UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
HIDRÁULICA Y ENERGÉTICA

**SISTEMA FLUIDICO PARA LA EXTRACCION DE
SEDIMENTOS DE FONDO EN EMBALSES PEQUEÑOS**

TESIS DOCTORAL

AUTOR: Jorge Luis Oliver González
Ingeniero Civil

DIRECTOR DE TESIS: FRANCISCO JAVIER MARTIN
CARRASCO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Madrid 2015

INDICE

CAPITULO 1 INTRODUCCION.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACION.....	2
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4 IMPORTANCIA DEL TRABAJO.....	3
1.5 CONTENIDO DEL TRABAJO.....	4
1.6 ANALISIS DIMENSIONAL DEL SISTEMA EXTRACTOR.....	4
1.7 SELECCIÓN Y JUSTIFICACION DE ESCALA.....	4
 CAPITULO 2 SEDIMENTACION EN PRESAS Y EMBALSES.....	6
2.1 INTRODUCCION.....	6
2.2 ORIGEN DE LOS SEDIMENTOS.....	6
2.3 CLASIFICACION Y PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS.....	10
2.4 CARACTERIZACION DE LOS SEDIMENTOS.....	11
2.5 PROCESO EROSIVO DE UNA CUENCA.....	13
2.6 SISTEMA DE EXTRACCION DE SEDIMENTOS.....	20
2.7 SISTEMAS DE PREVENCION Y CONSERVACION DE PRESAS Y EMBALSES.....	23
 CAPITULO 3 SISTEMA DE EXTRACCION DE SEDIMENTO POR EL PRINCIPIO DE SIFON.....	25
3.1 INTRODUCCION.....	25
3.2 SISTEMA HIDRAULICO DE EXTRACCION POR EL PRINCIPIO DE SIFON.....	26
3.3 APLICACIÓN DEL TEOREMA DE BERNOULLI AL SISTEMA EXTRACTOR.....	28
3.4 CONDICIONES INICIALES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA EXTRACTOR.....	29
3.5 ANALISIS DEL SISTEMA EXTRACTOR DE ACUERDO A LAS CONDICIONES INICIALES DE LABORATORIO.....	32
3.6 PERDIDA DE ENERGIA.....	33

CAPITULO 4 JUSTIFICACION ANALITICA.....	38
4.1 INTRODUCCION.....	38
4.2 PLANTEAMIENTO DE ECUACIONES.....	38
4.3 ECUACION DE CONTINUIDAD.....	45
4.4 ECUACION DE NAVIER STOKES.....	48
 CAPITULO 5 PLANEACION GENERAL.....	 54
5.1 INTRODUCCION.....	54
5.2 CONSTRUCCION DEL SISTEMA EXTRACTOR.....	55
5.3 CALIBRACION Y ENSAYOS PRELIMINARES DEL SISTEMA EXTRACTOR.....	 56
5.4 ELEMENTOS DEL SISTEMA EXTRACTOR.....	58
5.5 JUSTIFICACION DIMENSIONAL DEL MECANISMO MOVIL.....	60
5.5.1 PARTE INTERNA	61
5.5.2 PARTE EXTERNA.....	62
5.6 FUNCION DE LAS PARTES DEL EXTRACTOR.....	63
5.7 PRUEBA DE RESISTENCIA DEL PROTOTIPO ANTE EL TUNEL DE VIENTO.....	 77
5.8 ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROTOTIPO EN TUNEL DE VIENTO.....	 78
5.9 CALIBRACION, RESISTENCIA Y FUNCIONALIDAD DE LOS DISPOSITIVOS DE PRESION INTEGRADOS EN EL EXTRACTOR.....	 83
5.10 RELACION DE VELOCIDADES.....	84
5.11 ANALISIS DE LOS DISPOSITIVOS DE PRESION (PITOT) INTERGRADOS EN EL EXTRACTOR.....	 85
5.12 PRUEBAS DEL SISTEMA EXTRACTOR EN EL LABORATORIO DE INGENIERIA HIDRAULICA.....	 90
5.12.1 INSTALACIONES Y EQUIPO.....	90
 CAPITULO 6 ENSAYOS CON AGUA Y SEDIMENTO ALTERNATIVO DEL SISTEMA EXTRACTOR.....	 95
6.1 INTRODUCCION.....	95
6.2 ENSAYOS REALIZADOS CON AGUA.....	96

6.3 ENSAYOS REALIZADOS CON SEDIMENTO ALTERNATIVO.....	98
6.3.1 ANALISIS DE LA DENSIDAD DE SOLIDOS.....	99
6.3.2 ANALISIS DE LA DENSIDAD DE SOLIDOS DE LA MUESTRA DE FONDO.....	99
6.4 LIMNIMETRO DE PRESION.....	105
6.5 ANALISIS DEL GASTO Y LA VELOCIDAD EN EL VERTEDOR RECTANGULAR.....	106
6.6 ANALISIS DE LA VELOCIDAD ANGULAR DEL REMOVEDOR.....	109
6.7 ANALISIS DEL NÚMERO DE REYNOLDS EN LA TUBERIA.....	111
6.8 ANALISIS DEL NÚMERO DE FROUDE.....	112
6.9 PRUEBAS REALIZADAS.....	113
6.10 ENSAYOS DEFINITIVOS CON SEDIMENTO ALTERNATIVO.....	115
6.11 CONCLUSIONES DE LA SERIE DE LOS ENSAYOS CON SEDIMENTO ALTERNATIVO.....	146
6.12 RESULTADOS DE LA SERIE DE DE ENSAYOS DEL 11 AL 22 DE ACUERDO A SU RELACION DE PARAMETROS (GASTO, VELOCIDAD Y PRESION).....	147
 CAPITULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	148
7.1 CONCLUSIONES.....	148
7.2 RECOMENDACIONES.....	149
 BIBLIOGRAFIA.....	151

RESUMEN

El proceso de erosión y arrastre de sedimentos hacia el fondo de un embalse artificial en épocas de avenidas, se incrementa cuando no existe una cubierta vegetal en las laderas de la cuenca, sobre todo en regiones áridas y semiáridas. Esto es proceso geológico, cíclico y natural que afecta a todo tipo de embalses, independientemente de su magnitud y ubicación, pero que a través de su estudio y análisis se puede reducir el volumen de sólidos que se desprende y arrastra de la superficie debido a la erosión eólica y a la erosión hídrica principalmente, mediante la reforestación de laderas o de cualquier otro método para disminuir el volumen de arrastre hacia el embalse. Sin embargo el sedimento arrastrado sobre la superficie que llega a un embalse disminuye la capacidad de volumen líquido y por tanto disminuyendo la vida útil de un embalse. En zonas áridas y semiáridas en México se han construido pequeños embalses mismos que no escapan al fenómeno de aterramiento por lo cual se propone la extracción de sedimentos de fondo por el principio de sifón complementado con un removedor de fondo para operarlo con energía no convencional (energía potencial) protegiendo así el medio ambiente. Existen diferentes métodos para extraer los sedimentos del fondo de un embalse este trabajo presenta solo una alternativa de solución para extraer los sedimentos finos no cohesivos mediante la construcción de un equipo fluido ligero y portátil, contribuyendo así a minimizar los problemas creados por el fenómeno de erosión, reportando las pruebas hechas en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, del Instituto Politécnico Nacional, demostrando las ventajas del sistema.

ABSTRAC

The erosion process and sediment dragging to the bottom of an artificial dam during the rainy season increases when there is not a vegetal cover on the hillside basin mainly specially on arid or semiarid region.

This is a cyclic and natural geological process, that affect all type of dam independently its magnitude and location, but by doing a study and analysis we can reduce the volume of detached solids from the surface due to eolic erosion and water erosion mainly throughout reforestation of hillsides other method to reduce the volume of dragging toward to dam.

However, the dragged sediment over the surface that arrive to the dam reduce capacity of liquid volume and the life expectancy of the dam decreases. On arid and semi-arid zones of México have been built small dams, they do not escape to phenomenon of sedimentation thus, it is proposed the extraction of the sediment from the bottom by applying the principle, complementing with a pad to move sediment of the bottom, this will be operated with no conventional energy (potential energy) to protect the environment.

There are different methods to extract the sediments from the bottom of a dam.

This proposal shows just an alternative of solution to extract the fine noncohesive sediments by building light and portable equipment fluidity to minimize the problems created by the phenomenon of erosion. Reporting the test made in the Laboratory of Hydraulic Engineering of the Escuela Superior de Ingenieria y Arquitectura, Unidad Zacatenco of Instituto Politecnico Nacional demonstrating the advantages of the system.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

El agua siempre ha representado una fuente de vida y progreso para todas las civilizaciones de la humanidad desde los tiempos más remotos. Todas las grandes culturas se han establecido, desarrollado y evolucionado gracias a la cercanía de una fuente de agua, garantizando su abastecimiento para su consumo y diversos fines, sin embargo, no todas las culturas se establecieron cerca de un cuerpo de agua debido a su situación geográfica o política, por lo que se vieron en la necesidad de almacenar agua en depósitos artificiales para así disponer de agua todo el año.

Gracias a la disposición de agua todo el año, las antiguas civilizaciones ya no dependían de la época de lluvia para sus cosechas, y abastecimiento, por lo que el agua ya fue empleada para el desarrollo de la industria.

La evolución de las grandes civilizaciones fue gracias al desarrollo de la industria a partir de la energía hidráulica, desde los molinos hidráulicos hasta la generación de energía eléctrica por medio de grandes turbinas en presas de generación, la cual trajo un impulso de crecimiento y bienestar en general a la población, sin embargo, los embalses artificiales fueron diseñados y construidos para servir y durar un cierto periodo de vida útil.

El efecto secundario como consecuencia del llenado de una presa ó embalse es el proceso natural de arrastre y depositación de sedimentos de fondo, cuyo volumen no fue considerado, sin embargo, este fenómeno se incrementa en época de avenidas, creando problemas no previstos como el aterramiento y la disminución de la vida útil de la presa ó embalse.

El fenómeno de arrastre y depositación de sedimentos de fondo en un embalse artificial es un proceso natural como parte del ciclo geológico ligado con el ciclo hidrológico y es un problema que ocurre en todas las presas de todo el mundo. Estudios al respecto dictan que se pueden tomar medidas preventivas y correctivas, para alargar su vida útil.

1.2 JUSTIFICACION

De todas las regiones climáticas, la que presenta mayor necesidad para la captación de agua de lluvia son las regiones áridas y semiáridas, donde la precipitación es muy escasa y el periodo de lluvias es por lo regular de tres meses al año ó menos, siendo así una intensidad de precipitación menor a los 800 mm. anuales, sin embargo, los volúmenes de agua que se concentran en la superficie son considerables, pero estos escurrimientos corren libremente por barrancos y arroyos de temporal, ocasionando que su velocidad desprenda y arrastre grandes cantidades de volúmenes de suelo, además de perderse en su totalidad debido a la rápida infiltración del agua en el subsuelo.

Por otro lado, la demanda de abastecimiento de agua para el riego de pequeñas parcelas, abrevaderos para el ganado, micro-reforestación, autoconsumo, etc. es complicada, ya que para el riego de pequeñas hortalizas, solo dependen del temporal, es decir, de la época de lluvia, otro caso, es el abastecimiento de agua para el autoconsumo, el cual se satisface transportando agua a grandes distancias teniendo un alto desgaste físico y en un tiempo considerable. Debido a esto, los volúmenes de agua de los pequeños embalses, se utilizan durante el periodo de estiaje para satisfacer las necesidades básicas y esenciales de las comunidades cercanas.

Los almacenamientos contruidos con cortinas de ferro-cemento en cuencas de flujo torrencial tienen el propósito de retener el máximo volumen de agua y así disminuir su pérdida y por otro lado, abatir los efectos erosivos, además de contribuir a riego de parcelas domesticas, para abrevaderos de ganado, labores domesticas de autoconsumo y la micro-reforestación entre otros usos.

Finalmente, los volúmenes de sedimento depositados en el fondo de los embalses (aterramiento) disminuyen su vida útil, por lo que para incrementar ésta, se propone la extracción del sedimento de fondo mediante el empleo de energía hidráulica a través de sifones.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Aprovechar la energía hidráulica ó carga hidráulica disponible del fluido en un embalse generado la operación de un flujo de agua en una tubería por el principio de sifón para que el sistema de acoplamiento hidrodinámico de extracción, accione un sistema extractor de sedimentos.

OBJETIVOS PARTICULARES

Los objetivos particulares que presenta este proyecto de extracción de sedimentos de fondo por medio de sifones son:

- a) Determinar el patrón hidrodinámico en la vecindad de la boquilla de extracción.
- b) Determinar las condiciones mínimas de operación del sistema de remoción de sedimentos a través de los estudios experimentales en el laboratorio.
- c) Determinar la relación funcional de los principales parámetros que intervienen en la remoción de sedimentos.
- d) Determinar la operabilidad del sistema extractor de acuerdo a la posición, distancias verticales y diseño del removedor.

1.4 IMPORTANCIA DEL TRABAJO

Con el fin de extraer el azolve en embalses, se propone el uso de una tecnología adecuada de bajo costo, fácil mantenimiento, fácil operación, ligera, portátil y sin alterar el medio ambiente y sin generar contaminación alguna, ya que opera con la energía potencial (carga hidráulica) del agua del mismo embalse, es decir, entre mayor sea la altura de la cortina de la presa, mayor carga hidráulica se tendrá y por tanto, se tendrá mayor energía generada.

Este trabajo, presenta una alternativa de solución que atenderá la problemática de la extracción de sólidos (aterramiento) en pequeños embalses de almacenamiento por medio de sifones que utilizan la energía hidráulica y el exceso de agua en época de avenidas.

1.5 CONTENIDO DEL TRABAJO

El presente trabajo se divide en dos partes que trazan su contenido, la primera parte se define como el Estado del Arte que trata del trabajo analítico, de investigación y estudio relacionado del tema, desde el estudio del fenómeno hasta el planteamiento del problema y la alternativa de solución. La segunda parte trata de investigación relacionado con la extracción de los sedimentos desde el diseño, desarrollo y metodología, finalmente la experimentación, ensayos y resultados, conclusiones y recomendaciones.

1.6 ANALISIS DIMENSIONAL DEL SISTEMA EXTRACTOR

El análisis dimensional es un fenómeno físico donde se identifican el conjunto de magnitudes físicas o variables principales que intervienen directamente en él y de acuerdo con el análisis dimensional es posible encontrar las relaciones entre las variables mediante una ecuación que debe ser dimensionalmente homogénea, donde la dimensión de cada uno de los miembros de la ecuación son iguales y por lo tanto, validos para cualquier sistema de unidades.

Las magnitudes físicas en general se clasifican en básicas y derivadas, las básicas son longitud (L), masa (M) y tiempo (T), y las derivadas son básicamente la combinación de las anteriores para obtener una ecuación dimensional como velocidad, gasto, presión, etc.

1.7 SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE ESCALA

En el modelo extractor, uno de los parámetros más importantes es el diámetro de la tubería, es decir, se considero en base al diámetro

comercial disponible y comúnmente empleado de 4 pulgadas (0.1016 m.), y de acuerdo a las condiciones prácticas de laboratorio, y reales de trabajo y disposición de equipo y materiales. Por su bajo coeficiente de rugosidad absoluta ($\epsilon=0.0015$) la tubería de PVC hidráulica, fue seleccionada entre otras cosas, debido a sus características de bajo peso, disponibilidad comercial, maniobrabilidad, etc.

La selección de la escala de este trabajo, se baso en la disposición de materiales, condiciones de laboratorio, disponibilidad comercial y condiciones de trabajo y construcción, por lo que la escala propuesta es de 1:1, es decir el modelo es igual al prototipo, por lo que en este proyecto se determinará como prototipo, por lo que este trabajo no analiza las de condiciones de similitud ni el Teorema π ó Teorema de Bukinham.

CAPITULO 2

SEDIMENTACIÓN EN PRESAS Y EMBALSES.

2.1 INTRODUCCIÓN

La planeación y construcción de una presa, es una necesidad indispensable en toda civilización humana para su desarrollo y evolución , sin embargo, es preciso mantener y preservar esta construcción de gran importancia para obras de infraestructura básica de una nación, por lo que es preciso un mantenimiento y desazolve, para así alargar la vida útil de la presa.

Existen múltiples alternativas de solución, sin embargo, este trabajo propone tan solo una alternativa de solución para la extracción de sedimentos del fondo empleando tecnología de bajo costo, ligero, de fácil operación y mantenimiento, portátil, sin el empleo de energía convencional y sin alterar el medio ambiente.

Lo que se pretende, es contribuir tan solo en la solución de un problema real que se presenta en todas las pequeñas presas y embalses del mundo.

2.2 ORIGEN DE LOS SEDIMENTOS.

La sedimentación tiene su origen en la erosión y transporte de partículas de origen mineral y orgánico.

La erosión es un fenómeno natural que depende principalmente de la erosión hídrica de acuerdo a la intensidad de la precipitación y escurrimiento sobre las laderas de la cuenca.

Existe una reacción de fuerzas de erosión, transporte y sedimentación de acuerdo a su movimiento y tamaño de sus partículas, esta reacción se representa en la gráfica propuesta por Hjulstrom (1935)

Que se involucra la velocidad del flujo y el diámetro de las partículas del sedimento.

Figura 2.1 Relación del comportamiento de la erosión transporte y sedimentación de acuerdo a la velocidad del flujo y el diámetro de las partículas. (Fte. Internet)

El proceso erosivo de una cuenca comprende desde el desprendimiento de las partículas en las zonas altas y medias hasta el arrastre y transporte de las partículas en las zonas bajas ó valles como se muestra en la figura.

Figura 2.2 Proceso de erosión, desprendimiento y deposición en una cuenca.

En general, el desprendimiento y erosión de las partículas del suelo se considera como una pérdida de suelo firme y fértil. La erosión, desprendimiento transporte y deposición es un proceso natural que depende del ciclo hidrológico cuya fuente principal generadora es la energía solar, por lo que se trata de un proceso cíclico que se incrementa con la época de avenidas, presentándose año con año.

Al bloquear su camino natural al momento de construir una presa, los sedimentos son retenidos y acumulados en dicha presa, por lo que genera sobreacumulación de sedimentos en función del tiempo, reduciendo así su vida útil como se muestra en la figura.

Figura 2.3 Relación de operabilidad promedio de una presa ó embalse en función del tiempo.

De acuerdo a la figura anterior, la relación de operabilidad promedio mantiene este comportamiento siempre y cuando no reciba

mantenimiento ni operación de desazolve, sin embargo, siempre es recomendable conservar estas obras en gran utilidad y alto costo.

El comportamiento de una presa con mantenimiento preventivo y un oportuno desazolve se muestra en la siguiente figura.

Figura 2.4 Relación de operabilidad de una presa con mantenimiento preventivo y un inoportuno desazolve.

De acuerdo a la figura anterior, se trata del comportamiento de una presa con mantenimiento preventivo y un oportuno desazolve en función del tiempo, realizando estas actividades en función del tiempo en un periodo de tiempo (P) regular dependiendo de la precipitación media anual, arrastre y depositación de los sedimentos hacia el embalse, eficiencia y tiempo de extracción de los sedimentos, dimensiones de la presa y características propias y específicas de cada presa (ubicación geográfica, altitud, clima, etc.) sin embargo, cabe destacar q por un lado, la presa tiene una depreciación natural y por otro lado existe un volumen de sedimento estratificado (azolve), lo que quiere decir, en tanto el volumen de sedimento como su vida útil tiende a unirse, por lo que la operación optima de la presa se reduce a función del tiempo así como su vida útil, por lo que siempre es recomendable un buen mantenimiento y un

desazolve oportuno para alargar lo más posible la vida útil de la presa pensando en las futuras generaciones y el servicio generado.

2.3 CLASIFICACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS.

Los sedimentos están constituidos por partículas de origen mineral, limos y arcillas de diferente tamaño, forma y densidad.

De acuerdo a la resistencia y comportamiento al arrastre por una corriente de agua, existen dos tipos de sedimentos los cohesivos y los no cohesivos, aunque existen sedimentos que muestran ambas características.

El sedimento cohesivos formado por partículas finas principalmente limos y arcillas que se mantienen unidas entre sí por la fuerza de cohesión natural entre sus partículas.

El sedimento no cohesivo friccionante, es el formado por partículas gruesas y sueltas como arenas y gravas. Por lo tanto, el empuje que ejerce la corriente de agua para transportar las partículas está en función del tamaño y peso de estas y cuando se depositan, lo hacen apoyándose directamente unas en otras y distribuyéndose de una manera natural por tamaño de acuerdo al arrastre en función de la velocidad del flujo y su resistencia al arrastre de acuerdo a su densidad.

Las principales características y propiedades de los sedimentos, tanto cohesivos y no cohesivos de acuerdo a su distribución teórica granulométrica son:

- 1.- Densidad
- 2.- Peso específico
- 3.- Gravedad específica
- 4.- tamaño
- 5.- Forma y
- 6.- velocidad de caída

1. Densidad.- Es la relación entre la masa que posee una partícula y su volumen.

2. Peso específico.- Es la relación entre el peso de la partícula y su volumen, es equivalente al producto de la densidad por la aceleración de la gravedad.

3. Gravedad específica.- es la relación entre la masa que posee una partícula y su volumen entre la densidad de la partícula sólida y la densidad del agua a 4 grados centígrados.

4. Tamaño.- Es la dimensión volumétrica de las partículas y la principal característica de arrastre y transporte, normalmente se define a través de su redondez, esfericidad y factor de forma.

5. Forma.- Es la característica que determina la manera de movimiento de la partícula.

6. Velocidad de caída.- Este parámetro determina el comportamiento de las partículas que caen en un seno de un líquido y se logra cuando el peso de la partícula se equilibra con el empuje ascendente que ejerce el líquido sobre la partícula. La velocidad de caída depende del tamaño y forma de las partículas, así como la de la densidad y temperatura del agua.

Al trazar el problema en ríos y arroyos, es importante conocer las propiedades de un conjunto o volumen grande de partículas para conocer la distribución natural de los tamaños de las partículas que constituyen el material de cause como si se tratara de una sola partícula, por lo que, lo primero, es considerar las partículas como elementos aislados. De acuerdo con esto se trata primero las propiedades físicas de las partículas constitutivas del sedimento y luego las referentes a un conjunto de partículas de suelo.

2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS.

Dentro del embalse, la fase sólida representa los sedimentos asentados (azolves), es decir, el volumen sólido está compuesto principalmente de material mineral (limos, arcillas, arenas etc.) y materia orgánica. Al analizar las muestras del fondo, se toma en cuenta las partículas individuales que resultan de la meteorización, así como su composición físico-química y mineralógica llegando a comprender su origen y la forma de su desprendimiento y por otro lado, en cuanto a la materia orgánica, se

deducirá la relación que existe entre las fibras vegetales (hojas, ramas, tallos, etc.) y microorganismos biológicos en contacto con el sedimento.

En el caso específico del muestreo de fondo del embalse “Yutetoto” localizada en el municipio de Huitzo en el estado de Oaxaca, México, se realizó una extracción de muestra “in situ” cercana a la pared de la cortina para analizarla y clasificarla en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. La clasificación de la muestra, se realizó de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, USCS (United Soil Classification System).

Un suelo se considera fino si más del 50% de sus partículas pasan a través de la malla N.- 4 (200) (Juárez Badillo, 1992). De acuerdo a las características físico-químicas, los suelos se clasifican como se muestra en la siguiente tabla.

suelos	Letra principal	Letra secundaria	derivadas
gruesos	G: Gravas (Gravel)	W: Bien graduado (well graded)	GW, SW,
	S: Arenas (Sand)	P: Mal graduada (poorly graded)	GP, SP, GM, SM, GC, SC.
finos	M: Limos inorgánicos (Mo mjala)	L: Baja compresibilidad (low compresibilidad)	ML, CL,
	C: Arcillas inorgánicas (clay)		OL, MH,
	O: Limos y arcillas orgánicos (Organic)	H:Alta compresibilidad (High compresibilidad)	CH, OH.
	Pt: Suelos organicos (peat, turba)		

Tabla 4.1 Interpretación y significado de la clasificación de los suelos.

Por otro lado, la clasificación general de un suelo, se concreta en el diagrama de plasticidad que relaciona el índice de plasticidad (Ip) con el límite líquido (LI) de la muestra analizada, como se demuestra en el siguiente diagrama.

Figura 2.5 Diagrama de plasticidad

Así entonces, con el diagrama de plasticidad se ubica la muestra de sedimento extraído por medio del cálculo de los dos parámetros que definen su plasticidad; la colocación de la muestra en cualquiera de los grupos definidos, indicara las características propias de dicho grupo, obteniéndose así la información general de dicha muestra.

Finalmente, debido a que no contiene agentes contaminantes ni metales pesados, se determino emplear con precisión la disposición final de sedimento extraído, como fertilizante natural en tierras de cultivo debido a su composición de nitrógeno como elemento básico para las plantas de cultivo.

2.5 PROCESO EROSIVO DE UNA CUENCA.

El proceso de erosión de un fenómeno físico, cíclico y natural que contiene en la pérdida de un suelo ocasionada por factores climáticos naturales y sobre todo factores deliberados por la actividad humana. Las corrientes superficiales ó escurrimiento del agua de lluvia sobre las laderas con poca ó nula vegetación causando un deterioro directamente en la estructura molecular del suelo y dando origen a la erosión.

La erosión del suelo se clasifica en dos tipos:

1. Erosión eólica.- Esta se produce cuando existen diferencias de presión en la temperatura de la atmosfera, creando así corrientes de aire que al contacto con el suelo con poca ó nula vegetación, desprenden y arrastran las partículas superficiales, esta acción depende directamente de la velocidad, intensidad y persistencia del viento.
2. Erosión hídrica.- Esta es la que más produce erosión y es producida de dos maneras.
 - 2.1 Por el continuo choque de las gotas de lluvia durante la precipitación que debido a la energía cinética que disipan las gotas al momento de impactar sobre el suelo, sobre todo con poco o nula vegetación que provoca el rompimiento de la estructura molecular de los agregados del suelo y esto depende de la intensidad y duración de la precipitación.
 - 2.2 Por el escurrimiento superficial, debido a la fracción tangencial que ejercen directamente las partículas de agua sobre la estructura molecular del suelo creando así pequeños canales y cárcavas que desgastan y erosionan el suelo en función de la pendiente, la cobertura vegetal y la estructura natural del suelo. Esto es precisamente lo que produce el arrastre y transporte de los sedimentos.

Por otro lado, la vegetación del terreno protege al suelo de la erosión de manera natural y segura, ya que las raíces refuerzan y reafirman la estructura del suelo haciéndolo más estable y durante la precipitación, las hojas secas y la vegetación misma amortiguan el impacto de las gotas de lluvia, por eso es importante no alterar la biodiversidad ni la ecología en general, sin embargo, cuando la cubierta vegetal de una cuenca hidrológica desaparece por diversas causas, se queda sin protección natural, por lo que cuando se presentan grandes precipitaciones torrenciales, el proceso de erosión y arrastre de sedimento se acelera, por lo que se convierte en un serio problema de deslave.

