la solución en número finito de puntos discretos en dicho dominio, llamados nodos.

El método de elementos finitos discretiza el área de estudio mediante una malla conformada por pequeños elementos que tienen formas triangulares o cuadrangulares. Los vértices de estos elementos representan los nodos de la malla en los cuales se busca encontrar el valor de la variable incógnita, ya sea el nivel de agua o velocidad. Estos elementos locales son ensamblados mediante los procedimientos de álgebra lineal en matrices globales, en los cuales el vector solución representa las soluciones nodales. Este método es esencialmente útil y versátil para acomodar geometrías complejas, permitiendo acomodar el tamaño y forma de los elementos a las necesidades de modelación.

Algunas diferencias entre los modelos físicos y los modelos matemáticos vienen dadas principalmente por las limitaciones a la que se ven sometidas durante su ejecución, en las tablas siguientes se comparan las limitaciones existentes entre uno y otro tipo de modelo(tabla3, tabla4).

Tabla. 3- Principales limitaciones en los modelos físicos y matemáticos.

Modelos físicos.	**Modelos matemáticos.**
Tamaño del modelo (espacio en el laboratorio).	Capacidad de almacenamiento en la memoria del computador.
Caudal de bombeo.	Velocidad de cálculo.
Carga hidráulica (capacidad de bombeo).	Conjunto incompleto de ecuaciones.
Leyes de similitud.	Hipótesis de turbulencias.

Tabla. 4- Limitaciones prácticas en los modelos físicos y matemáticos.

Modelos físicos.	Modelos matemáticos.
Escala mínima del modelo (tensión superficial, viscosidad, rugosidad).	En ecuación de simplificación: - Exactitud de relaciones supuestas. - Disponibilidad de coeficientes.
Tamaño del modelo (límite superior).	Resolución espacio-tiempo (límite inferior).
Método de medida y recolección de datos.	Estabilidad numérica, convergencia del cálculo numérico.

La diferencia fundamental entre los dos tipos de modelación hidráulica radica justamente en esta exigencia sobre el grado de conocimiento o experiencia alrededor del fenómeno. En el caso de la modelación física es suficiente la identificación de fuerzas actuantes más relevantes y de aquí la formulación de los parámetros y del criterio de similitud dinámica restringida.(Paz Herrera Alfredo, (2004))

1.5 Ventajas de la Modelación Física y Matemática.

Teniendo en cuenta lo expresado en el epígrafe anterior donde este abordo lo relacionado con la clasificación de los modelos físicos, las principales limitaciones de los modelos físicos y matemáticos, y sus diferencias entre ellos, representamos en la siguiente tabla 5 las ventajas de la modelación física y matemática, en lo general las más importantes.(Semanate Sigcha Gustavo, (2014))

Tabla 5. Ventajas de la Modelación Física y Matemática.

Ventajas de la Modelación Física.	Ventajas de la Modelación Matemática.
1. No estar limitados por la potencia de cálculo. 2. Mejor aproximación al proceso físico, al no tener que emplear métodos numéricos para resolver las ecuaciones que rigen el problema. 3. Una inmediata interacción con el modelo que facilita la búsqueda de mejoras hidráulicas y además permite visualizar e interpretar fenómenos hidráulicos de gran complejidad. 4. Han constituido una gran ventaja en la historia de las grandes estructuras de puentes, edificios, presas, etc., puesto que mejorar el diseño en un modelo físico a escala es más económico que realizarlo a una estructura de gran tamaño. 5. Ayudan en el proceso de innovación ya que permite al experimentador observar, analizar y modificar la estructura a través del modelo. 6. Permiten modificar de una manera rápida y técnica los miembros de una estructura, de tal manera que los esfuerzos en diferentes partes de la estructura modelo resista a las necesidades que presenta un determinado proyecto.	1. Reducción de tiempo y de costes de ejecución. 2. Permite abordar estudios con mayor generalidad que posibilitan acotar el estudio. 3. Genera, además, información para todo el dominio de cálculo. 4. También posibilita observar y analizar muchas variables del flujo como la velocidad, la presión, la disipación turbulenta y la vorticidad entre otras.

Concretando, los modelos matemáticos pueden ser sustituidos en cualquier tipo de obra hidráulica, sino por el contrario, pueden complementarse aprovechando la potencialidad que cada uno posee.

1.6 Evolución de la modelación física en la Ingeniería Hidráulica.

En cualquier caso, la evolución de las dos herramientas mencionadas (modelación física y numérica) siguió, inicialmente, caminos paralelos con escasos puntos en común, dando lugar a dos cuerpos de doctrina diferenciados a los que alternativamente se acudía, según el caso. Sin embargo, desde la década de los 80 ó 90 del siglo pasado, dichos caminos de aplicación práctica comenzaron a converger entre sí debido a la reconsideración de un conjunto de conceptos (la física del problema, el campo de aplicación de las leyes de semejanza, etc.)

Y es aquí donde la modelación tiene un importante papel, puesto que el desfase entre la naturaleza tridimensional del problema real y la caracterización uni o bidimensional del análisis numérico se puede cubrir, y de hecho ya es una realidad en el campo que nos ocupa, mediante un análisis cíclico interactivo entre la modelación matemática y la modelación física. Así pues, ante un problema hidráulico complejo (como son las interacciones suelo – agua – estructuras, de manera inevitablemente tridimensional y turbulento), la técnica de la modelación matemática en la actualidad dispone de las herramientas suficientes para simular su comportamiento con un grado de aproximación suficiente, si bien sigue siendo incapaz de reproducir los efectos tridimensionales de las condiciones de contorno locales complejas.(L Balairón & López, (2014))

Esta modelación físico matemática en la hidráulica se ve potenciada en los últimos años de manera muy intensa con trabajos de calibración y toma de datos de forma directa y muy intensiva directamente en el prototipo en estudio en la naturaleza, lo que permite calibrar de manera más precisa que hace años los resultados de los

modelos físicos o matemáticos con la realidad simulada. Esto es posible en buena medida gracias al abaratamiento y simplificación de las técnicas de instrumentación, toma de datos y posterior tratamiento y almacenamiento de la información registrada, lo que facilita enormemente el uso de los modelos físicos o numéricos en el campo de la ingeniería del agua, abriendo un camino imparable en el futuro.

Lógicamente, en la medida que avanza la calibración de los modelos numéricos y aumentan las capacidades de cálculo, irá aumentando su campo de aplicación. En cualquier caso la modelación física sigue siendo imprescindible para seguir profundizando en el conocimiento de fenómenos tan complejos como los flujos bifásicos emulsionados (aire-agua) y la física del transporte de sedimentos.(L Balairón & López, (2014))

1.7 Bases de cálculo para la modelación hidráulica.

Leyes y Teorías fundamentales de los modelos hidráulicos a escala reducida.

Teorema de Buckingham o Teorema π:

El primer paso que se debe aplicar en este teorema es el de identificar las variables que se consideran relevantes en un proceso y con ellas construir una matriz identificando las dimensiones del problema. A partir de esta matriz se deben construir los grupos adimensionales en los que pueden combinarse las variables. Para ello debe aplicarse el teorema π que expresa lo siguiente:

El número de grupos (o números) adimensionalmente independientes que pueden utilizarse para describir un fenómeno físico en el que intervienen n variables es n-r, siendo r el número mínimo de dimensiones del sistema fundamental, y con las que se pueden representar todas las demás.(Álvarez Anta, (2008))

Problema Fundamental de la Hidráulica:

La ley general de la Hidráulica se plantea como una función de las siguientes variables: longitud L, velocidad v, fuerza F, densidad ρ, viscosidad μ, módulo de

compresibilidad *K*, coeficiente de tensión superficial σ, fuerza por unidad de masa *g*, tiempo *t*, rugosidad *d* ⇒ ψ (L, v, F, ρ, μ, K, σ, g, t, d).

La rugosidad es un parámetro de longitud en general, y no se incluyen parámetros termodinámicos (θ).

Estas variables pueden expresarse en función de las magnitudes fundamentales (M, L, T) de la siguiente forma:

	L	V	F	ρ	M	K	σ	g	t	d
M	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
L	1	1	1	-3	-1	-1	0	1	0	1
T	0	-1	-2	0	-1	-2	-2	-2	1	0

Aplicando el teorema π antes explicado obtenemos *10-3 = 7* grupos adimensionales en Hidráulica, denominados números adimensionales.

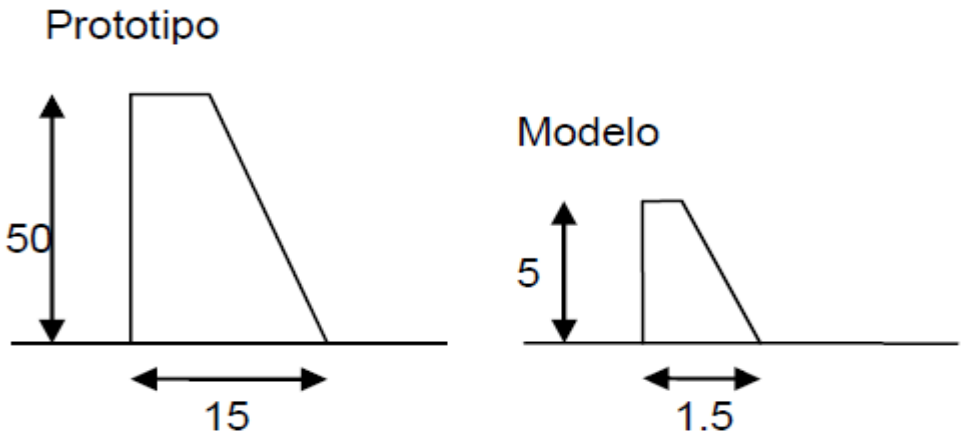
Criterios Básicos de Semejanza.

La teoría de la semejanza es una herramienta de análisis que orienta en la decisión de cómo construir o ensayar un modelo físico. Esta teoría pone en relación el modelo con el equivalente natural, prototipo, y analiza en qué sentido son semejantes.

En primer lugar se nos ocurriría pedir que el modelo fuese geométricamente similar al prototipo. Esta es la noción más elemental y es también la que exigiríamos a una maqueta de cualquier objeto para que ésta fuese realista.(Álvarez Anta, (2008))

Tipos de Semejanza:

Semejanza geométrica: Existe si las relaciones entre las magnitudes geométricas se mantienen constantes entre modelo y prototipo. Estas magnitudes son la longitud (L), el área (L^2) y el volumen (L^3).

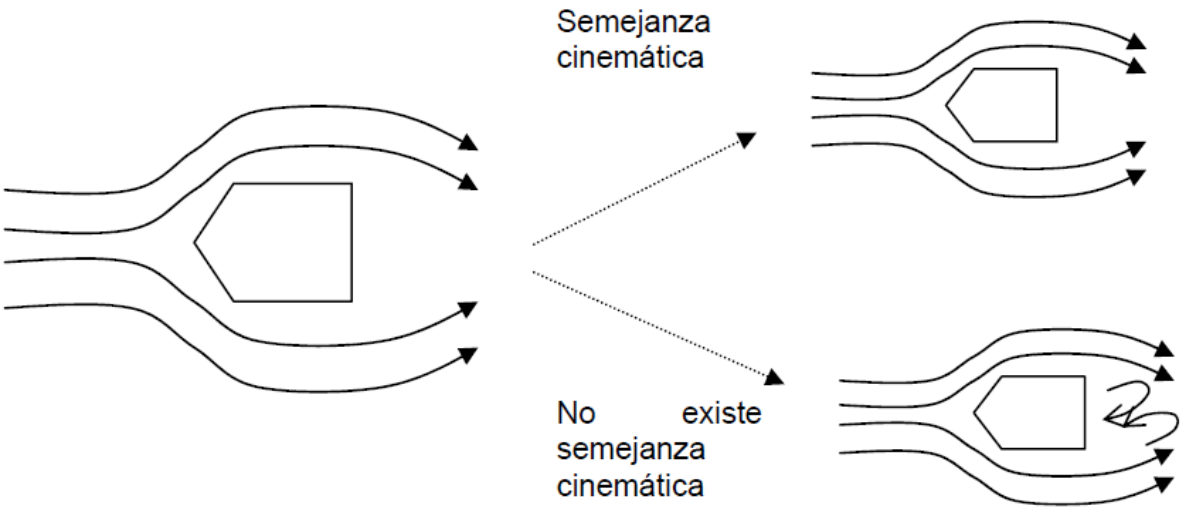


Entonces, la relación entre las longitudes características del modelo y el prototipo deben mantenerse constantes:

$$\lambda g = \frac{Lp}{Lm} = \frac{dp}{dm} = \frac{Hp}{Hm}$$

Donde los subíndices *p* y *m* hacen referencia a prototipo y modelo respectivamente, y λg es el coeficiente de semejanza geométrica.(Álvarez Anta, (2008))

Semejanza Cinemática: Existe si las líneas de corriente en modelo y prototipo son semejantes.



De este modo, el cociente entre las velocidades características entre modelo y prototipo deben mantenerse constantes:

$$\lambda c = \frac{Vp}{Vm} = \frac{up}{um} = \frac{vp}{vm} = \frac{wp}{wm}$$

Procedimientos para establecer los modelos hidráulicos a escala reducida.

Identificar todas las magnitudes físicas existentes en el modelo.

Elegir las magnitudes físicas más relevantes en función de aquellos aspectos que se quieren analizar en el modelo. Este paso requiere un profundo conocimiento del comportamiento físico. Habrá que pensar en las posibles restricciones del problema y la posibilidad, o no, de que pueda variar las diferentes magnitudes físicas de forma independiente.

Expresar las n magnitudes físicas del problema en función del conjunto de variables fundamentales ([M] [L] [T] [θ] ó { [F] [L] [T] [θ]), donde [M] es masa, [L] longitud, [T] tiempo, [θ] temperatura y [F] es fuerza.

