



WELLENFAG

AGUSTÍN TOMEI
GUIDO WEHNCKE
JUAN AGUSTÍN MANGIATERRA

DIRECCIÓN:
DR. ING. DIEGO SANTIAGO
DR. ING. SANTIAGO URQUIZA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MAR DEL PLATA, ABRIL 2018





RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Índice

Resumen.....	3
Introducción.....	4
1. Antecedentes:	5
2. Marco teórico.....	7
2.1. Las olas en la Naturaleza	7
2.1.1. Características de una ola	7
2.2. Tipos de ondas presentes en el mar	11
2.3. Celeridad	11
2.4. Comportamiento de las olas generadas por el viento	12
2.5. Principio de Bernoulli	13
2.6. Números adimensionales.....	15
2.6.1. Número de Reynolds.....	16
2.6.2. Número de Froude	16
2.7. Capa límite.....	17
2.7.1. Capa límite en una placa plana	19
2.8. Análisis dimensional.....	20
2.9. Adhesión, cohesión y ángulo de mojado	21
2.10. Resalto hidráulico.....	22
3. Desarrollo	22
3.1. Análisis teórico	23
3.2. Análisis práctico.....	28
3.2.1. Determinación de caudal disponible en la bomba.....	28
3.2.2. Construcción del modelo	28
3.2.3. Diseño del obstáculo	30
3.3. Pruebas y mediciones.....	38
3.3.1. Conclusiones.....	39
3.4. Prototipo	41
3.4.1. Factores de escala	41

3.4.2.	Diseño del prototipo	41
3.5.	Obra civil.....	45
3.5.1.	Verificación de pared de acrílico	48
3.5.2.	Características del agua.....	49
3.6.	Obstáculo	50
3.6.1.	Análisis tensional y de desplazamientos	51
3.7.	Sistema de bombeo.....	55
3.7.1.	Sujeción del sistema de bombeo	62
3.7.2.	Alimentación del sistema de bombeo.....	66
3.8.	Medidas de seguridad.....	67
3.8.1.	Superficie amortiguadora de impactos	68
3.8.2.	Uso de casco.....	69
3.8.2.1.	CE-1385	70
3.8.2.2.	Aspectos a considerar cuando se compra un casco	71
3.9.	Análisis de aceptación del proyecto.....	71
3.10.	Estimación de la inversión.....	74
3.11.	Alternativas	76
3.12.	Conclusión	78
3.13.	Bibliografía	79

Resumen.

En el presente trabajo final de grado se realizó el diseño preliminar de un sistema capaz de generar una ola artificial, que simule de la forma más precisa posible las características de aquellas de mejor calidad, producidas naturalmente.

Se realizó un estudio de antecedentes de sistemas ya existentes en el mundo, y un estudio de los principios teóricos involucrados en la generación de olas en la naturaleza, así como también en forma artificial.

Posteriormente a la realización de los cálculos correspondientes, se diseñó y construyó un modelo a escala del sistema. Sobre este se aplicaron factores de escala, respetando relaciones dimensionales y condiciones de flujo, para el diseño del prototipo en tamaño real.

Se determinaron los materiales y equipos necesarios para llevar a cabo el proyecto, y se realizó un análisis de costos (con el error característico de la ingeniería básica). Por otro lado, se analizó el equipamiento de seguridad necesario para la práctica del deporte en una instalación de estas características.

Finalmente, se analizaron distintas alternativas de diseño que no fueron ensayadas en el presente.

Introducción.

El surf es un deporte de gran popularidad en el mundo. Es practicado por personas de todas las edades y culturas, en pequeños pueblos o en grandes capitales, como hobby o en forma profesional. Sea cual fuere la razón por la que se lo realiza, despierta pasiones en los amantes de la disciplina, ya que combina la diversión y adrenalina de todo deporte extremo, con el relax y el contacto con el océano.

En los últimos años se ha producido un gran crecimiento de la actividad. Esto se debe a la aparición de competencias internacionales, el circuito mundial de surf, la promoción de la disciplina en redes sociales y otros medios. El crecimiento ha sido tan significativo que será incluido como deporte olímpico en los Juegos de Tokyo 2020.

A pesar de la gran popularidad con la que cuenta, la práctica del surf se encuentra limitada por distintas razones. Factores geográficos, como la cercanía al mar, como también climáticos y de calidad de olas, son muy importantes a la hora de evaluar la frecuencia y posibilidad de realizar esta actividad.

Como solución a estas problemáticas, a lo largo de los años se han diseñado distintos sistemas capaces de generar olas en forma artificial, para poder practicar este deporte en ciudades que no cuentan con mar, o las condiciones de este no son las adecuadas, por falta de olas, o su mala calidad. También brindan la posibilidad de realizar un entrenamiento continuo y rutinario para profesionales, quienes no deben esperar a que se den las mejores condiciones para hacerlo, o en el caso de los principiantes, iniciarse en la disciplina en un ambiente controlado.