En general, el desprendimiento de las partículas del suelo es considerado como una pérdida del suelo fértil (productiva tanto para la vegetación natural como para fines agrícolas).

El sedimento es transportado desde las partes más altas (laderas y montañas) pasando por las partes medias (valles) hasta las más bajas (lagos ó embalses) e incluso en algunos casos llegan hasta el mar transportado por los ríos, e incluso, el arena marina, es el producto de sedimentos que llega y se distribuye a lo largo de toda la costa reacomodándose por las rompientes de las olas del mar formando así las playas.

La pérdida del suelo es una consecuencia directa del proceso erosivo de una cuenca, la pérdida de suelo se lleva en tres etapas:

1. Por desprendimiento.
2. Por transporte y
3. Por depositación.

1. Por desprendimiento.- El desprendimiento ó remoción del material solido también es conocido como erosión del suelo y se debe principalmente a la precipitación, el desprendimiento se puede clasificar en:

- 1.1 Laminar
- 1.2 Micro canales
- 1.3 Cárcavas y
- 1.4 Canales

1.1 Laminar.- Este tipo de desprendimiento se refiere al desprendimiento de una delgada capa uniforme que se lleva a cabo por el impacto de las gotas de lluvia (energía cinética) debido a su masa y velocidad con la que caen desprendiendo así sus partículas, que quedan sueltas y salpican para ser posteriormente arrastradas. Por otro lado, si la capacidad de infiltración del suelo es mayor que la intensidad de la precipitación, el agua es absorbida y las partículas del suelo desprendidas quedaran depositadas a ciertas distancias, que depende de la energía cinética de las gotas de lluvia y la pendiente del terreno, si por el contrario, la capacidad de infiltración del suelo es menor que la intensidad de la precipitación

(una vez suturado), el agua se acumula en la superficie y comienza a escurrir, produciendo el flujo superficial que arrastra las partículas sueltas, aunque solo las más finas.

La cantidad de estas partículas depende de las características físico-químicas del suelo, así como la magnitud de la velocidad del flujo y la pendiente del terreno. Finalmente, este desprendimiento solo aporta material fino (limos y/o arcillas) no cohesivos que será transportado por riachuelos, ríos y arroyos como “carga de lavado”.

1.2 Micro canales.- Este desprendimiento inicia con el flujo superficial, este escurrimiento produce erosión en el suelo debido a la fricción que ejercen las partículas del agua que son arrastradas directamente sobre el suelo, generando así micro canales de pequeñas dimensiones de forma irregular, que desprenden de la topografía y la cobertura vegetal del terreno. Estos micros canales cambian su trayectoria y/o desaparecen de una precipitación a otra, ya que también dependen de la intensidad y la magnitud de la lluvia así como la dirección o ángulo de caída de las gotas de lluvia, aportando importantes cantidades de sedimento sobre todo limos y/o arcillas.

1.3 Cárcavas.- Este desprendimiento se presenta cuando los micro canales arrastran cantidades importantes de sedimento debido a la fricción entre sus partículas, las cuales van desde pequeñas dimensiones hasta oquedades de dimensiones considerables. Como característica particular, estas tienen un crecimiento constante hacia aguas arriba, lo que provoca deslizamiento en las laderas y por consiguiente una pérdida acelerada del suelo. Este tipo de desprendimiento produce importantes cantidades de material grueso.

1.4 Canales.- Este desprendimiento ocurre cuando el flujo en cárcavas está bien definido y ocurre por ríos y causas con una trayectoria ya definida.

El esfuerzo de fricción o esfuerzo tangencial que ejercen las partículas sobre el fondo y las paredes de los cuses de las cárcavas

produce erosión en cantidades considerables. El aporte de sedimentos por este tipo de erosión depende de la capacidad erosiva de la corriente, la pendiente del cauce y la resistencia del material.

2. Por transporte.- Este tipo de pérdida de suelo es producido al transportarse como masa a través del flujo, produciendo esfuerzos tangenciales sobre las paredes del canal ó río, integrando así una mayor cantidad de sedimento. La pérdida de suelo en este tipo de transporte se clasifica como:

- 2.1 De fondo y

- 2.2 En suspensión

- 2.1 De fondo.- Este se transporta, cuando el material grueso es arrastrado por rodamiento ó saltación a lo largo del cauce sobre el lecho del mismo, que depende de la pendiente del fondo, su batimetría y la velocidad del flujo.

- 2.2 En suspensión.- Este se transporta en suspensión arrastrando solo material fino (limos y/o arcillas principalmente), lo que provoca la turbidez del flujo y está constituido por material de lavado (carga de lavado) y depende de la concentración del material de lavado, densidad, pendiente del fondo y ubicación geomorfológica y se transporta como una masa fluida en función del gasto líquido y el tiempo.

3. Depositación.- La depositación de sedimentos de un embalse se considera como la etapa final del recorrido de los mismos, se distribuye en forma gradual de acuerdo al diámetro de las partículas ó granulometría del suelo, su densidad y la velocidad del suelo principalmente, de tal forma que los sedimentos más gruesos se asientan a la entrada (formando una delta) y los más finos al final del embalse. En el caso de un embalse artificial, los sedimentos más finos se transportan hacia el fondo a lo largo y ancho del embalse como corrientes de densidad, y al chocar dicha corriente con la cortina del embalse se derivan dos casos: El asentamiento de los sedimentos finos en forma de aterramiento (los más pesados) y una recirculación ascendente (los más ligeros) que serán transportados de regreso hasta llegar a un punto donde se encuentre la corriente

principal a la entrada del cauce (punto de sumergencia) creando así un ciclo que permite la distribución clasificada de los sedimentos de fondo en un embalse como se muestra en la figura.

Figura 2.6 Proceso de deposición de sedimentos en un embalse artificial.

Dicho fenómeno es un proceso cíclico que anualmente se presenta, incrementando así el nivel de aterramiento. Una vez terminada la época de avenidas, el azolve se asienta paulatinamente en el lecho del embalse durante la época de estiaje, y así, en la siguiente época de avenidas se vuelven a depositar de nuevo un volumen de azolve sobre el ya asentado del año anterior, acumulándose así por capas, lo que provoca que la capa (de azolve) superior comprima a la capa inferior y así se estratifique debido al paso de la nueva capa de azolve, así como la presión recibida del fluido actual sobre esta, generando así, un proceso de sobreelevación del nivel de aterramiento que se va incrementando año por año como se muestra en la figura.

Figura 2.7 Proceso de asentamiento del azolve en el lecho de un embalse que depende directamente de la composición fisicoquímica de los sedimentos.

El espesor de las capas de azolve (estratos) depende de la intensidad y regularidad de la precipitación en época de avenidas, así como la de su ubicación geográfica, altitud, características fisicoquímicas y topográficas de la cuenca hidrológica (grado de erosionabilidad) y por último de la cobertura vegetal de la misma. Cabe destacar que las capas mostradas en la fig. 2.7 se observa un asentamiento totalmente horizontal, sin embargo, en realidad dicho asentamiento depende de la batimetría de cada embalse, es decir, de la forma de fondo del embalse y por otro lado el volumen depositado se distribuye a lo largo del embalse en función del diámetro de las partículas independientemente de su batimetría. Finalmente, para la evaluación de los volúmenes de azolve, se requiere de levantamientos batimétricos preferentemente antes de la época de avenidas para determinar así, por medio de la diferencia de niveles el volumen de azolve almacenado en un cierto tiempo, tomando en cuenta que el aporte de sedimento en el embalse depende de la pendiente con que entre el embalse, ya que generalmente en los embalses con pendientes suaves, el deposito ocurre principalmente en la entrada del vaso, en tanto que en

aquellos donde la pendiente es pronunciada, el depósito ocurre cerca de la cortina.

2.6 SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE SEDIMENTOS.

Dentro de las alternativas de extracción de sedimentos de fondo, existen múltiples formas de extracción, de acuerdo a las sedimentaciones, ubicación y finalidad ó función del embalse considerando que las presas de generación de energía tienen prioridad de extracción de sedimento, por lo que los métodos más comunes de extracción son:

2.6.1 Desazolve por conducto de fondo (compuertas de fondo)

2.6.2 Sistemas de dragado convencional (degradadoras mecánicas)

2.6.3 Diversos sistemas de extracción

2.6.1 Desazolve por conducto de fondo (compuertas de fondo).

Como única alternativa de extracción de sedimentos sin emplear ningún tipo de dispositivo externo, se encuentra el desazolve por conducto de fondo, mediante compuertas de fondo que operan mecánicamente y que forman parte de la infraestructura propia de la cortina de la presa, que descarga o desaloja el material depositado en el fondo del vaso de almacenamiento (aterramiento) a través de la propia cortina en periodos pre establecidos, operando de manera limitada, recuperando así, parte de la capacidad útil del embalse y por otro lado, la inversión para su operación y mantenimiento es mínima y sin existir gastos de depreciación, sin embargo, esta alternativa no es muy recomendado, ya que no desaloja por completo el azolve, sino únicamente su propia zona de influencia, por lo que esta alternativa solo puede desarrollar este proceso por tiempo limitado, ya que el nivel de aterramiento se incrementa fuera de la zona de influencia de las compuertas de fondo, tomando en cuenta que durante la operación se debe suspender el servicio de dotación ó peor aún la generación de energía eléctrica, además de disponer de una gran cantidad de

volumen líquido (agua) solo para desalojar un mínimo de volumen sólido (sedimento) de acuerdo a las dimensiones de las compuertas. El desazolve se realiza en el área de influencia de las compuertas, por lo que fuera de esta zona, el azolve queda intacto y peor aún, estratificado. Por último, el alto costo, las dificultades técnicas y el complejo estudio para determinar la ubicación y las dimensiones y forma de las compuertas y el análisis técnico y estudio analítico para poder establecer el momento y tiempo adecuado para su correcta operación y mantenimiento dificultan su promoción y construcción en otras presas, sin tomar en cuenta que podrían ser de baja rentabilidad, alta depreciación y sin ninguna garantía de alta operabilidad y el material desalojado podría ocasionar perjuicios a intereses ubicados aguas abajo, sin tomar en cuenta que las compuertas no se puedan volver a cerrarse totalmente debido a un agente externo atorado en dicha compuerta de fondo.

2.6.2 Sistemas de dragado convencional (degradadoras mecánicas).

Los sistemas de dragado convencional, son empleados principalmente en zonas portuarias para el mantenimiento del fondo de puertos y artilleros. Se trata de embarcaciones concedidas para tal fin, con alta tecnología y personal de altamente calificado, sin embargo, los costos de operación son extremadamente altos. Por otro lado, la necesidad de dragar las presas, ha desarrollado dragadoras especiales de acuerdo a las características de cada presa o embalse. Estos tipos de dragas son de acción mecánica, que posteriormente surgieron las llamadas hidráulicas o de succión basadas en la posibilidad de transportar la mezcla fluidica en proporciones aceptables de acuerdo a la capacidad de la bomba. Este método permite realizar no solo un dragado, sino también el transporte por medio de tuberías a distancia considerables de acuerdo con la potencia de la bomba. Existen dragas de acción mecánica, con palas, cucharón, de rosario, dragalinas, etc. Así como de empuje ó retro excavadora y de diferentes dimensiones. Por otro lado, están las dragas especiales en extraer sobre fondos rocosos duros y semiduros como el empleo de trituradoras de acción neumática con numerosos tipos de modelos. Por último, existen las

dragas de succión por medio de bombas de vacío de gran potencia, ordinarias ó dustpan incluyendo cabezas cortadoras de succión de diferentes dimensiones y modelos. Este tipo de dragadoras, resultan muy costosas, su vida útil limitada, costos de operación muy alto y personal técnico de operación altamente calificado, tomando en cuenta que todo esto, no soluciona el problema del azolve, sino que solo lo aminora temporalmente y en zonas específicas, sin tomar en cuenta que solo una mínima parte de todas las dragadoras son empleadas para desazolver embalses en agua dulce, ya que la mayoría son empleadas para dragar zonas portuarias y artilleros.

2.6.3 Diversos sistemas de extracción.

Por último, existen otras alternativas de solución para resolver el problema de extracción de aterramiento en embalses mediante succión por el principio de sifón, los cuales son:

a) Extractor simple, mediante una tubería por efecto de sifón.

Este método extrae azolve solo de manera limitada, sin embargo, su área de influencia es muy estrecha y sin removedor ó algún tipo de dispositivo que genere movimiento del sedimento, y con la condición de que tiene que estar operando muy cerca del nivel de azolve, por lo que corre el riesgo de bloquearse ó suspender su operación cuando se encuentre demasiado cerca ó en contacto con el nivel de azolve.

b) Extractor convertido con boquilla lateral y disgregador (orificios inferiores). Este método permite extraer el sedimento de fondo de acuerdo al número de orificios y a su diámetro sin riesgo de bloqueo alguno debido a la dirección de la boquilla, sin embargo, solo extrae sedimentos de manera puntual, por lo que se requiere una extensión telescópica dirigida manualmente desde la superficie para movimientos laterales por lo menos de un operario.

c) Extractor con removedor de fondo mediante agua y presión.

Este método, permite extraer sedimento de fondo, aprovechando la turbulencia que el chorro de agua genera desde la boquilla, sin embargo, no extrae la totalidad del material solido del fondo ya que

genera demasiada turbulencia y depende de la presión del chorro de agua.

d) Extractor con removedor de fondo mediante aire de presión.

Este método, permite extraer sedimentos del fondo aprovechando la turbulencia que el otro chorro de aire genera desde la boquilla, sin embargo, el aire provoca una turbulencia caótica, por lo que la extracción será limitada.

e) Extractor de sedimentos (roto extractor).

Este método, es la alternativa que presenta este trabajo, que permite extraer sedimento de fondo, aprovechando la turbulencia superficie creada por su propio removedor succionando la parte sólida (sedimentos) con parte líquida (agua) por el principio de sifón empleando la carga hidráulica ó energía potencial, cuenta con dos rotores internos que permite que la mezcla fluidica sea homogénea, cuenta además con un sistema amortiguador (punta del removedor) que le permite amortiguar los estratos rocosos o duros que indica la terminación de dragado en esa zona, cuenta también con un sistema de succión adicional (sistema antibloqueo) y una boquilla que dirige el fluido a la entrada al sistema extractor finalmente acoplado a una tubería de 4 pulgadas para conectar a una extensión que permite transportar la mezcla fluidica hacia aguas abajo y disponer del material extraído. Este último es el propuesto en este trabajo como alternativa para la extracción de sedimentos de fondo (aterramiento).

2.7 SISTEMAS DE PREVENCIÓN Y CONSERVACIÓN DE PRESAS Y EMBALSES.

En un embalse, el sedimento asentado (aterramiento) ocupa un volumen que no fue considerando y que se incrementa en épocas de avenidas. Esto es un proceso cíclico natural que aumenta año con año el nivel de azolve, por lo que de esta manera disminuye su vida útil, así como la capacidad original de almacenamiento de un azolve. Preservar y conservar este tipo de obras es de gran importancia, considerando que son obras de infraestructura, muy útiles y costosas y que no fueron diseñadas para almacenar volumen sólido

(sedimentos) sino para almacenar volumen líquido (agua) sobre todo pensando en futuras generaciones que se verán más necesitadas de la generación de energía y de la disposición de agua principalmente. El prevenir el aterramiento en los embalses, reducirá el volumen de sólidos (sedimentos), aumentara la capacidad del volumen útil (agua), evitara inundaciones aguas abajo (reduciendo perdidas agrícolas, ganaderas y daños a viviendas, vías de comunicación, etc.) y así, alargar la vida útil del embalse, que es lo que principalmente se pretende para su futuro aprovechamiento y por otro lado, evitara la escases de agua en época de estiaje, beneficiando así a la población en general por todos los servicios derivados.

CAPITULO 3

SISTEMA DE EXTRACCION DE SEDIMENTOS POR EL PRINCIPIO DE SIFON

3.1 INTRODUCCION

La extracción de sedimentos por medio de sifones es un método ya conocido y experimentado por algunos países, comprobando que los sedimentos de fondo pueden ser removidos fácilmente por el principio de sifón que inicia la remoción debido a la presión negativa ó succión que ejerce directamente sobre el nivel del fondo del embalse y en particular sobre las partículas sólidas de la superficie de azolve, sin embargo, este método está limitado a la sumergencia del sifón (d) y su capacidad de succión está determinada por la sumersión (h), diámetro de la tubería (D_1), diámetro de la boquilla extractora (D_2) y por otro lado, el grado de estratificación o dureza del sedimento asentado y la naturaleza del mismo sedimento (densidad, diámetro de sus partículas, cohesividad, etc.), sin embargo, se tomara en cuenta las dificultades técnicas de operación ya que el sifón solo opera con la energía potencial o carga hidráulica sin ningún tipo de energía convencional, las condiciones reales en Laboratorio y por otro lado sus limitaciones de alcance, sumergencia y radio de barrido (R), como se muestra en la figura.

Figura 3.1 Variables que intervienen directamente en la extracción de sedimentos del sistema exterior.

3.2 SISTEMA HIDRAULICO DE EXTRACCION POR EL PRINCIPIO DE SIFON

Para la extracción del sedimento de fondo (azolve) en embalses pequeños (como es el caso de este trabajo), se propone la extracción de sedimentos por el principio de sifón, como alternativa adicional al sistema de dragado hidráulico convencional, donde el equipo de bombeo es sustituido por el efecto de vacío, debido a la diferencia de niveles entre la toma de descarga y la boquilla extractora donde el removedor genera turbulencia del sedimento asentado, para extraer el sedimento con mayor facilidad. El funcionamiento del sistema extractor aquí presentado funciona de manera independiente una vez iniciando su operación, abarcando una mayor área de dragado debido a los rotores internos y su mecanismo interno, empleando solo la energía potencial ó energía hidráulica disponible por la diferencia de niveles.

El sistema aquí propuesto para la extracción de sedimento, tiene la ventaja de ser ligero, resistente, económico y de fácil operación y mantenimiento y sobre todo portátil, fácilmente desmontable y al transportarlo disminuye considerablemente el costo de operación y aumenta la eficiencia del sistema extractor aquí propuesto como se muestra en la figura:

Figura 3.2 Partes generales constitutivas del sistema extractor de sedimentos.

Sin embargo tiene la limitante de que solo puede operar en pequeños embalse con un alto de cortina entre 6 y 7 metros de altura, es decir con

una altura de carga de agua entre 5 y 6 metros de profundidad. Por otro lado, las condiciones que necesita el sistema extractor para su óptima operación en cuanto a las características particulares del embalse se refiere son:

1. Distancia de la superficie libre del agua (SLA) al nivel de azolve (d) para determinar la longitud de la tubería vertical.
2. Distancia horizontal de aterramiento (L) para determinar la longitud de la tubería horizontal.
3. Nivel de la superficie libre del agua (SLA) a la corona de la cortina para determinar el desnivel a librar de la tubería.
4. Distancia de la boquilla del extractor al nivel de azolve (h) para determinar la distancia óptima de extracción.

Para definir la longitud máxima de la tubería que conforma el sifón para las condiciones de carga hidráulica disponible, el diámetro de la tubería a utilizar y la región de extracción, será necesario que la velocidad media del flujo (V) dentro de la tubería, sea igual o mayor, que la velocidad crítica (V_c).

Para que la operación del sifón se genere en Laboratorio, es necesario un Manual de Operaciones que especifique que la llave de paso aguas abajo este completamente cerrada y la boquilla extractora esté completamente sumergida para crear un vacío en la parte más alta del sifón (válvula de vacío) produciéndose una presión negativa (P_v).

Una vez extraído todo el aire dentro de la tubería, se procede a abrir la llave de paso aguas abajo, produciéndose así la operación del sistema extractor por la acción de la presión atmosférica (P_a) de modo que $P_a > P_v$, por lo tanto, la columna se vence después de aplicar la ecuación de la conservación de la energía (ecuación de Bernoulli) a lo largo de la tubería entre los puntos A y B, pasando por el punto C hasta llegar al punto D, como se muestra en la figura.

Figura 3.3 Parámetros y variables que intervienen en el análisis de la operación del sistema de extractos.

3.3 APLICACIÓN DEL TEOREMA DE BERNOULLI AL SISTEMA EXTRACTOR

Dentro de la hidrodinámica, la conducción a presión en tuberías se presenta cuando un líquido circula y llena completamente el conducto en su sección transversal, por lo que se genera una presión en su interior a una velocidad determinada.

El volumen del líquido que pasa por una sección recta por unidad de tiempo, se determina como gasto y se designa como Q . En este caso, las unidades del gasto, estarán en el sistema métrico, es decir m^3/s .

Por otro lado, si el diámetro del conducto es D_1 , entonces la expresión para el gasto es $Q = \frac{\pi}{4} D_1^2 V$ ó bien por continuidad $Q = AV$

Cuando el gasto es igual en todas las secciones de un conducto, se considera que el régimen es permanente. Si el conducto tiene diámetro variable, la velocidad es diferente para cada sección e inversamente proporcional a esta, es decir $Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \dots = A_n V_n$ a esta relación se le conoce como ecuación de continuidad.

3.4 CONDICIONES INICIALES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA EXTRACTOR

Si se trata de conducir agua de un punto a otro, pero no precisamente tiene que ser en línea recta; más aún si se trata de salvar un obstáculo; para este caso se emplea una solución por el principio de sifón, como se muestra en la siguiente figura

Figura 3.5 Parámetros principales de acuerdo a las condiciones iniciales del sistema extractor

En este caso para que el líquido suba, habrá que hacer un vacío ó succión en la parte superior del sifón mediante una válvula de vacío; el líquido sube por la acción de la presión atmosférica que se ejerce sobre la superficie libre elevada del sifón. Para esto, se debe contar válvula de paso cerrada aguas abajo para que una vez succionado todo el aire, se interrumpa el proceso de vacío, se abre la válvula aguas abajo, poniendo en movimiento la masa del agua y finalmente se inicia la operación del sistema extractor por el principio de sifón. Los parámetros y variables que intervienen directamente en el análisis de la revisión de la operación del sistema extractor serán:

D_1 .- Diámetro de la tubería del sistema extractor (4 plg).

D_2 .- Diámetro de la boquilla.

Y_1 .- Distancia de la SLA al plano horizontal de referencia de referencia.

Y_2 .- Distancia del punto D ó E al plano horizontal de referencia.

ABCDEF y G.- Puntos de referencia.

El sistema extractor que transporta una masa fluidica del punto A al punto G, con los siguientes parámetros acotados de acuerdo a las condiciones de laboratorio, como se muestra en la figura.

Figura 3.6 Parámetros necesarios para el análisis el sistema extractor.

La distancia total del punto A al punto G se considera de 6.04 m, el diámetro del tubo es 4 pulgadas (0.1016 m) en toda la extensión del sifón, y con estos valores se determina la velocidad media teórica del flujo de acuerdo a las condiciones de laboratorio.

Datos:

$$h_A = 2.0192m$$

$$hf_{A-G} = 1.29m$$

$$P_{atm} = 58.6 cmHg$$

$$V_A = 0 m/s$$

$$P_A = P_G$$

Para ver si es factible se considera A-C dos partículas, una dentro del líquido y otra fuera del líquido, para averiguar la velocidad de salida del líquido por el punto G, aplicamos la ecuación de Bernoulli entre A y G.

$$h_A + \frac{V_A^2}{2g} + \frac{P_A}{\gamma} = h_G + \frac{V_G^2}{2g} + \frac{P_G}{\gamma} + hf_{A-G} \quad (3.7)$$

Como las cargas de presión son equivalentes, los dos puntos se suprimen.

La carga de velocidad de A vale cero y la energía de posición en G es cero ($h_G = 0$).

Despejando a V_G de la ecuación anterior se tendrá:

$$h_A + \frac{V_A^2}{2g} = h_G + \frac{V_G^2}{2g} + hf_{A-G}$$

$$h_A + \frac{V_G^2}{2g} = h_{A-G}$$

$$\frac{V_G^2}{2g} + hf_{A-G} = h_A$$

$$\frac{V_G^2}{2g} = h_A - hf_{A-G}$$

$$V_G^2 = 2g(h_A - hf_{A-G})$$

$$V_G = \sqrt{2g(h_A - hf_{A-G})} \quad (3.8)$$

Sustituyendo $2g = 19.62 \text{ m/s}^2$

$$h_A = 2.01 \text{ m}$$

$$h_{f_{A-G}} = 1.29 \text{ m}$$

$$V_A = \sqrt{19.62 \text{ m/s}^2 (2.0192 - 1.2957)}$$

$$V_A = 3.76 \text{ m/s} \text{ Velocidad media teórica.}$$

3.5 ANALISIS DEL SISTEMA EXTRACTOR DE ACUERDO A LAS CONDICIONES INICIALES DE LABORATORIO.

Para determinar el análisis teórico el comportamiento del sistema extractor, empleando el diagrama de Moody en función del número de Reynolds se determina el cálculo del factor de fricción de acuerdo a la figura 3.6

Por lo que se tienen los parámetros necesarios para el cálculo del factor analítico de fricción de la tubería de PVC nueva de 4 pulgadas de diámetro.

Datos:

- Longitud inicial de la tubería $L_{AD} = 6.5 \text{ m}$
- Diámetro de la tubería $D_1 = 4 \text{ plg} = 0.1016 \text{ m}$.
- Velocidad inicial propuesta $V_1 = 1.646 \text{ m/s}$
- Viscosidad cinemática del agua (destilada a 20°C)
- $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Considerando la rugosidad relativa de tubería lisa de plástico (PVC)
 $\varepsilon = 1.5 \times 10^{-6}$

Y tomando en cuenta el diámetro de la tubería ($D_1 = 0.1016 \text{ m}$)

$$\frac{\varepsilon}{D_1} = \frac{1.5 \times 10^{-6}}{0.1016 \text{ m}} = 1.476 \times 10^{-5} \text{ ADIMENCIONAL}$$

$$Re = 1.66 \times 10^5 \text{ ADIMENCIONAL}$$

De acuerdo a la tabla de Moody se obtiene el factor de rozamiento (f).

$$f = 0.01625 \text{ ADIMENCIONAL}$$

3.6 PERDIDA DE ENERGIA

Durante la operación del sistema extractor es necesario considerar las pérdidas de energía que suceden dentro del sistema como los efectos viscosos, analizando las fuerzas de fricción organizadas por la turbulencia que se generan a través de la tubería.

Una parte de la energía de la corriente es empleada para vencer las fuerzas de fricción organizadas por entrada, por rugosidad de las paredes internas de la tubería, así como los cambios geométricos (codos), por sistemas de apertura (válvulas) y por salida, sin embargo también se considera la fricción generada por los alabes internos y la extensión flexible.