Realizar una interpretación física del resultado.

Finalmente, comparar los resultados de los distintos ensayos.(Palacios García, (2013))

1.8 Ejemplos de modelos físicos en Estructuras Hidráulicas.

Presas

Las presas de tierras han sido las más utilizadas desde la antigüedad, además fueron construidas para el almacenamiento y abastecimiento de agua. En la actualidad se ha acudido en gran medida a la modelación física de las estructuras hidráulicas en presas de tierras, dentro de esta se realizan transformaciones en obras de presas de tierras real a un modelo de escala reducida, con el objetivo de disminuir el riesgo de diseñar una obra poco resistente que colapse fácilmente con las consecuentes pérdidas económicas. A continuación pueden ver ejemplos prácticos de presas y sus modelos, en las siguientes figuras (4, 5, 6, 7, 8) diseñados por la Red de Laboratorio de Hidráulica de España.(Pérez Balairón & Gómez, (2016))

Figura 4. Presa de El Villar, Canal de Isabel

Figura 5. Presa de Entrepeñas.

Figura 6. Presa de Entrepeñas.

Figura 7. Presa de La Tajera, CH Tajo.

Figura 8. Presa de La Tajera.

Aliviaderos

Constituyen una tecnología que en los últimos años está siendo objeto de numerosos estudios mediante modelación física y numérica en muchas partes del mundo, buscando mejorar los criterios de diseño de estas estructuras en particular los aliviaderos, ante el claro interés que se percibe que tendrán en un futuro inmediato, con el objetivo de reducir la posibilidad de un diseño sobredimensionado que requiera de inversiones innecesarias. Acerca de estos estudios tenemos varios ejemplos de modelos físicos de aliviaderos, en las siguientes figuras (9-10) realizados por el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos.(Pérez Balairón & Gómez, (2016))

Figura 9. Aliviaderos en Laberinto.

Figura 10. Aireación de Flujo en Aliviaderos.

Obra de Toma

Las obras de toma sirven para regular o dar salida al agua almacenada en una presa. El término obra de toma es muy amplio y se utiliza para determinar diferentes obras en el campo de la hidráulica; dentro de este se encuentran obras realizadas mediante la modelación física. Por ejemplo; la Red de laboratorios de hidráulica de España realizo un modelo físico de la obra de toma CHE Ocaña II para ver cómo se comportan las variaciones de caudales o presiones en el modelo, representada en la siguiente figura.(Pérez Balairón & Gómez, (2016))

Figura 11. CHE Ocaña II.

Conclusiones parciales:

En este capítulo se ha explicado de manera general la información necesaria para darle solución al objetivo general de la tesis, donde se abordaron los siguientes temas como son; generalidades y conceptos, aplicación y aporte de los modelos hidráulicos, los objetivos de la modelación hidráulica, además la clasificación general de los modelos físicos hidráulicos (modelos físicos, analógicos y matemáticos), y las diferencias entre los modelos físicos y matemáticos. También tenemos las ventajas de la modelación física y matemática, la evolución de la modelación física en Ingeniería Hidráulica, los ejemplos de modelos físicos en Estructuras Hidráulicas, y por último las bases de cálculo para la modelación hidráulica, donde este tema hace referencia a las Leyes y Teorías fundamentales de los modelos hidráulicos a escala reducida dando paso a profundizar en el capítulo 2, en el cual se realizaran los cálculos para obtener el modelo.

CAPÍTULO 2: Obtención del Modelo físico para el conjunto hidráulico Palmarito.

INTRODUCCION

En este capítulo se propone la obtención del modelo físico para el conjunto hidráulico Palmarito mediante la aplicación de los conceptos y teorías explicadas en el capítulo 1. Se presentan los cálculos para definir las dimensiones del modelo físico de cada uno de los objetos de obras del conjunto hidráulico Palmarito, estos son: la cortina, el aliviadero y la obra de toma. Además se incluyen los croquis adoptados para el modelo físico en cada uno de estos objetos de obras del conjunto.

2.1 Cálculos para la obtención del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito.

Selección del modelo y escala de traslación.

Uno de los puntos más importantes a la hora de realizar un modelo físico reside en la escala que se debe proponer para el estudio del mismo. A escalas grandes (1:20) el modelo resulta ser muy parecido a la realidad pero también el costo es elevado y en cambio a escalas pequeñas (1:100) comienzan a generarse efectos de escala que introducen errores a la hora de analizar los resultados, pero lo más importante es que a estas escalas las magnitudes a medir pueden ser en exceso pequeñas y resulten imposibles de medir.(Paz Herrera Alfredo, (2004))

En la siguiente tabla 6 se presentan los parámetros característicos de la obra y el embalse del conjunto hidráulico Palmarito.

Tabla 6. Parámetros característicos de la obra y el embalse de Palmarito.

N	Denominación	UM	Cantidad
1	Nivel de Aguas Normales N.A.N	m	109.6
2	Nivel de Aguas Máximas N.A.M	m	110.0
3	Nivel de Volumen Muerto N.V.M	m	103.0
4	Área del Embalse	km^2	11.7
5	Volumen Total del Embalse	$10^6 m^3$	80.0
6	Volumen Útil	$10^6 m^3$	55.0
7	Volumen Muerto	$10^6 m^3$	25.0
8	Escurrimiento Medio Hiperanual	$10^6 m^3$	49.3
9	Gasto de Avenida del 0,5%	m^3/s	1650.0
10	Volumen de Avenida del 0,5%	hm^3	43.9
11	Gasto de Vertimiento para 0,5%	m^3/s	1350.0
12	Gasto de la Toma de Agua	m^3/s	7.0
13	Área de la Cuenca	km^2	154.0
14	Área que Beneficia	ha	1610.0
15	Coeficiente de Regulación		0.91
16	Volumen de Entrega	$10^6 m^3$	
17	Cota de Corona	m	112.1
18	Longitud de la Corona	m	2422.0
19	Altura Máxima	m	29.4
20	Terraplén de Arcilla	$10^3 m^3$	858.5
21	Terraplén de Rocoso	$10^3 m^3$	1213.7
22	Excavación	$10^3 m^3$	533.6
23	Filtros	$10^3 m^3$	47.4
24	Rajón de Volteo	$10^3 m^3$	67.5
25	Hormigón	$10^3 m^3$	9.12
26	Costo de la Obra	$10^6 m^3$	8.18

La relación de escala modelo prototipo determinada como más factible para el estudio del conjunto hidráulico Palmarito fue de 1:50.

En el capítulo anterior se abordo acerca de los tipos de semejanza, en el cual la semejanza geométrica explica que la propiedad característica de los sistemas geométricamente similares, ya sea figuras planas, cuerpos sólidos o modelos de flujo, es que la relación de cualquier longitud en el modelo con respecto a la longitud correspondiente en el prototipo, es en todas partes igual. Esta relación se conoce como **factor de escala** y puede expresarse de la siguiente forma:

$$Lr = \frac{Lp}{Lm} \qquad \text{Ecuación 1.1}$$

Siendo Lm y Lp dimensiones lineales correspondientes en modelo y prototipo, respectivamente y Lr factor de escalas. Entonces:

Relación de áreas:

$$Ar = \left(\frac{Lp}{Lm}\right)^2 = Lr^2 \qquad \text{Ecuación 1.2}$$

Relación de volúmenes:

$$Vr = \left(\frac{Lp}{Lm}\right)^3 = Lr^3 \qquad \text{Ecuación 1.3}$$

Relación de peso:

$$Wr = \frac{Wp}{Wm} = Lr^4 \qquad \text{Ecuación 1.4}$$

Relación de tiempo:

$$Tr = \frac{Tp}{Tm} = Lr^{1/2} \qquad \text{Ecuación 1.5}$$

Relación de velocidad:

$$Vr = \frac{Vp}{Vm} = Lr^{1/2} \qquad \text{Ecuación 1.6}$$

Relación de caudal:

$$Qr = \frac{Qp}{Qm} = Lr^{5/2} \qquad \text{Ecuación 1.7}$$

Relación de energía:

$$Er = \frac{Ep}{Em} = Lr^{4} \qquad \text{Ecuación 1.8}$$

Relación de potencia:

$$Pr = \frac{Pp}{Pm} = Lr^{1/2} \qquad \text{Ecuación 1.9}$$

Relación de rugosidad:

$$r_r = \frac{rp}{rm} = Lr^{1/6} \qquad \text{Ecuación 1.10}$$

Número de Reynolds:

$$Rer = \frac{Rep}{Rem} = Lr^{3/2} \qquad \text{Ecuación 1.11}$$

Basándome en las ecuaciones anteriores se determinaran las escalas de traslación de los parámetros generales del conjunto hidráulico Palmarito, y también la escala de relación modelo prototipo que se muestran en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Escala de Traslación.

Parámetro	Símbolo	Escala
Longitud, ancho, altura	L, B, H	$Lr = 50$
Área	A	$Lr^2 = 2500$
Volumen	V	$Lr^3 = 125000$
Tiempo	T	$Lr½ = 7.071$
Velocidad	V	$Lr½ = 7.071$
Caudal	Q	$Lr^{5/2} = 17677.67$
Coeficiente de rugosidad	η	$Lr⅙ = 1.9194$
Número de Reynolds	Re	$Lr^{3/2} = 353.55$

Tabla 8. Escala de relación modelo prototipo.

Parámetro	Relación escala		Magnitudes	
	Escala	**Relación numérica**	**Prototipo**	**Modelo**
Longitud	Lr	50	50m	1m
Área	Lr^2	2500	11700000m²	4680m²
Descarga	$Lr^{5/2}$	17677.67	1350m³/s	76.38l/s

Como resultado de escoger una escala 1:50 entre el prototipo y el modelo, todas las dimensiones en el modelo superan los 10 cm.

Cortina:

Según la ley de semejanza geométrica, las escalas de traslación de los valores del modelo a los valores del prototipo se muestran en la tabla 9:

Tabla 9

Parámetros	Prototipo	Modelo
Altura de la cortina	28,8m	57,6cm
Ancho de la corona	6m	12cm
Berma del talud aa y aab	4m	8cm
Largo de la cortina	202,16m	404,32cm
Berma del talud aguas abajo	10m	20cm
Berma del talud aguas arriba	12m	24cm

A continuación se presentan los croquis del prototipo y el modelo físico de la cortina de la Presa.

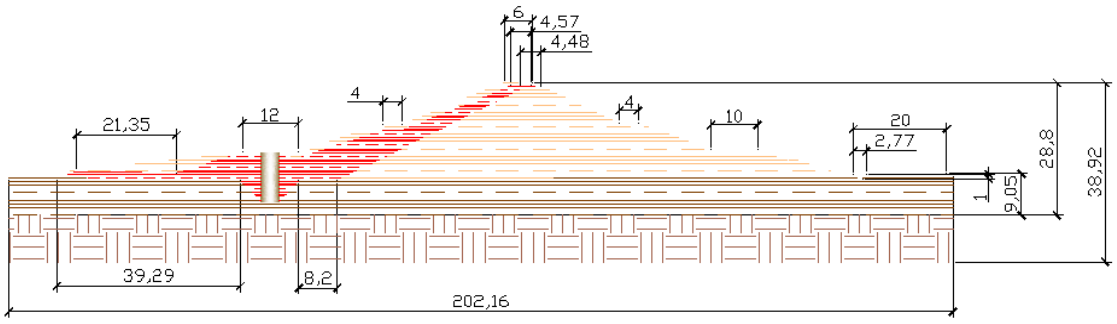


Figura 12. Croquis del Prototipo a escala 1:500, todas las dimensiones están dadas en metros.

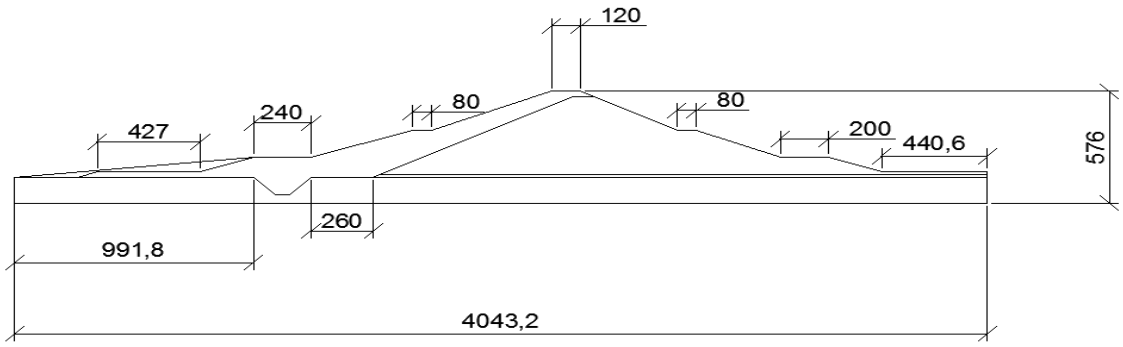


Figura 13. Croquis del Modelo Físico a escala 1:50, todas las dimensiones están dadas en milímetros.

Aliviadero

Sección en el canal de salida.

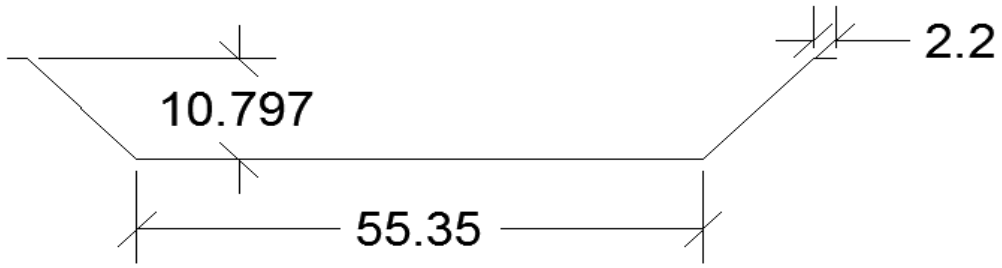


Figura 14. Croquis del Prototipo a escala 1:200, todas las dimensiones están dadas en metros.