El desarrollo de estos sistemas abrió, por otro lado, la posibilidad de utilizarlos como atracciones turísticas en parques acuáticos, de diversiones, resorts, cruceros, y lugares destinados exclusivamente a su explotación. El crecimiento experimentado por el deporte en las últimas décadas lo convierte en una gran oportunidad de negocio.

En este trabajo se realiza el diseño preliminar de un sistema capaz de generar una ola artificial, continua y estática (ya que no se desplaza), con el objetivo de simular, de la forma más precisa posible, las condiciones de una ola de características óptimas generada en forma natural.

Informe

1. Antecedentes:

- Trabajo: “Generador de olas artificiales estáticas”.
 - Autores: Emanuel Guzmán, Eder Salcedo, Dennis Casas, Jimmy Mendoza, Héctor Alcalde.
 - Objetivo del trabajo: diseñar y construir un modelo a menor escala de un generador de olas artificiales estáticas. Calcular los parámetros de diseño para este modelo a escala, tales como el radio de curvatura y el caudal mínimo para que se pueda sostener un surfista, entre otros.
 - Investigación: se procedió calculando la velocidad mínima de sustentación, la cual fue obtenida una vez encontrado el coeficiente de drag. Luego se realizó un diseño a escala del canal, que contaba con un difusor, canales de vidrio, un sistema para sostener la tabla y ésta misma. Finalmente se obtuvo la geometría que daba forma a la ola. Se fabricó un módulo experimental. Luego a esta superficie se le tomó coordenadas y se generó un modelo CAD.
 - Resultados: se obtuvieron resultados para el modelo a escala. Se determinó el caudal, la velocidad mínima de sustentación, se realizaron simulaciones y se indicó en que parte del canal se encuentra el máximo rozamiento entre el fluido y la superficie.
 - Conclusiones: el caudal que se obtuvo es elevado, con respecto a las dimensiones modelo. Se demostró que la rugosidad de la superficie es un factor determinante en la experiencia, ya que las velocidades requeridas varían en función de esta. Además, se concluyó que las velocidades iniciales dependen de la forma de la superficie a recorrer.
 - Relación con el proyecto: si bien el sistema generador de ola parte de un principio distinto, se relaciona ya que la finalidad del proyecto es la misma: realizar un modelo a escala con el fin de obtener la dimensión y geometría del canal.

- Trabajo: “Artificial stationary breaking surf waves in a physical and numerical model”.
 - Autores: Mario Oertel, Juan Mönkemöller, Andreas Schlenkhoff.
 - Objetivo del trabajo: diseñar a pequeña escala un modelo físico y numérico generador de olas estáticas que permita identificar geometrías fáciles de manejar y validar las simulaciones numéricas como una solución de bajo costo para variar las condiciones de contorno. Se analizan alturas de ruptura y longitudes de los tubos generados.
 - Investigación: usando el software FLOW-3D de modelado numérico, se diseñó un modelo que incluía dos bloques de mallado para el análisis. Se impusieron condiciones de turbulencia y condiciones de contorno, así como ubicación del obstáculo. Se le aplicó una restricción para identificar los niveles superficiales del agua y las velocidades. Se

construyó el modelo físico a escala para contrastar los resultados obtenidos en el programa.

- Resultados: el propósito del estudio fue identificar la posición y el ángulo óptimos para crear una rompiente de ola con tubo. Definiendo parámetros se logró definir la forma de la ola generada.
- Conclusiones: variando la posición y ángulo del obstáculo se obtuvieron tres estados de ola, denominados como “roller”, “surf wave” y “overflown”. Una comparación entre el modelo físico y el numérico indican una buena aplicación del modelado numérico con el método utilizado.
- Relación con el proyecto: la parte experimental de este trabajo presenta cierta similitud con el presente, tanto en contenido como en metodología y resultados obtenidos.

- Trabajo: “Stationary standing surf waves”.

- Autor: Markus Aufleger, Valerie Neisch, Ulrich Hautzel, Derek O’Neil.
- Objetivo del trabajo: estudiar la formación de olas estacionarias surfeables en Munich, Alemania, y diseñar un sistema que permita adaptarse en otros ríos.
- Investigación: a partir de la ola generada en Munich en el río Eisbach y un sistema patentado en Estados Unidos tomado como referencia, se estudiaron las condiciones de borde y se diseñó una estructura con un desnivel por el cual circula agua y genera una ola estática. El objetivo principal de la estructura existente en Eisbach antes de ser analizada es la de disminuir la energía cinética del fluido. Este fue encausado artificialmente y en un punto fue necesario realizar un descenso brusco por lo que el fluido se acelera y aumenta su energía notablemente.
- Resultados: la estructura consta de una rampa con articulaciones para variar las condiciones de borde y calibrarla ajustando su posición para generar una ola de condiciones aceptables para la práctica del surf. Se obtuvo un diseño apto para colocar en un río y aprovechar la energía cinética del mismo para fines recreativos.
- Conclusiones: la adaptabilidad del sistema permite instalarse en distintas condiciones de flujo por lo que se puede reproducir una forma similar a una ola del mar con energía producida de forma natural.
- Relación con el proyecto: busca generar una ola estacionaria mediante la instalación de una superficie que deberá recorrer el agua para generarla.