Por último, esa parte de energía de la corriente, se transforma en pérdida de energía de la corriente, se transforma en pérdida de energía de la corriente, se transforma en pérdida de energía a determinar.

Al aplicar la pérdida de energía en la ecuación de Bernoulli es necesario adicionar un término que representa las perdidas y poder establecer la igualdad es decir:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + hf$$

Donde hf representa la pérdida de energía, por lo que se analizará del punto A al punto G.

Si la presión en el punto A es mayor que la presión en el punto G, el principio de sifón se cumple, es decir, el agua dentro del sifón comienza a fluir.

- Cálculo de la pérdida de carga local por fricción longitudinal (tubería lisa de PVC) empleando la ecuación de Darcy-Weisbach (h_f)

$$h_{f_1} = f \frac{L_{BG}}{D_1} \frac{V^2}{2g} \quad (3.9)$$

Donde:

$$f \frac{L_{AD}}{D_1} = K \quad (3.10)$$

Sustituyendo en K

$$K = 0.01625 \frac{(5.3516 \text{ m})}{0.1016 \text{ m}} = 0.8427$$

Sustituyendo en h_f .

$$h_{f_1} = 0.8427 \frac{(1.646 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_{f_1} = 0.1163 \text{ m}$$

$$K = 0.8427$$

- Cálculo de pérdida de carga local por entrada (k_1).

Considerando entrada parabólica con obstrucción a la entrada (removedor) boquilla abocinada y tubería redonda de 4 plg de diámetro.

$$k_1 = \frac{0.04 + 0.10}{2} = 0.07 \text{ m}$$

$$k_1 = 0.07 \text{ m}$$

- Cálculo de pérdida de carga local por fricción tangencial del sistema hidromecánico del sistema extractor, considerando una rugosidad

de plástico liso y estimando dos alabes internos giratorios y rotando en función de la velocidad del flujo, se tiene :

$$k_2 = 2 * 0.1 = 0.2$$

- Cálculo de pérdida de carga local por cambio de dirección , considerando tres codos de 90° de 4 pulgadas de diámetro ($D_1 = 0.1016 \text{ m}$) liso sin rosca

$$k_3 = 3 * (0.30) = 0.9$$

- Cálculo de pérdida de carga local por accesorio ó válvula, considerando una válvula de retención completamente abierta y considerando una posición vertical con bridas

$$k_4 = 6.4$$

- Calculo de pérdida de carga local por salida, considerando el diámetro de la tubería igual al diámetro de salida

$$k_5 = 1.0$$

Finalmente, la suma de todas las pérdidas de carga serán:

$$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = 8.57 \text{ m.}$$

De la ecuación de Bernoulli, se consideran los términos de velocidad y de posición.

$$\frac{V^2}{2g} = h \text{ donde } h = Y_1 - hf$$

Despejando la velocidad

$$V = [2g(Y_1 - hf)]^{1/2} \quad (3.11)$$

Donde hf es la perdida de carga.

Para calcular la presión en el punto C se realizara el análisis hidráulico del punto A al punto D por medio de Bernoulli es decir el tramo L_{AC} por lo que:

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + h_A = \frac{P_G}{\gamma} + \frac{V_G^2}{2g} + h_C$$

Despejando P_G :

$$\frac{P_G}{\gamma} + \frac{V_G^2}{2g} + h_c = \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + h_G$$

$$\frac{P_G}{\gamma} = \frac{P_A}{\gamma} - \frac{V_G^2}{2g} - \frac{V_A^2}{2g} + h_A - h_G$$

Como $h_A + Y_1 = -hf$ y $h_G = Y_2$

$$\frac{P_G}{\gamma} = \frac{P_A}{\gamma} - \frac{V_G^2}{2g} - hf_{AG} - Y_2$$

$$P_G = \gamma \left[\frac{P_A}{\gamma} - \frac{V_G^2}{2g} - hf_{AG} - Y_2 \right]$$

Si la presión en el punto A es mayor que la presión en el punto G el principio de sifón se genera, es decir, el agua dentro del sifón comienza a fluir.

La suma de pérdidas de carga hf_2 y la pérdida de carga por fricción longitudinal, será la pérdida de carga total.

$$hf = hf_1 + hf_2$$

Por lo que:

$$hf_1 = f \frac{L_{AG}}{D_1} \frac{V^2}{2g} ; K = f \frac{L_{AG}}{D_1}$$

$$hf_1 = K \frac{V^2}{2g} \text{ y } hf_2 = (k_1 + \dots + k_5) \frac{V^2}{2g}$$

Entonces:

$$hf = K \frac{V^2}{2g} + (k_1 + \dots + k_5) \frac{V^2}{2g}$$

$$hf = \frac{V^2}{2g} [K + (k_1 + \dots + k_5)]$$

Sustituyendo hf en la ecuación:

$$V = [2gY_1 - 2ghf]^{1/2}$$

$$V = \left[2g \left(Y_1 - \frac{V^2}{2g} (K + (k_1 + \dots + k_5)) \right) \right]^{1/2}$$

$$V = [2gY_1 - V^2(K + (k_1 + \dots + k_5))]^{1/2}$$

$$V = \sqrt{2gY_1 - V^2(K + k_1 + \dots + k_5)}$$

$$V^2 = 2gY_1 - V^2(K + k_1 + \dots + k_5)$$

$$V^2 + V^2(K + k_1 + \dots + k_5) = 2gY_1$$

$$V^2(1 + (K + k_1 + \dots + k_5)) = 2gY_1$$

$$V^2(1 + (K + k_1 + \dots + k_5)) = 2gY_1$$

$$V^2 = \frac{2gY_1}{1 + K + k_1 + \dots + k_5}$$

$$V = \left[\frac{2gY_1}{1 + K + k_1 + \dots + k_5} \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

Sustituyendo valores, donde:

$$2g = 19.62 \text{ m/s}^2$$

$$Y_1 = 2.07 \text{ m}$$

$$K = 0.8427$$

La sumatoria

$$\text{Se tiene que } V = 1.97 \text{ m/s}$$

Si la velocidad media del flujo es menor o igual a la velocidad crítica ($V \leq V_c$) entonces se procede a resolver la ecuación anterior se procede a resolver por medio de aproximaciones sucesivas, dándole valores a la longitud L_{BG} para calcular K, con la finalidad de lograr que la velocidad

media sea mayor a la velocidad critica ($V > V_c$) para que el flujo que se genere dentro de la tubería del sistema extractor, sea capaz de transportar la masa fluidica.

En este caso, la velocidad analítica media, es mayor que la velocidad critica ($1.97 > 1.6465$), por lo que se garantiza analíticamente la operación del sistema extractor por el principio de sifón, transportando así, la masa fluidica.

Finalmente, de acuerdo a los resultados analíticos obtenidos, se observa que efectivamente se cumple la condición $V > V_c$ por lo que se garantiza el movimiento de flujo dentro de la tubería.

CAPITULO 4

JUSTIFICACIÓN ANALITICA

4.1 INTRODUCCIÓN

El planeamiento matemático, justifica plenamente el análisis desarrollado en el campo experimental minimizando tiempo y costo. El planeamiento, analítico es una herramienta de apoyo para todas las áreas y en especial en la rama de la ingeniería, derivándose en este caso en la dinámica de fluidos y la hidrodinámica. Existen diversos temas de hidrodinámica que se justifican penamente para demostrar un planteamiento matemático y experimental.

4.2 PLANTEAMIENTO DE ECUACIONES

Los métodos de análisis a considerar de acuerdo a un flujo en movimiento que transporta material sólido y el mecanismo por el que cambia sus propiedades, este principio, se basa en los principios básicos de la mecánica, como el principio de continuidad o conservación de la materia o transporte de masa, que en este caso se trata principalmente de la masa de un fluido por unidad de tiempo que entra en un volumen específico

dentro del flujo de forma y magnitud constantes, por lo que se considera un volumen de control.

Teóricamente se trata de una cantidad neta de masa, es decir, la misma cantidad que entra, es la misma cantidad que sale o la cantidad de masa que atraviesa la superficie de frontera del volumen diferencial por unidad de tiempo, más la rapidez de la variación de la masa contenida en el volumen, es equivalente a cero, que se conoce como la ecuación de continuidad.

Aplicando el principio de la conservación de la materia en el volumen de control cuyos lados son dx , dy y dz donde la masa es igual a la densidad por la diferencial de volumen como se muestra en la figura.

Figura. 4.1 Diferencial de volumen de control de la ecuación de continuidad.

En el centro de la masa de la diferencial de volumen, corresponde al producto de la masa ρ_v como una función vectorial.

Al pasar las caras normales del eje z que limitan al elemento del fluido, la función ρ_v se incrementa y decremента de la misma manera o en la misma cantidad.

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} dz \quad (1)$$

De acuerdo al eje de referencia z como se muestra en la figura.

Figura 4.2 Diferencial de la masa que entra y sale del elemento diferencial de volumen en función del eje z.

El análisis de comportamiento del estudio, indica la componente de la función ρ_v de acuerdo al eje z, de tal manera que se considera positiva de la masa que sale del volumen y negativa la masa que entra, por lo que la cantidad neta de masa que atraviesa las caras del volumen diferencial en el plano z será.

$$\left(\rho v_z + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} dz\right) dx dy - \left(\rho v_z - \frac{1}{2} \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} dz\right) dx dy = \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} dx dy dz \quad (2)$$

Y de acuerdo a un análisis similar, la cantidad neta de masa que atraviesa las caras normales al eje X y Y serán:

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} dx dy dz \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho v_y}{\partial y} dx dy dz \quad (4)$$

La rapidez de variación de la masa contenida en la diferencial de volumen será

$$\frac{\partial}{\partial t}(dx dy dz) \quad (5)$$

Por lo que, por el principio de conservación de la masa, se establece

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} dx dy dz + \frac{\partial}{\partial t}(dx dy dz) = 0 \quad (6)$$

Y puesto que el diferencial de volumen no cambia respecto al tiempo, la ecuación anterior resulta

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

Pero si

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} = \text{div}(\rho v) \quad (8)$$

Se tiene

$$\text{div}(\rho v) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

Que es la ecuación de continuidad o conservación de la materia.

Por otro lado, de acuerdo a la segunda ley de newton o a la ecuación de impulso y cantidad de movimiento, establece la relación fundamental entre la resultante de las fuerzas que actúan sobre una partícula y la

variación en el tiempo de la cantidad de movimiento que puede ser de acuerdo a la componente escalar según el flujo, conocida como la ecuación de la energía que permite calcular las diferentes transformaciones de energía mecánica dentro del flujo y las cantidades disipadas en energía calorífica que no es aprovechada cuando se trata de agua, y en la otra ecuación de otro tipo vectorial conocida como impulso y cantidad de movimiento que determina algunas fuerzas que producen el flujo si se conoce el cambio en la cantidad de movimiento y las fuerzas restantes. A partir de la segunda ley de Newton, se consideran las fuerzas que se oponen al movimiento que desarrolla un trabajo mecánico equivalente a la energía disipada al vencer dichas fuerzas. Al aplicar la segunda ley de Newton a un elemento diferencial de masa de un líquido de manera $dF = dm * a$ se obtienen las ecuaciones de movimiento a lo largo de una línea de corriente para el flujo de un líquido real no permanente. La derivación de esta ecuación corresponde a las condiciones particulares del movimiento de acuerdo al sistema de referencia.

Para el planteamiento de las ecuaciones, es necesario establecer un equilibrio dinámico de las fuerzas en las direcciones, normal y tangencial que actúan sobre el elemento diferencial líquido con la fuerza actuante del peso como única fuerza que actúa como se muestra en la figura.

Figura 4.3 Componentes de las fuerzas que actúan sobre el elemento de volumen diferencial.

Dicho elemento integra las variables de velocidad (v), presión (p), densidad (ρ) y esfuerzo tangencial (t). Las componentes de las fuerzas que actúan sobre el elemento en la dirección z son las fuerzas de superficie resultante de un gradiente de presiones en dirección del movimiento y para la dirección positiva en la coordenada z será.

$$\left(P - \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial z} dz\right) dxdy - \left(P + \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial z} dz\right) dxdy = -\frac{\partial P}{\partial z} dxdydz \quad (10)$$

Por otro lado, las fuerzas de superficie debido a la resistencia al movimiento se evalúa en términos del esfuerzo tangencial τ las cuales son:

$$\left(\tau + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau}{\partial x} dx\right) dydz - \left(\tau - \frac{1}{2} \frac{\partial \tau}{\partial x} dx\right) dydz = \frac{\partial \tau}{\partial x} dxdydz \quad (11)$$

Y la otra será

$$\left(\tau + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau}{\partial y} dy\right) dxdz - \left(\tau - \frac{1}{2} \frac{\partial \tau}{\partial y} dy\right) dxdz = \frac{\partial \tau}{\partial y} dxdydz \quad (12)$$

Y la componente de la fuerza del cuerpo, debida al principio peso del elemento diferencial con la componente

$$\cos\theta = \frac{\partial z}{\partial x} \quad (13)$$

Se tiene

$$-\rho_g dx dy dz \cos\theta = -\rho_g dx dy dz \frac{\partial z}{\partial x} \quad (14)$$

De acuerdo a la segunda ley de Newton en función del elemento multiplicada por el vector aceleración, se tiene el volumen del elemento dx, dy, dz .

Finalmente se tiene

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathcal{U}}{\partial x} - g \frac{\partial z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{V^2}{2} \right) + \frac{\partial v}{\partial z} \quad (15)$$

Que representa la ecuación diferencial de movimiento en la dirección z estableciéndose un equilibrio dinámico del elemento diferencial, donde la fuerza de fricción se considera despreciable, por lo que.

$$-\frac{\partial \rho}{\partial z} dx dy dz - \rho_g dx dy dz \frac{\partial z}{\partial x} = -\rho \frac{V^2}{r} dx dy dz \quad (16)$$

Donde r es el radio local de curvatura de la línea de corriente como se muestra en la figura.

Figura 4.4 Radio de curvatura (r) de las líneas de corriente a la entrada de la boquilla del sistema extractor.

Dividiendo entre $\rho_g dx dy dz$ se tiene

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \rho \frac{\partial z}{\partial z} = -\frac{V^2}{r} \quad (17)$$

Que termina la distribución de la presión en dirección normal a la línea de corriente conociendo la distribución de velocidades valido al flujo permanente y no permanente.

Este trabajo, tiene como objetivo plantear las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento y Navier Stokes para justificar analíticamente el comportamiento del flujo que pasa a través de una tubería y tomando en cuenta el sistema mecánico de rotor.

4.3 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

A partir de la consideración de un volumen de control diferencial Δx , Δy y Δz en el espacio tridimensional cuya densidad y velocidad son funciones de la posición en función del tiempo y el espacio. Al calcular el flujo de masa por segundo que circula a través de cada cara de un cubo hipotético, se obtienen las siguientes ecuaciones en las tres direcciones (x, y, z).

$$-\left[\frac{\partial(\rho_u)}{\partial x} \Delta x\right] \Delta y \Delta z, -\left[\frac{\partial(\rho_u)}{\partial y} \Delta y\right] \Delta x \Delta z \text{ y } -\left[\frac{\partial(\rho_u)}{\partial z} \Delta z\right] \Delta x \Delta y \quad (18)$$

Por el principio de conservación de la materia, la suma de estas tres componentes deberá ser igual a la rapidez de la variación en función del tiempo y la masa, es decir.

Donde los incrementos Δx , Δy y Δz son independientes del tiempo, ya que el volumen de control es fijo, por lo que se tiene:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w)}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

Y esto a su vez

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta \cdot \rho \mathbf{q} = 0 \quad (20)$$

Pero también puede quedar como

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (21)$$

O bien

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta(\rho \mathbf{q}) = 0 \quad (22)$$

Que es conocida como la ecuación general de continuidad, para un fluido que se encuentra en un fluido variado.

El fluido dentro de la boquilla, después del primer rotor interno, es netamente rotacional. La velocidad de rotación de un elemento del fluido con los diferenciales Δx y Δy girando alrededor del eje z y sus incrementos en las direcciones X y Y.

Definiendo el sentido contrario a las manecillas del reloj como positivo, se tiene que la velocidad de rotación del frente Δx del elemento será.

$$\frac{v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \Delta x - v}{\Delta x} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad (23)$$

Y para el frente Δy del elemento será:

$$\frac{-u - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \Delta y - u}{\Delta y} = -\frac{\partial v}{\partial y} \quad (24)$$

De acuerdo a la figura donde el signo negativo se introduce para conservar la convección de la rotación.

$$u + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y$$

y

Fig. 4.5 Esquema analítico para el cálculo de la rotación de un elemento fluidico.

La velocidad neta de rotación del elemento del fluido alrededor del eje z es el promedio de la suma de rotación sobre los frentes Δx y Δy

$$\frac{1}{2} \left[\frac{v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \Delta x - v}{\Delta x} + \frac{-u - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \Delta y + u}{\Delta y} \right] = \omega_z \quad (25)$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \Delta x - v}{\Delta x} + \frac{-u - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \Delta y + u}{\Delta y} \right] = \omega_z \quad (26)$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{v}{\Delta x} + \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) \Delta x}{\Delta x} - \frac{v}{\Delta x} - \frac{u}{\Delta y} - \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \Delta y}{\Delta y} + \frac{u}{\Delta y} \right] = wz \quad (27)$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] = wz \quad (27)$$

En forma análoga se tiene

$$wx = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad y \quad wx = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (29)$$

Por lo que el vector resultante de velocidad de rotación será

$$w = \frac{1}{2} (\nabla \times q) \quad (30)$$

Con magnitud

$$|w| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2} \quad (31)$$

Aquí, el vector $\nabla \times q$ es el rotacional del vector velocidad y también es conocido como verticidad.

4.4 ECUACIONES DE NAVIER-STOKES

Para fluidos Newtonianos con un coeficiente de viscosidad de acuerdo a las funciones de velocidad de deformación se obtiene para la componente x de la ecuación de movimiento.

$$\rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot q) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] = \rho a_x \quad (32)$$

Esta ecuación es válida para un fluido Newtoniano de densidad y viscosidad viable en un campo gravitacional. Las medicinas de la viscosidad indica que μ es una función de la temperatura y la presión que se considera casi despreciable y si los cambios de temperatura no son muy

grandes como una viscosidad constante y proporcional a la temperatura media del fluido, entonces la ecuación anterior se transforma en

$$\rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla * q) \right] + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] = \rho a_x \quad (33)$$

Desarrollando se tiene

$$\rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\nabla * q) = \rho a_x \quad (34)$$

Similarmente para las direcciones Y y Z se tiene

$$\rho g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\nabla * q) = \rho a_y \quad (35)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\nabla * q) = \rho a_z \quad (36)$$

Que son la forma cartesiana de las ecuaciones de Navier Stokes, para fluidos compresibles y viscosidad constante.

En notación vectorial y empleando la ecuación para el vector aceleración se tiene

$$\rho g - \nabla \rho + \mu \nabla^2 q + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla * q) = \rho \frac{\partial q}{\partial t} + \rho (q * \nabla) q \quad (37)$$

Pero para fluidos incompresibles $(\nabla * q) = 0$ junto con las ecuaciones de Navier- Stokes se tiene

$$\rho g - \nabla \rho + \mu \nabla^2 q = \rho \frac{\partial q}{\partial t} + \rho (q * \nabla) q \quad (38)$$

Considerando un volumen de control diferencial en el espacio tridimensional Δ_x , Δ_y y Δ_z en una región con una densidad y velocidad en función del espacio y el tiempo.

A partir de un punto localizado estratégicamente, se puede calcular el flujo de masa por segundo que circula a través de cada cara de un cubo hipotético en el espacio tridimensional como se muestra en la figura.

Figura 4.6 Volumen de control diferencial a través del eje x para la conservación de la materia.

Por lo que el flujo neto a través de la cara perpendicular al eje x será:

$$-\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \Delta x \right] \Delta y \Delta z \quad (39)$$

Así entonces, se obtienen el flujo de masa por segundo que circula a través de cada cara del cubo en tres direcciones.

$$-\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \Delta x \right] \Delta y \Delta z \quad (40)$$

$$-\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial y} \Delta y \right] \Delta x \Delta z \quad (41)$$

$$-\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial z}\Delta_x\Delta_y\right] \quad (42)$$

Por lo que de acuerdo al principio de conservación de la materia, la sumatoria de estas tres componentes, deberá ser igual a la rapidez de variación en función del tiempo, y de la masa que existe dentro del volumen de un cubo de control, es decir:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho(\Delta_x\Delta_y\Delta_z) \quad (43)$$

Donde Δ_x , Δ_y y Δ_z son independientes del tiempo, ya que el volumen de control esta estático, por lo que se tiene:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \rho\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) = 0 \quad (44)$$

O bien

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \rho(\nabla \cdot \mathbf{q}) = 0 \quad (45)$$

$$= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (46)$$

Que es la ecuación general de continuidad para el flujo que se encuentra en un flujo variado y para un flujo incompresible, está dada por la ecuación

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = 0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (47)$$

Sin embargo, si consideramos el flujo incompresible, se tiene

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 = \frac{\partial\rho}{\partial t} + u\frac{\partial\rho}{\partial x} + v\frac{\partial\rho}{\partial y} + w\frac{\partial\rho}{\partial z} \quad (48)$$

En el espacio tridimensional.

Al aplicar las ecuaciones generales de Navier-Stokes que se aplican a cualquier fluido sobre el cual actúan las fuerzas gravitacionales considerando esfuerzos normales y tangenciales de acuerdo a la componente x, se tiene:

$$\rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu (\nabla * q) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] = \rho a_x \quad (49)$$

Desarrollando en la dirección x, se tiene:

$$\rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\nabla * q) = \rho a_x \quad (50)$$

En la dirección y

$$\rho g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\nabla * q) = \rho a_y \quad (51)$$

Finalmente en la dirección z

$$\rho g_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\nabla * q) = \rho a_z \quad (52)$$

Estas ecuaciones son para fluidos compresibles con una viscosidad constante y empleando la ecuación del vector aceleración.

$$a = \frac{\partial q}{\partial t} + (\nabla * q)q \quad (53)$$

Se reduce a

$$\rho g - \nabla \rho + \mu \nabla^2 q + \nabla (\nabla * q) = \rho \frac{\partial q}{\partial t} + \rho (q * \nabla) q \quad (54)$$

Finalmente para los fluidos incompresibles $q * \nabla = 0$ así, las ecuaciones de Navier-Stokes quedaran como:

$$\rho g - \nabla \rho + \mu \nabla^2 q = \rho \frac{\partial q}{\partial t} + \rho (q * \nabla) q \quad (55)$$

Por otro lado, el esfuerzo normal en la dirección x se expresa como:

$$\sigma_x = \sigma^- + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu (\nabla * q) \quad (56)$$

Donde

σ^- .— Es la media aritmética de los tres esfuerzos normales en las direcciones X, Y y Z.

$2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$. — Es la doble acción de la viscosidad dinámica al entrar y salir de un elemento líquido diferencial.

$-\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{q})$. — Es el desplazamiento negativo de un elemento líquido diferencial al avanzar solo un tercio de su volumen.

Estos parámetros que forman parte de las ecuaciones de Navier-Stokes se presentan de acuerdo a su desplazamiento de un volumen de control y el eje correspondiente como se muestra en la figura.

Figura 4.7 Desplazamiento diferencial de control en el eje x.

Al ajustar las ecuaciones de Navier-Stokes de acuerdo al proyecto desarrollando en el proyecto de investigación las coordenadas establecidas en el eje tridimensional, se tiene que el eje z es el principal eje de acción a considerar, ya que el flujo principal fluye en dirección vertical debido a la succión que se genera en la boquilla del sistema extractor.

CAPITULO 5

PLANEACION GENERAL

5.1 INTRODUCCION

Como parte de la preparación para la planeación general de este proyecto, se realizaron los trabajos por diferentes etapas que consistieron principalmente en el análisis estudio y construcción del sistema extractor, ensayos de túnel de viento y preparación del tanque de pruebas. Las

etapas de trabajo fueron planeadas y elaboradas en forma gradual de acuerdo con las necesidades de avance, desarrollo y construcción de todo el sistema extractor parte por parte. Por último, cada etapa tuvo a su vez un desarrollo especial de acuerdo a la técnica específica en coordinación con las demás etapas.

5.2 CONSTRUCCION DEL SISTEMA EXTRACTOR

El diseño original del sistema extractor se basa en principios teóricos y mecánicos aplicado directamente al problema de extracción de sedimentos y tomando en cuenta las condiciones de trabajo bajo las cuales actúa directamente en el proceso de extracción.

De acuerdo con estas condiciones particulares y considerando que el sistema actúa en un medio continuo (fluido), la planeación de los experimentos consistió en desarrollar un conjunto de ensayos, sobre un prototipo hidráulico escala 1:1 a través del cual se pudieran representar y medir diferentes parámetros que condujeran a relacionar y determinar las condiciones de mayor eficiencia del sistema, situación que se logra cuando se extrae el máximo volumen de sedimento para la mínima presión de vacío en el conducto, que no produzca cavitación y con el mínimo volumen de agua. Cabe aclarar que el diámetro de la tubería del experimento en laboratorio es igual al del prototipo de 4". La carga hidráulica en el laboratorio es menor que en prototipo con una relación de 1 a 7 por lo que la velocidad y los factores observados en este, serán mayores y en consecuencia más favorables para el mejor funcionamiento del sistema extractor en el prototipo.

Para la ejecución de estos ensayos se tomaron en consideración las condiciones de similitud del número de Reynolds y número de Froude, así como los equipos de medición, el número de ensayos y el tiempo de su ejecución.

Se establecieron dos etapas de ensayos; los preliminares y los definitivos. Los primeros fueron dirigidos a la calibración, estudio y mantenimiento de instalaciones y equipo, así como mejorar el diseño del removedor a través de ensayos en un túnel de viento, de acuerdo a las condiciones preestablecidas para la acción de ejecución de presión negativa en la

tubería y conseguir así mayor velocidad de rotación del cortador. Los segundos fueron enfocados a obtener y recopilar datos para posteriormente procesarlos y encontrar la relación entre los parámetros seleccionados.

5.3 CALIBRACION Y ENSAYOS PRELIMINARES DEL SISTEMA EXTRACTOR.

Para la operación del sistema extractor, se llevaron a cabo una serie de ensayos a todos sus elementos que lo conforman con la intención de observar su comportamiento ante las condiciones reales de trabajo.

El extractor fue diseñado hidrodinámicamente e hidromecánicamente de acuerdo a principios aerodinámicos que reaccionan en función a una corriente de flujo a diversas velocidades, por lo que la primera prueba durante su construcción fue conectar la flecha del extractor directamente a un taladro mecánico con el máximo de revoluciones por minuto (2800 rpm), es decir, a su máxima potencia, posteriormente después de algunos ajustes y probarlo nuevamente con el taladro mecánico se introdujo el mecanismo móvil al cuerpo principal del extractor y probarlo de manera definitiva con el taladro mecánico para analizar su comportamiento definitivo y detectar posibles fallas y corregirlas previamente a su primera fase de pruebas.