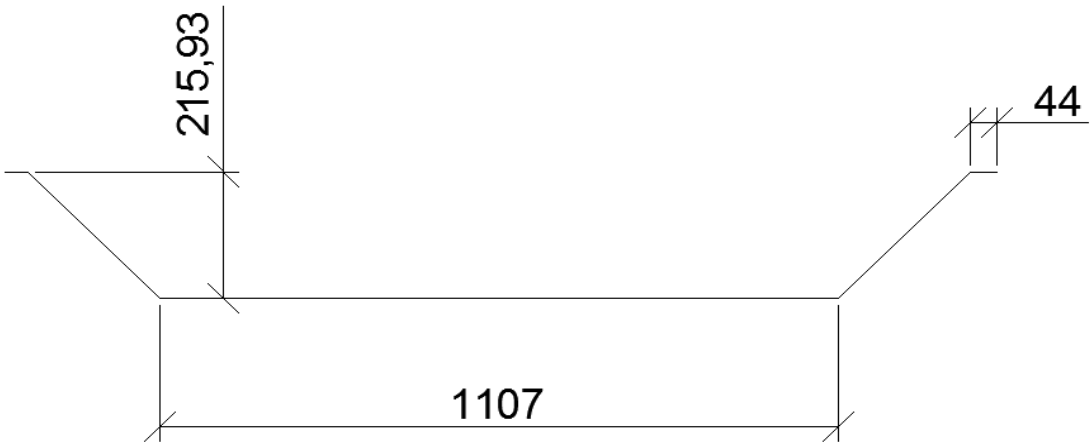


Figura 15. Croquis del Modelo Físico a escala 1:50, todas las dimensiones están dadas en milímetros.

Conceptualización para el Proyecto del Polígono de Modelos Físicos en la Facultad de Construcciones.

Planta General

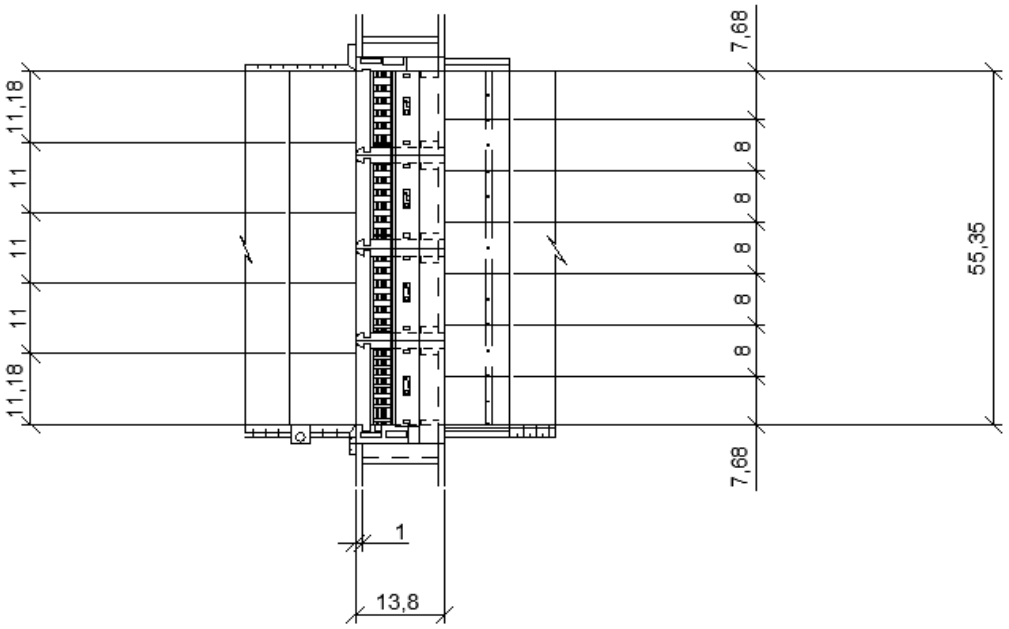


Figura 16. Croquis del Prototipo a escala 1:200, todas las dimensiones están dadas en metros.

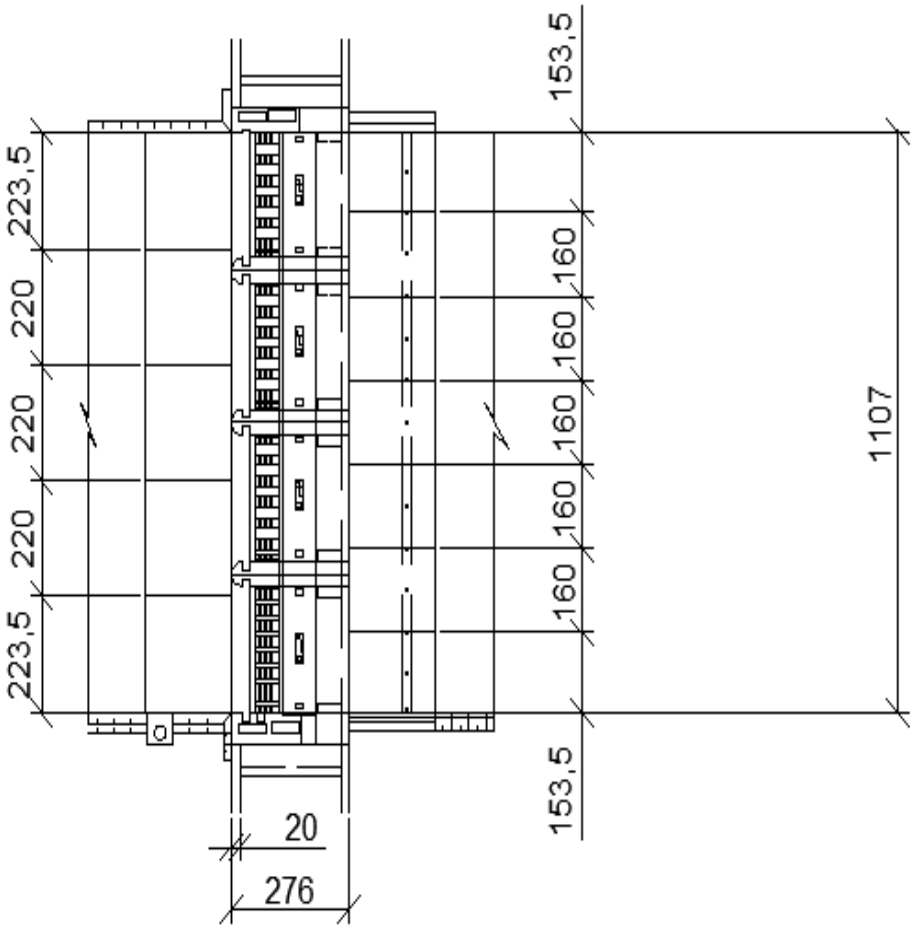


Figura 17. Croquis del Modelo Físico a escala 1:50, todas las dimensiones están dadas en milímetros.

Cimacio.

En este caso la escala del modelo físico coincide con la escala del prototipo.

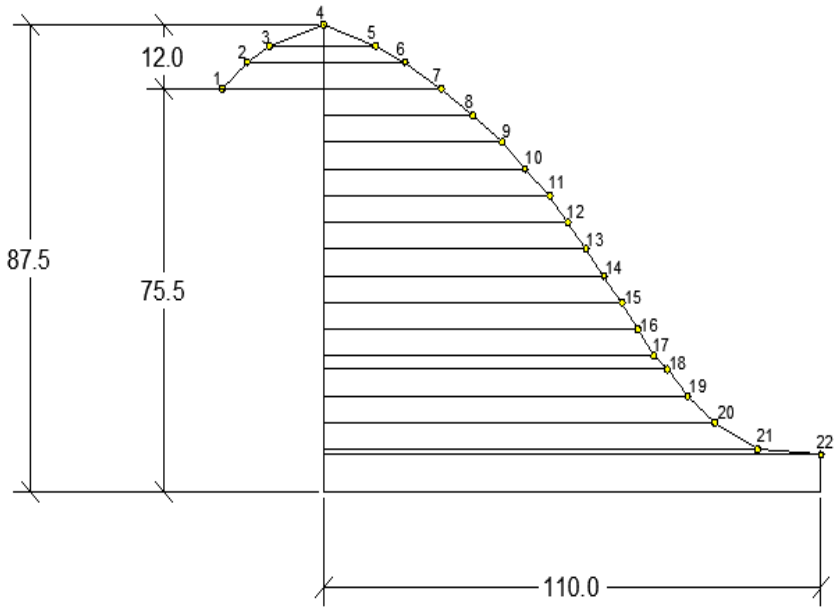


Figura 18. Croquis del Modelo Físico a escala 1:50, todas las dimensiones están dadas en milímetros.

En la siguiente tabla 10 se mostraran los valores de las coordenadas (x; y) de cada punto de la curva del cimacio.

Tabla 10. Representación de las coordenadas de cada punto.

Puntos	Coordenadas (x)	Coordenadas (y)
1	-22.5	75.5
2	-17	80.5
3	-12	83.5
4	0	87.5
5	11.5	83.5
6	18	80.5

Tabla 11. Representación de las coordenadas de cada punto. (Continuación)

Puntos	Coordenadas (x)	Coordenadas (y)
7	26	75.5
8	33	70.5
9	39.5	65.5
10	44.5	60.5
11	50	55.5
12	54	50.5
13	58	45.5
14	62	40.5
15	66	35.5
16	69.5	30.5
17	73	25.5
18	76	23
19	80.5	18
20	86.5	13
21	96	8
22	110	7

Plano General del Aliviadero.

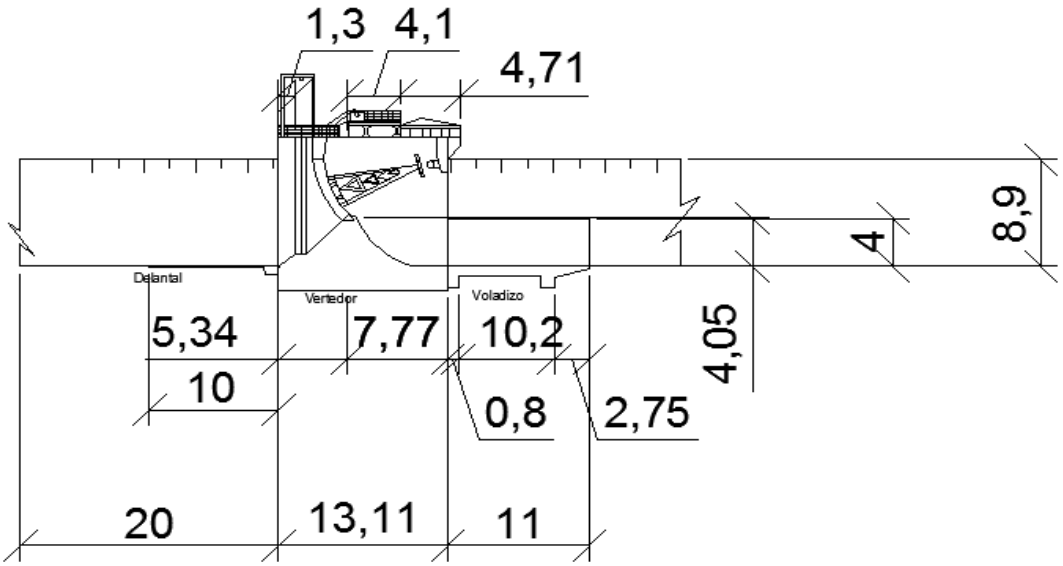


Figura 19. Croquis del Prototipo a escala 1:200, todas las dimensiones están dadas en metros.

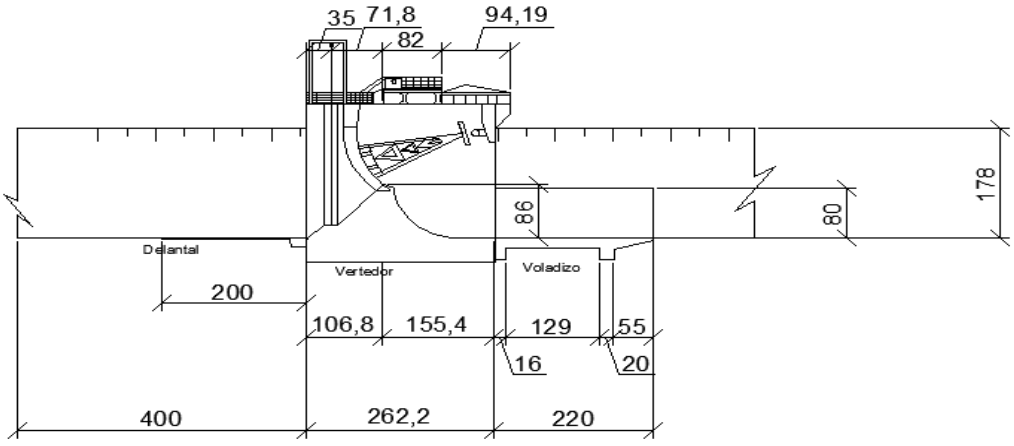


Figura 20. Croquis del Modelo Físico a escala 1:50, todas las dimensiones están dadas en milímetros.

Obra de Toma.

Apoyándome de la tabla 6, la obra de toma tiene un gasto de $7m^3/s$, y basándome en la ecuación 1.7 y la tabla 8 calcule el gasto para el modelo físico que es de 0.40l/s.

Galería.