2. Marco teórico

2.1. Las olas en la Naturaleza

Una fracción de la energía solar incidente en la Tierra se invierte en un calentamiento desigual de la misma. Este fenómeno genera zonas de alta y baja presión en la atmósfera, lo que da origen a desplazamientos de aire (viento), de distintas intensidades. Del rozamiento del aire con la superficie marina surge el oleaje, el cual actúa como acumulador y transporte de energía. La intensidad del oleaje depende de la intensidad del viento, su duración y la distancia sobre la cual transmite energía a la ola.

El mecanismo por el cual se generan las olas tiene su origen en la acción del viento, acompañado por oscilaciones de corto período, en la presión atmosférica. Una corriente de viento que fluye paralela a la superficie marina genera oscilaciones en la presión, que actúan en un plano ortogonal a su dirección [1].

2.1.1. Características de una ola

El término surfeabilidad se refiere al grado de idoneidad de una ola para la práctica del surf. Los cuatro parámetros más importantes para la caracterización de las olas surfeables son: altura, ángulo de rotura, intensidad de rotura y longitud de sección.

2.1.1.1. *Altura de la ola en rotura*

Está considerada como uno de los parámetros más importantes en una rompiente. Puede variar entre olas consecutivas, entre series (grupos de olas) consecutivas, incluso a lo largo de su propia rotura debido a las interacciones no lineales y al efecto del viento.

2.1.1.2. *Ángulo de rotura*

Una ola surfeable es aquella sobre la cual un surfista puede mantener una velocidad superior o igual a la velocidad de avance lateral del vórtice sobre el frente de onda. Para que esto sea posible, la ola no debe romper simultáneamente a lo largo de todo el frente. Si esto sucede se dice que la ola cierra, pues el ángulo de rotura es demasiado pequeño. Éste es quizás el parámetro más determinante para caracterizar una rompiente. Se define como "ángulo de rotura" a aquel determinado por la línea de rotura y la tangente del frente en el punto de rotura. Ángulos pequeños producen olas que rompen longitudinalmente muy rápido, imposibilitando al surfista a desplazarse sobre la ola. Ángulos altos de rotura generan olas que rompen longitudinalmente más despacio,

llegando al límite superior donde la velocidad de desplazamiento es tan lenta que no resulta surfable.

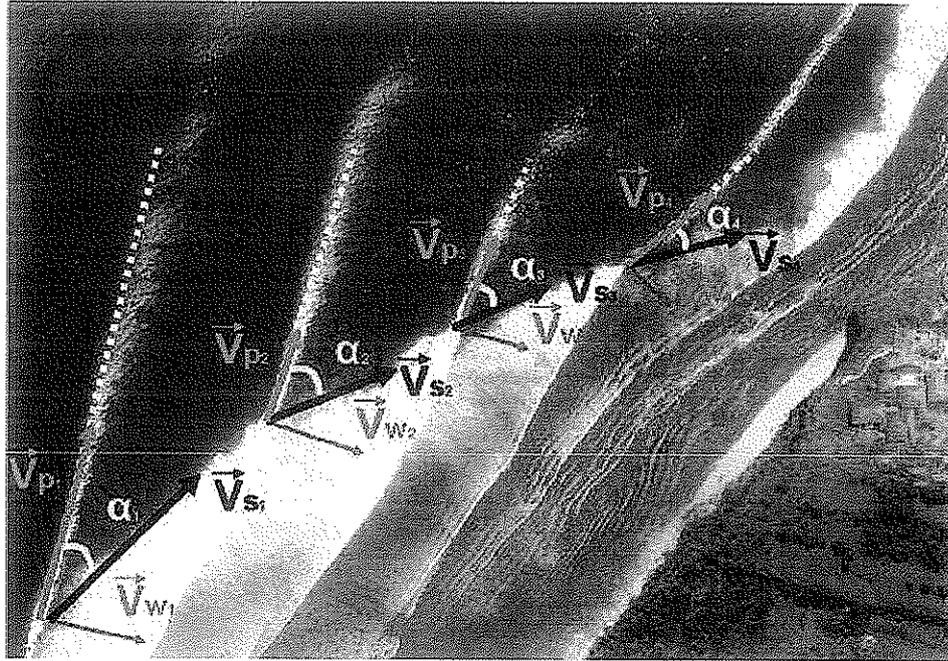


Fig.:1. Descomposición vectorial de la celeridad de una ola.

En la Figura 1, se señalan el vector de celeridad de la onda V_w y la velocidad de rotura longitudinal del frente V_p . La suma de estos dos vectores indica la velocidad de desplazamiento que experimenta el surfista V_s y el ángulo de rotura α . Este método de análisis tiene la ventaja de poder determinar la surfabilidad de la ola midiendo este ángulo mediante fotografías aéreas.