Durante la primera fase de pruebas, fue la construcción del sistema extractor de sedimentos, analizando todos los parámetros que intervienen durante su operación empleando principios aerodinámicos e hidromecánicos.

El material seleccionado para el diseño y construcción del modelo fue material impermeable, ligero, económico y sobre todo que no dañen el medio ambiente y la vida acuática, para esto empleamos; fibra de vidrio para la boquilla de entrada, accesorios de PVC para el sistema de succión adicional, tubería de acrílico transparente de 0.50 m de longitud para observación directa de 4 plg. de diámetro, y tubería de PVC hidráulico de 4 plg. de diámetro en toda la extensión del sistema extractor. Incluyendo un tramo horizontal de acrílico de 0.1 m para verificar el proceso de vacío.

La parte del modelo que tuvo mayor desarrollo e investigación, y a la que se sometió al mayor número de pruebas y ensayos, así mismo como a cambios de diseño y estructura, fue el extractor, cuyo objetivo es el de remover, dirigir y transportar la masa fluidica del tanque de pruebas hacia el vertedor, es decir, funcionando como una aspiradora de fondo, que succiona el material solido sedimentado.

La parte central del extractor es un sistema mecánico con partes móviles denominado mecanismo central, que se baso en principios hidromecánicos e hidrodinámicos de acuerdo al análisis de la dinámica y la mecánica de fluidos, justificando plenamente cada elemento y su funcionalidad. Por tal motivo, se llevaron a cabo, una serie de pruebas que permitieron llegar al diseño definitivo.

El objetivo principal del modelo extractor, fue la operabilidad en condiciones reales, es decir, operar dentro de un medio continuo, una masa fluidica transportándolo dentro de todo el sistema extractor a una presión y a una velocidad determinada, razón por la cual, se tomo en cuenta que el sistema extractor trabaja en un medio continuo parte solido (sedimentos) y parte liquido (agua), es decir, en el lecho del embalse donde el extractor provoca una turbulencia, creando un medio lodoso, por lo que todas las piezas del mecanismo central están diseñadas para tal fin, es decir, desde la selección de materiales (aluminio, PVC, nailon, plástico), sistema de acoplamiento a la flecha y al cuerpo del sistema extractor así como sus dimensiones y diámetros de tal manera que las partículas de sedimento y en especial los sedimentos de tamaño coloidal, limos y arcillas no intercedan al momento de operar el mecanismo central, es decir, que las pequeñas partículas de sedimento no obturen o impidan el movimiento rotatorio del mecanismo central en condiciones reales de trabajo, con la finalidad de que no exista perdida de energía ni reste velocidad angular a causa del sedimento que pasa por todo el mecanismo central, es decir, que no se quede atrapado en todo el mecanismo, la idea es hacer de la masa fluidica, una masa homogénea. Por tal motivo se llevaron a cabo una serie de pruebas que permitieron llegar al diseño definitivo.

La parte central del extractor, es un sistema mecánico con partes móviles denominado, mecanismo interno central, que se basa en principios hidrodinámicos e hidromecánicos de acuerdo al análisis de la dinámica y la mecánica de fluidos, justificando plenamente cada elemento y su funcionalidad. Por tal motivo se llevaron a cabo una serie de pruebas y ensayos que permitieron llegar al diseño definitivo, aunque se considera que aún se podrán realizar futuras evoluciones de diseño y construcción de un nuevo modelo extractor.

Por otro lado todos los elementos y piezas del mecanismo móvil, fueron diseñados y trabajados en el sistema ingles debido principalmente a su disponibilidad comercial y el uso de herramienta de precisión.

5.4 ELEMENTOS DEL SISTEMA EXTRACTOR.

1. Cuerpo principal

Se trata de un tramo de tubería de PVC hidráulico unido a un tramo de acrílico transparente de 0.50 m de longitud y 4 pulgadas de diámetro, con la finalidad de alojar al mecanismo interno central y al mismo permitir observar el movimiento del mecanismo al momento de estar operando. El cuerpo principal, es el que sujeta a todo el mecanismo interno central, evitando desplazamientos y deslizamientos.

2. Mecanismo interno central

Se trata de un conjunto de elementos interconectados entre sí, de tal manera que conforman la parte central del extractor, estos son:

2.1 Dispositivos inicial y final

Tienen la finalidad de evitar la pérdida de energía por empuje frontal (al inicio) y por succión (al final), por tal razón están diseñados hidrodinámicamente y contruidos de nailon-polietil UHMW – PE de forma semi- esférica de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " de radio con un orificio de $\frac{1}{4}$ " para acoplarse con precisión al eje principal.

Figura 5.1.- Dispositivos de entrada y salida.

2.2 Hélices

Tienen la finalidad de girar, de acuerdo a la velocidad angular en función del flujo que pasa a través del extractor y su objetivo es el de volver el flujo de la masa fluídica, de heterogénea a homogénea. Se trata de 3 hélices con 5 alabes cada una.

Dos hélices fueron colocadas en la parte central con diámetro de 3 $\frac{3}{4}$ pulg. con la finalidad de girar dentro de la tubería de 4 pulgadas y con un diámetro central de 1 $\frac{1}{2}$ pulg. para acoplarse a los dispositivos de entrada y de salida considerada una distancia ideal de mínimo 3 veces el diámetro de la tubería para re mezclar la masa fluídica, y la tercera hélice está colocada en la punta del modelo extractor, como removedor con un diámetro de 4 pulgadas.

2.3 Soportes (superior e inferior)

Estos soportes se empotran directamente en el cuerpo principal y son colocados perpendicularmente a una distancia de 8 $\frac{1}{2}$ pulgadas, uno respecto del otro, para evitar vibraciones, desplazamientos y desplazamientos laterales.

2.4 Eje Principal

Es el elemento interconectado a los soportes que integra los soportes y la flecha, permitiendo que la flecha gire libremente de acuerdo al movimiento rotatorio de las hélices en función del flujo que pasa a través del extractor.

Se trata de una conexión de tubería de PVC de 1 ½ pulgada acoplada geométricamente de acuerdo al diseño simétrico del sistema.

2.5 Flecha

Es el elemento principal que soporta todo el mecanismo interno central, a través de los soportes, lo que permite hacer rotar sobre su eje las hélices y el removedor en función del flujo que pasa a través del extractor. Se trata de una varilla de aluminio de ¼ " rígida de 80 cm de longitud que se ubica en la parte central del extractor y rota de acuerdo a la velocidad que generan las hélices que depende de la velocidad del flujo.

3. Sistema de succión adicional:

Permite que el extractor opere con mayor eficiencia, y en caso de que la boquilla se obture, es decir, en caso de que el nivel de azolve este por arriba de la boquilla de entrada, por lo que cuenta con tres codos distribuidos geométricamente, para permitir la entrada del flujo.

4. Boquilla abocinada de entrada.

Funciona como campana de dirección de flujo y tiene la finalidad de abarcar una mayor área de entrada (8 pulgadas) y dirigir el flujo hacia el interior del extractor, así como sujetar los tensores de acero, evitando la vibración del removedor al momento de girar y estabilizar la operación de flecha principal.

5. Removedor.

Tiene la función de generar una turbulencia al girar al pie del extractor permitiendo que las partículas de sedimento que se encuentran en el estrato superior, se levanten y sean atraídas debido a la presión negativa, cuenta también con una punta de dirección en forma de bala que evita que las aspas del removedor, tengan contacto directo con el sedimento de fondo o azolve.

5.5 JUSTIFICACION DIMENSIONAL DEL MECANISMO MOVIL.

La distribución geométrica del mecanismo móvil, intenta justificar las dimensiones de todo el mecanismo, tanto las partes fijas como las partes móviles como se muestra en la figura.

Figura 5.2 Mecanismo móvil interno del sistema extractor.

5.5.1 PARTE INTERNA

El mecanismo móvil es una articulación hidromecánica de entrada al sistema extractor, cual consta de:

a) Dispositivos (de entrada y salida).

Los dispositivos de entrada y salida tienen una forma circular hidrodinámica de 1½" con la finalidad de un acoplamiento preciso con las hélices y soportar el empuje del flujo al pasar desviándolo hacia los lados.

b) Hélices

Las Hélices que se emplearon son de 5 alabes con una finalidad de una mayor y mejor mezcla de la masa fluidica con el propósito de convertirla en una mezcla homogénea. Dos hélices fueron colocadas en la parte central, con un diámetro de 3 ¾" con el fin de girar dentro de la tubería de 4" y con un diámetro central de 1 ½" para acoplarse a los dispositivos de entrada y de salida a una distancia de 14". Considerada una distancia ideal para volver a mezclar la masa fluidica después de

haber pasado los soportes del mecanismo central y por ultimo una hélice externa colocada en la punta del extractor con la finalidad de operar como removedor de sedimentos.

c) Soportes

Los soportes del mecanismo central son extensiones del eje, colocados perpendicularmente a una distancia de 8 ½" de acuerdo a la distancia de las hélices interiores.

d) Eje principal

Es la parte central del mecanismo móvil, que integra los soportes y la flecha, se trata de una conexión de tubería de PVC de 1½", diseñada para evitar desplazamientos debido a contactos involuntarios en el removedor, y por otra parte para delimitar la distancia entre las hélices internas de 14"

e) Flecha

Se trata de la columna principal de aluminio de ¼" de todo el mecanismo móvil que rota sobre su eje y soporta a través de los soportes, todo el peso del mecanismo y a la vez permite girar las partes móviles como las hélices y el removedor.

5.5.2 PARTE EXTERNA

Como parte de una extensión externa del mecanismo central, se encuentra el removedor, el cual está formado por:

- 1) Sección posterior del removedor (tipo botella)
- 2) Hélice del removedor
- 3) Punta del removedor

1) Sección posterior del removedor (tipo botella)

Se trata de un dispositivo especial que permite delinear la corriente de flujo de entrada al sistema extractor. Dicha sección tiene una longitud de 2" con un diámetro de 1 ½" para acoplamiento de la hélice del removedor y diámetro menor de 5/8" para acoplamiento a la flecha.

2) Hélice del removedor

Permite remover los sedientos de fondo creando una turbulencia para así ser succionada por el sistema extractor. En este caso, se utilizaron dos

hélices, una de 6" con 4 aspas, otra de 4" con 5 aspas y otra de 8" con cinco aspas, con la finalidad de realizar los ensayos en condiciones diferentes.

3) Punta del removedor

Es la pieza que encabeza al extractor que se ubica a una distancia de 4" del mecanismo móvil como una distancia propicia para librar el sistema de succión adicional y la boquilla de entrada.

Se trata de una punta de nylon en forma de bala de forma hidrodinámica, que obedece una ecuación matemática con la finalidad de actuar como punto contacto directo con los sedimentos de fondo, en el caso de que tenga un cierto grado de estratificación y por otro lado como punto de contacto con un estrato rocoso o capa dura.

Se trata de una punta diseñada hidrodinámicamente de 1 ½" de diámetro para su acoplamiento preciso a la hélice que funciona como removedor y en función de una curva parabólica.

5.6 FUNCION DE LAS PARTES DEL EXTRACTOR

Las partes con que cuenta el modelo de la boquilla extractora son:

1. Cuerpo principal
2. Flecha ó eje principal
3. Soportes (superior e inferior) de la flecha
4. Hélices
5. Removedor y punta del removedor
6. Niple
7. Campana de dirección de flujo
8. Sistema de succión adicional

Las funciones de cada uno de los elementos de la boquilla extractora son:

1. El cuerpo principal es un tramo de 40 cm. de acrílico transparente y PVC hidráulico de 4 plg. de diámetro que alberga todos los elementos de la boquilla extractora, con el fin de observar el mecanismo interno al momento de estar operando.

2. La flecha o eje principal de aluminio, soporta las hélices internas y el removedor, lo que le permite girar conjuntamente sobre su eje de acuerdo a la velocidad del flujo.
3. Los soportes (superior e inferior) de PVC de 1.5 plg. se empotran directamente en el cuerpo principal y son colocados perpendicularmente uno respecto del otro para evitar vibraciones laterales al momento de operar el extractor y girar la flecha ó eje principal.
4. La hélices de plástico permiten una mayor velocidad y dirección del flujo, transformado los sedimentos de fondo en una mezcla homogénea como masa fluidica después de pasar a través de sus aspas.
5. El removedor y la punta del removedor es el conjunto externo del extractor, el cual se le colocan hélices de acuerdo con los ensayos que se realizan, cuyo objetivo es remover el sedimento asentado, removiendo la materia de fondo y creando turbulencia, para así finalmente ser extraído como mezcla atreves de la boquilla extractora. el diseño de estas aspas se sustento en el principio de las cabezas cortadoras de dragadoras para material granular y modificadas por ensayo y error. Se trata de un sistema con hélice y una punta diseñada hidrodinámicamente con punta de bala, que obedece a una ecuación parabólica y para evitar turbulencia de flujo, cuenta con un dispositivo posterior en forma de botella, como parte del una continuación hidrodinámica entre la hélice, que funciona como removedor frontal de los sedimentos de fondo, al generar una turbulencia, al girar al pie del modelo extractor, permitiendo que las partículas de sedimento que se encuentran en el estrato superior se levanten y sean absorbidos debido a la succión que genera todo el sistema extractor por el principio de sifón.
6. El Niple permite unir al cuerpo principal con la campana de dirección de flujo sellado herméticamente.
7. La campana de dirección del flujo tiene la finalidad de abarcar mayor área de entrada (8 plg.) y da un óptimo alcance al flujo, así

como sujetar los tensores de acero evitando la vibración del cortador al momento de girar.

8. El sistema de succión adicional consiste en un par de coples de cuatro pulgadas unidos entre sí, con tres entradas verticales interconectadas con codos de 2 pulgadas cada uno, permitiendo una entrada de flujo adicional permitiendo que por sus características, se convierta en rotatorio, las entradas están distribuidas proporcionalmente a 120° . Para el diseño y construcción del sistema de succión adicional se seleccionaron los siguientes materiales, de acuerdo al diseño de operación. Se emplearon dos coples de PVC sanitario de 4 pulgadas de diámetro unido por un tramo de 2.5 pulgadas, 3 codos de 90° de PVC sanitario de 2 pulgadas de diámetro interconectados a los coples por reductores de PVC de 1 pulgada de diámetro, todo unido con cemento para PVC, finalmente se empleo silicón para sellar los codos con los coples, solo por la parte externa. El sistema de succión adicional, permite la entrada de agua por arriba de la entrada principal, generando un flujo rotacional al interior del extractor, así como permitir que el flujo sea homogéneo al transportar la masa fluidica (agua y sedimento), ayudando con esto, el aumento de su eficiencia durante la operación del sistema extractor. La proporcionalidad del sistema de succión adicional, consta de un diámetro de 4 pulgadas y por otro lado, los dispositivos de succión adicional, cuentan con un diámetro de entrada de 2 pulgadas cada uno, sin embargo la entrada al sistema extractor cuenta con una entrada reducida de 1 pulgada, es decir, 3 en total, como se muestra en la figura.

Figura 5.3.- Sistema de succión adicional.

Para esta etapa, se realizó un convenio interinstitucional con el Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos No. 8 “Narciso Bassols García” (Escuela de Nivel Medio Superior) específicamente con el taller de plásticos y fibra de vidrio, para la construcción de la boquilla de entrada, que fue diseñada de acuerdo a una curva parabólica, y construida con fibra de vidrio, resina, plasti esmalte de color (gelcohat), catalizador y carga para resina (calcita); por lo que su consistencia es de alta resistencia, sobre todo a impactos involuntarios al momento de operar y resistente a altas presiones (profundidades) así como a aguas residuales, fangosas y marinas. Por otro lado, el acabado de la boquilla tiene una superficie libre de rugosidades, sobre todo en su parte interna para evitar pérdidas de energía por fricción tangencial en las paredes internas, por lo que la superficie dentro y fuera de la boquilla, fue totalmente lisa y pulida.

Dicho trabajo, es solo una parte de un sistema extractor de sedimentos que opera dentro del agua, es decir, se trata de un Proyecto Hidráulico que extrae los sedimentos de fondo (lodos) de un embalse por el principio de sifón. Esto, en respuesta al fenómeno de azolvamiento en embalses, que es un problema a nivel mundial, alargando la vida útil de un embalse, protegiendo así, el medio ambiente y como una alternativa más a resolver

el problema del calentamiento global, que afecta a todos los seres vivos de este planeta.

La decisión de elegir al Cecyt 8 para la delicada misión de la construcción de la boquilla abocinada y en especial el Taller de Plásticos de dicho Centro de Estudios, fue su infraestructura e instalaciones, innovando constantemente en técnicas y materiales y con una disponibilidad abierta para colaborar en proyectos artísticos y decorativos, así como técnicos y científicos; y con una vinculación con la industria, el comercio y cualquier institución pública o privada, y aún mas, de tratarse de una colaboración inter institucional con una Escuela Superior del Instituto Politécnico Nacional.

La construcción de la boquilla, representó un reto en función de sus objetivos, características y funcionalidad, ya que el objetivo principal del problema es el de extraer el mayor volumen de azolve ó sedimentos de fondo, con el mínimo volumen líquido (agua), ya que con el cambio climático actual, el proceso de erosión en todo el mundo se acelera, lo que trae como consecuencia grandes sequías, lo que resulta en un suelo árido y reseco y por otro lado fuertes lluvias que provocan una alta erosión hídrica y por tanto un mayor arrastre de sedimentos que se depositan en el fondo de los embalses, aumentando así el volumen sólido en presas, lo que provoca una disminución drástica del volumen útil (agua) que es el que precisamente se utiliza para diversos fines, como generación de energía eléctrica, riego de parcelas, abrevadero, abastecimiento de agua potable a la población, piscicultura, recreación, etc. y que serán requeridos por las futuras generaciones, tomando en cuenta que quizá exista una mayor demanda de los beneficios generados de una presa, es decir, dicho proyecto de investigación hidráulica, tiene un alcance futuro.

Fotografía 5.1 Construcción de la boquilla en el Taller de Plásticos del Cecyt 8 .

La boquilla abocinada, así como todos los elementos del sistema extractor están diseñados hidrodinámicamente, previo estudio y análisis aerodinámico. La boquilla funciona como un elemento de entrada al sistema extractor, por lo que su forma está en función de una curva parabólica, con la finalidad de succionar un mayor volumen de flujo, razón por la cual fue ideada, planeada y diseñada en la ESIA Zacatenco de acuerdo a un estricto modelo matemático, para ser probado en un túnel de viento de la ESIME Ticomán, después ser probado en un tanque de pruebas del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Zacatenco para realizar los ensayos, la calibración, ajustes y pruebas finales, para así, finalmente ser probada en un embalse real.

La selección del material del molde fue Madera de Cedro de primera, debido principalmente a su resistencia al ser tallada y trabajada en el torno, a sus características térmicas naturales, así como una permeabilidad natural ideal para recibir la pasta preparada para tal fin y así ser llevado a la ESIA Zacatenco para su aprobación y finalmente llevado al taller de Plásticos del Cecyt 8 para servir como molde principal en la

construcción de la boquilla. Cabe mencionar que el molde definitivo no fue sino hasta después de cuatro intentos tras lograr pasar las altas exigencias de un estricto control de calidad.

Fotografía 5.2 Molde definitivo de madera de cedro utilizado para la construcción de la boquilla

En cuanto al modelado, se requería de habilidad y precisión, ya que de ello dependía que la boquilla tuviera la forma adecuada, según el modelo matemático y los planos de diseño. El moldeado, terminación, acabado y pulido de la boquilla, exigía una superficie interior totalmente lisa y pulida, para evitar pérdidas de energía locales por fricción tangencial en el interior de la boquilla, por lo que su acabado interior pasó las pruebas que el proyecto exigía, así como de su acoplamiento en la siguiente fase del sistema extractor (el sistema antibloqueo) que fue realizado sin contratiempos y con una precisión milimétrica dentro del taller de Plásticos, comprobando así, la calidad, precisión y excelencia en el trabajo realizado.

Fotografía 5.3 Acabado rustico de la boquilla de acuerdo al diámetro de acoplamiento.

La elección de los materiales que se manejan dentro del taller de plásticos del Cecyt 8 se justifica plenamente, ya que la boquilla va a estar sujeta a altos esfuerzos tangenciales y normales dentro del agua, así como impactos involuntarios al momento de operar en el interior de un embalse, por lo que el material tenía que ser altamente resistente y sobre todo impermeable. Después de un análisis general del problema por parte de los equipos del Taller de Plásticos del Cecyt 8 y de la ESIA Zacatenco y aprovechando la amplia experiencia y habilidad por parte de los trabajos realizados en el Taller de Plásticos, se llegó a la conclusión de que el material seleccionado sería fibra de vidrio, Caucho de silicón, Gelcohat (plasti-esmalte de color), catalizador y una carga especial para resina (calcita), los cuales en su conjunto se obtiene una mezcla totalmente impermeable y de alta resistencia a todo tipo de impactos involuntarios al momento de estar operando en condiciones reales de trabajo, debajo del agua, ideal para ser sumergida a grandes profundidades y resistente incluso a aguas residuales y salinas.

Fotografía 5.4 Terminado definitivo de la boquilla acoplada con el sistema de succión adicional.

Dentro de la siguiente fase de pruebas, se realizó otro convenio con la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional en la Unidad Ticomán, donde se imparte la carrera de Ingeniería Aeronáutica, esto con el fin de probar el extractor en el túnel de viento.

Como requisito previo, se construyó una estructura metálica de soporte rígido y resistente para soportar el peso del extractor y el empuje generado por el túnel de viento, al momento de exponerlo de manera directa frontal y a dos ángulos de ataque vertical de 15° , por lo que la estructura cuenta con un sistema articulado para diferentes posiciones de acuerdo con su ángulo de ataque y un sistema de sujeción (abrazaderas); la estructura metálica finalmente fue recubierta con anticorrosivo y esmalte, además cuenta con un sistema de anclaje (pijitas de $\frac{3}{4}$ ") a una

mesa de madera construida para tal fin. Como parte de una preparación previa, se realizo un estudio para determinar la ubicación de los puntos a perforar en el prototipo, tomando en cuenta los puntos críticos a la entrada, a lo largo y al final del cuerpo del prototipo con la finalidad de determinar la presión estática en puntos específicos, así como la presión dinámica por medio de dispositivos de medición (pitot) de presión dinámica en cuatro puntos estratégicos.

Como requisito previo, se construyo una estructura metálica de soporte rígido y resistente a soportar el peso del extractor y el empuje generado por el túnel de viento, al momento de exponerlo de manera frontal y a diferentes ángulos de ataque verticales, por lo que la estructura cuenta con un sistema articulado para diferentes posiciones de acuerdo con su ángulo de ataque y un sistema de sujeción (abrazaderas); la estructura metálica finalmente cuenta con un sistema de anclaje (pijas) a una mesa de madera construida para tal fin.

Como parte de una preparación previa, se realizo un estudio para determinar la ubicación de los puntos a perforar en el prototipo, tomando en cuenta los puntos críticos a la entrada, a lo largo y al final del cuerpo del prototipo con la finalidad de determinar la presión estática en puntos específicos.

Para esto, se realizaron 27 perforaciones a lo largo de todo el cuerpo. Dichas perforaciones fueron de $1/8$ " de diámetro alineados a lo largo del cuerpo del prototipo, así como en puntos específicos.

Una vez realizada la serie de perforaciones, se acoplaron tramos de tubería de latón, de $3/4$ " de largo y de $1/8$ " de diámetro por medio de plastilina epóxica, como se muestra en la fig. 8.1

Figura 5.4 Sistema de acoplamiento de los tubos de latón con el cuerpo del prototipo en medición de presión estática.

Los tramos de tubería de latón están ligados a tramos de manguera flexible elástica de 50 cm de longitud que se conectan directamente con un medidor de presión, se trata de un manómetro T.E.M Engineering Limited Ingles, previamente nivelado y con una inclinación de 30° para realizar los ensayos de presión estática.

Por otro lado, se realizó la calibración del túnel de viento para determinar la velocidad que genera. Se trata de un túnel de viento Plint & Partners Ltd. Engineers Working ham Berkshire Ingles, con un motor Brook Crompton Parkison, Guiseley Motors Ingles.

La calibración del túnel de viento fueron realizadas en el Laboratorio de Túnel de Viento dentro de las instalaciones de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Ticomán el día Jueves 29 de Octubre de 2009; con hora de inicio: 6:50 pm., y hora de terminación: 7:33 pm. Tiempo total: 43 minutos.

Las condiciones iniciales como temperatura, presión barométrica y humedad relativa, fueron registradas en la estación No. 2 del propio laboratorio en un termómetro marca Princo

Southampton, Pa y un Cole Parmer Instrument Company Chicago – Illinois, el cual se tomaron los siguientes registros como condiciones iniciales:

Temperatura ambiente (Ta)..... 22°C

Presión barométrica (Pb)..... 599 mm Hg

Humedad relativa (Hr)..... 78%

Por lo que se procede a realizar los siguientes cálculos:

1.- Calculo de la presión barométrica corregida (Pbc)

$$P_{bc} = P_b \left[\frac{1 + 0.0000184 \frac{1}{^{\circ}C} (Ta)}{1 + 0.0001818 \frac{1}{^{\circ}C} (Ta)} \right] \quad (1)$$

$$P_{bc} = 599 \text{ mm Hg} \left[\frac{1 + 0.0000184 \frac{1}{^{\circ}C} (22^{\circ}C)}{1 + 0.0001818 \frac{1}{^{\circ}C} (22^{\circ}C)} \right]$$

$$P_{bc} = 596.85 \text{ mm Hg}$$

2.- Calculo de la presión de saturación (Ps) de acuerdo a la formula

$$P_s = 2.685 + 3.537 \times 10^{-3} (Ta^{2.245}) \quad (2)$$

Nota: Debido a que la formula se basa en métodos empíricos, será necesario convertir la temperatura ambiente de °C a °F. Introduciendo este valor de temperatura en la formula, se obtiene la presión de saturación en lb / pie².

Temperatura ambiente (Ta)

$$^{\circ}F = (1.8 * 22^{\circ}C) + 32 = 71.60^{\circ}F$$

Sustituyendo

$$P_s = 2.685 + 3.537 \times 10^{-3} (71.60^{2.245})$$

$$P_s = 54.31 \frac{\text{lb f}}{\text{pie}^2}$$

Convirtiendo a Kg f / m²

$$54.31 \frac{lb\ f}{pie^2} = 265.17 \frac{Kg\ f}{m^2}$$

3.- Calculo de la presión de vapor (Pv)

$$P_v = H_r P_s \quad (3)$$

Sustituyendo

$$P_v = 0.78 \left(265.17 \frac{Kg\ f}{m^2} \right) = 206.83 \frac{Kg\ f}{m^2}$$

4.- Calculo de la densidad del aire (P z)

Previo a emplear la formula, se requiere convertir la presión barométrica de mm Hg a Kg f / m² , así como la temperatura ambiente a °K, por lo que:

$$P_{bc} = 596.85\ mm\ Hg = 8116.50 \frac{Kg\ f}{m^2}$$

$$T_a = 22^\circ C = 295.16\ ^\circ K$$

Para un cálculo más aproximado, se determina la aceleración de la gravedad en la Ciudad de México.