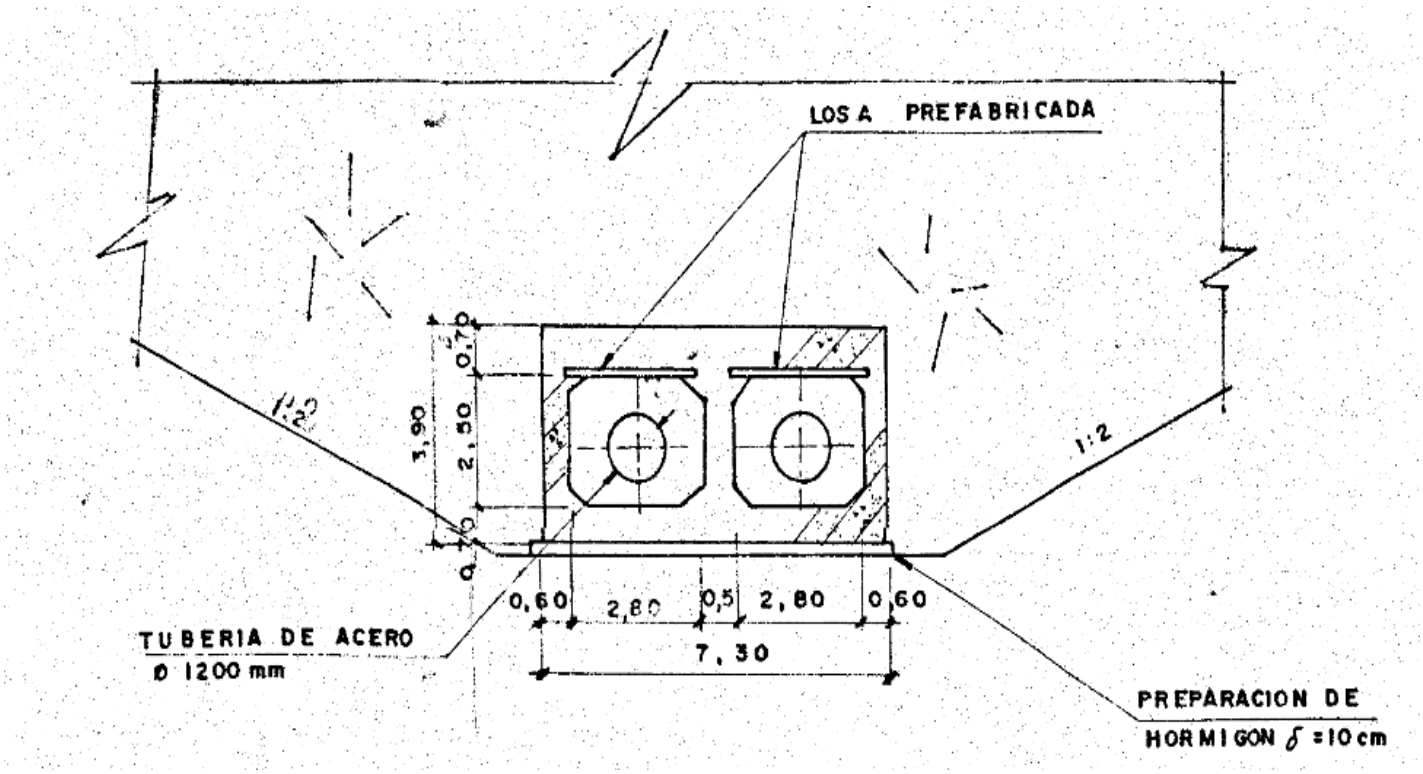


Figura 21. Croquis del Prototipo a escala 1:200, todas las dimensiones están dadas en metros.

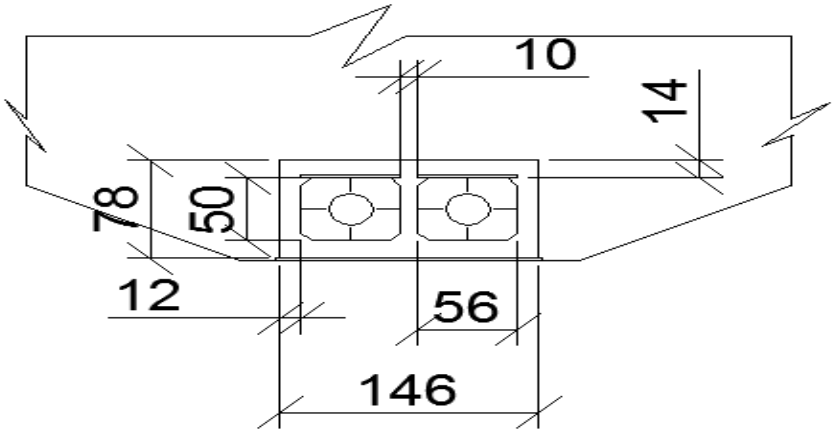


Figura 22. Croquis del Modelo Físico a escala 1:50, todas las dimensiones están dadas en milímetros.

Torre de Control.

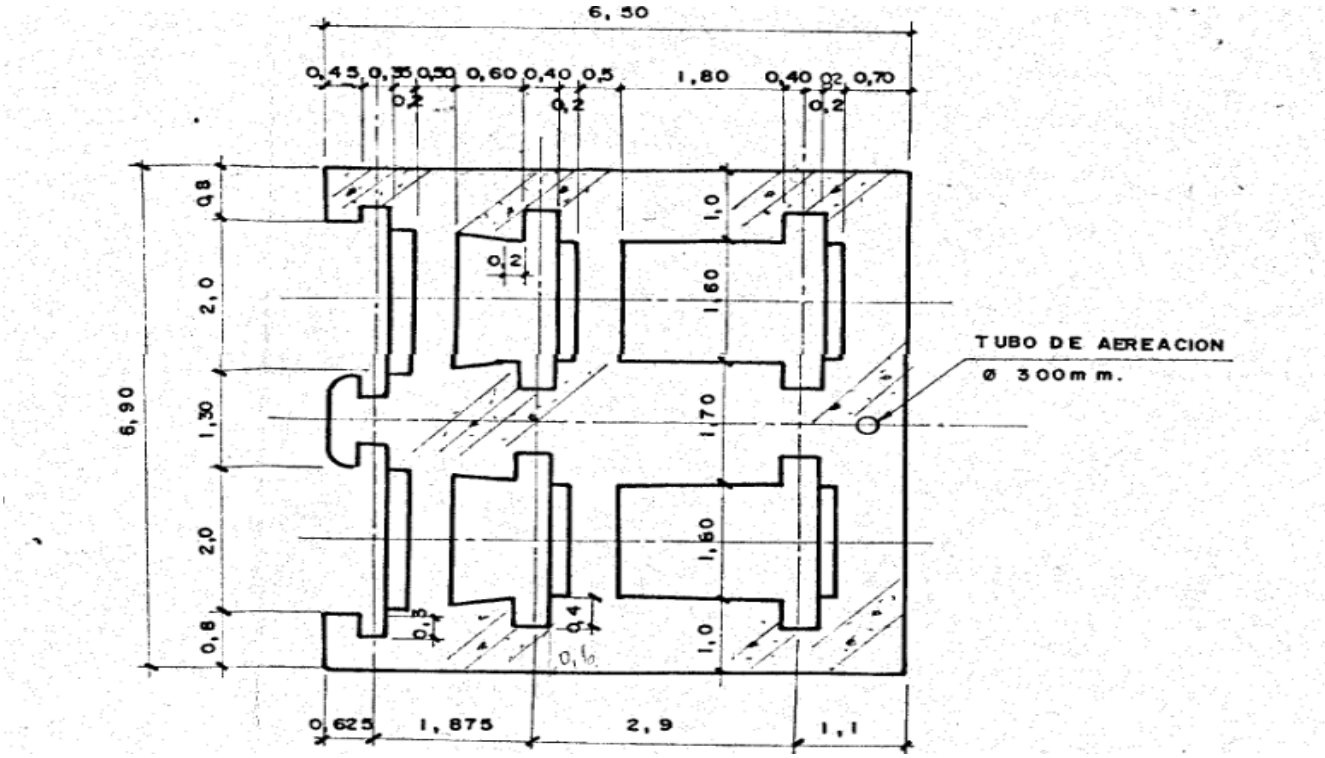


Figura 23. Croquis del Prototipo a escala 1:100, todas las dimensiones están dadas en metros.

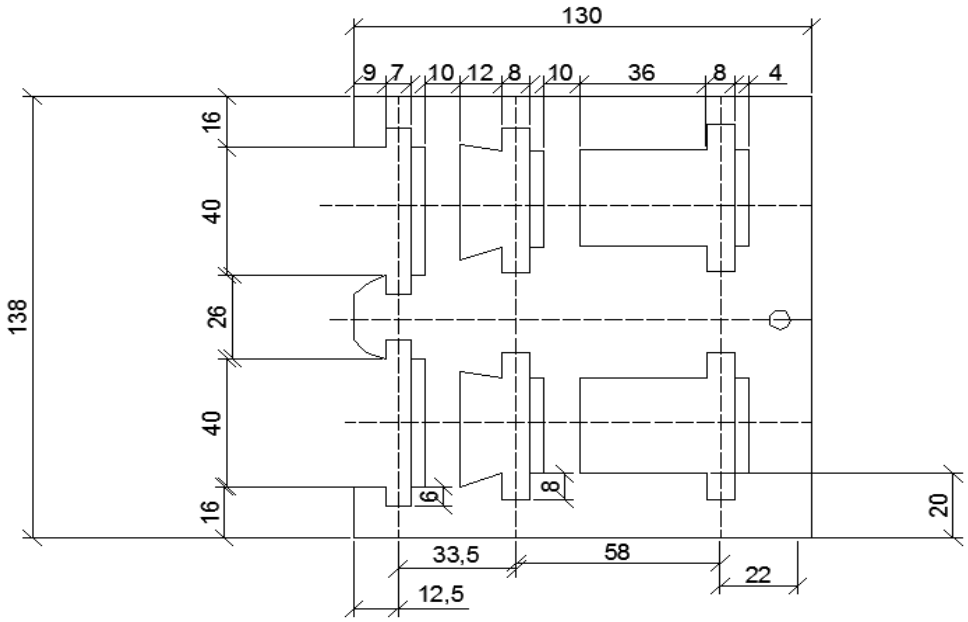


Figura 24. Croquis del Modelo Físico a escala 1:50, todas las dimensiones están dadas en milímetros.

Espejo de Agua.

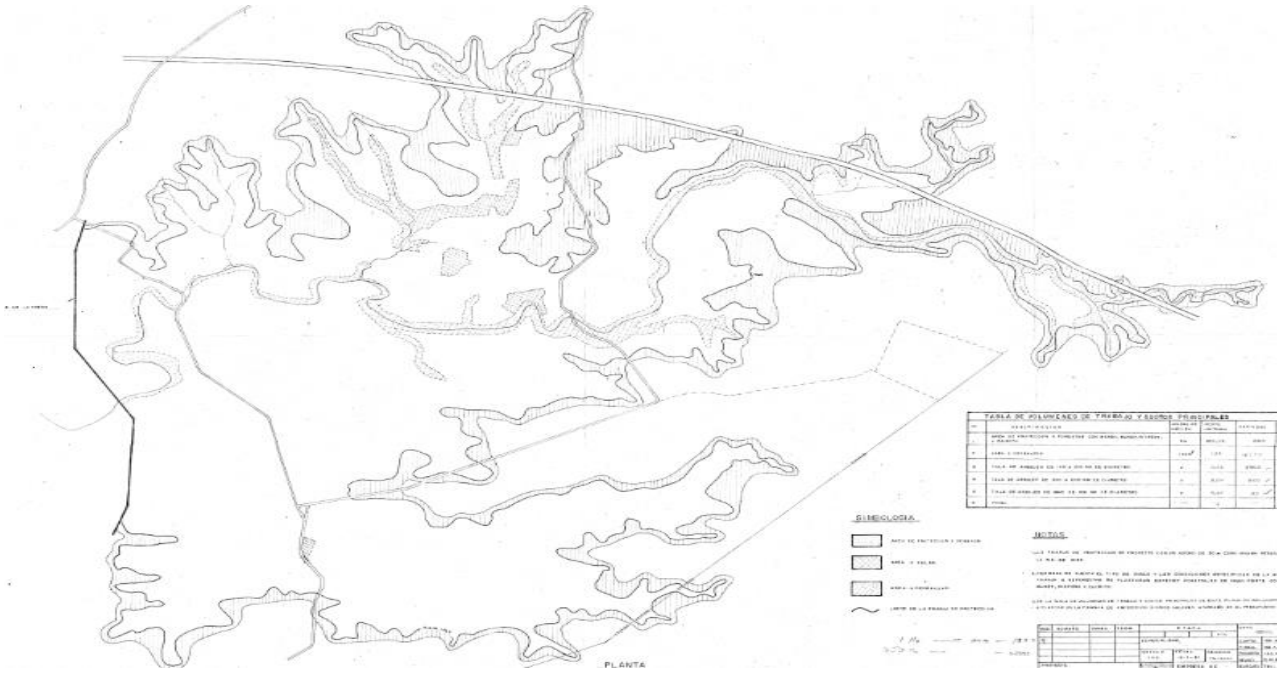


Figura 25. Croquis del Prototipo a escala 1:10000, todas las dimensiones están dadas en metros.