En la imagen se pueden apreciar 4 frentes de onda que rompen hacia la izquierda (según el punto de vista del surfista). El primer tramo, $\alpha_1 \cong 25^\circ$ corresponde a la zona de inicio de la rotura, es una sección rápida que requiere alcanzar una alta velocidad. Los siguientes tramos $\alpha_2 = \alpha_3 \cong 45^\circ$ corresponden a la segunda sección, la cual es mucho más lenta y maniobrable que la anterior. El último tramo, $\alpha_4 \cong 20^\circ$ corresponde al final del recorrido, ya que el frente alcanza una dirección cada vez más paralela a la costa hasta el punto $\alpha = 0$.

2.1.1.3. *Intensidad o forma de rotura*

El que una ola rompa con mayor o menor peralte depende fundamentalmente de la pendiente del fondo, la altura y período asociados. La rotura del oleaje se puede clasificar en cuatro categorías que son de vital importancia desde el punto de vista del surfista:

- **Descrestamiento:** Este tipo de rotura ocurre cuando la cresta de la ola se desmorona sobre el frente, cuyo peralte es bajo. Estas olas son surfeables aunque su escaso peralte no permite alcanzar velocidades elevadas. Por ello son adecuadas para la iniciación en el surf.



Fig.:2. Ola tipo descrestamiento.

- **Voluta:** este tipo de rotura ocurre cuando la cresta de la ola rompe sobre la base del frente generando la forma característica tubular. El elevado peralte que alcanzan permite al surfista generar altas velocidades. Es la forma preferida por la mayoría.



Fig.:3. Ola tipo voluta.

- Colapso: este tipo de rotura ocurre cuando la ola permanece peraltada hasta que su frente colapsa, formando una estructura turbulenta irregular. Es frecuente en los fondos de arrecife, cuando la marea está demasiado baja y el fondo no está suficientemente sumergido. No se considera surfeable.



Fig.:4. Ola tipo colapso.

- Oscilación: ocurre cuando la ola, debido a la elevada pendiente del fondo, no llega a romper de manera que la superficie del agua simplemente oscila al llegar al contorno de tierra. Este régimen no es surfeable.

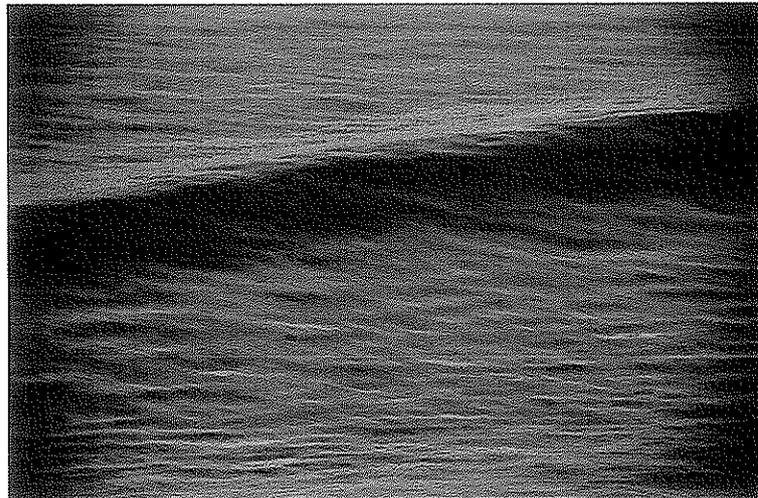


Fig.:5. Ola tipo oscilación.

2.1.1.4. Longitud de la sección

El frente de ola durante el proceso de rotura experimenta una serie de procesos que hacen que cambie de dirección y altura. En realidad, la gran mayoría de las olas presentan dos o más secciones, en las cuales puede apreciarse variaciones en la altura, dirección y ángulo de rotura. La existencia de diferentes secciones puede ser deseable para niveles de destreza avanzados, lo cual permite realizar una mayor variedad de maniobras. En la Figura 1 se pueden diferenciar claramente tres secciones, descritas anteriormente [2].

2.2. Tipos de ondas presentes en el mar

Clasificación general:

- Ondas estacionarias: Existen uno o varios puntos en los que el movimiento es nulo (puntos nodales), y uno o varios puntos en los que el desplazamiento es máximo (puntos ventrales). La distancia entre nodos y la frecuencia, dependen de las dimensiones de la cuenca en que se produzcan.
- Ondas transitorias o progresivas: Varían en el tiempo y en el espacio. Pueden formarse tanto en la superficie, debido al viento, como también debajo, por discontinuidades de temperatura y salinidad entre distintas masas de agua, terremotos costeros y oceanográficos.
- También se las puede clasificar según la forma de aplicación de la fuerza perturbadora:
 - Libres: Generadas por la aplicación instantánea de la fuerza perturbadora. Esta cesa y la ola evoluciona libremente.
 - Forzadas: La perturbación se aplica en forma continua [1].