Considerando que la Ciudad de México se encuentra situada a 19° 25' latitud norte y a 2240 metros s.n.m.

Tomando en cuenta que la Ciudad de México está ubicada aproximadamente a 20° latitud norte, entonces:

$$g_{20}^\circ = 978.6 \frac{cm}{s^2}$$

Haciendo la corrección por la altitud se tiene:

$$g_{20}^\circ = \frac{0.3 \times 2240}{1000} = 0.672 \frac{cm}{s^2}$$

$$g_T = 978.6 - 0.672$$

$$g_T = 9.77928 \frac{m}{s^2}$$

Por lo que la fórmula para obtener la densidad del aire será:

$$P_z = \frac{P_{bc} - 0.3779 * P_v}{g * R * T_a} \quad (4)$$

Donde R es la constante del aire

$$R = 29.256 \frac{m}{^\circ K}$$

Sustituyendo

$$P_z = \frac{8116.50 \frac{Kg f}{m^2} - 0.3779 * 206.83 \frac{Kg f}{m^2}}{9.77928 \frac{m}{s^2} * 29.256 \frac{m}{^\circ K} * 295.16 ^\circ K}$$

$$P_z = 0.09519 \frac{Kg f * s^2}{m^4}$$

$$P_z = 0.09519 \frac{UTM}{m^3}$$

$$P_z = 0.9335 \frac{Kg m}{m^3}$$

Una vez obtenida la densidad del aire (P_z), se procede a la calibración del túnel de viento con un medidor de presión a la entrada del túnel como se muestra en la figura:

FIG. 5.5 Calibración del túnel de viento a la entrada con dispositivo especial.

La graduación de la velocidad del viento, depende directamente de la apertura de una llave de control que abre gradualmente un diagrama que permite la entrada de aire, es decir, la calibración del túnel de viento se graduó desde la llave totalmente cerrada, hasta Medidor de presión en función de la velocidad y dirección del viento.

El cual está conectado al manómetro T.E.M. que registra la presión total (PT) y la presión estática (PE) en cm, por lo que la diferencia de las presiones total y estática se multiplica por el factor sean 30° , debido a que el manómetro tiene una inclinación de 30° respecto a su horizontal.

Por otro lado, el túnel de viento tiene integrado un manómetro con un ángulo de inclinación de 30° respecto a la horizontal, del cual, también se toma registro que será la Presión Diferencial de Referencia (PDR).

El diafragma es un dispositivo de válvula manual que permite la entrada de aire y que a su vez esto genera el flujo de aire con una velocidad de salida mínima hasta una velocidad máxima. La apertura del diafragma fue gradual, hasta su máxima apertura, es decir, desde su mínima, hasta su máxima velocidad, por lo que la apertura de dicha llave, se abrió en una serie de 30 secuencias aproximadamente.

5.7 PRUEBA DE RESISTENCIA DEL PROTOTIPO ANTE EL TUNEL DE VIENTO.

Debido a la fuerza de empuje que genera el túnel de viento, el prototipo en estudio, se anclo a la mesa de pruebas por medio de 3 pijas que sujetan la estructura metálica, que a su vez sostiene al prototipo la prueba en sí, consistió en ver la reacción y resistencia, así como calibrar posibles alteraciones o fallas del prototipo expuesto directamente al túnel de viento; con dicha exposición se verifico y comprobó su diseño aerodinámico y resistencia estructural del mismo.

Bajo las siguientes condiciones iniciales del Laboratorio de Aerodinámica, se realizo la prueba de resistencia:

Fecha: Jueves 12 de Noviembre de 2009.

Hora: 18:19 hrs. Temperatura ambiente: 21.6°C, Humedad relativa: 65.8%, Presión barométrica: 599 mm Hg.

Una vez con las condiciones iniciales registrados, se procede a colocar en posición frontal directa al prototipo, previamente anclado a la mesa de pruebas, y por otro lado, a calibrar la potencia mediante la apertura gradual de las compuertas del túnel de viento.

La apertura de las compuertas, se realizó en ocho etapas, es decir, a un octavo de su potencia, registrando observaciones de comportamiento del prototipo, presión diferencial de referencia (PDR) y tiempo de exposición por separado, como se muestra en la tabla:

No.	Observaciones de resistencia del prototipo	PDR (mm Hg)	Tiempo de exposición (seg)
1	Buena	2.5	20
2	Aceptable	7	24
3	Moderada	15.5	20
4	Media	25	18
5	Muy Buena	34	24
6	Excelente	39	25
7	Alta	41.5	20
8	Maxima	43.5	140

Tabla 5.2 Calibración de resistencia del prototipo frente al túnel de viento.

Cabe mencionar que de acuerdo a la tabla anterior, el prototipo soportó la máxima potencia generada por el túnel de viento, y por otro lado, el tiempo de exposición fue de 140 seg. Con el fin de observar alteración o posible falla, la cual resistió la máxima potencia sin ninguna alteración o falla, comprobando así, la resistencia a la que fue diseñado el prototipo.

5.8 ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROTOTIPO EN TUNEL DE VIENTO.

Para las pruebas definitivas del modelo extractor en el túnel de viento, se realizaron preparativos de entrada de acuerdo a los siguientes elementos:

1. Válvula de control de flujo de entrada (diafragma).

2. Sistema Extractor.
3. Multimanómetro Diferencial.
4. Presión Diferencial de Referencia (PDR).
5. Variables adicionales (Condiciones Iniciales).

1. Válvula de control de flujo de entrada (Diafragma).

La válvula de control regula la entrada de aire al túnel de viento mediante cuchillas (diafragma) que permiten su paso en función de la potencia del motor principal, que se transmite en la velocidad del flujo de aire de salida del túnel de viento, lo que determina el gasto del flujo con relación al número de vueltas.

2. Sistema Extractor.

Para seleccionar la campana de dirección de flujo en el extractor, que generará la mayor velocidad angular y menor fricción del sistema de rotación para modelos específicos de las hélices y del removedor, se hicieron pruebas cualitativas para cuatro modelos de campanas de diferentes materiales con diámetro D_1 igual a 4.0 plg. y diámetro D_2 de 4.5, 5.0, 6.0 y 7.0 plg. Con los ensayos cuantitativos para determinar la magnitud de las velocidades angulares de la hélice con respecto a diferentes escalas de velocidad lineal del viento generado en el túnel de viento.

Para operar el extractor en el túnel de viento, se determinó realizar los ensayos afuera de la boca de salida del túnel viento debido principalmente a sus dimensiones y características geométricas, sin embargo se precisó construir una estructura de acero rígido que soportara y abraza el extractor de tal manera que soportara el peso propio, los esfuerzos, las posiciones de ataque que permitan realizar

mediciones a distintos ángulos y el empuje generado por el flujo de aire, y por último, un sistema de anclaje a una mesa de trabajo fabricada para tal fin que consiste en tres pijas galvanizadas de $\frac{3}{4}$ ", ancladas a la mesa de trabajo y a una altura a nivel de la boca de salida del flujo.

3.- Multimanómetro Diferencial.

Se trata del multimanómetro T.E.M., el cual se debe verificar que este a nivel con soportes ajustables y que el ángulo de operación sea de 30° . En este caso, se deberá conectar una sola entrada para las entradas pares y otra para las entradas nones o impares como se demuestra en la tabla 7.3.

4.- Presión Diferencial de Referencia (PDR).

La Presión Diferencial de Referencia, es un dispositivo integrado al mismo túnel de viento, se trata de un manómetro diferencial en milímetros de mercurio y está en función de la potencia del túnel de viento.

Tiene un ángulo de 25° respecto a la horizontal, lo que determina la presión necesaria de acuerdo a las propias características del propio túnel, cuenta con un líquido (aceite lubricante). En este caso, solo se limpia la superficie con el fin de obtener la lectura con mayor facilidad.

5.- Variables Adicionales

Las variables adicionales de medición son las condiciones del propio Laboratorio de Aerodinámica, tales como fecha(estación del año), temperatura ambiente (grados centígrados), humedad relativa (en porcentaje), presión barométrica (en mm Hg), así como la hora exacta del día. Todos estos datos, se tomaran antes y después de cada prueba.

Por último se verificó la presión que genera el túnel de viento a máxima potencia, exponiendo un dispositivo de presión (Pitot) del propio laboratorio de Aerodinámica con el fin de preparar las mediciones y registros definitivos.

Para el cálculo de la velocidad se empleo la siguiente fórmula:

$$V = \sqrt{\frac{2q_p}{\rho_x}} \quad (5)$$

Nota; La velocidad registrada es tan solo un promedio detectado por el dispositivo de presión (Pitot) que incluye estática y dinámica. Tomando en cuenta que el túnel de viento trabaja a máxima potencia.

Para la primera prueba en el túnel de viento se colocó el modelo extractor sujetado y anclado a la mesa de pruebas, identificando a todos y cada uno de los 27 puntos como sigue:

*1,2, 3 y 4 a lo largo de la boquilla de entrada (presión estática).

*5,6 y 7 a lo largo del sistema antibloqueo (presión estática).

*8 y 9 al centro de la boquilla de entrada, primera par pitot (presión dinámica).

*10 y 11 a la entrada de un codo del sistema antibloqueo, segundo par pitot (presión dinámica).

*12, 13, 14 y 15 a lo largo de un codo del sistema antibloqueo (presión estática).

*16 al inicio de la tubería de acrílico (presión estática).

*17 y 18 pasando la primer hélice, tercer par pitot (presión dinámica).

*19, 20, 21, 22, 23, 24 y 25 a lo largo del cuerpo del modelo sobre el acrílico (presión estática).

*26 y 27 al final del modelo, pasando la segunda hélice interna, cuarto par pitot (presión dinámica).

Posteriormente se realizaron dos perforaciones unas con el fin de determinar los coeficientes de presión en los pitot:

*A por debajo del segundo pitot (codo del sistema antibloqueo)

*B por debajo del cuarto pitot.

Estos últimos con el fin de determinar los coeficientes de presión específica en los pitot.

Para un mejor análisis y comprensión del comportamiento de los dispositivos de presión (Pitot), se realiza el cálculo de cada uno de ellos, situados estratégicamente a lo largo del modelo, como dato adicional, se tiene la densidad del aire en el “Laboratorio de Aerodinámica de la ESIME Ticomán”, tomando en cuenta la densidad del aire (ρ_z).

$$\rho_z = 9.519 \times 10^{-2} \frac{UTM}{m^3}$$

Así como los siguientes parámetros:

Coeficiente de presión (Cp)

$$C_p = \frac{P_{ex} - P_{e\ pitot}}{q_{pitot}} \quad (6)$$

Donde:

P_{ex} . Lectura directa de la presión estática del punto en estudio

$P_{e\ pitot}$. Diferencia de presión estática multiplicada por el seno del ángulo del multimanómetro ($\theta = 30^\circ$)

q_{pitot} . Diferencia de presiones multiplicada por el seno del ángulo θ del pitot base

Presión específica puntual (P_{ex})

$$P_{ex} = C_p \left(\frac{1}{2} \rho_z V^2 \right) \quad (7)$$

5.9 CALIBRACION, RESISTENCIA Y FUNCIONALIDAD DE LOS DISPOSITIVOS DE PRESIÓN INTEGRADOS EN EL EXTRACTOR.

Para la preparación de los conductos para tomar la presión en el extractor, se cortaron tubos de latón de 1 plg. de longitud con navaja, a fin de no deformar su configuración geométrica y por otro lado limar después del corte ambos lados con la finalidad de remover rebabas y permitir el libre flujo.

Se procedió a marcar los puntos en los cuales se harán los barrenos con broca de 1/8 de plg. (29 barrenos en total) con una separación de 1.5 plg., a excepción de los puntos especiales , donde se colocaron 4 pares de entradas Pitot ubicados en puntos estratégicos, colocados a la entrada (puntos 8 y 9), en un codo del sistema antibloqueo (puntos 10 y 11), sobre el cuerpo del prototipo (puntos 17 y 18) pasando el alabe interno y finalmente a la salida (puntos 26 y 27) pasando el segundo alabe interno, así como un conducto exactamente bajo cada uno de los Pitot con la finalidad de un análisis específico y finalmente todos los demás, distribuidos a lo largo del prototipo.

La calibración y registro de los puntos, se determino empleando la máxima potencia del túnel de viento, el cual se registró la presión específica por toma.

Las 29 tomas del prototipo, se registraron con dos entradas del manómetro T.E.M., es decir, las tomas impares del prototipo se registraron con la primera entrada del manómetro y las tomas pares se registraron con la segunda entrada del manómetro, así como la presión diferencial de referencia (PDR) y las condiciones iniciales del Laboratorio de Aeronáutica (Estación No. 2) como la Temperatura ambiente (21.6°C), la Humedad relativa (65.8%), la presión barométrica (599 mm Hg), así como el tiempo de inicio (18:19 hrs.) y la fecha (Jueves 12 de Noviembre de 2009).

Finalmente se tomo el registro de las condiciones de Laboratorio de Aeronáutica como la Temperatura (20.4°C), Humedad Relativa (67%), Presión barométrica (599 mm Hg), así como el tiempo final (20:03 Hrs.), en total 104 min, es decir 1 hr. 44 min.

Los tornillos están integrados a la propia estructura, lo sujeta de tal manera que quede totalmente horizontal (a nivel) para recibir el flujo de aire de una manera frontal, siendo este último caso el más importante, debido a que son las condiciones reales de trabajo, sin embargo, debido a la forma de la boquilla de entrada (parabólica) se determino realizar estas adaptaciones y ensayos, solo para determinar el comportamiento en condiciones críticas.

5.10 RELACION DE VELOCIDADES

Existe una relación de velocidades entre la velocidad lineal del túnel de viento generado por el túnel de viento y la velocidad angular del extractor. Para demostrarlo, se efectuaron los ensayos que permiten conocer esta relación, con el auxilio de la tabla.

La relación de velocidades, se realiza con el fin de establecer un modelo que determine una relación de velocidad imperante en el modelo extractor por medio del viento generado por el túnel de viento y relacionarlo con la velocidad angular del modelo, para las condiciones reales de trabajo, es decir, en una masa fluidica que pasa a través del extractor. De lo que se trata es que la relación de velocidades sea semejante, es decir, lo ideal es que sean iguales o muy aproximadas, lo que refleja que la perdida de energía en el modelo extractor sea mínima.

Un factor importante a considerar es la posición del extractor, es decir, en los ensayos con el túnel de viento, su posición es horizontal, en cambio, en los ensayos tanto en el tanque de pruebas como en las condiciones reales de trabajo, es decir en presas azolvadas, se trabaja en una posición vertical, sin embargo, tanto en la posición horizontal como en la vertical, el comportamiento no tiene ningún cambio aparente, a pesar de la influencia de la gravedad, esto debido a la velocidad del flujo a través del

extractor, que considera la atracción de la gravedad como despreciable en el primer caso por tratarse de gas (aire) y en el segundo caso debido principalmente al efecto de la energía potencial actuando directamente sobre el extractor.

De acuerdo a los datos específicos que se relacionan con la velocidad del túnel de viento, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

1. Manómetro.

Se trata de un manómetro Ingles marca T.E.M. Engineering Limited, con una escala de 60 unidades (cm y mm) en la vertical, el cual debe ser preparado para los ensayos, con un ángulo de inclinación de 30°, estar nivelado y conectado directamente al extractor por medio de mangueras flexibles de ¼ " a 1/8" con una conexión (reducción) y tomar la lectura inicial antes de comenzar con los ensayos preliminares y definitivos.

2. Presión Diferencial de Referencia (PDR)

La Presión Diferencial de Referencia, es un dispositivo integrado al mismo túnel de viento, se trata de un manómetro diferencial en milímetro de mercurio y está en función de la potencia del túnel de viento. Tiene un ángulo de 45° respecto a la horizontal, lo que determina la presión necesaria de acuerdo a las propias características del propio túnel de viento, Cuenta con un líquido (aceite)

3. Variables adicionales

Las variables adicionales de medición son las condiciones iniciales del Laboratorio de Aerodinámica de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Ticomán donde se encuentra el túnel de viento, tales como, la Temperatura ambiente en grados centígrados, la Humedad relativa en porcentaje, la Presión manométrica en milímetros de mercurio, la fecha para determinar la estación del año y condiciones generales ambientales.

5.11 ANALISIS DE LOS DISPOSITIVOS DE PRESION (PITOT) INTEGRADOS AL EXTRACTOR

El modelo extractor, cuenta con cuatro dispositivos de presión ubicados estratégicamente a lo largo del cuerpo del modelo, se determino colocar un juego de dos dispositivos Pitot para un mejor análisis junto a un dispositivo estático colocado de manera ortogonal al Pitot con el fin de determinar un análisis completo, como se muestra en la figura:

Figura 5.6 Dispositivos de presión (Pitot) a lo largo del prototipo extractor (a) entrada, (b) codo, (c) central, (d) salida

Una vez preparado el modelo, se ajusto a la mesa de pruebas y se anclo para soportar las altas velocidades del túnel de viento, trabajando a su máxima potencia.

Para realizar los ensayos, con el fin de analizar su comportamiento definitivo. Para tal fin, se coloco previamente un pitot base, es decir, únicamente un aparato dispositivo pitot, para determinar la presión

estática del propio túnel de viento y así determinar las presiones a la que se comporta el túnel de viento.

Los registro de los datos de las presiones estática y específica en los puntos estratégicos de control del sistema extractor se muestran en la siguiente tabla

Punto I entrada:

Presión total (mm)	<u>Presión estática (mm)</u>
$P_8=200$	$P_4= 229$
$P_9= 199$	$P_4= 229$

Punto II codo:

Presión total (mm)	<u>Presión estática (mm)</u>
$P_{10}=286$	$P_A= 284$
$P_{11}= 286$	$P_A= 285$

Punto III parte central:

Presión total (mm)	<u>Presión estática (mm)</u>
$P_{17}=187$	$P_{16}= 216.5$
$P_{18}= 195$	$P_{16}= 216$

Punto IV salida:

Presión total (mm)	<u>Presión estática (mm)</u>
$P_{26}=234$	$P_B= 239$
$P_{27}= 233$	$P_B= 240$

Tabla 5.8 Lectura de los dispositivos de presión (pitot) del prototipo.

Datos obtenidos del reporte de la hoja de control registrada en el “Laboratorio de Aerodinámica de la ESIME Ticomán”.

PUNTO I ENTRADA

Lectura del Punto 8 (Presión dinámica)	Lectura del Punto 4 (Presión estática)
200.00	229.00
Lectura del Punto 9 (Presión dinámica)	Lectura del Punto 4 (Presión estática)
199.00	229.00

PUNTO II CODO

Lectura del Punto 10 (Presión dinámica)	Lectura del Punto A (Presión estática)
186.00	228.00
Lectura del Punto 11 (Presión dinámica)	Lectura del Punto A (Presión estática)
186.00	228.50

PUNTO III PARTE INTERNA CENTRAL

Lectura del Punto 17 (Presión dinámica)	Lectura del Punto 16 (Presión estática)
187.00	216.50
Lectura del Punto 18 (Presión dinámica)	Lectura del Punto 16 (Presión estática)
195.00	216.00

PUNTO IV SALIDA

Lectura del Punto 26 (Presión dinámica)	Lectura del Punto B (Presión estática)
234.00	239.00
Lectura del Punto 27 (Presión dinámica)	Lectura del Punto B (Presión estática)
233.00	240.00

Tabla 5.9 Lectura de los puntos de presión de acuerdo a su ubicación.

Por otro lado, se determino integrar cuatro pares de tubos Pitot en el extractor, situados en puntos estratégicos, tratando de no perturbar el flujo al paso donde se ubican los Pitot, es decir, la dirección del flujo es normal a la posición del Pitot y por otro lado tomando en cuenta la diferencia de niveles del manómetro, midiendo la carga total

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

En un punto específico, ya que el extremo del tubo el cual se coloca dentro del flujo en movimiento, corresponde a un punto crítico de estancamiento ($v_2 = 0$) por lo que la carga de presión en dicho punto se puede determinar mediante la ecuación de Bernoulli aplicada sobre una línea de corriente horizontal, es decir

$$P_2 = P_1 + \gamma \frac{v_1^2}{2g} \quad (9)$$

Finalmente para cumplir con el equilibrio estático con la lectura del manómetro, deberá cumplir la relación

$$P_2 = \gamma m \Delta h + \gamma h \quad (10)$$

Donde γm es el peso específico del manómetro.

De esta manera se conoce a P_2 midiendo h y Δh , para determinar V_1 si se mide también la presión estática P_1

De acuerdo a lo anterior, se analizarán los cuatro dispositivos de presión (Pitot) integrados en el extractor, tomando en cuenta que cada perforación o cada punto, fue clasificado o numerado y clasificado con la intención de tener un estricto control de su comportamiento específico en cada punto, por lo que se clasificará de acuerdo a las ecuaciones 5, 6 y 7 de este capítulo

5.12 PRUEBAS DEL SISTEMA EXTRACTOR EN EL LABORATORIO DE INGENIERIA HIDRAULICA.

5.12.1 INSTALACIONES Y EQUIPO

Los ensayos realizados del sistema extractor, se llevaron a cabo en el tanque de pruebas del laboratorio de ingeniería hidráulica de la ESIA Zacatenco.

La construcción y operación del sistema extractor se realizó con apoyo de equipo hidráulico (infraestructura), eléctrico (suministro), mecánico (herramienta) y analítico (biblioteca).

Cabe mencionar que el agua utilizada en los experimentos y ensayos fue en circuito cerrado, es decir usando una bomba con una capacidad de 30 H.P. con la finalidad de ahorrar agua y aprovechar al máximo la infraestructura e instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica.

Las condiciones para su diseño, construcción, operación y calibración se realizaron dentro de las normas establecidas por el propio Laboratorio, tomando en cuenta tiempos y espacios así como de la colaboración de personal de apoyo externo.

El sistema experimental, consiste en tres partes principales:

- a) Tanque de pruebas
- b) Sistema extractor
- c) Vertedor

- a) Tanque de pruebas

Como primer paso fue probar el tanque de pruebas en condiciones iniciales, con lleno total de agua destilada con el fin de detectar fugas y

fisuras en general y así determinar la estrategia de reparación y mantenimiento, ya que este tanque fue construido anteriormente para ensayos y prácticas en general de Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Zacatenco. Una vez hecha la prueba, debido a sus múltiples fallas, fisuras y agrietamientos se determinó retirar las 5 placas de acrílico transparente de $\frac{3}{4}$ " de espesor y de paso limpiar y pulir cada una de las placas. Por otro lado, a la estructura de acero se detectó óxido avanzado sobre todo en las partes bajas (patas) y moderado en la parte superior, por lo que se procedió a lijar y pintar con pintura anti oxidante y esmalte negro. La parte fija de cemento y muros se descarpelo y resano con pintura epóxica importada de alberca azul y vinilica blanca en su exterior. La maniobra se llevó a cabo con el auxilio de una brigada de trabajadores externos. Una vez hecho el mantenimiento de las placas, se volvió a colocar cada una de las placas de acrílico a su posición original, con renovación total de tuercas, tornillos y empaques nuevos, y sellador de alta densidad en todas las esquinas y juntas del tanque de pruebas, por lo que se restauró en su totalidad, tanto en su interior como en su exterior.

El tanque de pruebas consiste en un tanque en su parte principal (de exhibición) de 1.63 m de ancho, 1.0 m de altura y 2.14 m de longitud, con una capacidad parcial aproximada de 3.48 m^3 interconectada con un canal de 1.65 m de ancho, 1.0 m de altura y 3.21 m de longitud con una capacidad parcial de 5.29 m^3 que se alimenta de un tanque principal con dimensiones de 3.99 m de ancho, 2.09 m de altura y 2.02 m de ancho, con una capacidad parcial de 16.84 m^3 , para hacer una capacidad total aproximada de 25.61 m^3 .

a) VISTA LATERAL

b) VISTA FRONTAL

Figura 5.7 Tanque de pruebas en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica.

b) Sistema extractor. El sistema extractor, es la parte más importante del sistema experimental, es decir es la parte inicial de la succión y del transporte de la mezcla o masa fluidica en el tanque de pruebas. El sistema extractor cuenta con los siguientes elementos:

1. Boquilla extractora
2. Sistema de succión adicional
3. Sifón (cuerpo principal)
4. Mecanismo elevador
5. Válvula de succión
6. Sistema de acoplamiento

Figura 5.8 Partes principales del sistema extractor.

1. Boquilla extractora: La boquilla extractora es el elemento de entrada de la masa fluidica, su diseño se sustento principalmente en la necesidad de absorber una mayor cantidad de flujo dirigido hacia el interior del sifón
2. Sistema de succión adicional: El sistema antibloqueo tiene la finalidad de que el sistema extractor no deje de operar en caso de que la entrada principal se obture.
3. Sifón: es el cuerpo principal del sistema extractor, se trata de una tubería de PVC hidráulico de 4 pulgadas de diámetro en toda su extensión, en forma de sifón.
4. Mecanismo elevador: El mecanismo elevador, fue diseñado para soportar el peso de todo el sistema extractor en condiciones de trabajo (transportando la masa fluidica) y al mismo tiempo operar dicho mecanismo. Este mecanismo opera principalmente mediante un gato mecánico que soporta y opera el sifón y se apoya directamente en una torre de soporte.
5. Válvula de succión: La válvula de succión o de vacio se encuentra en la parte superior del sifón, lo que le permite extraer el volumen de aire acumulado en la tubería, generando el efecto de sifón, para lograr esto es necesario que el nivel de la SLA del tanque de pruebas este por arriba de la boquilla de entrada y por otro lado mantener cerrada la válvula de control que regula el vertedor. Una vez extraído el volumen de aire se abre la válvula de control iniciando así el proceso de extracción
6. Sistema de acoplamiento: El sistema de acoplamiento es un sistema elevador que funciona conjuntamente con el sistema elevador para ascender o descender todo el sistema extractor de acuerdo a la altura que se requiera regular a la boquilla dentro del tanque de prueba.
7. Vertedor: Se trata de un vertedor de pared delgada que esta interconectado con la parte fija del sistema de acoplamiento. El vertedor regula el gasto del flujo por medio de una válvula de control. Cuenta con un limnógrafo que registra el gasto que pasa a través del vertedor y una trampa de sedimentos a la salida del vertedor para evitar obstrucción en la alcantarilla de salida.

c) Vertedor: Se trata de un vertedor de pared delgada que esta interconectado con la parte fija del sistema de acoplamiento.