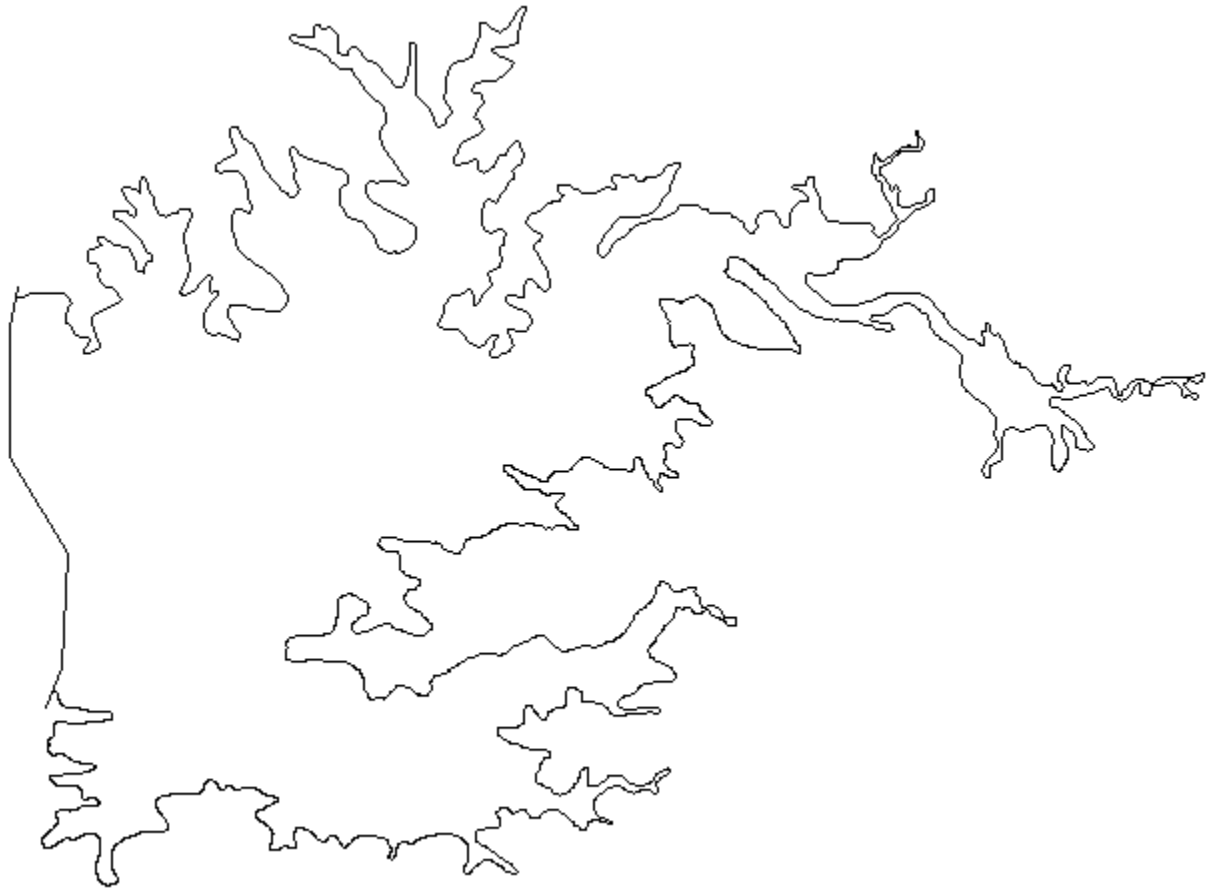


Figura 26. Croquis del Modelo Físico a escala 1:50, todas las dimensiones están dadas en milímetros.

Conclusiones parciales:

En el desarrollo de este capítulo 2 se da cumplimiento al segundo objetivo específico de la investigación, que es la obtención del modelo físico para el conjunto hidráulico Palmarito, donde se calcularon todas las dimensiones, y también se representaron los croquis del prototipo y los croquis del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito basándome en los planos reales de la obra y en las ecuaciones dadas anteriormente en el capítulo que están relacionadas con el factor de escala.

CAPÍTULO 3: Determinación del presupuesto para la construcción del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito.

INTRODUCCION

En este capítulo se determinan los volúmenes de trabajo y el presupuesto necesarios para la construcción del modelo físico de la cortina, aliviadero y tomas de agua del conjunto hidráulico Palmarito, sobre la base de las dimensiones definidas en el capítulo anterior.

3.1 Determinación de los volúmenes de trabajo y presupuesto del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito.

Cortina

En la siguiente figura se representa la sección de la cortina, a partir de esta sección se calcularan los volúmenes de trabajo que aparecerán en la tabla 12 y además del cálculo del presupuesto de la misma sección donde se mostrará más adelante.

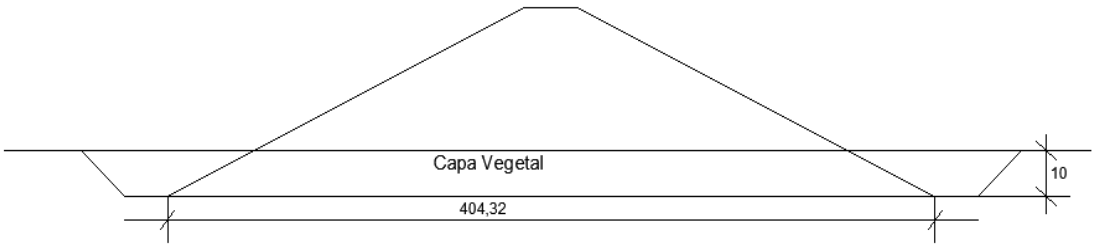


Figura 27. Sección de la cortina del modelo físico, las dimensiones están en centímetros.

Tabla 12. Cálculo del volumen de trabajo de la sección de la cortina.

Descripción	Área m²	Longitud m	Volumen m³
Volumen			
Cortina	0,654	0,4844	0,3167976
Capa Vejetal	0,42432	0,4844	0,20554061

Apoyándome en los datos de la Lista de Costos de Renglones Variantes del PreCons II que se muestran en las siguientes figuras, se harán los cálculos para el presupuesto de la sección de la cortina, en el cual aparecerá en la tabla 13.

Lista de Costos de Renglones Variantes. PreCons II

Código	Descripción	U.M	Costos Directos					Peso
			Total	Sin MAT	MAT	MO	EQ	Total (Kg)
012124	EN TIERRA DE MAS DE 20 M2 DE SECCION EN PLANTA, HTA 5 M DE PROFUNDIDAD (MECANIZADA)	m3	0.28	0.28	0.00	0.02	0.26	0.00
012125	EN TIERRA HASTA 4 M2 DE SECCION EN PLANTA HASTA 1.60 M. DE PROFUNDIDAD (MANUAL).-INCLUYE AGOTAMIENTO CON BOMBA DE 201-600 LT/MIN.	m3	33.74	33.74	0.00	12.48	21.26	0.00
012131	EN ROCA BLANDA DE 0 A 20 M2 DE SECCION HASTA 1.80 M PROFUNDIDAD CON COMPRESOR Y MARTILLO (CARGA MANUAL)	m3	15.22	15.22	0.00	3.06	12.16	0.00
012132	EN ROCA BLANDA, CUALQUIER SECCION EN PLANTA, HASTA 5 M DE PROFUNDIDAD (MECANIZADA)	m3	0.31	0.31	0.00	0.02	0.29	0.00
012133	EN ROCA BLANDA C/COMPRESOR Y MARTILLO CUALQUIER SECCION EN PLANTA, HASTA 5 M DE PROFUNDIDAD (CARGA MECANIZADA)	m3	12.69	12.69	0.00	0.04	12.65	0.00
012134	EN ROCA BLANDA C/COMPRESOR Y MARTILLO CUALQUIER SECCION EN PLANTA, HASTA 5 M PROF. (CARGA MANUAL).	m3	21.33	21.33	0.00	9.17	12.16	0.00

Figura 28. Listado de Costos.

012	*EXCAVACIONES*							
0121	*EN FOSOS*							
012111	EN FANGO HASTA 4.00 M2 DE SECCION EN PLANTA, HASTA 1.60 M DE PROFUNDIDAD (MANUAL)	m3	14.73	14.73	0.00	14.73	0.00	0.00
012112	EN FANGO HASTA 4.00 M2 SECCION EN PLANTA, HASTA 2.00 M DE PROFUNDIDAD (MECANIZADA)	m3	0.88	0.88	0.00	0.11	0.77	0.00
012113	EN FANGO DE 4 A 20 M2 DE SECCION EN PLANTA HASTA 5 M DE PROFUNDIDAD (MECANIZADA)	m3	0.58	0.58	0.00	0.05	0.53	0.00
012114	EN FANGO DE MAS DE 20 M2 DE SECCION EN PLANTA HASTA 5 M DE PROFUNDIDAD (MECANIZADA)	m3	0.40	0.40	0.00	0.03	0.37	0.00
012121	EN TIERRA HASTA 4 M2 DE SECCION EN PLANTA HASTA 1.60 M DE PROFUNDIDAD (MANUAL)	m3	9.75	9.75	0.00	9.75	0.00	0.00
012122	EN TIERRA HASTA 4 M2 DE SECCION EN PLANTA HASTA 2 M DE PROFUNDIDAD (MECANIZADA)	m3	0.48	0.48	0.00	0.06	0.42	0.00
012123	EN TIERRA DE 4 A 20 M2 DE SECCION EN PLANTA HASTA 5 M DE PROFUNDIDAD (MECANIZADA)	m3	0.39	0.39	0.00	0.03	0.36	0.00

Figura 29. Listados de Costos.

014	*REHINCHOS O RELLENOS*							
0141	*EN ZANJAS DE CONDUCTOS SOTERRADOS*							
014111	REHINCHO Y COMPACTACION MANUALES	m3	9.67	5.39	4.28	4.12	1.27	2002.00
014121	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO SOMETIDO A CARGA HTA 1 M DE ANCHO (MANUAL)	m3	8.59	4.31	4.28	2.84	1.47	2002.00
014122	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO SOMETIDO A CARGA HTA 3 M DE ANCHO (MECAN.)	m3	6.12	1.84	4.28	0.65	1.19	2002.00
014123	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO SOMETIDO A CARGA > 3 M DE ANCHO (MECANIZ.)	m3	6.21	1.93	4.28	0.10	1.83	2002.00
014131	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO NO SOMETIDO A CARGA *HTA 1 M ANCHO (MANUAL)*	m3	6.77	2.49	4.28	2.49	0.00	2002.00
014132	DESDE ALTURA MIN.DE PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO NO SOMETIDO A CARGA > 1.00 M DE ANCHO(MEC.)	m3	5.23	0.95	4.28	0.04	0.91	2002.00
0142	*EN CIMIENTOS*							
014211	COMPACTADOS MANUALMENTE	m3	10.61	6.33	4.28	5.05	1.28	2002.00
014212	COMPACTADOS MECANIZADAMENTE	m3	8.45	4.17	4.28	1.12	3.05	2002.00
014213	COMPACTADO MANUALMENTE .-INCLUYE AGOTAMIENTO CON BOMBA DE 201-600 LT./MIN.	m3	11.05	6.77	4.28	3.83	2.94	2002.00

Figura 30. Listado de Costos.

Tabla 13. Presupuesto de la sección transversal de la cortina.

Código	Descripción	u.m	Volumenes	Precio Unitario		Precio Total
	Costos de la Cortina					
	Movimiento de Tierra					
12221	Excavación Capa Vegetal	m^3	0,20554061	11,28		2,31849808
14111	Relleno Capa Vegetal	m^3	0,02422	9,67		0,2342074
14131	Relleno de la Cortina	m^3	0,3167976	6,77		2,14471975
					Σ	4,69742523

Aliviadero

En las figuras que se muestran a continuación se aprecia la sección del canal de salida y la sección del vertedor, de manera que se calcularan los volúmenes de trabajo de forma independiente; primero el canal de salida, y después el vertedor, que se mostrarán en las tablas 14 y 15.

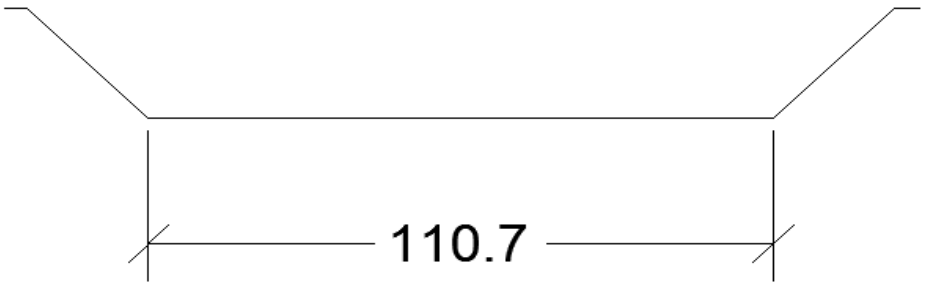


Figura 28. Sección del canal de salida del modelo físico, las dimensiones están en centímetros.

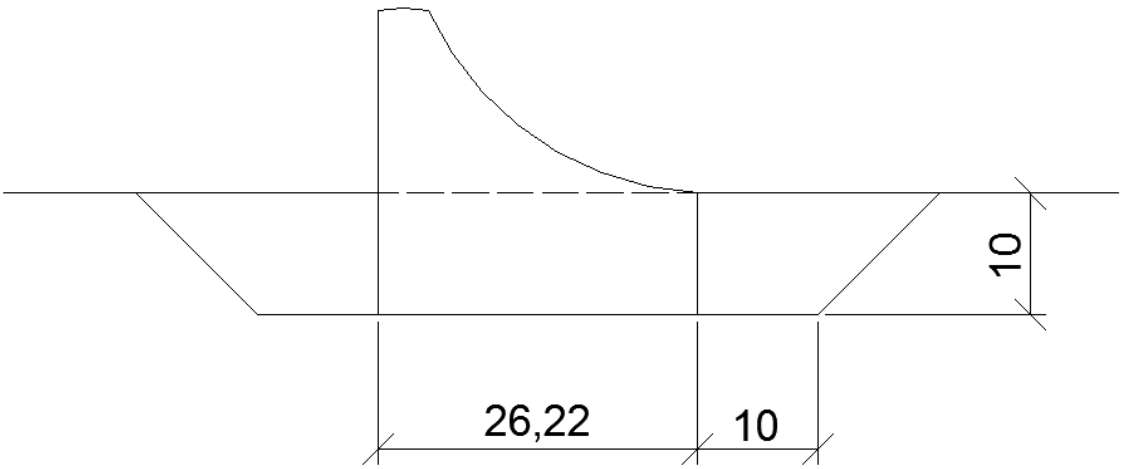


Figura 29. Sección del vertedor del modelo físico, las dimensiones están en centímetros.