2.3. Celeridad

El término "celeridad", se refiere a la velocidad de propagación o traslación de la ola, respecto al agua estacionaria. La celeridad de las idealizadas olas viajeras del mar es dependiente de la longitud de onda y, para mares poco profundos, también depende de la profundidad del agua. Éste obedece la siguiente ecuación:

$$V_w = \sqrt{\frac{g \lambda}{2 \pi} \tanh\left(2 \pi \frac{h}{\lambda}\right)} \quad \text{Ec.:1}$$

Donde:

λ : Longitud de onda.

T: Período.

g: Aceleración de la gravedad.

h: Profundidad.

• En aguas profundas ($h > \frac{\lambda}{2}$): $V_w = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$ Ec.:2

• En aguas poco profundas ($\frac{\lambda}{20} < h < \frac{\lambda}{2}$): $V_w = \sqrt{gh}$ Ec.:3

• En canales de profundidad limitada: $V_w = \sqrt{g(h + H)}$ Ec.:4

Donde H: Altura de la ola [1].

2.4. Comportamiento de las olas generadas por el viento

Mientras el viento se encuentra soplando, se generan olas sin una dirección definida. Cuando abandonan la zona en la que sopla el viento, se propagan de acuerdo a su velocidad " V_w ", la cual es función de la longitud de onda " λ ".

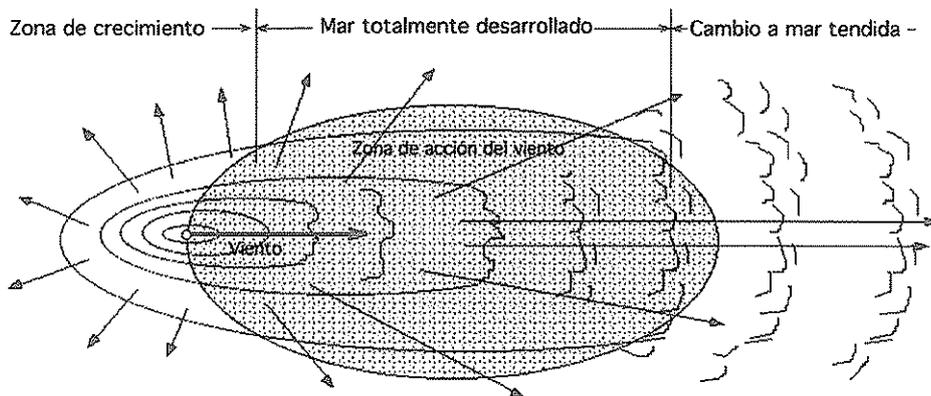


Fig.:6. Acción del viento sobre una zona del mar.

Es muy importante diferenciar entre la forma del perfil de onda, y la trayectoria de las partículas de agua que la constituyen.

Las olas se trasladan, mientras que las partículas de agua se mueven en órbitas elípticas o circulares. Estas órbitas se consideran cerradas por comodidad para su estudio, aunque en realidad son abiertas, por lo que el oleaje está relacionado con un transporte de corriente. Las partículas situadas en la misma vertical describen órbitas de igual fase, pero sus radios disminuyen con la profundidad.

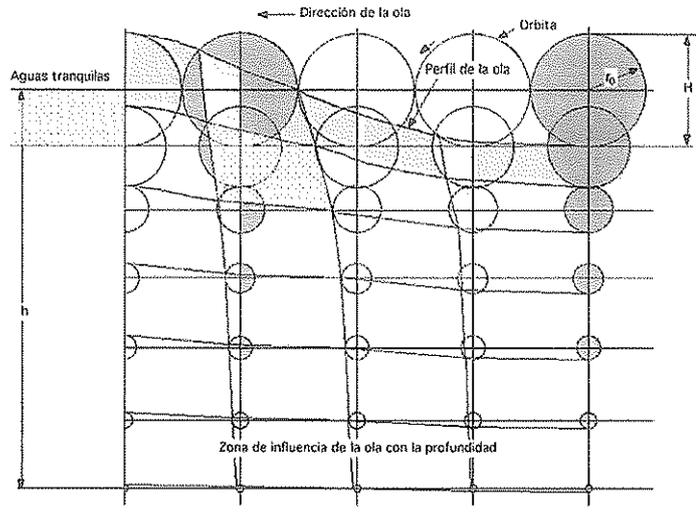


Fig.:7. Movimiento de partículas de agua en una ola.

Si la profundidad es muy pequeña, el movimiento vertical queda impedido, y la trayectoria de las partículas se convierte en rectas horizontales [1].