El vertedor regula el gasto del flujo por medio de una válvula de control y cuenta con un limnógrafo que registra el gasto que pasa a través del vertedor y una trampa de sedimentos a la salida del vertedor para evitar obstrucción en la alcantarilla de salida como se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 5.9 Partes constitutivas del vertedor del sistema extractor.

Finalmente se realizaron las pruebas y ensayos del sistema extractor de sedimentos aprovechando la infraestructura de las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Zacatenco, así como con el equipo y herramienta para facilitar los registros de dichos ensayos.

CAPITULO 6

ENSAYOS CON AGUA Y SEDIMENTO ALTERNATIVO DEL SISTEMA EXTRACTOR

6.1 INTRODUCCION

Con la finalidad de exponer el modelo extractor ante un escenario lo más cercano a la realidad, se determinó realizar los ensayos con agua y sedimento alternativo (baquelita y arena azul) de tal manera que no contamine el agua, ya que el sedimento natural (limos, arcillas y materia orgánica en descomposición) contiene agentes químicos, biológicos y bacteriológicos que reaccionan al contacto con el agua y podrían contaminar el agua del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Zacatenco, que se comparte con otras prácticas dentro de un circuito cerrado, por otro lado, probar el modelo extractor ante un escenario extremo, es decir, en condiciones de trabajo específico empleando baquelita que es un polímero compuesto por fenol a partir del benceno, siendo un plástico muy rígido y por otro lado, arena de mina “azul” compuesta de sílice y cuarzo principalmente material 100% abrasivo y por consiguiente provoca una mayor fricción directamente sobre las partes móviles del sistema extractor, poniendo a prueba la resistencia y funcionamiento en general del modelo extractor. Los ensayos realizados, demostraron que el modelo soportó todos los ensayos, desde el túnel de viento, pasando por agua y finalmente con mezcla fluídica (agua – sedimento) baquelita y arena de mina, lo que significa que su diseño,

construcción y operación cumplió con las condiciones mínimas de operación y de extracción por el principio de sifón.

6.2 ENSAYOS REALIZADOS CON AGUA

Con el fin de poner a prueba todo el sistema extractor se realizaron los diez primeros ensayos empleando únicamente agua destilada del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica. Cabe destacar que se trata de un circuito cerrado de alimentación de agua que forma parte de un sistema de alimentación y suministro de agua a todo el Laboratorio para la operación de diversas prácticas y ensayos. Esta serie de ensayos sirvió para detectar posibles fugas, fallas, filtraciones, etc. y poder corregir, restaurar y ajustar los componentes y elementos del sistema extractor, así como el tanque de pruebas. Dentro de los ajustes o correcciones que se realizaron al sistema extractor y en especial al extractor, cabe mencionar que fueron nulos y que funcionó correctamente como se esperaba, sin embargo los ajustes y correcciones al tanque de pruebas fueron los de mayor actividad y de fondo. Dentro de los diez ensayos realizados en agua, no se detectó deterioro, desgaste o fallas de ningún tipo, por lo que se procedió a continuar con los ensayos dentro de una segunda etapa. Esta serie de ensayos sirvió para comprobar la operación en cada uno de los ensayos, como se muestra en la siguiente tabla, que en realidad solo se muestra una sola tabla.

LABORATORIO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

UNIDAD ZACATENCO

PROYECTO: SISTEMA FLUIDICO PARA LA EXTRACCIÓN DE SEDIMENTOS DE FONDO EN
EMBALSES PEQUEÑOS

REGISTRO DE ENSAYOS EN AGUA

CONDICIÓN: SISTEMA ANTIBLOQUEO SELLADO.

Ensayo: 1 Fecha: 4 -JUN - 10 TEMPERATURA DEL AGUA: 23 ° C

Hora inicio: 11:00 Hora final: 12:15 Tiempo: 75 min

Diámetro alabe: (4 ¼") 0.10795 m

FASE	h (m)	P (mm Hg)	N°	d (m)	rpm	H (cm)	N°
I	0.15	-122	1	0.82	833.4	54.0	1
			2	0.81	833.6	54.7	2
			3	0.76	829.0	54.6	3
			4	0.74	850.0	54.7	4
			5	0.70	862.0	54.6	5
			6	0.67	811.6	54.5	6
II	0.20	-125	1	0.986	842.8	54.6	7
			2	0.81	856.4	54.7	8
			3	0.76	840.0	54.5	9
			4	0.73	831.8	54.5	10
			5	0.68	823.8	54.4	11
			6	0.65	825.8	54.3	12
III	0.25	-130	1	0.84	716.3	54.0	13
			2	0.81	726.1	54.6	14
			3	0.80	711.4	54.8	15
			4	0.77	696.9	54.7	16
			5	0.73	692.5	54.6	17
			6	0.71	684.7	54.5	18
IV	0.30	-128	1	0.64	782.5	54.4	19
			2	0.60	789.9	54.3	20
			3	0.59	795.5	54.2	21
			4	0.56	778.6	54.2	22
			5	0.54	764.4	54.1	23
			6	0.52	767.4	54.0	24

6.3 ENSAYOS REALIZADOS CON SEDIMENTO ALTERNATIVO

Durante la siguiente etapa de ensayos, se empleo sedimento alternativo cernido con tamiz del No. 20 y tratado de tal manera que no contamine el agua del laboratorio. Los ensayos de prueba realizados dentro de las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA - Zacatenco, se resumen a partir del ensayo N° 16, ya que es el primer ensayo realizado con el sedimento alternativo (baquelita) simulando un sedimento asentado (azolve) limoso – arcilloso previamente tratado (crivado) y posteriormente con arena de mina “azul” para su estudio y análisis.

Para determinar las características físicas y mecánicas del sedimento, se extrajo una muestra del fondo de la presa Yutetoto en San Pablo Huitzo, Oaxaca, México, y fue analizada en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

El resultado del análisis de la muestra, de acuerdo a su granulometría fue la siguiente:

Muestra:	1	Fecha:	13-Ene-10	Hora:	11:32 a.m.
Especificación:	Muestra del fondo "in situ" de la presa Yutetoto, Oaxaca.				
Malla N°	R E T E N I D O				
	(gr.)		(%)		
20	9.21		0.921		
40	29.71		2.971		
60	83.9		8.39		
100	703.13		70.313		
200	141.39		14.139		
Pasa la 200	16.19		1.619		
	983.53		98.353		

Tabla 6.1.- Resultado de la prueba de granulometría a la muestra de fondo.

6.3.1 ANÁLISIS DE LA DENSIDAD DE SOLIDOS.

Para determinar la densidad de sólidos de la muestra se analizaron los siguientes conceptos:

W_{mw} .- Peso del matraz más agua.

W_{mws} .- Peso del matraz más agua y más suelo.

W_s .-Peso del suelo.

W_{mwfs} .- Peso del suelo aforado.

T°.- Temperatura.

W_{mwf} .- Peso del matraz aforado con agua.

S_s .- Densidad de sólidos.

6.3.2 CALCULO DE LA DENSIDAD DE SOLIDOS DE LA MUESTRA DE FONDO.

Para el cálculo de la densidad de sólidos, se tiene:

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{mwf} - W_{mwfs}}$$

Donde:

$$W_s = 20.95$$

$$W_{mwf} = 716.82$$

$$W_{mwfs} = 729.95$$

Sustituyendo:

$$S_s = \frac{20.95}{20.95 + 716.82 - 729.95}$$

$$S_s = \frac{20.95}{7.82} = 2.679 \text{ gr./ml.}$$

Para la medida de uniformidad del suelo se consideraron los coeficientes de uniformidad (Cu) y de curvatura (Cc), como:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Y} \quad Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60}D_{10}}$$

Donde D_{60} , D_{30} y D_{10} , son los porcentajes del suelo o muestra que pasan de acuerdo a la curva granulométrica.

Los suelos con $Cu < 3$, se consideran muy uniformes, cuanto mayor sea el valor de Cu, mayor será el diámetro de las partículas.

Para obtener la curva granulométrica, se toma en cuenta el porcentaje que pasa contra el diámetro de las partículas o abertura en mm. de la tabla de valores del registro.

Calculo de la densidad de sólidos del sedimento de la muestra de fondo.					
Muestra:	1	Fecha:	13-Ene-10	Peso:	983.53 gr.
Densidad de sólidos (Ss):					2.67
Malla		Retenido		Acumulado	
Plg.	mm.	gr.	(%)	(%)	(%) que pasa
20	0.84	9.21	0.921	0.921	99.079
40	0.42	29.71	2.971	3.892	96.108
60	0.25	83.9	8.39	12.282	87.718
100	0.149	703.13	70.313	82.595	17.405
200	0.074	141.39	14.139	96.734	3.266
> 200	> 0.074	16.19	1.619	98.353	1.647
		983.53	98.353		

Tabla 6.2.- Valores obtenidos a partir de la primera prueba de granulometría (muestra de fondo).

Calculo de la densidad de sólidos del sedimento alternativo.					
Muestra:	2	Fecha:	28-Jun-10	Peso:	1000 gr.
Densidad de sólidos (S _s):					1.4
Malla		Retenido		Acumulado	
Plg.	mm.	gr.	(%)	(%)	(%) que pasa
10	2	55.11	5.511	5.511	94.489
20	0.84	344.48	34.448	39.959	60.041
40	0.42	272.24	27.224	67.183	32.817
60	0.25	217.62	21.762	88.945	11.055
100	0.149	73.55	7.355	96.3	3.7
200	0.074	13.42	1.342	97.642	2.358
> 200	> 0.074	21.09	2.109	99.751	0.249
		997.51	99.751		

Tabla 6.3.- Valores obtenidos a partir de la segunda prueba de granulometría (sedimento alternativo).

Una vez realizadas las pruebas de granulometría al sedimento de fondo ($S_s = 2.679 \text{ gr/ml}$) y al sedimento alternativo

($S_s = 1.400 \text{ gr/ml}$) se realizo la comparativa granulométrica.

Gráfica 6.1.- Comparativa de curvas granulométricas de sedimento de fondo y sedimento alternativo.

De lo que se trata, es de equilibrar las curvas, de tal manera que la densidad del sedimento de fondo, quede inalterada por ser muestra real “in situ” a considerar extraer, sin embargo, la muestra de sedimento alternativo si es posible alterarla, con el fin de igualar las curvas granulométricas, por lo que se considero en primer instancia, realizar una prueba previa con una muestra de sedimento alternativo previamente clasificada.

Calculo de la densidad de sólidos del sedimento alternativo previamente clasificada					
Muestra:	3	Fecha:	30-Jun-10	Peso:	998.75 gr.
Densidad de sólidos (Ss):					1.40
Malla		Retenido		Acumulado	
Plg.	mm.	gr.	(%)	(%)	(%) que pasa
10	2	46.27	4.627	4.627	95.373
20	0.84	377.5	37.75	42.377	57.623
40	0.42	289.19	28.919	71.296	28.704
60	0.25	184.44	18.444	89.74	10.26
100	0.149	61.67	6.167	95.907	4.093
200	0.074	22.32	2.232	98.139	1.861
> 200	> 0.074	17.36	1.736	99.875	0.125
		998.75	99.875		

Tabla 6.4.- Valores obtenidos a partir de la tercera prueba de granulometría (sedimento alternativo previamente clasificado).

Una vez analizada la muestra de sedimento alternativo clasificada se procedió a realizar una nueva reclasificación a partir de malla N° 60 a la malla N° 200, pasando por la malla N° 80 como nueva variante, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Calculo de la densidad de sólidos del sedimento alternativo reclasificado					
Muestra:	4	Fecha:	01-Jul-10	Peso:	720 gr.
Densidad de sólidos (Ss):					1.4
Malla		Retenido		Acumulado	
Plg.	mm.	gr.	(%)	(%)	(%) que

					pasa
60	0.25	347.95	34.795	34.795	65.205
80		208.71	20.871	55.666	44.333
100	0.149	106.34	10.634	66.3	33.7
200	0.074	32.26	3.224	69.526	30.474
> 200	> 0.074	19.78	1.978	71.504	28.496
		715.04	71.504		

Tabla 6.5.- Valores obtenidos a partir de la cuarta prueba (sedimento alternativo previamente clasificado)

Con lo anterior, una vez analizado el sedimento de fondo, se determino pasar el sedimento alternativo a través de la criba N°60, de esta manera se reclasifica y por tanto se asemejan las características físicas de ambos sedimentos como se muestra en la gráfica.

Gráfica 6.2.- Comparativa de curvas granulométricas de sedimento de fondo y el sedimento alternativo reclasificado.

Por lo que, con la reclasificación, se ajustaron las curvas y por lo tanto se decidió realizar los ensayos definitivos con el sedimento reclasificado.

Por otro lado, se realizaron los ensayos por etapas, determinando un espesor del sedimento reclasificado de 0.05 m, debido a que se considero

la tercera parte de la distancia menor del sistema extractor respecto al tanque de pruebas (0.15 m) y a la disposición de material, cubriendo una superficie total de 0.50 m^2 , evitando la dispersión del material debido al inicio de llenado del tanque de pruebas.

Fig. 6.1 Tanque de pruebas del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica.

El tanque de pruebas es parte de la infraestructura del Laboratorio de infraestructura del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Zacatenco donde se probó el prototipo hidráulico extractor de sedimentos, éste se alimenta con una bomba de 30 HP en circuito cerrado, es decir, no hay desperdicios de agua.

La capacidad total del tanque es de 25.61 m^3 de agua, sin embargo se desarrolló una graduación de acuerdo a los niveles, de acuerdo a la fórmula:

$$V = (16.83 * H) + 8.7851 \quad (1)$$

Lo que resulta:

D (m)	V(m^3)
0.05	9.62
0.10	10.46
0.15	11.30
0.20	12.15
0.25	12.99
0.30	13.83
0.35	14.67
0.40	15.51
0.45	16.35
0.50	17.20
0.55	18.04
0.60	18.88
0.65	19.72
0.70	20.56
0.75	21.40
0.80	22.24
0.85	23.09
0.90	23.93
0.95	24.77
1.00	25.61

TABLA 6.6 Relación altura (d) capacidad (v) del tanque de pruebas.

6.4 LIMNIMETRO DE PRESICIÓN.

El limnimetro, es un aparato de medición que permite determinar la altura (H) del tirante del vertedor de salida, y a partir de este dato obtener de acuerdo a formulas establecidas el gasto que circula a través del sistema extractor de sedimentos.

Fig. 6.2 Limnómetro de precisión del vertedor

La diferencia de altura entre el vertedor de pared delgada y las paredes laterales del propio vertedor es de 10.6 cm y por otro lado, la altura de la cresta vertedora es de $W=29.5$ cm.

Como dato adicional, la lectura inicial del vernier a partir de W es de 47.1 cm y finalmente el ancho del vertedor rectangular es constante $L=37.175$ cm.

6.5 ANALISIS DEL GASTO Y LA VELOCIDAD EN EL VERTEDEDOR RECTANGULAR.

La ecuación general para calcular el gasto en un vertedor rectangular como se muestra en la figura:

Fig. 6.3 Secciones longitudinal y transversal del vertedor rectangular

Esta dada por la ecuación:

$$Q = CLH^{3/2} \text{ (2)}$$

Cuya carga de velocidad de llegada es despreciable, en este caso, la variable C agrupa los términos $\frac{2}{3}\sqrt{2g}\mu$, donde g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) y μ es el coeficiente de gasto para vertedores rectangulares con o sin contracción, es decir:

$$C = \frac{2}{3}\sqrt{2g}\mu \text{ (3)}$$

Que será:

$$C = 2.952 \mu \text{ (4)}$$

Por lo que se calculara entonces el coeficiente de gasto (μ) únicamente para vertedores sin contracción, con la finalidad de obtener el coeficiente C, de acuerdo a los valores obtenidos de los ensayos, como se muestra en la siguiente tabla:

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN	MAGNITUD (m)	
L	Ancho del canal vertedor.	0.3717	
W	Altura de la cresta vertedora.	0.2950	
H	Sobrecarga de la cresta vertedora.	$0.01 \leq H \leq 0.10$	
$\frac{H}{W}$	Relación sobrecarga – altura de la cresta vertedora.	MIN	MAX
		$\frac{0.01}{0.295} = 0.033$	$\frac{0.09}{0.295} = 0.305$

TABLA 6.7.- Parámetros y relaciones del vertedor.

Considerando el análisis para determinar el coeficiente de gasto μ propuesto por Rehbock (1929) para el cual, sus límites de aplicación coinciden con los parámetros propuestos por Rehbock, como se muestra en la tabla:

PARAMETROS PROPUESTOS POR REHBOCK(m)	DIMENSIÓN DE PARÁMETROS REALES DE PROYECTO (m)	
$L \geq 0.30$	$L = 0.3717$	
$W \geq 0.06$	$W = 0.2950$	
$0.01 \leq H \leq 0.80$	$0.01 \leq H \leq 0.10$	
$\frac{H}{W} \leq 1$	MIN	MAX
	0.033	0.305

TABLA 6.8 Comparación de parámetros propuestos y dimensiones reales del proyecto.

De acuerdo con la relación anterior, se comprueba que las dimensiones cum

De acuerdo con la relación anterior, se comprueba que las dimensiones cumplen los parámetros propuestos por Rehbock, por lo que se aplica la fórmula para determinar el coeficiente μ .

$$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{H + 0.0011}{W} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{H} \right]^{3/2} \quad (5)$$

Tomando en cuenta que W es constante igual a 0.2950 m, la ecuación anterior quedara como:

$$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{H + 0.0011}{0.2950} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{H} \right]^{3/2} \quad (6)$$

Por lo que el gasto será calculado por la ecuación:

$$Q = 2.952 \mu L H^{3/2} \quad (7)$$

Tomando en cuenta que L es constante igual a 0.3717 m, la ecuación anterior quedara como:

$$Q = 1.0972584 \mu H^{3/2} \quad (8)$$

Una vez calculado el gasto hidráulico Q se procede al cálculo de la velocidad por medio de la ecuación de continuidad:

$$Q = A V \quad (9)$$

Tomando en cuenta que el diámetro de la tubería del sistema extractor es constante $D_1 = 0.1016 \text{ m}$, por lo que el área de la tubería será calculada como:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (10)$$

Sustituyendo quedara como:

$$A = 0.0081 \text{ m}^2 \quad (11)$$

Despejando la velocidad de la ecuación de continuidad, se tiene:

$$V = A^{-1} Q \quad (12)$$

Se tiene:

$$V = 123.3453276 Q \quad (13)$$

6.6 ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD ANGULAR (V_θ) DEL REMOVEDOR.

El removedor es una de las partes más importantes del sistema extractor de sedimentos, ya que es la parte externa y actúa como elemento de contacto directo del sistema y el sedimento de fondo. Su análisis, diseño y construcción se desarrollo de acuerdo a las necesidades de extracción de sedimentos de fondo, tipo de sedimento, batimetría y la hidromecánica como se muestra en la figura

Fig. 6.4 Velocidad angular (V_θ) del removedor

Para el cálculo de la velocidad angular del removedor, se emplea la ecuación:

$$V_\theta = \pi (rps) \Phi \quad (14)$$

Dónde:

π . – constante

rps.- las revoluciones por segundo

Φ .- diámetro del removedor

Tomando en cuenta que el diámetro del removedor es constante $\Phi=0.1080$ m, por lo que quedara como:

$$V_\theta = 0.339292 (rps) \quad (15)$$

Para determinar las revoluciones por segundo, se conto con una lámpara estroboscópica modelo DT-2339 con luz de xenón y lectura digital.

Fig. 6.5 Lámpara estroboscópica (tacómetro) para determinar la velocidad angular (rpm).

La lámpara o tacómetro, mide la lectura directamente en rpm.

Empleando los datos obtenidos en la formula:

$$rps = \frac{rpm}{60} \quad (16)$$

6.7 ANÁLISIS DEL NÚMERO DE REYNOLDS EN LA TUBERÍA.

El número de Reynolds, se define como la relación de las fuerzas de inercia entre las fuerzas viscosas en flujo a tubería llena:

$$Re = \frac{\rho V \Phi}{\mu} = \frac{V \Phi}{\nu} \quad (17)$$

Dónde:

V.- Velocidad del agua que pasa en la tubería del sistema extractor en m/seg.

Φ .- Diámetro de la tubería del sistema extractor, se considera constante igual a cuatro pulgadas, $D_1 = 0.1016 \text{ m}$.

ν .- Viscosidad cinemática del agua considerando una temperatura de 20° C
 $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Por lo que si el diámetro de la tubería y la viscosidad cinemática se consideran constantes, se tendrá:

$$Re = V \frac{\Phi}{\nu} \quad (18)$$

$$= V \left[\frac{0.1016 \text{ m}}{1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \right]$$

$$Re = V * 100\,893.7438 \frac{\text{s}}{\text{m}} \quad (19)$$

De acuerdo al valor obtenido del número de Reynolds, se determina si la corriente del flujo es laminar o turbulenta conforme a la tabla:

Valor (Re)	Corriente
Re < 2000	Laminar
2000 < Re < 4000	Transición
Re > 4000	Turbulento

Tabla 6.9 Rango de valores del número de Reynolds para determinar la corriente del flujo dentro de una tubería.

6.8 ANÁLISIS DEL NÚMERO DE FROUDE.

El número de Froude, se define como la relación de las fuerzas de inercia entre las fuerzas gravitatorias en flujo a tubería llena:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \Phi}} \quad (20)$$

Dónde:

V.- Velocidad del agua que pasa en la tubería del sistema extractor en m/seg.

Φ.- Diámetro de la tubería del sistema extractor, se considera constante, igual a 4 pulgadas, $D_1 = 0.1016 \text{ m}$.

g.- Aceleración de la gravedad, se considera constante igual a

$$g = 9.81 \text{ m/seg}^2.$$

Por lo que si la aceleración de la gravedad y el diámetro de la tubería se consideran constantes, se tendrá:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{9.81 \frac{m}{s^2} (0.1016 m)}}$$

$$Fr = V * 1.001656105 \frac{s}{m} \quad (21)$$

De acuerdo al valor obtenido del número de Froude, se determina si el régimen del flujo es lento, crítico o rápido conforme a la tabla:

Valor (Fr)	Régimen
Fr < 1.0	Lento
Fr = 1.0	Crítico
Fr > 1.0	Rápido

Tabla 6.10 Rango de valores del número de Froude para determinar el régimen del flujo dentro de una tubería.

6.9 PRUEBAS REALIZADAS.

Los primeros ensayos a realizar en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Zacatenco, fueron con agua destilada en condiciones normales y presión atmosférica estándar sin sedimento alternativo, para determinar las condiciones iniciales de trabajo, así como observar el comportamiento y funcionalidad de todo el sistema extractor, controlando únicamente los parámetros d y h, como se muestra en la figura:

Fig. 6.6 Extractor de sedimentos en posición definitiva dentro del tanque de pruebas.

Durante los primeros ensayos se controló el parámetro d con la llave principal de alimentación del tanque de pruebas, procurando no sobrepasar el límite máximo tolerable (0.85 m) y por otro lado el parámetro h , el cual se toma desde el mínimo (0.15 m), hasta el máximo (0.30 m), operado con el mecanismo elevador y así determinar las condiciones iniciales, por lo que en conjunto los datos de entrada registrados en laboratorio serán la distancia de la superficie libre del agua (d), la distancia de la boquilla de entrada del extractor al nivel de fondo del tanque de pruebas (h), las revoluciones por minuto (Ω) y la sobreelevación del vertedor o lectura del limnómetro (H).

Con estos valores de inicio, se establecen las condiciones generales como información básica de campo o laboratorio, para ser analizada y posteriormente y procesada para obtener los datos complementarios.

Para un mejor aprovechamiento de la infraestructura del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica y la optimización del sistema extractor se propuso un Manual de Operaciones

6.10 ENSAYOS DEFINITIVOS CON SEDIMENTO ALTERNATIVO.

Con la finalidad de exponer el modelo extractor ante un escenario lo más cercano a la realidad, se determino realizar los ensayos con sedimento alternativo (baquelita y arena azul) de tal manera que no contamine el agua, ya que el sedimento natural (limos, arcillas y materia orgánica en descomposición) contiene agentes químicos, biológicos y bacteriológicos que podrían contaminar el agua del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Zacatenco, que se comparte con otras prácticas dentro de un circuito cerrado, y por otro lado, probar el modelo extractor ante un escenario extremo, es decir, en condiciones de trabajo específico empleando baquelita que es un polímero compuesto por fenol a partir del benceno, siendo un plástico muy rígido y por otro lado, arena de mina compuesta de sílice y cuarzo principalmente material 100% abrasivo y por consiguiente provoca una mayor fricción directamente sobre las partes móviles del sistema extractor, poniendo a prueba la resistencia y funcionamiento en general del modelo extractor.

Los ensayos realizados, demostraron que el modelo soportó todos los ensayos, desde el túnel de viento, pasando por agua y finalmente con mezcla fluídica (agua – sedimento) baquelita y arena de mina, lo que significa que su diseño, construcción y operación cumplió con las condiciones mínimas de operación y de extracción por el principio de sifón. Los ensayos definitivos realizados dentro de las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Zacatenco, se resumen a partir del ensayo No. 16, ya que es el primer ensayo realizado con el sedimento alternativo (baquelita) simulando un sedimento asentado

(azolve) limo – arcilloso previamente tratado (cribado) y posteriormente con arena de mina para su estudio y análisis.

ENSAYO No. 11

Dicho ensayo fue realizado el día Jueves 14 de Abril de 2011 bajo las siguientes condiciones:

Temperatura del agua: 20° C, Operando con un removedor de 6 pulgadas, con el sistema antibloqueo abierto, empleando sedimento alternativo (baquelita) de espesor (a) 0.04 m. y una altura de removedor (e) 0.01m.

ANALISIS DEL ENSAYO No. 11

La colocación del sedimento alternativo, fue totalmente en seco, sobre una superficie de 1.69 m^2 sobre el fondo del tanque de pruebas como se muestra en la figura.

Fig. 6.7 Base de pruebas sobre el fondo del tanque de pruebas (zona de pruebas)

La razón de la colocación del sedimento sobre la base de 1.69 m^2 fue la simetría, geometría y colocación del modelo extractor, el cual tiene la característica limitante de que no puede girar ni desplazarse, solamente subir y bajar. En dicho ensayo, se colocó el sedimento totalmente seco, es decir, sin saturación de agua o humedad, en condiciones contrarias a las condiciones reales, donde el sedimento asentado (azolve) está totalmente saturado y dicha prueba se realizó con el sedimento alternativo sin saturación.

Por otro lado se colocó un muro dissipador de energía elaborado con piedra de tezontle y tabiques de barro comprimido con la finalidad de que la energía cinética del agua sea minimizada al máximo y así evitar una turbulencia generalizada y barrido del mismo sedimento alternativo, lo que traería como consecuencia, no semejar las condiciones reales de trabajo, sobre todo la nivelación del sedimento alternativo. Sin embargo, al momento de operar el modelo, se observó que el sedimento alternativo (baquelita) al contacto con el agua, presentó el fenómeno de tensión superficial entre sus partículas ya que no logró saturarse al 100%, por lo que se crearon bolsas de aire, a pesar de estar el tanque lleno de agua a su máxima capacidad (Nivel 0.85 m – 23.09 m^3) el fondo del embalse se mantenía totalmente seco como se muestra en la figura.