Tabla 14. Cálculo de volumen de trabajo del Canal de Salida.

Descripción		Área m²	Longitud m	Volumen m³
Volumen				
Canal de Salida		0,285	20	5,7

Tabla 15. Cálculo de volumen de trabajo del Vertedor.

Descripción	Área m²	Longitud m	Volumen m³
Volumen			
Vertedor	0,05622	20	1,1244

Auxiliándome del libro Precons II, obtuve las Listas de Costos de Renglones Variantes, en la cual encontré los datos precisos para el cálculo del presupuesto del canal de salida

y el vertedor, donde a continuación se mostrarán las tablas de las Listas de Costos, y más adelante en la tabla 16 aparecerán los cálculos del presupuesto.

0126	*EN CANALES*							
012612	EN FANGO CON ANCHO DE PLATO HASTA 4.00 M	m3	1.05	1.05	0.00	0.05	1.00	0.00
012613	EN FANGO ANCHO PLATO HASTA 4.00 M SOBRE BALSA DE MADERA (MECANIZADA)	m3	0.90	0.90	0.00	0.08	0.82	0.00
012614	EN FANGO CON ANCHO DE PLATO DE MAS DE 4.00 M	m3	0.82	0.82	0.00	0.04	0.78	0.00
012624	EN TIERRA ANCHO PLATO HASTA 0.50 M Y PROFUNDIDAD VARIABLE	m3	0.76	0.76	0.00	0.04	0.72	0.00
012625	EN TIERRA CON ANCHO DE PLATO DE 0.51 HASTA 4.00 M	m3	0.74	0.74	0.00	0.04	0.70	0.00
012626	EN TIERRA CON ANCHO DE PLATO DE MAS DE 4.00 M	m3	1.24	1.24	0.00	0.02	1.22	0.00
012631	EN ROCA BLANDA CON ANCHO DE PLATO HASTA 0.50 M	m3	1.06	1.06	0.00	0.03	1.03	0.00
012632	EN ROCA BLANDA CON ANCHO DE PLATO DE 0.51 HASTA 4.00 M	m3	0.70	0.70	0.00	0.02	0.68	0.00
012633	EN ROCA BLANDA CON ANCHO DE PLATO DE MAS DE 4.00 M	m3	1.44	1.44	0.00	0.03	1.41	0.00
012635	EN ROCA BLANDA CON ANCHO DE PLATO DE MAS DE 4.0 M (CON RETROEXCAVADORA)	m3	0.81	0.81	0.00	0.03	0.78	0.00
012641	EN ROCA HASTA 1.80 M PROFUNDIDAD, MAS DE 4.0 M ANCHO CON DETONADOR ELECTRICO (CARGA MANUAL)	m3	8.72	6.81	1.91	4.60	2.21	1.56

Figura 30. Listados de Costos.

014	*REHINCHOS O RELLENOS*						
0141	*EN ZANJAS DE CONDUCTOS SOTERRADOS*						
014111	REHINCHO Y COMPACTACION MANUALES	m3	9.67	5.39	4.28	4.12	1.27	2002.00
014121	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO SOMETIDO A CARGA HTA 1 M DE ANCHO (MANUAL)	m3	8.59	4.31	4.28	2.84	1.47	2002.00
014122	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO SOMETIDO A CARGA HTA 3 M DE ANCHO (MECAN.)	m3	6.12	1.84	4.28	0.65	1.19	2002.00
014123	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO SOMETIDO A CARGA > 3 M DE ANCHO (MECANIZ.)	m3	6.21	1.93	4.28	0.10	1.83	2002.00
014131	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO NO SOMETIDO A CARGA *HTA 1 M ANCHO (MANUAL)*	m3	6.77	2.49	4.28	2.49	0.00	2002.00
014132	DESDE ALTURA MIN.DE PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO NO SOMETIDO A CARGA > 1.00 M DE ANCHO(MEC.)	m3	5.23	0.95	4.28	0.04	0.91	2002.00

Figura 31. Listados de Costos.

Tabla 16. Presupuesto de la sección transversal del canal de salida y del vertedor.

Código	Descripción	u.m	Volumenes	Precio Unitario		Precio Total
	Costos del Aliviadero					
	Movimiento de Tierra					
12625	Excavación Canal Salida	m^3	5,7	0,74		4,218
12624	Excavación del Vertedor	m^3	1,1244	0,76		0,854544
14111	Relleno del Vertedor	m^3	1,1244	9,67		10,872948
					Σ	15,945492

Toma de agua

Teniendo en cuenta los datos de la Lista de Costos de Renglones Variantes y las secciones transversales de la torre de control, y la galería, que aparecen más adelante, se harán los cálculos de volúmenes de trabajo y presupuestos; (ver las tablas 17, 18).

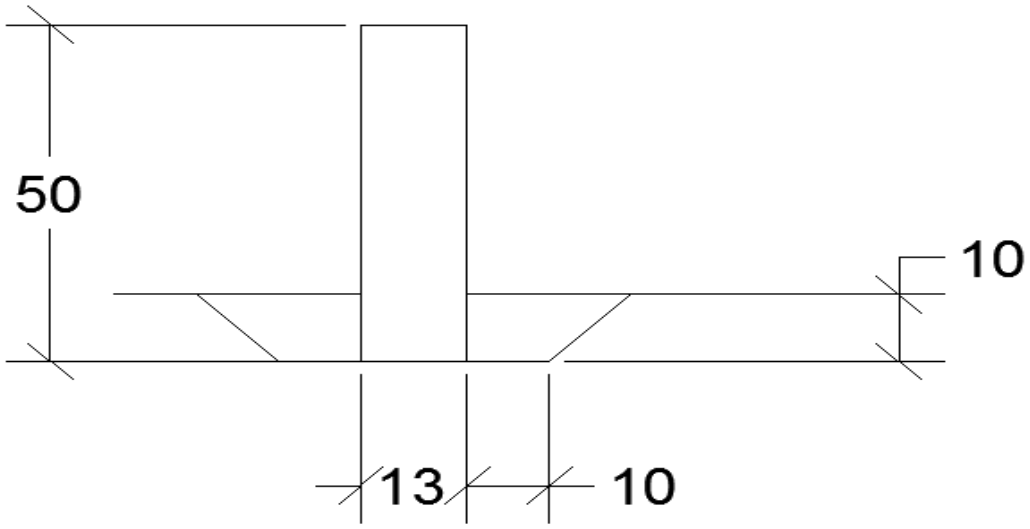


Figura 32. Sección transversal de la torre de control, las dimensiones están dadas en centímetros.

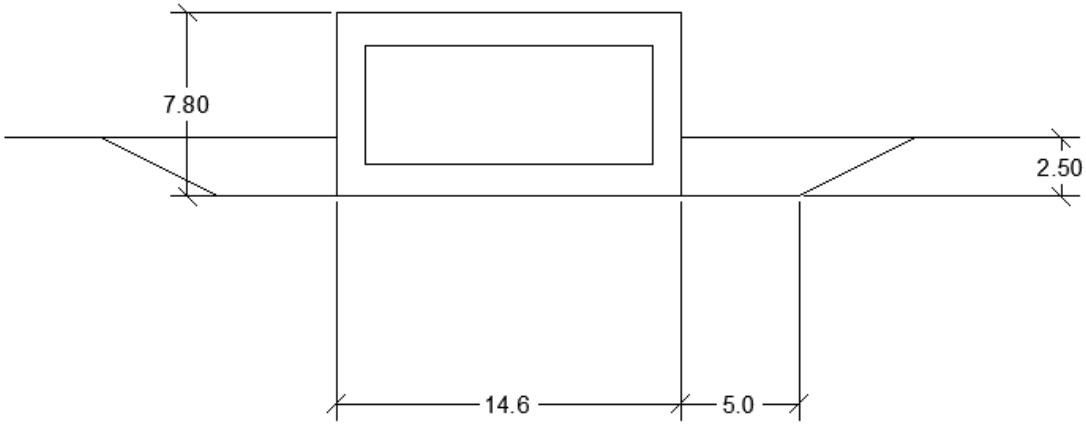


Figura 33. Sección transversal de la galería, las dimensiones están dadas en centímetros.

Lista de Costos de Renglones Variantes. PreCons II

Código	Descripción	UM	Costos Directos					Peso
			Total	Sin MAT	MAT	MO	EQ	Total (Kg)
012225	EN TIERRA HASTA 1.0 M DE PROF. Y 0.25 M DE ANCHO CON ZANJEADORA DE CADENA VERMER 8550 A	m	0.41	0.41	0.00	0.04	0.37	0.00
012231	EN ROCA BLANDA HTA 1.80 M DE PROFUNDIDAD CON COMPRESOR Y MARTILLO ROMPEDOR (CARGA MANUAL)	m3	20.56	20.56	0.00	8.40	12.16	0.00
012232	ROCA BLANDA HASTA 2.00 M PROFUNDIDAD MECANIZADA	m3	0.81	0.81	0.00	0.35	0.46	0.00
012233	EN ROCA BLANDA HASTA 5.00 M DE PROFUNDIDAD (MECANIZADA)	m3	0.31	0.31	0.00	0.02	0.29	0.00
012241	EN ROCA HASTA 1.80 M PROFUND HASTA 4.0 M DE ANCHO CON DETONADOR ELECTRICO (CARGA MANUAL)	m3	11.67	9.04	2.63	4.60	4.44	1.96
012242	EN ROCA HASTA 1.80 M DE PROF, HASTA 4.0 M ANCHO CON DETONADOR ELECTRICO (CARGA MECANIZADA)	m3	7.89	5.26	2.63	0.08	5.18	1.96
012243	EN ROCA MAS 1.80 M HASTA 5.0 M PROFUND, HASTA 4.0 M DE ANCHO CON DETONADOR ELECTRICO (CARGA MECANIZADA)	m3	6.65	4.49	2.16	0.08	4.41	1.44

Figura 34. Listado de Costos.

014	*REHINCHOS O RELLENOS*							
0141	*EN ZANJAS DE CONDUCTOS SOTERRADOS*							
014111	REHINCHO Y COMPACTACION MANUALES	m3	9.67	5.39	4.28	4.12	1.27	2002.00
014121	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO SOMETIDO A CARGA HTA 1 M DE ANCHO (MANUAL)	m3	8.59	4.31	4.28	2.84	1.47	2002.00
014122	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO SOMETIDO A CARGA HTA 3 M DE ANCHO (MECAN.)	m3	6.12	1.84	4.28	0.65	1.19	2002.00
014123	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO SOMETIDO A CARGA > 3 M DE ANCHO (MECANIZ.)	m3	6.21	1.93	4.28	0.10	1.83	2002.00
014131	DESDE ALTURA MINIMA PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO NO SOMETIDO A CARGA *HTA 1 M ANCHO (MANUAL)*	m3	6.77	2.49	4.28	2.49	0.00	2002.00
014132	DESDE ALTURA MIN.DE PROTECCION SOBRE CORONA HTA SUPERF. DEL TERRENO NO SOMETIDO A CARGA > 1.00 M DE ANCHO(MEC.)	m3	5.23	0.95	4.28	0.04	0.91	2002.00

Figura 35. Listado de Costos.

031	*MUROS Y TABIQUES*							
0311	*DE BLOQUES DE HORMIGON*							
031111	DE 0.20 M ESPESOR ASENTADOS CON MORTERO	m2	15.56	3.48	12.08	3.48	0.00	270.74
031112	DE 0.20 M ESPESOR VISTA 1 CARA ASENTADOS CON MORTERO	m2	17.37	5.29	12.08	5.29	0.00	270.74
031113	DE 0.20 M ESPESOR VISTA 2 CARA ASENTADOS CON MORTERO	m2	19.49	7.41	12.08	7.41	0.00	270.74
031121	DE 0.15 M ESPESOR ASENTADO CON MORTERO	m2	11.71	2.90	8.81	2.90	0.00	187.83
031122	DE 0.15 M ESPESOR VISTA 1 CARA ASENTADO CON MORTERO	m2	13.05	4.12	8.93	4.12	0.00	192.18
031123	DE 0.15 M ESPESOR VISTA 2 CARA ASENTADOS CON MORTERO	m2	14.63	5.70	8.93	5.70	0.00	192.18

Figura 36. Listado de Costos.

0427	*LOSAS PLANAS VERTIDO MANUALMENTE*							
042724	CON HORMIGON DE HASTA 200 KG/CM2	m3	5.30	5.30	0.00	4.44	0.86	0.00
042726	CON HORMIGON MAYOR DE 200 KG/CM2	m3	5.90	5.90	0.00	4.97	0.93	0.00
0428	*LOSAS PLANAS VERTIDO CON GRUA Y CUBO*							
042824	ALTURA <= 15 M CON CUALQUIER CALIDAD DE HORMIGON	m3	4.27	4.27	0.00	0.99	3.28	0.00
042834	ALTURA DE 15 -35 M CON CUALQUIER CALIDAD DE HORMIGON	m3	4.46	4.46	0.00	1.04	3.42	0.00

Figura 37. Listado de Costos.

Tabla 17. Cálculo del volumen de trabajo de la Toma de Agua.

Descripción	Área m²	Longitud m	Volumen m³
Volumen de la Toma Agua			
Torre de Control	0,065	0,5	0,0325
Capa Vejetal	0,03	20	0,6
Galería	0,0114	10	0,114
Capa Vejetal	0,0038	20	0,076

Tabla 18. Presupuesto de la Toma de Agua.