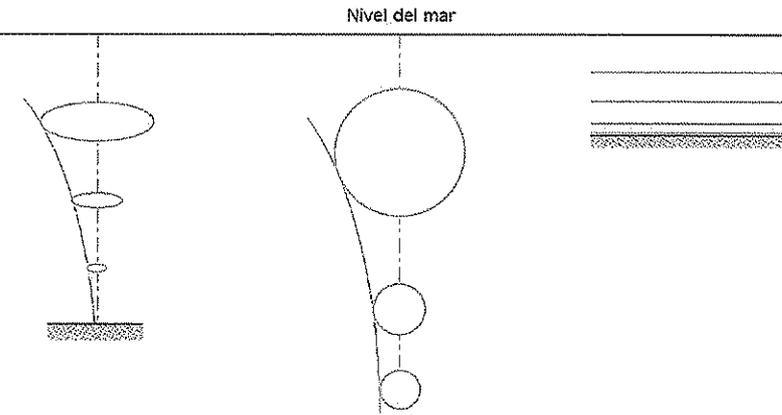


Fig.: 8. Influencia del fondo en el desplazamiento vertical.

2.5. Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli, también denominado "Ecuación de Bernoulli", describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente (para condiciones de flujo permanente, sin fricción e incompresible):

$$h + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} = cte. \quad Ec.:5$$

Dónde:

h : Altura.

v : Velocidad.

g : Aceleración de la gravedad.

p : Presión.

γ : Peso específico. ($\rho \cdot g$, con ρ : densidad).

Esta ecuación permanece constante a lo largo de una línea de corriente en flujo permanente, sin fricción e incompresible.

Una línea de corriente se define como el lugar geométrico de los puntos tangentes al vector velocidad de las partículas de fluido en un instante determinado. En general, a lo largo de esta, la velocidad del elemento varía tanto en magnitud como en dirección. Si todo elemento que pasa por un punto dado, sigue la misma trayectoria que sus precedentes, se dice que el flujo es estacionario.

En flujo permanente, ya que no existe cambio en la dirección del vector velocidad en ningún punto, la línea de corriente tiene una inclinación fija en cada punto, y por consiguiente está fija en el espacio. Una partícula se mueve siempre tangente a la línea de corriente, por lo tanto, la trayectoria de una partícula, es una línea de corriente.

Cada uno de los términos de Ec.:5 puede ser interpretado como una forma de energía disponible. El primer término corresponde a la energía potencial, el segundo a la energía cinética, y el tercero a la energía de flujo. También es conocida como la ecuación de "conservación de la energía mecánica".

Si se cumple con las condiciones de flujo permanente, sin fricción e incompresible, se puede plantear la igualdad entre dos puntos de una misma línea de corriente [3]:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} \quad Ec.:6$$

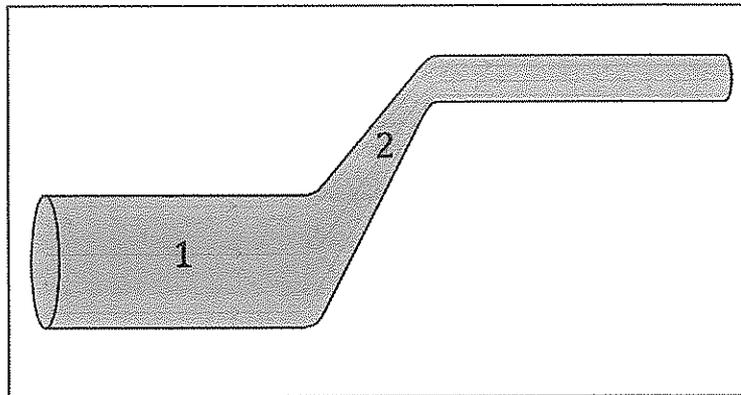


Fig.: 9. Líneas de corriente.

$$(h_1 - h_2) + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2g} + \frac{(p_1 - p_2)}{\gamma} = 0 \quad \text{Ec.:7}$$

De Ec.:7, se concluye:

- $(h_1 - h_2)$: es independiente del nivel de referencia.
- $\frac{(p_1 - p_2)}{\gamma}$: Es independiente de la presión de referencia.
- $\frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2g}$: Ya que los términos de velocidad no son lineales, su nivel de referencia es fijo.

2.6. Números adimensionales

Se llama número adimensional a aquel que no tiene unidades físicas, por lo tanto es un número puro. Se definen como productos o cocientes de cantidades que sí tienen unidades de forma que se anulen. Dependiendo de su valor, tienen un significado físico que caracteriza determinadas propiedades para algunos sistemas.

Son muy utilizados a la hora de definir el comportamiento de ciertos fenómenos a estudiar. Analiza el papel que juega cierto factor en el fenómeno. También permite simplificar cálculos de ecuaciones en las cuales, sin estos, resultaría tedioso su análisis.

Estos números han permitido un avance en la investigación y la solución de incógnitas y paradigmas de la ingeniería. Los números adimensionales utilizados en este proyecto han sido los de Reynolds y Froude.