Fig. 6.8 Fenómeno de tensión superficial como condición inicial de operación inicial de operación del ensayo No. 11

Bajo las condiciones anteriores, el procedimiento de operación fue el siguiente de acuerdo al manual de operación, en función al manual de operación.

El tiempo de espera de asentamiento de partículas de sedimento, fue de 40 minutos, tiempo apenas suficiente para el asentamiento total de las partículas y así ser visible el extractor.

El tiempo de operación del sistema extractor fue de apenas 6 minutos con las condiciones iniciales de operación como se muestra en la figura.

Fig. 6.9 Condiciones iniciales de operación del ensayo No. 11

Los resultados iniciales del ensayo N° 16 se muestran en la siguiente tabla, con un $H = 46.2$ cm como lectura inicial del limnimetro y un espesor de plantilla $a = 0.04$ m y una altura del removedor de $e = 0.01$ m.

Fase	H(m)	P(mm Hg)	d_o (m)	df (m)	rpm	H (cm)
I	0.13	-120	0.79	0.76	1509	53.5
		-120	0.76	0.74	1506	53.9
		-60	0.74	0.73	1507	54.0

Tabla 6.11.- Registro de datos del ensayo No.11 realizado con sedimento alternativo (baquelita).

En la tabla anterior, se observa un registro de tres lecturas en las columnas de presiones, alturas, velocidad radial y limnimetro, por lo que el análisis de los resultados se sintetiza de la siguiente manera:

De las tres presiones negativas, la superior se trata de la columna horizontal y la media e inferior se trata de la columna vertical del sistema

extractor. La diferencia de alturas ($d_0 - d_f$) son la variación inicial y final de las alturas del nivel de agua (d) en el tanque de pruebas que se coordinan con las presiones al mismo tiempo que la lectura de la velocidad radial y del limnimetro.

Fig. 6.10 Lectura de la presión negativa superior localizada en el conducto horizontal del sistema extractor.

La presión intermedia y la presión inferior se localizan en el conducto vertical como se muestra en la figura.

Fig. 6.11 Lectura de la presión intermedia e inferior en el conducto vertical del sistema extractor.

La lectura del limnimetro determina directamente el gasto que pasa por la tubería del sistema extractor como se muestra en la siguiente tabla:

Lectura Inicial H (cm)	Lectura H (cm)	Coeficiente H (m)
46.2	53.20	0.070
	53.90	0.077
	54.00	0.078

Tabla 6.12 - Lectura del limnimetro para determinar el coeficiente H.

El coeficiente H es necesario para determinar el coeficiente de gasto (μ) como se muestra en la siguiente tabla:

La lectura de las presiones del ensayo No. 11 se presenta en la siguiente tabla:

PRESIONES NEGATIVAS				
mm Hg	bares	kg/cm ²	kg/m ²	lb/plg ²
-120	-0.16	-0.1631	-1631.50	-2.32
-120	-0.16	-0.1631	-1631.50	-2.32
-60	-0.08	-0.0815	-815.76	-1.16

Tabla 6.13 - Resultado de presiones negativas del ensayo No. 11.

Por otro lado, para las velocidades angulares, se obtuvieron a partir de las revoluciones por minuto (rpm) con el removedor de 6 pulgadas como se muestra en la siguiente tabla:

rpm	rps	V θ (m/s)	V θ (km/hr)
1509	25.15	12.04	43.34
1506	25.10	12.01	43.23
1507	25.11	12.02	43.27

Tabla 6.14 – Velocidades radiales del removedor de 6 pulgadas del ensayo No. 11.

Coeficiente H (m)	Coeficiente de gasto μ
0.070	0.6378394593
0.077	0.6384649185
0.078	0.6385734379

Tabla 6.15 - Coeficiente de gasto μ a partir del coeficiente H del ensayo No. 11

Como consecuencia directa del coeficiente de gasto μ , se determina el coeficiente de gasto C como se muestra en la siguiente tabla:

Coeficiente de Gasto μ	Coeficiente de Gasto C
0.6378394593	1.88063515
0.6384649185	1.882479283
0.6385734379	1.882799246

Tabla 6.16 - Coeficiente de gasto C a partir del coeficiente de gasto μ del ensayo No. 11.

Finalmente, para determinar el gasto que se genera dentro de la tubería, se procede de acuerdo con la formula de gasto que es la ecuación general para calcular el gasto de un vertedor rectangular.

$$Q = C L H^{\frac{3}{2}} \quad (22)$$

Donde involucra el coeficiente (c), el ancho del canal (L) y el coeficiente del limnómetro (H), lo que se resume en la siguiente tabla:

Ancho del vertedor L (m)	Coeficiente C	Coeficiente $H^{\frac{3}{2}}$	Gasto $Q (m^3/s)$	Gasto $Q (lt/s)$
0.3717	1.8806	0.01852	0.012945	12.945
	1.8824	0.02136	0.014945	14.945
	1.8827	0.02178	0.015241	15.241

Tabla 6.17 - Gasto generado a partir de los coeficientes C, H y ancho del vertedor L del ensayo No. 11.

Para el cálculo de la velocidad de la mezcla fluídica que pasa a través de la tubería, se emplea la ecuación de continuidad.

$$Q = V \cdot A \quad (23)$$

Siendo el diámetro de la tubería constante de 4 pulgadas, como se muestra en la siguiente tabla:

Q (m^3/s)	V (m/s)	V (km/hr)
0.012945	1.5967	5.74812
0.014945	1.8433	6.6358
0.015241	1.8799	6.76764

Tabla 6.18 -Velocidad de la mezcla fluidica en función del gasto.

La relación de velocidades entre el removedor y la mezcla fluidica que pasa en el interior de la tubería, muestran la gran diferencia que existe entre una y otra, es decir, de 12.02 m/seg a 1.77 m/seg en promedio, con una diferencia de 754.05%, como se muestra en la siguiente tabla:

V_{θ} (m/seg)	V_{MEZCLA} (m/seg)
12.04	1.5967
12.01	1.8433
12.02	1.8799

Tabla 6.19- Comparativa de velocidades del removedor y de la mezcla fluídica.

La velocidad rotacional del modelo extractor, es mucho mayor a la velocidad lineal de la mezcla fluídica al momento de estar operando el sistema extractor, debido principalmente al volumen de la mezcla que pasa por unidad de área que empuja directamente y acciona los elementos rotatorios (removedor y dos hélices internas) interconectados en un solo eje, como se muestra en la figura:

Esto es debido a la pérdida de energía que pasa a través de las alabes del removedor a pesar de que este, esta interconectado con las dos hélices interiores, y por otro lado, esta diferencia de velocidades, es debido a que el removedor se encuentra en la parte externa del sistema extractor.

Fig. 6.12 – Diferencia de velocidades al momento de operar el sistema extractor

El comportamiento de las líneas de flujo a la entrada del sistema extractor, se muestra en la siguiente figura:

Fig. 6.13– Comportamiento de las líneas de flujo que pasan a través del removedor.

Para determinar el tipo de flujo que se presenta en este fenómeno, se emplea el Número de Reynolds (Re) de acuerdo a la velocidad de la mezcla fluidica como se muestra en la siguiente tabla:

V (m/seg)	Re
1.5967	161097.04
1.8433	185977.43
1.8799	189670.14

Tabla 6.20 - Número de Reynolds en función de la velocidad de la mezcla fluidica.

De acuerdo a los resultados, $Re > 4000$ se considera como un flujo turbulento.

En conclusión, debido al fenómeno de tensión superficial entre las partículas del sedimento alternativo (baquelita) en estado totalmente

seco, al contacto con el agua, se adherió a la superficie de fondo del tanque de pruebas y por otro lado se crearon bolsas de aire, por lo que la saturación fue parcial y aleatoria, lo cual presentó un escenario muy particular (condiciones contrarias a las condiciones reales), donde al momento de extraer el sedimento alternativo y a pesar de presentarse dicho fenómeno, logró extraer gran parte de lo esperado, creando una silueta o marca de extracción como se muestra en la siguiente figura:

Fig. 6.14 Silueta del sedimento alternativo extraído del fondo del tanque de pruebas del ensayo No. 11

VOLUMEN DE EXTRACCIÓN.

El volumen estimado de extracción en este primer ensayo (con sedimento alternativo), se calculó de acuerdo al espesor de plantilla (a), altura (h) y a la silueta o marca que dejo en:

$$V = 0.02216 \text{ m}^3.$$

Cabe mencionar que el volumen de extracción fue en función del tiempo ($t=75$ segundos), que se consideró, esto debido a la nula visibilidad por la gran turbulencia y de acuerdo al gasto promedio generado ($Q = 0.014377 \text{ m}^3/\text{s}$), se tiene:

$0.014377 \text{ m}^3/\text{seg} * 75 \text{ seg.} = 1.078275 \text{ m}^3$ de mezcla fluidica, sin embargo de acuerdo al volumen promedio estimado de extracción (0.02216 m^3) se tiene:

$$1.078275 \text{ m}^3 - 0.02216 \text{ m}^3 = 1.056115 \text{ m}^3 \text{ (agua)}$$

Por lo que se tiene:

$$1.078275 \text{ m}^3 \text{ (mezcla fluidica)} - 100\%$$

$$1.056115 \text{ m}^3 \text{ (agua)} - 97.94\%$$

$$0.02216 \text{ m}^3 \text{ (sedimento)} - 2.06\%$$

En este caso, los resultados muestran que no se cumplió con el objetivo particular de “extraer el máximo gasto sólido, con el mínimo gasto líquido”, sin embargo, gracias a este ensayo, se determinaron las condiciones iniciales de trabajo (saturación mínima del 70% del sedimento alternativo), mejorar el diseño del muro dissipador de energía, espesor mínimo de plantilla del sedimento (a) de 0.05 m, tiempo mínimo de asentamiento del sedimento alternativo (mínimo 1 hora) y una altura mínima del extractor (h) de 0.17 m, es decir, se detectaron y corrigieron las deficiencias de la extracción – operación. Por lo que se concluye que de

acuerdo a los volúmenes de extracción de acuerdo a estas condiciones, se tiene la siguiente proporción:

Fig. 6.15 Evolución de los ensayos con sedimento alternativo y proporción de los volúmenes de extracción de los ensayos del No. 11 al No. 20

Se considera como ensayo ideal, aquel que logre extraer el máximo gasto sólido (azolve) con el mínimo gasto líquido (agua), es decir, al menos extraer más del 50% de sedimento con un mínimo de menos del 50% de agua; Por lo cual, se ajustaron los parámetros necesarios para realizar el siguiente ensayo.

ENSAYO No. 12

Resumen del ensayo No. 12 realizado el día miércoles 27 de abril de 2011.
Condiciones iniciales:

Operando con el removedor de 6 pulgadas de diámetro con el sistema antibloqueo abierto, empleando sedimento alternativo (baquelita) con un espesor de plantilla (a) de 0.05 m. y altura del removedor (e) de 0.0 m.

Este ensayo se realizó con el sedimento alternativo a un 70% de saturación. Por otro lado, como muro disipador, se empleó un diseño mejorado compuesto por piedra de tezontle y tabique de barro

comprimido, colocado con las aristas hacia el frente de la corriente principal, como se muestra en la siguiente figura:

Fig. 6.16 Muro disipador de energía colocado antes de llegar a la zona de prueba.

El objetivo del muro disipador de energía, es minimizar la energía cinética del agua del canal, evitando la turbulencia y el consecuente arrastre del sedimento.

Adicionalmente al ensayo No.12, se colocó una malla –red, tanto a la salida del vertedor (trampa de sedimentos), como una pantalla de protección de sedimentos colocada antes del muro amortiguador, para evitar la propagación del sedimento en todo el tanque de pruebas.

Las condiciones iniciales de operación del ensayo No. 12 se muestra en la siguiente Figura:

Fig. 6.17 Condiciones iniciales de operación del ensayo No. 12

Los registros iniciales se respaldan en la siguiente tabla con una lectura inicial del limnimetro de H=46.2 cm.

FASE	H (m)	P (mm Hg)	do (m)	df (m)	rpm	H (cm)
I	0.12	-110	0.85	0.70	1368	54.0
		-120	0.70	0.62	1366	54.1
		-50	0.62	0.58	1367	54.2

En la tabla anterior, se observa un registro de tres valores en las columnas (alturas), revoluciones por minuto (rpm) y las lecturas del limnimetro (h).

VOLUMEN DE EXTRACCIÓN.

De acuerdo con la silueta o marca de extracción del ensayo No.12 se muestra en la siguiente figura:

Fig. 6.18 Radio de influencia de extracción del ensayo No. 12

En este caso, la silueta o marca de extracción fue aproximadamente circular, de radio $r=0.35$.

Con los datos iniciales de altura de la boquilla a nivel de plantilla $h=0.12$ m. y un espesor de plantilla $a= 0.05$ m. El tiempo de extracción se consideró de acuerdo a la visibilidad de la silueta o marca de la extracción observada desde abajo o por el espejo colocado en la parte inferior del tanque de pruebas, fue estimado en 25 segundos, obteniéndose un volumen aproximado de $V = 0.0192422 \text{ m}^3$, incrementándose de acuerdo a la siguiente tabla:

Φ	t (seg)	r (m)	$r^2 \text{ (m}^2\text{)}$	Vol. (m^3)
0.54	10	0.27	0.0729	0.011450
0.58	15	0.29	0.0841	0.0132103
0.62	20	0.31	0.0961	0.0150950
0.70	25	0.35	0.1225	0.0192422

**Tabla 6.31.- Comportamiento del volumen de extracción del ensayo N°.
12.**

Se resume que el volumen de extracción del sedimento alternativo se incremento de acuerdo a la relación diámetro – volumen en función del tiempo. Esto con el fin de observar y analizar el comportamiento de extracción, parámetros y condiciones mínimas de operación del sistema extractor.

El volumen de extracción de este ensayo, se estimó de acuerdo al espesor de platilla y a la silueta o marca de extracción que dejo ($V = 0.0192422 \text{ m}^3$) en función del tiempo.

De acuerdo al gasto promedio de extracción (Q) y el tiempo estimado (t) se tiene:

$$0.01554294135 \text{ m}^3/\text{seg} * 25 \text{ seg.} = 0.3885735338 \text{ m}^3 \text{ de mezcla}$$

fluidica, sin embargo, de acuerdo al volumen final de extracción ($V = 0.019292422 \text{ m}^3$), se tiene:

$$0.3885735338 \text{ m}^3 - 0.019292422 \text{ m}^3 = 0.3692811118 \text{ m}^3 \text{ (agua)}$$

Por lo que:

$$0.38857 \text{ m}^3 \text{ (mezcla fluidica)} - 100\%$$

$$0.36928 \text{ m}^3 \text{ (agua)} - 95.03\%$$

$$0.01929 \text{ m}^3 \text{ (sedimento)} - 4.97\%$$

En este caso, los resultados muestran que si bien se mejoro respecto al volumen de extracción y tiempo, este ensayo, fue solo de análisis y observación para su posterior calibración.

una vez verificado todas las condiciones y parámetros de dicho ensayo, se concluye que el sistema extractor opera adecuadamente, sin embargo, en cuanto a la extracción de sedimento alternativo se concluye que ésta depende directamente de la altura de la boquilla al nivel de plantilla (h) que deberá estar entre 0.12m y 0.15m en promedio, al espesor de

plantilla que deberá ser mayor de $a=0.05\text{m}$ y el tiempo de exposición (t), el cual de acuerdo con las observaciones de estos dos últimos ensayos sean menor a 25 segundos. Con el fin de representar gráficamente los resultados del ensayo N°. 12, se muestra la siguiente figura:

ENSAYO No.13 (E-13)

Fecha: Jueves 28 de abril de 2011

Hora: 14:40 hrs.

Temperatura del agua: $T= 19^{\circ}\text{C}$.

Lectura inicial del limnimetro: $H= 46.2\text{ cm}$

Espesor de la plantilla: $a= 0.05\text{ m}$.

Altura de la boquilla: $h=0.17\text{ m}$

Altura del removedor: $e= 0.05\text{ m}$.

Tiempo de extracción: $t= 20\text{ seg}$.

Sedimento alternativo: Baquelita

VOLUMEN DE EXTRACCION

$$0.01398\text{ m}^3/\text{seg} * 20\text{ seg} = 0.2874\text{ m}^3 (\text{mezcla fluidica}) - 100\%$$

$$0.2874\text{ m}^3 - 0.07918\text{ m}^3 = 0.2082\text{ m}^3 (\text{agua}) - 72.45\%$$

$$0.079183842\text{ m}^3 (\text{sedimento}) - 27.55\%$$

ENSAYO No.14 (E-14)

CONDICIONES INICIALES

Fecha: Jueves 12 de mayo de 2011

Hora: 13:10 hrs.

Temperatura del agua: $T = 20^{\circ} \text{C}$.

Lectura inicial del limnómetro: $H = 46.3 \text{ cm}$

Espesor de la plantilla: $a = 0.05 \text{ m}$.

Altura de la boquilla: $h = 0.20 \text{ m}$

Altura del removedor: $e = 0.08 \text{ m}$.

Tiempo de extracción: $t = 15 \text{ seg}$.

Sedimento alternativo: Baquelita

VOLUMEN DE EXTRACCION

$$0.0139986 \text{ m}^3/\text{seg} * 15 \text{ seg} \\ = 0.209979 \text{ m}^3 \text{ (mezcla fluidica)} - 100\%$$

$$0.209979 \text{ m}^3 - 0.0186964 \text{ m}^3 \\ = 0.0191282597 \text{ m}^3 \text{ (agua)} - 91.09\%$$

$$0.0186964 \text{ m}^3 \text{ (sedimento)} - 8.91\%$$

ENSAYO No.15 (E-15)

CONDICIONES INICIALES

Fecha: Jueves 13 de mayo de 2011

Hora: 14:15 hrs.

Temperatura del agua: $T = 20^{\circ} \text{C}$.

Lectura inicial del limnómetro: $H = 46.3 \text{ cm}$

Espesor de la plantilla: $a = 0.05 \text{ m}$.

Altura de la boquilla: $h = 0.25 \text{ m}$

Altura del removedor: $e = 0.08 \text{ m}$.

Tiempo de extracción: $t = 16 \text{ seg}$.

Sedimento alternativo: Baquelita

VOLUMEN DE EXTRACCION

$$0.01379863 \text{ m}^3/\text{seg} * 16 \text{ seg}$$

$$= 0.22077 \text{ m}^3 (\text{mezcla fluidica}) - 100\%$$

$$0.2207781 \text{ m}^3 - 0.01275879 \text{ m}^3 = 0.208019 \text{ m}^3 (\text{agua}) - 94.2\%$$

$$0.01275879 \text{ m}^3 (\text{sedimento}) - 5.8\%$$

ENSAYO No.16 (E-16)

CONDICIONES INICIALES

Fecha: Jueves 19 de mayo de 2011

Hora: 12:00 hrs.

Temperatura del agua: $T = 20^{\circ} \text{C}$.

Lectura inicial del limnómetro: $H = 46.3 \text{ cm}$

Espesor de la plantilla: $a = 0.05 \text{ m}$.

Altura de la boquilla: $h=0.15$ m

Altura del removedor: $e= 0.03$ m.

Tiempo de extracción: $t= 16$ seg.

Sedimento alternativo: Baquelita

VOLUMEN DE EXTRACCION

$$0.0144633 \text{ m}^3/\text{seg} * 16 \text{ seg}$$

$$= 0.2314128 \text{ m}^3 \text{ (mezcla fluidica)} - 100\%$$

$$0.2314128 \text{ m}^3 - 0.02268229 \text{ m}^3$$

$$= 0.208730501 \text{ m}^3 \text{ (agua)} - 90.19\%$$

$$0.022682296 \text{ m}^3 \text{ (sedimento)} - 9.81\%$$

ENSAYO No.17 (E-17)

CONDICIONES INICIALES

Fecha: Viernes 20 de mayo de 2011

Hora: 14:20 hrs.

Temperatura del agua: $T= 20$ ° C.

Lectura inicial del limnimetro: $H= 46.3$ cm

Espesor de la plantilla: $a= 0.05$ m.

Altura de la boquilla: $h=0.20$ m

Altura del removedor: $e= 0.08$ m.

Tiempo de extracción: $t= 15$ seg.

Sedimento alternativo: Baquelita

VOLUMEN DE EXTRACCION

$$\begin{aligned}
&0.014275404 \text{ m}^3/\text{seg} * 15 \text{ seg} \\
&= 0.21413106 \text{ m}^3 \text{ (mezcla fluidica)} - 100\% \\
&0.21413106 \text{ m}^3 - 0.018158405 \text{ m}^3 \\
&= 0.19597265 \text{ m}^3 \text{ (agua)} - 91.52\% \\
&0.018158405 \text{ m}^3 \text{ (sedimento)} - 8.48\%
\end{aligned}$$

ENSAYO No.18 (E-18)

CONDICIONES INICIALES

Fecha: Martes 14 de Junio de 2011

Hora: 11:40 hrs.

Temperatura del agua: T= 20 ° C.

Lectura inicial del limnimetro: H= 46.3 cm

Espesor de la plantilla: a= 0.05 m.

Altura de la boquilla: h=0.12 m

Altura del removedor: e= 0 m.

Tiempo de extracción: t= 17 seg.

Sedimento alternativo: Arena azul de mina

VOLUMEN DE EXTRACCION

$$\begin{aligned}
&0.0137976 \text{ m}^3/\text{seg} * 17 \text{ seg} \\
&= 0.2345603 \text{ m}^3 \text{ (mezcla fluidica)} - 100\% \\
&0.2345603 \text{ m}^3 - 0.0203575 \text{ m}^3 \\
&= 0.214202813 \text{ m}^3 \text{ (agua)} - 91.32\% \\
&0.0203575 \text{ m}^3 \text{ (sedimento)} - 8.68\%
\end{aligned}$$

ENSAYO No.19 (E-19)

CONDICIONES INICIALES

Fecha: Jueves 16 de Junio de 2011

Hora: 14:15 hrs.

Temperatura del agua: $T = 20^{\circ} \text{C}$.

Lectura inicial del limnómetro: $H = 46.30 \text{ cm}$

Espesor de la plantilla: $a = 0.06 \text{ m}$.

Altura de la boquilla: $h = 0.17 \text{ m}$

Altura del removedor: $e = 0.05 \text{ m}$.

Tiempo de extracción: $t = 16 \text{ seg}$.

Sedimento alternativo: Arena azul de mina

VOLUMEN DE EXTRACCION

$$0.013984819 \text{ m}^3/\text{seg} * 16 \text{ seg} \\ = 0.223757104 \text{ m}^3 (\text{mezcla fluidica}) - 100\%$$

$$0.223757104 \text{ m}^3 - 0.02721875875 \text{ m}^3 \\ = 0.196538 \text{ m}^3 (\text{agua}) - 87.83\%$$

$$0.02721875875 \text{ m}^3 (\text{sedimento}) - 12.17\%$$

ENSAYO No.20 (E-20)

CONDICIONES INICIALES

Fecha: jueves 18 de agosto de 2011

Hora: 11:49 hrs

Temperatura del agua: $T = 19^{\circ} \text{C}$

Lectura inicial del limnómetro: $H = 46.2 \text{ m}$

Espesor de la plantilla: $a = 0.23 \text{ m}$

Altura de la boquilla: $h = 0.12 \text{ m}$

Altura del removedor: $e = 0 \text{ m}$

Tiempo de extracción: $t = 17 \text{ seg}$

Sedimento alternativo: baquelita

VOLUMEN DE EXTRACCION

$$0.0119564 \text{ m}^3/\text{seg} * 17 \text{ seg}$$

$$= 0.2032588 \text{ m}^3 (\text{mezcla fluidica}) - 100\%$$

$$0.2032588 \text{ m}^3 - 0.0962638 \text{ m}^3 = 0.106995 \text{ m}^3 (\text{agua}) - 52.63\%$$

$$0.0962638 \text{ m}^3 (\text{sedimento}) - 47.37\%$$

ENSAYO No.21 (E-21)

CONDICIONES INICIALES.

Fecha: jueves 29 de septiembre de 2011

Hora: 11:05 hrs

Temperatura del agua: $T = 19^{\circ} \text{C}$

Lectura inicial del limnómetro: $H = 45.8 \text{ cm}$

Espesor de la plantilla: $a = 0.22 \text{ m}$

Altura de la boquilla: $h = 0.12 \text{ m}$

Altura del removedor: $e = 0 \text{ m}$

Tiempo de extracción: $t = 16 \text{ seg}$

Sedimento alternativo: Baquelita

VOLUMEN DE EXTRACCION

$$0.01563333 \text{ m}^3/\text{seg} * 16 \text{ seg}$$

$$= 0.250133328 \text{ m}^3 (\text{mezcla fluidica}) - 100\%$$

$$0.250133328 \text{ m}^3 - 0.08957308974 \text{ m}^3$$

$$= 0.160560238 \text{ m}^3 (\text{agua}) - 64.18\%$$

$$0.08957308974 \text{ m}^3 (\text{sedimento}) - 35.82\%$$

ENSAYO No.27 (E-27)

CONDICIONES INICIALES

Fecha: martes 25 de octubre de 2011

Hora: 14:20 hrs

Temperatura del agua: $T=17^\circ\text{C}$

Lectura inicial del limnimetro: $H = 46.2 \text{ cm}$

Espesor de la plantilla: $a= 0.21 \text{ m}$

Altura de la boquilla: $h= 0.13 \text{ m}$

Altura del removedor: $e= 0.01\text{m}$

Tiempo de extracción: $t= 16 \text{ seg.}$

Sedimento alternativo: Baquelita

VOLUMEN DE EXTRACCION

$$0.01370406667 \text{ m}^3/\text{seg} * 16 \text{ seg}$$

$$= 0.2192650667 \text{ m}^3 (\text{mezcla fluidica}) - 100\%$$

$$0.2192650667 \text{ m}^3 - 0.08081747101 \text{ m}^3$$

$$= 0.1384475957 \text{ m}^3 (\text{agua}) - 63.14\%$$

$$0.08081747101 \text{ m}^3 (\text{sedimento}) - 36.86\%$$

RESUMEN GENERAL DE LOS ENSAYOS

La realización de estos ensayos del modelo extractor, fueron de gran utilidad, sobre todo, para calibrar y ajustar los parámetros y las condiciones iniciales de acuerdo a los resultados obtenidos de esta anterior serie, como se muestra en la siguiente tabla:

No. de ensayo	Fecha (2011)	Temperatura del agua (°C)	Lectura del limnómetro H (cm)	Espesor de plantilla a (m)	Altura de boquilla h (m)	Altura del removedor e (m)	Tiempo total de extracción t (seg)	Sedimento alternativo utilizado	Porcentaje de extracción.	
									Sedimento (%)	Agua (%)
11	14 – ABR	20	46.20	0.04	0.13	0.01	75	Baqueli ta	2.06	97.94
12	27 – ABR	19	46.20	0.05	0.12	0.00	25	Baqueli ta	4.97	95.03
13	28 – ABR	19	46.20	0.05	0.17	0.05	20	Baqueli ta	27.55	72.45
14	12 – MAY	20	46.30	0.05	0.20	0.08	15	Baqueli ta	8.91	91.09
15	13 – MAY	20	46.30	0.05	0.25	0.08	16	Baqueli ta	5.80	94.20
16	19 – MAY	20	46.30	0.05	0.15	0.03	16	Baqueli ta	9.81	90.19
17	20 – MAY	20	46.30	0.05	0.20	0.08	15	Baqueli ta	8.48	91.52
18	14 – JUN	20	46.30	0.05	0.12	0.00	17	Arena de mina	8.68	91.32
19	16 – JUN	20	46.30	0.06	0.17	0.05	16	Arena de mina	12.17	87.83
20	18 -	19	46.20	0.23	0.12	0.00	17	Baqueli	47.37	52.6

	AGT							ta		3
21	29 - SEP	19	45.80	0.22	0.12	0.00	16	Baqueli ta	35.82	64.18
22	25 - OCT	17	46.20	0.21	0.13	0.01	16	Baqueli ta	36.86	63.14

Tabla 6.131 Resumen general de los ensayos realizados con sedimento alternativo.