Código	Descripcion	u.m	Volumenes	Precio Unitario		Precio Total
	Costos de la Toma Agua					
	Movimiento de Tierra					
12225	Exc Capa Vegetal Torre	m	0,6	0,41		0,246
14111	Rell Capa Vegetal Torre	m³	0,6	9,67		5,802
31121	Muro de la Torre	m²	0,0325	11,71		0,380575
12225	Exc Capa Vegetal Galeria	m	0,076	0,41		0,03116
14111	Rell Capa Vegetal Galeria	m³	0,076	9,67		0,73492
42724	Losas Galeria	m³	0,114	5,3		0,6042
					Σ	7,798855

Conceptualización para el Proyecto del Polígono de Modelos Físicos en la Facultad de Construcciones.

Una vez efectuado los cálculos de volúmenes de trabajo del conjunto hidráulico Palmarito, se determinaran los cálculos de materiales de la construcción para este conjunto hidráulico, a través de la tabla 19 y 20 que se muestran más adelante.

Tabla 19. Valores para el cálculo de materiales de la construcción.

HORMIGON HECHO EN OBRA	CEMENTO				ADITIVO	ARENA	AGUA	PIEDRA		GRAVILLA	
	PP-250		P-350								
CALIDAD	TM	SC	TM	SC	LT	m^3	m^3	m^3	%	m^3	%
50 Kg/cm²	0,13	2,60	NOTA: GRAVILLA DE 5 -13 mm GRADO A DE 800 Kg/cm2 O MAS. ADITIVO PARA HORMIGON SUPERPLASTIFICANTE 5-13.			0,60	0,25	0,78	100,00	—	—
								0,52	60,00	0,35	40
							0,29	—	—	0,86	100
100 Kg/cm²	0,25	5,00				0,56	0,26	0,78	100,00	—	—
							0,27	0,49	60,00	0,33	40
	0,26	5,20				0,54	0,29	—	—	0,81	100
150 Kg/cm²	0,32	6,40					0,28	0,78	100,00	—	—
						0,53	0,29	0,47	60,00	0,31	40
							0,30	—	—	0,76	100
175 Kg/cm²	—		0,30	6,00	4,12	0,52	0,29	0,76	100,00	—	—
							0,36	0,47	60,00	0,31	40
						0,51	0,31	—	—	0,75	100
ARENA ARTIFICIAL GRADO A DE 800 Kg/cm² O MAS					PIEDRA DE HORMIGON DE 19-38 mm GRADO A DE 800 Kg/cm² O MAS						

Tabla 20. Valores para el cálculo de materiales de la construcción.

ENCOFRADO POR ELEMENTOS		MADERA		PUNTILLA		NOTAS
		PT	USOS	Kg	USOS	
CONTEN	SIMPLE	12,8	3	0,29	1	PUNTILLA DE HIERRO CON CABEZA 2 1/2" CALIBRE 12. MADERA PINO USTOSCO.
	INTEGRAL	14	3	0,32	1	
	INTEGRAL EN REVUELTA					
ESCALERAS		35	3	0,81	1	
VIGAS		40	3	0,92	1	
CERRAMENTOS		20	3	0,46	1	
COLUMNA	CUADRADA O RECTANGULAR	35	3	0,81	1	
	CIRCULARES O POLIGONALES	40	3	0,92	1	
MURO	RECTOS	26	3	0,6	1	
	CURVOS	30	3	0,69	1	
CONDUCTOS CUADRADOS O RECTANGULARES		20	3	0,46	1	

Como se puede observar en las tablas anteriores se mostraron los datos para el cálculo de materiales de la construcción, a partir de esas tablas se determinaran los materiales de la construcción para el conjunto hidráulico Palmarito que aparecerá en la tabla 21.

Tabla 21. Cálculo de los materiales de construcción para el conjunto hidráulico Palmarito.

Descripción		Hormigon hecho en obra de calidad 175 kg/cm²				Encofrado por elementos		Cálculos de los materiales para la construcción					
Aliviadero y Toma de Agua	Volumenes	Cemento SC	Arena m³	Agua m³	Gravilla m³	Madera PT	Puntilla Kg	Cant de SC	Cant arena	Cant agua	Cant gravilla	Cant madera	Cant puntilla
Base del Vertedor	0,0262	6	0,52	0,36	0,75	0	0	0,1572	0,013624	0,009432	0,01965	0	0
Torre de Control	0,0325	6	0,52	0,36	0,75	35	0,81	0,195	0,0169	0,0117	0,024375	1,1375	0,026325
Galeria	0,114	6	0,52	0,36	0,75	0	0	0,684	0,05928	0,04104	0,0855	0	0
							Σ	1,0362	0,089804	0,062172	0,129525		

Teniendo en cuenta los presupuestos de la cortina, el aliviadero, la toma de agua, y los cálculos de materiales de la construcción, se llegó a la conclusión de que el presupuesto total del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito es de 413 MN.

Conclusiones parciales:

En la realización de este capítulo se han abordado varios aspectos relacionados con la determinación del presupuesto del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito como son: el cálculo de volumen de trabajo y presupuesto de la cortina, aliviadero y toma de agua. También para la realización de estos cálculos me apoyé de las dimensiones de las secciones transversales de cada objeto de obra, y del Libro del Precons II.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como conclusiones de este trabajo se tienen:

A partir de la búsqueda bibliográfica se abordaron varios temas en relación a: la aplicación y aporte de los modelos hidráulicos, los objetivos de la modelación hidráulica, la clasificación general de los modelos físicos hidráulicos, las diferencias entre modelos físicos y matemáticos, las ventajas de la modelación física y matemática, los ejemplos de modelos físicos en Estructuras Hidráulicas y por último las bases de cálculo para la modelación hidráulica.

Mediante la obtención del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito, se calcularon las dimensiones y se representaron los croquis del prototipo y del modelo físico del conjunto Palmarito, basándome en los planos reales de la obra y en las ecuaciones del factor de escala.

En correspondencia, se determinó el cálculo de volumen de trabajo y presupuesto de la cortina, aliviadero, toma de agua y también el cálculo de los materiales para la construcción del modelo físico, con apoyo de las secciones transversales de cada objeto de obra, del Libro Precons II y las tablas para el cálculo de materiales de la construcción.

Además de lo planteado anteriormente podemos referir las siguientes recomendaciones:

Propuesta constructiva para la ejecución de la construcción del modelo físico del conjunto hidráulico Palmarito en los predios de la Facultad de Construcciones.

Después de construido el modelo físico del conjunto hidráulico Presa Palmarito en la Facultad de Construcciones se deben realizar varios experimentos de manera que

los estudiantes de la carrera de Ingeniería Hidráulica apliquen los conocimientos adquiridos en clase.

Bibliografía:

Álvarez Anta, J. ((2008)). Análisis Dimencional Y Semejanza. Desarrollo de Modelos a Escala., 1-19. www.ceres.udc.es

Felices Rocha, A. ((2003)). INVESTIGACIÓN EN MODELOS FÍSICOS Y MATEMÁTICOS DE OBRAS HIDRÁULICAS. 1-18. www.biblioteca.uns.edu.pe

Fernández Hernández, D. ((2008)). *Modelación estructural de edificios.* (5 año Trabajo de Diploma), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

L Balairón, & López, D. ((2014)). Avances en investigación aplicada mediante modelación física y numérica en el diseño de la ingeniería de presas., 55-69. www.oa.upm.es

Lozano Gutiérrez, Y. ((2016)). *Modelación númerica computacional del diseño de un vertedor de pared delgada de sección compuesta.* (5 año Trabajo de Diploma), Universidad Central " Marta Abreu" de Las Villas.

Marco, C., & Ximena, H. ((2005)). SOBRE LA MODELACIIÓN HIIDRÁULIICA EN OBRAS DE SANEAMIIENTO BÁSIICO. 1-22. www.bvsde.paho.org

Palacios García, J. ((2013)). E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos., 1-29. www.upc.edu

Paz Herrera Alfredo, A. ((2004)). *Investigación en modelo hidráulico de la represa de la hidroeléctrica Chimay.* (Trabajo de Diploma), UNIVERSIDAD DE PIURA.

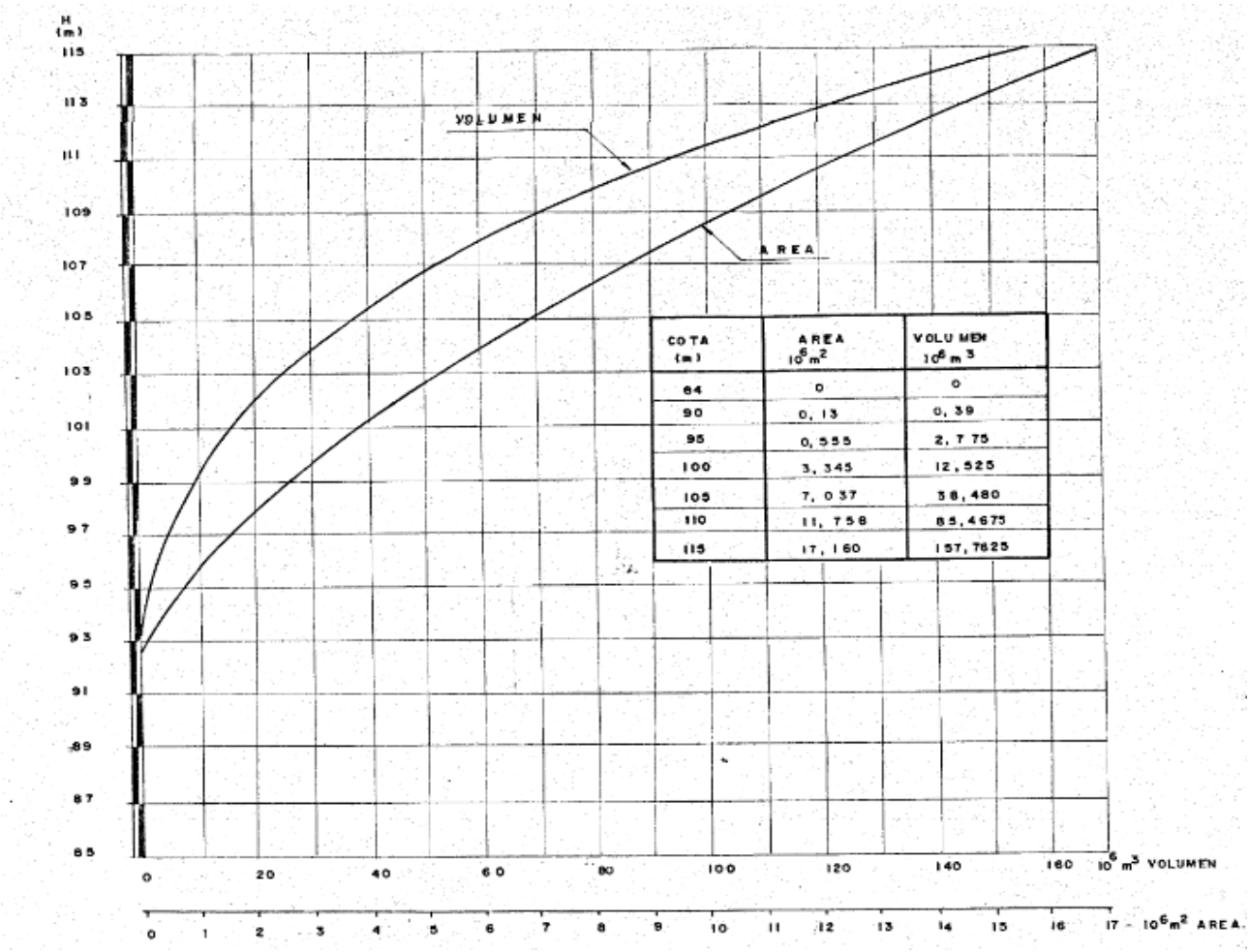
Pérez Balairón, J. L., & Gómez, L. D. ((2016)). ACTIVIDAD EXPERIMENTAL DE I+D+i EN INGENIERÍA HIDRÁULICA EN ESPAÑA., 1-69. www.lalibreria.upv.es

Semanate Sigcha Gustavo, B. ((2014)). *MÓDELOS FISICOS EXPERIMENTALES REDUCIDOS DE ESTRUCTURAS DE PUENTES DE ACERO.* (5to año Trabajo de Diploma), UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.

Serret, G. R. ((2012)). Los modelos físicos a Escala reducida y la simulación de maniobras de buques. 1-30. www.oas.org

ANEXOS

Anexo 1



COTA (m)	AREA $10^6 m^2$	VOLUMEN $10^6 m^3$
84	0	0
90	0, 13	0, 39
95	0, 555	2, 7 75
100	3, 345	12, 525
105	7, 0 37	38, 480
110	11, 7 58	85, 4675
115	17, 1 60	157, 7625

Figura 38. Curva de área y volumen de Palmarito.