2.6.1. Número de Reynolds

Un flujo laminar se define como aquel en que el fluido se mueve en capas o láminas, moviéndose suavemente unas sobre otras y existiendo solo intercambio de moléculas entre éstas. La inestabilidad o turbulencia será disminuida por la acción de las fuerzas cortantes viscosas que se oponen al movimiento de estas capas. En un flujo turbulento el movimiento de las partículas es muy inestable o desordenado y se tiene un intercambio entre capa y capa.

El número de Reynolds permite caracterizar la naturaleza del flujo, además indica la importancia relativa de la tendencia del flujo hacia un régimen turbulento respecto de uno laminar y la posición de este estado dentro de una longitud determinada. Es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Un número de Reynolds crítico distingue entre los regímenes de flujo laminar o turbulento en tuberías, capa límite, o alrededor de objetos sumergidos [4].

$$Re = \frac{\rho v x}{\mu} \quad Ec.:8$$

Con:

ρ : Densidad del fluido

v : Velocidad

x : Longitud característica

μ : Viscosidad dinámica.

2.6.2. Número de Froude

El flujo de canales abiertos tiene lugar cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad y solo están parcialmente envueltos por un contorno sólido. Sobre el líquido no actúa otra presión

que la debida a su propio peso y a la atmosférica. El mecanismo principal que sostiene un flujo en un canal abierto es la fuerza gravitacional.

El número de Reynolds y los términos laminar y turbulentos no bastan para caracterizar todas las clases de flujo en canales abiertos. El número de Froude establece una relación entre las fuerzas dinámicas (o inerciales) y las gravitacionales. Con un flujo a superficie líquida libre, su naturaleza depende de este número [5].

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}} \quad \text{Ec.:9}$$

Con:

v : Velocidad.

g : Aceleración de la gravedad

l :Parámetro de longitud.

El flujo se clasifica como:

- $Fr < 1$: Flujo subcrítico o tranquilo, tiene una velocidad relativamente baja y la profundidad es relativamente grande, prevalece la energía potencial. Corresponde a un régimen de llanura.
- $Fr = 1$: Flujo crítico, es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico.
- $Fr > 1$: Flujo supercrítico o rápido, tiene una velocidad relativamente alta y poca profundidad. Prevalece la energía cinética. Propios de cauces de gran pendiente o ríos de montaña.

2.7. Capa límite

Cuando empieza el movimiento en un fluido que tiene una viscosidad muy pequeña, el flujo esencialmente es irrotacional en los primeros instantes. Esto significa que las partículas del fluido no giran alrededor del eje que pasa por su centro de masas, cuando se tiene un fluido que se

desplaza en una corriente circular. Debido a que el fluido tiene velocidad nula en las fronteras, existe un alto gradiente de velocidad desde la frontera hacia el flujo, que en fluidos reales origina fuerzas de corte cerca de esta, reduciendo la velocidad de flujo. La capa de fluido cuya velocidad ha sido afectada por este esfuerzo cortante, se conoce como capa límite. En ella, la velocidad se aproxima a la de flujo principal en forma asintótica. A medida que esta capa se mueve a lo largo del cuerpo, la acción continua de los esfuerzos cortantes tiende a desacelerar partículas adicionales de fluido, haciendo que el espesor de la capa aumente con la distancia respecto del punto aguas arriba.

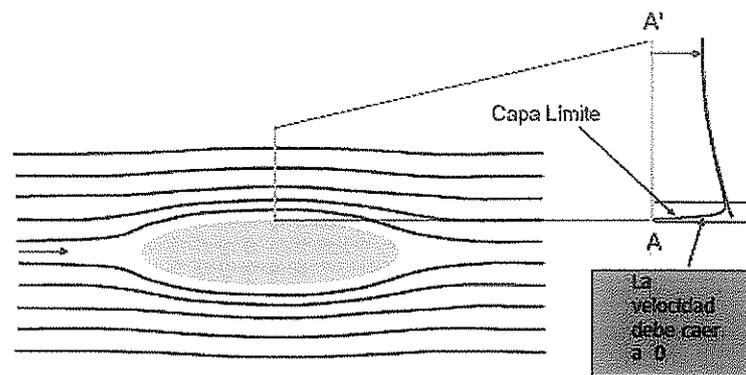


Fig.: 10. Capa límite.

Para fronteras lisas aguas arriba, la capa límite empieza como una capa límite laminar, dentro de la cual las partículas de fluido se mueven en capas lisas. A medida que la capa límite aumenta su espesor, se vuelve inestable y finalmente se transforma en turbulenta, en la cual las partículas de fluido se mueven en trayectorias aleatorias, a pesar de que su velocidad ha sido reducida por la acción viscosa en la frontera. Cuando la capa límite se ha hecho turbulenta, una pequeña capa muy delgada con movimiento laminar, sigue existiendo cerca de la frontera, y se la conoce como subcapa laminar [6].

La transición de régimen laminar a régimen turbulento en el flujo dentro de la capa límite depende del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v x}{\mu} \quad Ec.:10$$

Dónde:

ρ : Densidad del fluido.

v : Velocidad del fluido.

x : Longitud característica.