Ensayo No.	Gasto Q (m ³ /seg) [x10 ⁻³]	Velocidad V (m/seg)	Presión P (Kg/m ²)
11	12.95	1.59	-163.15
	14.95	1.84	-163.15
	15.24	1.87	-81.57
12	15.24	1.88	-149.55
	15.54	1.91	-163.15
	15.84	1.95	-67.98
13	13.50	1.66	-163.15
	14.65	1.80	-149.55
	14.95	1.84	-81.57
14	13.22	1.63	-163.15
	14.07	1.73	-149.55
	14.65	1.80	-54.38
15	12.66	1.56	-163.15
	14.07	1.73	-149.55
	14.65	1.80	-67.98
16	13.79	1.70	-149.55
	14.65	1.80	-135.96
	14.95	1.84	-67.98
17	13.50	1.66	-135.96
	14.36	1.77	-135.96
	14.95	1.84	-54.38
18	12.94	1.59	-135.96
	13.79	1.70	-122.36
	14.65	1.80	-81.57
19	13.50	1.66	-163.15
	14.07	1.73	-149.55
	14.36	1.77	-67.98

20	10.52	1.29	-163.15
	11.84	1.46	-149.55
	13.50	1.66	-122.36
21	15.22	1.87	-149.55
	15.53	1.91	-135.96
	16.13	1.99	-108.76
22	12.94	1.59	-163.15
	13.50	1.66	-149.55
	14.65	1.80	-122.36

Tabla 6.132 Registro de gastos, velocidades y presiones

Registro de la relación de las velocidades radial (V_{θ}) y lineal (V) de la serie de ensayos del 16 al 27.

E - 11	E - 12	E - 13	E - 14	E - 15	E - 16
V_{θ}/V	V_{θ}/V	V_{θ}/V	V_{θ}/V	V_{θ}/V	V_{θ}/V
7.543	5.806	6.280	7.827	6.436	6.496
6.516	5.685	5.740	7.308	5.777	6.093
6.397	5.585	5.560	6.998	5.577	5.988

E - 17	E - 18	E - 19	E - 20	E - 21	E - 22
V_{θ}/V	V_{θ}/V	V_{θ}/V	V_{θ}/V	V_{θ}/V	V_{θ}/V
6.312	6.759	6.393	8.364	5.773	6.797
5.953	6.389	6.205	7.431	5.622	6.499
5.800	6.049	6.324	6.492	5.405	5.974

Tabla 6.133 Resultado de la relación de las velocidades de la serie de ensayos con sedimento alternativo

Por otro lado, se presentan los resultados de los ensayos representados en las gráficas que relacionan gastos contra velocidades de la serie de ensayos con sedimento alternativo como se muestra en el ensayo No. 11 la relación ascendente de la velocidad en función del gasto, por lo que será el mismo comportamiento en los ensayos sucesivos.

Finalmente se presentan los resultados de los gastos contra las presiones de la serie de ensayos con sedimento alternativo, en esta grafica se muestra la relación que existe la relación ascendente que existe entre la presión y el gasto.

Relación de los parámetros de la distancia de los niveles de agua (d) y alturas de la boquilla (h) contra el gasto generado (Q) durante la operación del sistema extractor de la serie de ensayos con sedimento alternativo, del ensayo No. 11, los ensayos subsecuentes se comportan de manera similar.

d/h	Q
5.961	12.95
5.769	14.95
5.653	15.24

6.11 CONCLUSIONES DE LA SERIE DE ENSAYOS CON SEDIMENTO ALTERNATIVO

En esta serie de ensayos, se demostró y comprobó su funcionamiento del sistema extractor, transportando la mezcla fluidica (agua y sedimento alternativo) a través del sistema, cuyo sedimento alternativo se empleo baquelita clasificada y arena azul de mina (ensayos 18 y 19). Por otro lado, se obtuvieron resultados de la serie de ensayos, involucrando directamente el gasto, la velocidad de la mezcla fluidica y la presión, comportándose de acuerdo a la máxima potencia del sistema extractor, es decir, con la llave del vertedor de salida totalmente abierta.

De acuerdo al tiempo total de extracción, cabe mencionar, que fue un tiempo estimado, principalmente por la poca visibilidad de acuerdo a la turbulencia generada durante la extracción, por lo que se considera que el tiempo real de extracción, esté por debajo de los 8 segundos.

Finalmente, en cuanto al porcentaje de extracción se refiere, y de acuerdo a la tabla del Resumen General, la extracción del azolve (experimentalmente) no logro cumplir su objetivo de extraer el máximo volumen solido con el mínimo volumen liquido, debido principalmente al

volumen de sedimento alternativo disponible y al tiempo estimado, sin embargo, esto no quiere decir que el sistema extractor no cumpla con su objetivo, ya que, debido a la escases de sedimento alternativo, en los ensayos 20, 21 y 22, se redujo el área de influencia de $3.48 m^2$ a $1 m^2$ aumentando así, el espesor de plantilla ($a=0.23, 0.24$ y 0.21 m) obteniendo un aumento en el porcentaje de extracción, por lo que se comprueba su extracción.

Cabe destacar que la principal característica de el sistema extractor fue la remoción de fondo por medio del removedor exterior del extractor.

Por último, en cuanto a la relación de velocidades se refiere, se demuestra que tanto la velocidad radial como lineal siguen un patrón descendente como se muestra en la columna ($V\theta/V$).

6.12 RESULTADOS DE LA SERIE DE ENSAYOS DEL 11 AL 22 DE ACUERDO A SU RELACION DE PARAMETROS (GASTO, VELOCIDAD Y PRESION).

De acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos de gasto contra velocidades, se observa que ambos parámetros aumentan, por lo que su grafica (de todos los ensayos) en general, es ascendente de acuerdo a los registros, esto quiere decir que el gasto esta en función de la velocidad de acuerdo a la ecuación de continuidad. Por otro lado, los resultados obtenidos de los ensayos del gasto contra las presiones negativas registradas, se observa que mientras el gasto aumenta, por el contrario, el registro de las presiones disminuye, tomando en cuenta que la lectura de las presiones, está en función del punto de lectura y el tiempo.

La relación de los parámetros de la distancia de los niveles de agua (d) y la altura de la boquilla (h) contra el gasto (Q) durante la operación del sistema extractor, tiene por objeto determinar la caída de los niveles de agua, en función del aumento de los gastos generados, por lo que, en las gráficas se puede observar el decaimiento en la relación de los niveles de agua, en función del aumento del gasto.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES.

Este trabajo de investigación, abarco desde el estudio y análisis, pasando por la presentación de bocetos y la construcción del prototipo base del elemento mecánico que se probó y demostró en Laboratorio y así comprender su comportamiento expresado mediante relaciones funcionales posibles, situación aplicada al presente estudio, por lo que se estiman las siguientes conclusiones:

1. En ensayos previos para la elección de la boquilla extractora en el túnel de viento, se observó que la campana de trazo exponencial mayor de 6 pulgadas de diámetro resultó la más eficiente.
2. La colocación de una hélice en el interior de la boquilla extractora, demostró que la transferencia de la cantidad de movimiento del flujo hasta el removedor es factible.
3. El empleo del removedor provocó mayor turbulencia sobre la superficie del sedimento, lo que era de esperarse y por otro lado facilitó su extracción.
4. La velocidad media en la tubería para las condiciones de ensayo, resultó ser superior a la velocidad crítica de arrastre del sedimento, lo cual era lo deseable. Por lo que se estima que la velocidad media aumente en prototipo debido a que el desnivel entre la SLA y la descarga (Y_2) es mucho mayor.
5. Se estima que en condiciones de operación reales de campo con una mayor carga hidráulica, el sistema podrá ser más eficiente.
6. La relación (Q/V) en la serie de graficas muestra la funcionalidad del sistema al ir incrementándose.

7. Se presenta la relación ascendente (P/Q) que indica que a pesar de la presión negativa (succión) el gasto se incrementa como se observa en la relación de graficas.

8. La relación d/h representa un decremento en relación con el gasto lo que significa que es necesario mayor carga hidráulica en el proceso de extracción para obtener mejores resultados.

7.2 RECOMENDACIONES.

1. Al emplear diferentes tipos de sedimento, tanto cohesivos como no cohesivos, se tendrá una mejor comprensión del fenómeno de extracción para optimizar el diseño hidromecánico e hidrodinámico del sistema.
2. Para conocer el campo de velocidades dentro del tanque de pruebas se recomienda hacer ensayos puntuales, lo que permitirá analizar detalladamente el comportamiento alrededor de la boquilla extractora al momento de estar operando y así poder mejorar el diseño de este.
3. Para incrementar la velocidad del removedor de sedimento y por tanto de turbulencia, se recomienda trabajar más en el diseño del sistema hidromecánico de rotación y en el diseño hidrodinámico del propio removedor.
4. Para observar un mayor gasto en este dispositivo, se recomienda la construcción de otro prototipo de mayor diámetro, al menos de 6 pulgadas.
5. Para mejorar los resultados de los ensayos, se recomienda disponer de mecanismos que se muevan lateralmente para un mayor volumen de extracción de sedimentos.
6. Realizar una serie de ensayos con materiales más apegados a la realidad, es decir, con diferentes tipos de limos y arcillas con la finalidad de obtener mejores resultados.
7. Realizar los ensayos empleando por lo menos $1m^3$ de sedimento alternativo (baquelita), ya que en la última serie se empleo

solo 0.17 m³, con esto, se espera emplear un espesor de plantilla de al menos 0.20 m.

8. Modificar el sistema elevador del sistema extractor, de tal manera, que el espesor de plantilla, sea por lo menos de $a=0.20$ m. y con movimiento radial.
9. Colocar un cuarto dispositivo sumergido (ubicado a la entrada del sistema extractor) para registrar la presión a la entrada del conducto.
10. Emplear el mecanismo y partes móviles del sistema extractor fabricado con materiales más resistentes para todo tipo de sedimentos, es decir, como aluminio, acero inoxidable, bronce, etc.

BIBLIOGRAFIA

1. Aparicio Mijares, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa Noriega Mexico 1993.
2. Kirkby, M. J. Morgan, R.P.C. *Erosión de Suelos*. Editorial Limusa México 1984.
3. Zarate Cruz, Oziel. *Reporte del Centro Interdisciplinario de investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) del IPN Unidad Oaxaca*. México 1996.
4. *Normas Climatológicas*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional. México 2002.
5. Aguilar Alcerreca, José. *Hidráulica Fluvial*. Editorial IPN México 1994.
6. Máza Alvares, José; García Flores, Manuel. *Transporte de Sedimentos*. Instituto de Ingeniería, UNAM. México 1996.
7. González Maas, Horacio. *Experiencias en el Desazolve de Presas por Conducto de Fondo*. La Hidráulica en el Desarrollo Nacional. VII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Memorias. México 1995.
8. Juárez Badillo, Eulalio; Rico Rodríguez, Alfonso *Mecánica de Suelos, Fundamento de Mecánica de Suelos*. Editorial Noriega Editores. Tomo I. México 1993.
9. Torres Herrera, Francisco. *Conveniencia de disponer descargas de fondo en presas de almacenamiento*. Asociación Mexicana de Hidráulica A.C. México 1999.
10. Sotelo Avila Gilberto. *Hidráulica General*. Tomo I. Editorial Noriega Limusa. Mexico 2001.
11. Williams King, Horace. *Manual de Hidráulica*. Editorial UTEHA. Mexico 1984.
12. Turner, Thomas M.; et al *Fundamentals of Hydraulic Dredging*. USA 1984.
13. Víctor Franco. *Transporte de sólidos por tuberías*. Instituto de Ingeniería UNAM. México 1995.
14. W. Daily, James; F. Harleman, Donald R. *Dinámica de los Fluidos aplicaciones en ingeniería*. Editorial Trillas. México 1981.

15. Bonilla Gris, Robie; Salinas Quinard, Luis Enrique. *Apuntes de Modelos Hidráulicos*. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. IPN.
16. Daily, James W. & Harleman, Donald R. *Dinamica de los Fluidos con Aplicaciones*. Editorial Trillas, México 1981.
17. Streeter, Victor L.; Wylie E., Benjamin ; W. Bedford, Keith *Mecánica de Fluidos*. Editorial Mc. Graw Hill. Colombia 2000.
18. Giles V., Ronald. *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. Editorial Mc. Graw Hill. México 1993.
19. Roca Vila, Reclus. *Introducción a la Mecánica de los Fluidos*. Editorial Limusa Noriega. México 1993.
20. Xiaoqing, Yang. *Manual on Sediment and measurement*. Geneve. 2003.
21. Hill, James M.; Geoffrey Wikel. *Characterization of Bed Sediment Behind the Lower Three Dams on the Susquehanna River*. Maryland: University of Maryland. USA 2001.
22. G. Zill, Dennis; R.Cullen, Michael. *Ecuaciones Diferenciales*. Volumen I. Editorial Mc. Graw Hill. México 2008.
23. Fernandez Espinosa, Alfredo. *Alternativas para desazolvar la presa "La Soledad"*. XIII Congreso Nacional de Hidráulica. Tema: Agua y Medio Ambiente. México 1994.
24. Torres Ozuna, Francisco; González Sosa; Enrique. *La Sedimentación en el Medio Balsas*. XII Congreso Nacional de Hidráulica. Tema: Agua y Medio Ambiente. México 1994.
25. Krishan P., Singh; Durgunoglu, Ali. *Predicting Sediment Loads*. Civil Engineering. USA 1992.
26. P. Keller; Bouchard, J. P. *The Filling of Reservoir with Fine Sediments; Physical Mechanisms and ways to Prevent it Bibliographical Study*. Direction des Etudes et Recherches. France 1986.
27. Jiahua, Fan; Morris L., Gregory. *Reservoir Sedimentation. II: Reservoir Desiltation and Long-Term Storage Capacity*. Journal of Hydraulic Engineering. USA 1992.
28. Menéndez, A.N. *A Methodology to Scale Turbidity Plumes*. 2nd International Conference. Italy 2002.

29. Subdirección General de Administración del Agua, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos. *Manual de Ingeniería de Ríos. Sedimentación en embalses*. Capítulo 18. Comisión Nacional del Agua. Instituto de Ingeniería, UNAM. México 1993. *Presidente Plutarco Elías Calles*. Comisión Federal de Electricidad. México 1995.
30. L. Don Leet, Sheldon Judson. *Fundamentos de Geología Física*. Editorial Limusa. México 1982.
31. Torres L., Urrutia R. Environmental comparison, through sedimentary records, between pre-Hispanic and current conditions of a lacustrine system. Editorial Revista chilena de Historia Natural. Chile 2000.
32. Birch, GF, Robertson, E, Taylor, SE, McConchie, DM. The use of sediments to detect human impact on the fluvial system. *Environmental Geology* 1999.
33. Alvarez M., Pautasso C. "Estabilización de suelos finos con cal". Memorias V Congreso Arg. de Vialidad y Tránsito Embalse. Córdoba. 1964.
34. Fabian Rivera Trejo. La medición de sedimentos en Mexico. Seminario Internacional de Potamología. Mexico 2013.
35. Arizona Water Research Center. Manual de Campo para el muestreo de la calidad del agua. 1995.
36. WHITE, W. R., MILLI, H. y CRABBE, A.D, Sediment transport; an appraisal of available methods, Vol. 2, Report n° IT 119. Wallingford Research Station, Wallingford, England. 1938.
37. AGUIRRE PE, Julián. Hidráulica de sedimentos. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela. 1980.
38. DÍAZ, G.E. y MAZA ALVAREZ, J.A. Análisis de fórmulas de transporte de Sedimentos en escurrimientos a superficie libre, XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Vol. 3, Sao Paulo, Brasil. 1986.
39. GRAF W.H., ACAROGLU, E.R. Sediment transport in conveyance systems, (Part. 1), Buli Intem. Assoc. Sci. Hyd. XII année, N° 2. 1938.
40. Weinberger H.F. Ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Editorial Reverté. 1979.

41. Bedford A. Hill C.D. A Mixture Theory for Particulate Sedimentation Whit Diffusivity. AIChE. Vol 23. No. 3. 1977.
42. Zarate Cruz, Oziel (1996). Reporte del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CEDIR) del IPN. Unidad Oaxaca, México. Noviembre de 1996.
43. Aparicio Mijares, Francisco Javier (1993). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Ed. Limusa Noriega Editores.
44. Turner, Thomas M; et al Fundamentals of Hydraulic Dredging. USA 1984.
45. Daily, James W; Harleman, Donald R. F. *Dinámica de los fluidos con aplicaciones en ingeniería*. Editorial Trillas. México 1981.
46. Baver, L. D; et al Física de suelos. Editorial UTEHA. México 1980.
47. Torres Herrera, Francisco. Conveniencia de disponer de descargas de fondo en presas de almacenamiento. Asociación Mexicana de Hidráulica, A. C.
48. Aguilar Alcerreca, José. *Hidráulica Fluvial*. Editorial IPN. México 1989.
49. Badillo, Juárez; Rodríguez, Rico. Mecánica de Suelos. Editorial Noriega Limusa. Tomo I. México 1992.
50. Craig, R. F. Mecánica de suelos. Lagos Consorcio Editorial, S. A. México 1976.
51. Kirkby, M. J; Morgan, R. P. C. Erosión de suelos. Editorial Limusa. México 1984.
52. Maza Álvarez, José A; García Flores, Manuel. Transporte de sedimentos. Instituto de Ingeniería, UNAM. México 1996.
53. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) clave DEPI-970172, IPN. Informes Técnicos del Proyecto "Sistema Hidráulico de Extracción de Sedimentos en Embalses Pequeños". Oaxaca. México 1997.
54. Echavarría, Bernardo; García, Marcelo H. Patrón de depósito de sedimento en una presa. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Oaxaca, México 1998.
55. Bonilla Gris, Robie; Salinas Quinard, Luis E. Apuntes de modelos hidráulicos. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. México 1992.

56. Vergara Sánchez, Miguel Á. Técnicas de modelación en hidráulica. Editorial Alfa omega. México 1993.
57. González Ortiz, Luis Arturo. Estudio de la sedimentación ocurrida en 35 embalses pequeños de las zonas centro y noreste de la República Mexicana (Estimación de la aportación de sedimento de la cuenca). XIV Congreso Nacional de Hidráulica.
58. Fernández Espinosa, Alfredo. Uso de materiales de desecho para retención de azolve. XIV Congreso Nacional de Hidráulica.
59. González Maas, Horacio. Experiencias en el desazolve de presas por el conducto de fondo. La hidráulica en el desarrollo nacional. VII Congreso Nacional de Hidráulica, memorias.
60. Brahme, Shashikant B; Herbich, John B. Hydraulic model studies for suction cutterheads. Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering 112 N°5. Texas A&A University. USA 1986.
61. Fernández Espinosa, Alfredo. . Uso de materiales de desecho para retención de azolve. XIV Congreso Nacional de Hidráulica.
62. Torres Osuna, Francisco y González Sosa, Enrique. La sedimentación en el medio Balsas. XIII Congreso Nacional de Hidráulica.
63. González Ortiz, Luis Arturo y Campos Aranda, Daniel Francisco. Estudio de la sedimentación ocurrida en 35 embalses pequeños de las zonas centro y noreste de la República Mexicana (Estimación de la aportación de sedimentos de cuenca).XIV Congreso Nacional de Hidráulica.
64. Baver, L D; et al Física de suelos. Editorial UTEHA. México 1980.
65. Randall, Robert E. Dredging Engineering Short Course Sediment Transport in Pipes. Civil Engineering Department. Texas A&A University.
66. González Maas, Horacio. Experiencias en el desazolve de presas por el conducto de fondo. La hidráulica en el desarrollo nacional. VI Congreso Nacional de Hidráulica, Memorias. Pp. 404.
67. Journal of Waterway Port. Coastal and Ocean Engineering 112 N°5. 1986.
68. Roca Vila, Reclus. Introducción a la Mecánica de Fluidos. Editorial Noriega Editores.

69. Daily, James W.; Harleman, Donal R. F. Dinámica de los Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería. Editorial Trillas. México.
70. Baver, L D. Gardner, Warner. Wilford R. Física de Suelos. Editorial Füsperoamericana.
71. Ruíz Santiago, Vicente; et al. Manual para la construcción de pantallas de ferrocemento. IPN-CnDIR. Oaxaca, México.
72. Fand, Jiahua. ; Morris, Gregory L. Reservoir Sedimentation. Reservoir Destilation and long-term storage Capacity.
73. Montgomery, Raymond L. Leach, Jaime W. Dredging and Dredged Material Disposal.
74. José Daniel Brea. Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas Vol. 1. 2010.
75. Bedient, P. B. y Huber, W. C. Hidrology and flood plain analysis. Addison - Wesley P.C. New York. 1988.
76. Bennett, J. P. (1974) Concepts of mathematical modeling of sediment yield. Water Resources Research (10); 485 - 492. 1974.
77. Bochet, J. J. Ordenación de las cuencas hidrográficas: participación de las poblaciones de montañas. O.N.U. Roma. Guia para la conservacion - FAO # 8. 219p. 1983.
78. Bradford. J. M. y Piest, R. F. Erosional develoment of valley bottom gullies in the upper midwesten United State. Geomorphology. London 1980.
79. Carrera Morales, J. A. Lucha contra la erosión: la experiencia española. Rev. Montes 1985.
80. Campbell, I. A. Stream discarge, suspended sediment and erosion rates in the Red Deer River basin. Alberta Canada 1977.
- 81.** Fernandez E. A. F. I. C. G. R. Remocion de sedimentos usando el principio de venturi. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidraulica. Mexico 1998.
- 82.** Ferreira. L. F. Estudio experimental de la influencia de la granulometría en el transporte solido para cauces con fondo móvil. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Universidad Politecnica de Madrid. España 1996.
- 83.** García Flores M. M. J. A. Origen y propiedad de los sedimentos. Instituto de Ingeniería de la UNAM. México 1997.

84. García J.F. “Comprobación experimental de un modelo matemático de erosión hídrico en laderas”. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. México 1998.
85. Hotchkiss R. H. H. X. Reservoir Sediment Removal: Hydrosuction Dredging. Submitted to ACSE Journal of Hydraulics. 1994.
86. Merino J. M. A. L. “*Explotación más flexible y eficaz de centrales hidráulicas con alternadores Varspeed*” Revista ABB 3/96. Madrid 1996.
87. Van Rijn. Sediment transport, Part II: Bed load transport. Journal of hydraulic Engineering Vol 110. 1984.
88. Reh binder G. Sediment removal with a siphon at critical flux. Journal of Hydraulic Research. Vol 32. 1995.
89. Rocha A. “Transporte de sedimentos aplicado al diseño de estructuras hidráulicas. Colegio de ingenieros del Perú. Lima – Perú 1960.
90. Aparicio J. Tesis de licenciatura en Ing. Civil: Análisis de la Producción de Sedimentos Mediante el Modelo de Stanford. UNAM Facultad de Ingeniería. México 1979.
91. Barragan, M.C. Remoción de sedimentos en embalses con la ayuda de la modelación física. Tesis de maestría en ingeniería hidráulica. Facultad de Ingeniería UNAM. Mexico 2000.
92. Campos Aranda. Procesos del Ciclo Hidrológico. UASLP. Mexico D.F 1998.
93. Rojas, T Las obras hidráulicas mesoamericanas en la transición novohispanas. XIII Economy History Congress, Session 17 “Transferencia de técnicas, modos de producción y uso del agua en Europa y America Latina”. Argentina 2002.
94. SARH – CNA. Grandes Presas, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos – Comisión Nacional del Agua. México 1982- 1991.
95. Berozowsky, M. Jimenez, AA, y Echeverria, B, “Calculo de perfiles en ríos considerando formas de fondo” Instituto de Ingeniería. UNAM 1992.
96. Bouvard, M “Design Flood and Operational Flood Control”. General Report of the Question 63. San Francisco, USA 1988.

97. Chow, V.T. Open channel hydraulics. Editorial McGraw – Hill. New York, USA 1959.
98. Giles V., Ranald. Mecanica de los fluidos e hidráulica. Segunda Edición. Serie de compendidos Schawm. McGraw- Hill de Mexico S.A. de C.V. México 1975.
99. Comité Interafricain D'études Hydrauliques (CIEH). Etude hydrologique du marigot de Zogona. Determination de la crue decennale aux sections caracteristiques, Ouagadogon. 1988.
100. Linsley, R., Kohler, M., Paulhus, J. Hidrologia para ingenieros. Editorial McDraw & Hill 1997.
101. ORSTOM y M. D.R. du Niger. Les bassins versants de Galmi, Ibohamene et Tegueleleguel . Etude hydrologique. Campagne 1976.
102. Consuegra – Zammit D. Verification du modèle hydrologique OTTHYMO et propositions pour son application, tesis de Maestria, Université d'Ottawa 1987.
103. BROWN, C. B. "Sediment transportation. Engineering Hydraulic. Edited by Hunter Rouse. John Wiley and Sons, Inc New York USA 1950.
104. CHEN, X.M.C.Y. "Velocity Distribution of Turbulent Open – Channel Flow with Bed Suction Time (CST)." Journal of te Chin. I. Ch E Vol. 26, N° 6 1995.
105. Daniel M. O.; WARNER, E. B. "Influence of Suction and Blowing on Entrainment of Sand Particles". Journal of Hydraulics Division Vol. 123 1997.