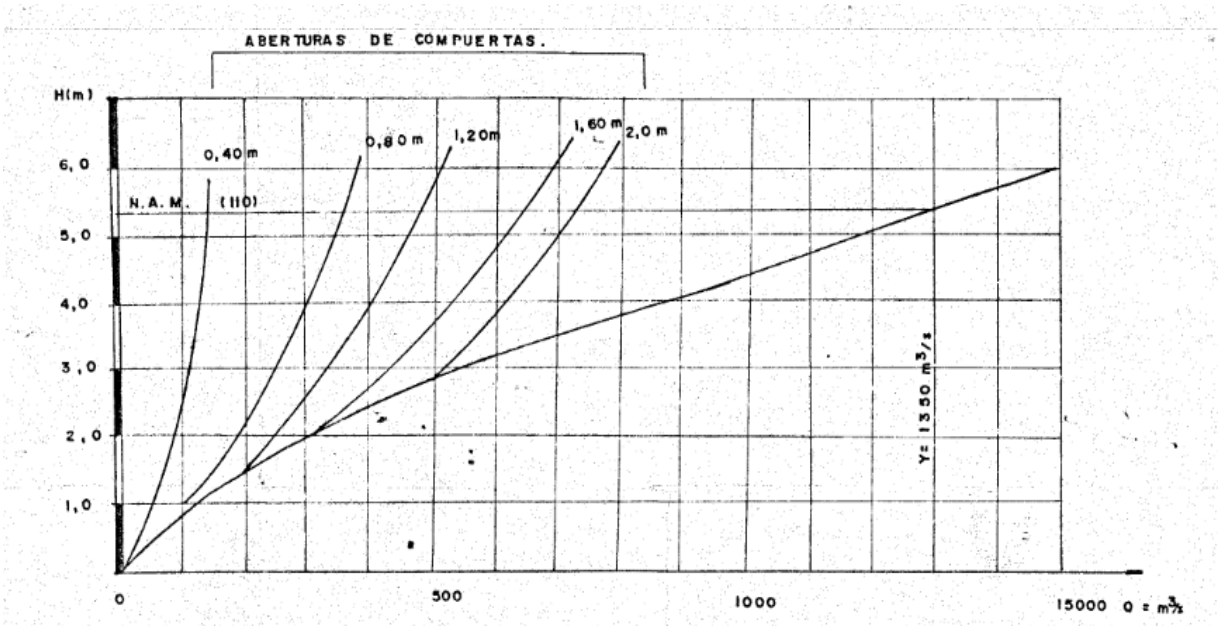


Figura 39. Curvas de capacidad de servicio del aliviadero.

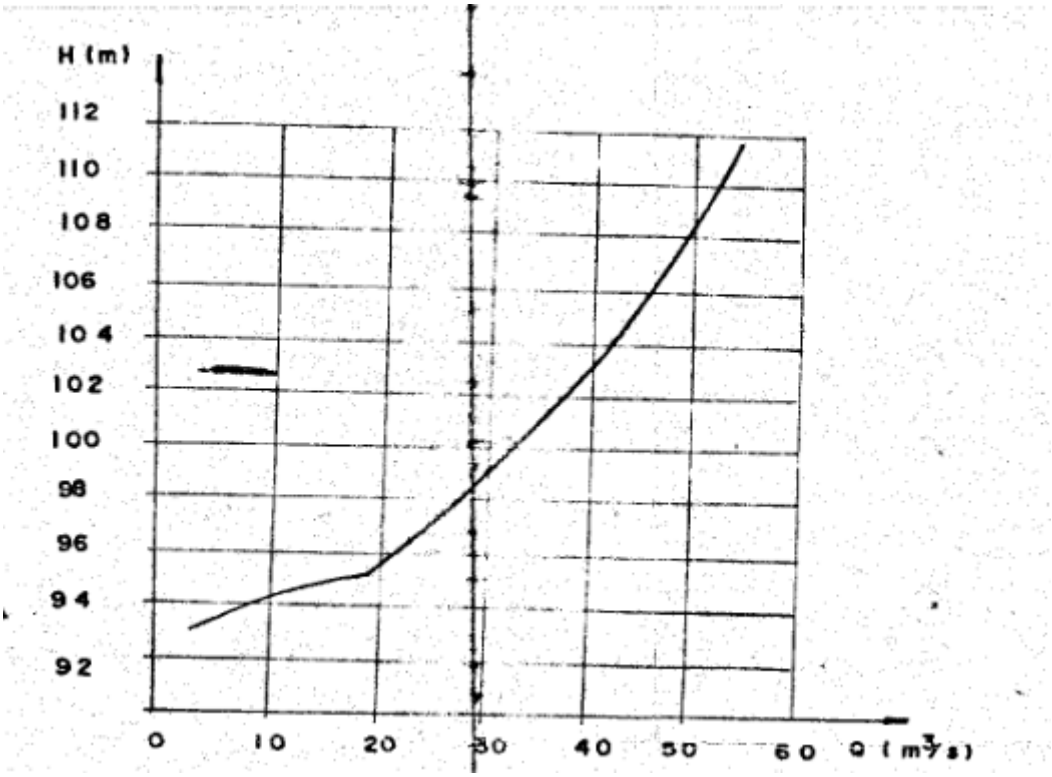


Figura 40. Curva Q f (H) periodo de explotación de la Toma de Agua.

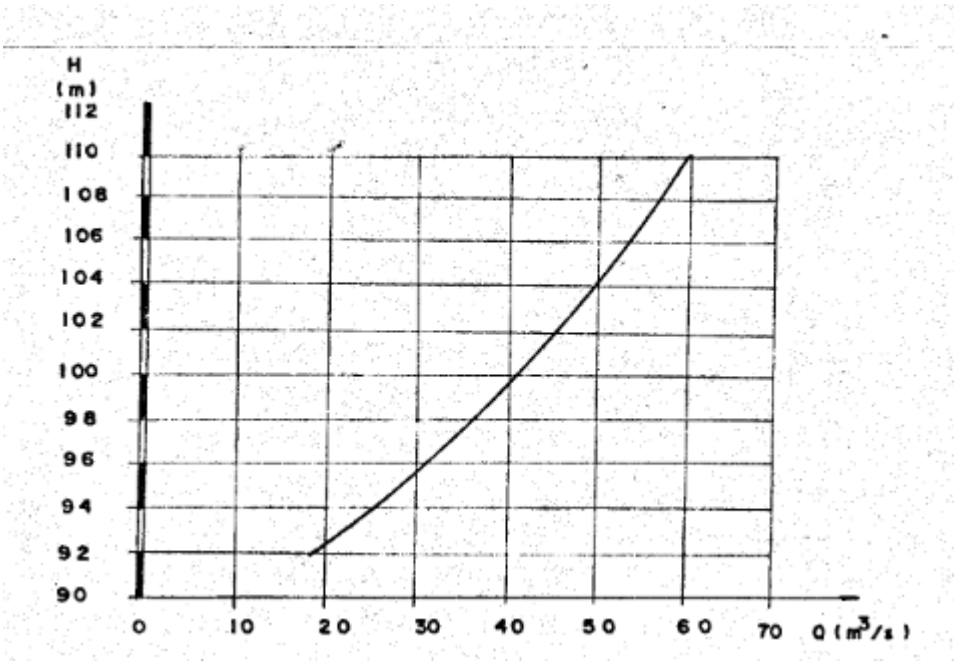


Figura 41. Curva Q f (H) periodo de construcción de la Toma de Agua.

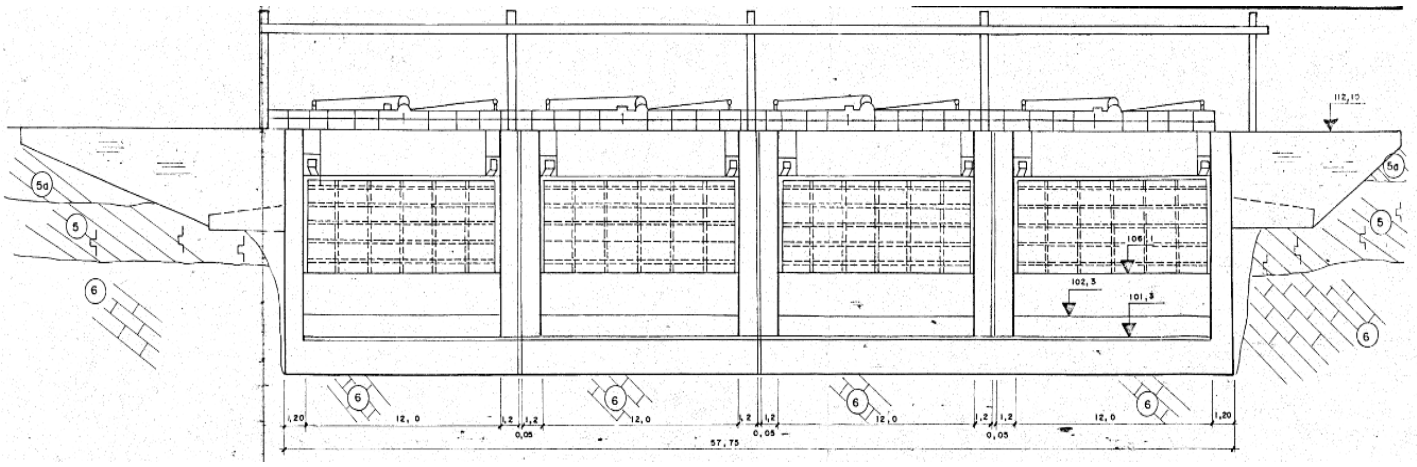


Figura 42. Vista frontal del vertedor.

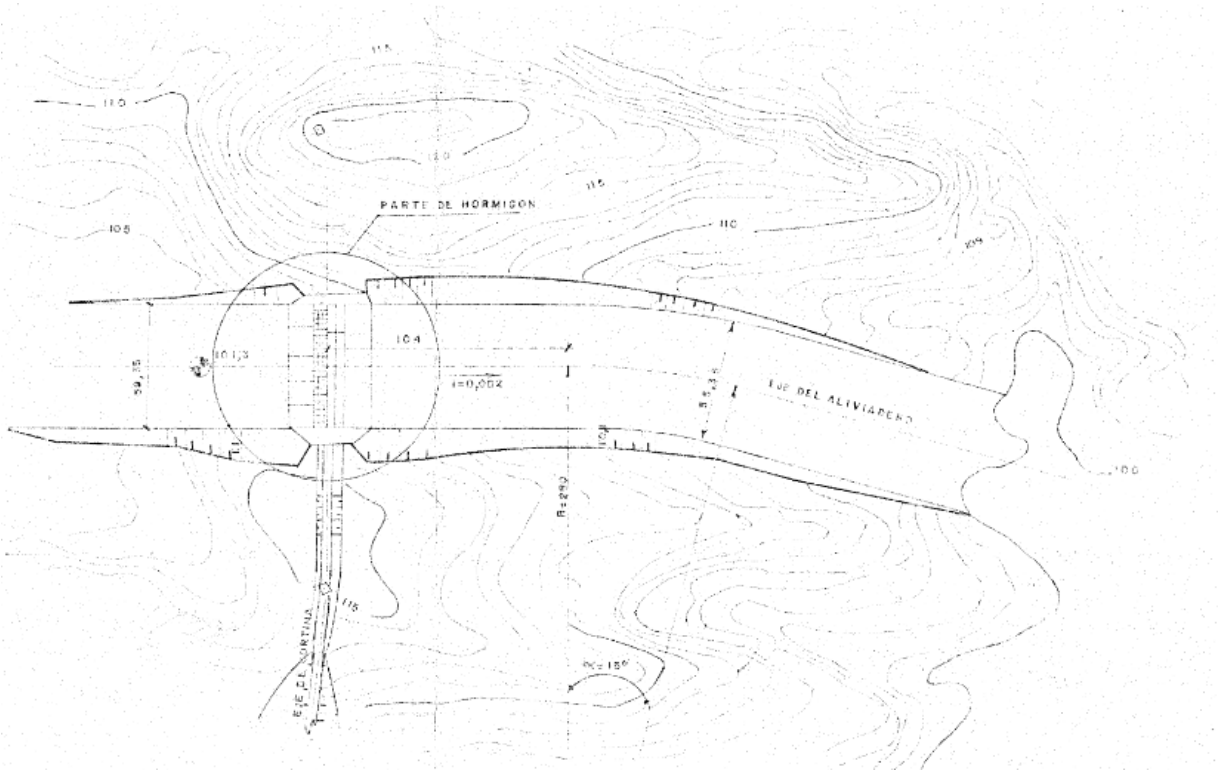


Figura 43. Planta General del aliviadero.

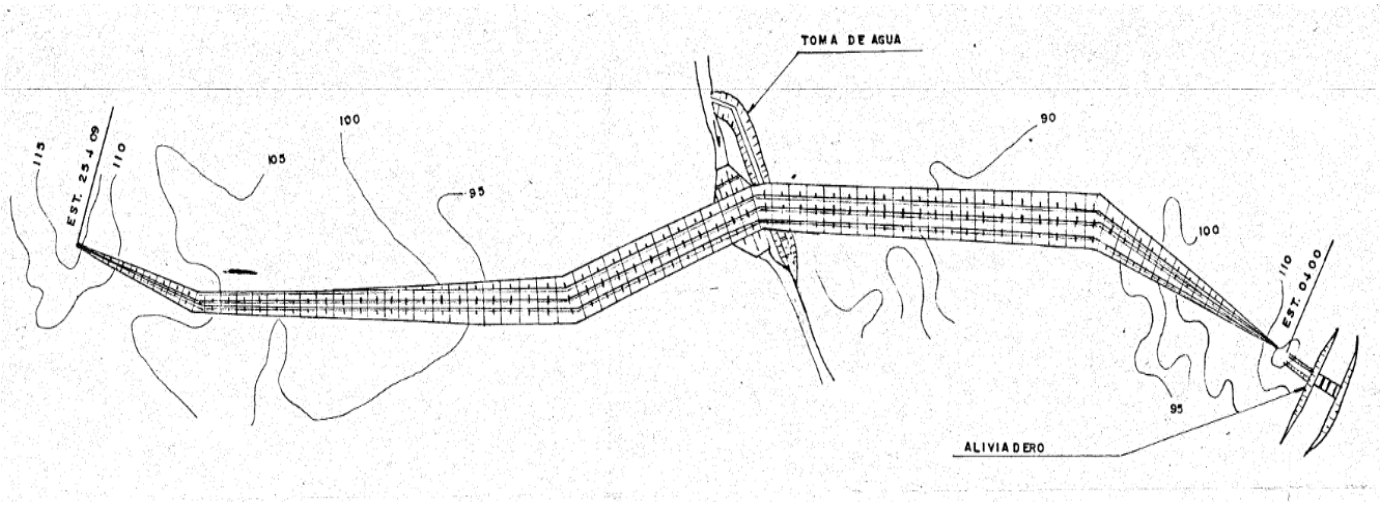


Figura 44. Planta.

Anexo 2

Fotos del conjunto hidráulico Presa Palmarito.