μ : Viscosidad dinámica.

2.7.1. Capa límite en una placa plana

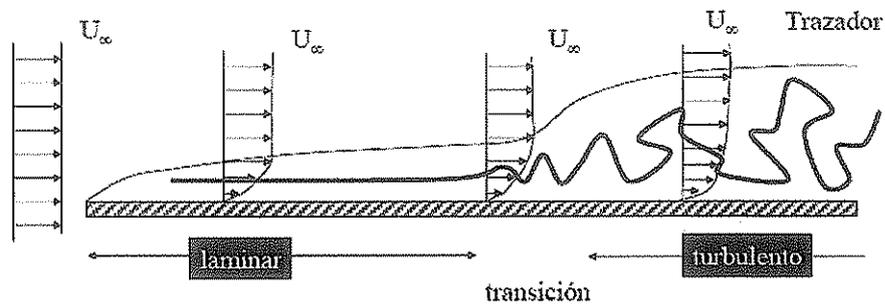


Fig.: 11. Evolución de la capa límite en una placa plana.

En el caso de una placa plana, la longitud característica "x" es la distancia al borde de ataque.

- La zona de transición comienza para un valor de $Re = 10^5$.
- La capa límite comienza a ser turbulenta para $Re = 3 \cdot 10^5$.

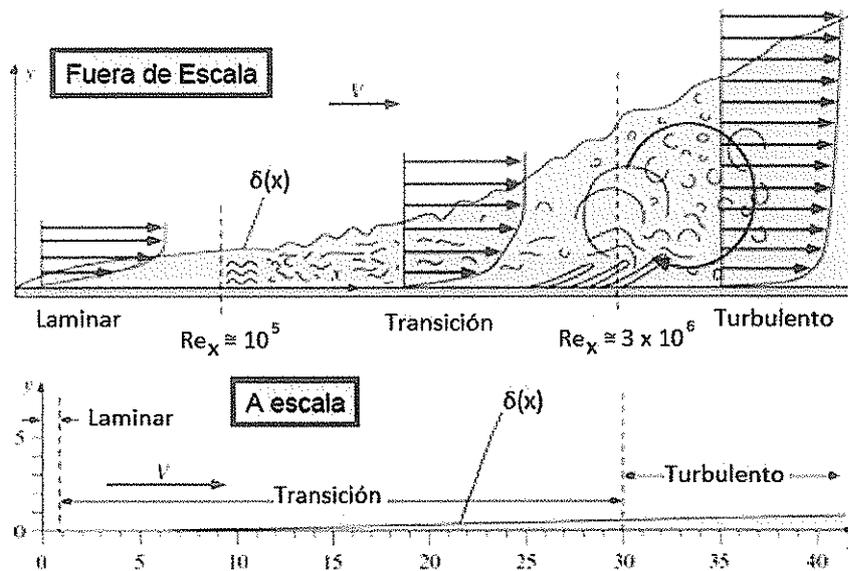


Fig.:12. Espesor de capa límite en función de la distancia

Espesor de la capa límite

◦ Espesor de capa límite laminar: $\delta(x) = \frac{4.91 x}{\sqrt{Re}}$ Ec.:11

◦ Espesor de capa límite turbulenta: $\delta(x) = \frac{0.38 x}{\sqrt[5]{Re}}$ Ec.:12

2.8. Análisis dimensional

Los parámetros adimensionales permiten que resultados experimentales limitados, sean aplicados a situaciones que involucran dimensiones físicas diferentes, y en algunos casos, distintas propiedades de fluidos. Esto se traduce en un ahorro significativo de tiempo y dinero.

Muchos de estos parámetros, pueden ser vistos como la relación de un par de fuerzas fluidas, cuya magnitud relativa indica la importancia relativa de una de las fuerzas con respecto a la otra. Si algunas fuerzas en una situación de flujo particular son mucho más grandes que otras, a menudo es posible despreciar el efecto de las fuerzas menores y tratar el fenómeno como si estuviera completamente determinado por los mayores, permitiendo utilizar procedimientos matemáticos y experimentales más simples, para resolver el problema.

Al resolver problemas de mecánica de fluidos, se utilizan tanto desarrollos teóricos, como resultados experimentales. Al agrupar cantidades importantes en parámetros adimensionales, es posible reducir el número de variables y posibilitar que los resultados compactos, sean utilizados en situaciones similares.

Tres fuerzas de las que se obtienen los números adimensionales utilizados en el presente trabajo son:

◦ Fuerzas de inercia: $F_i = ma$ Ec.:13

◦ Fuerzas viscosas: $F_v = \mu A \frac{v}{h}$ Ec.:14

◦ Fuerzas gravitatorias: $F_g = mg$ Ec.:15

Dónde:

m: masa.

a: aceleración.

μ : viscosidad dinámica.

A: área transversal.

v : velocidad.

h : espesor de película.

g : aceleración de la gravedad.

Si se relaciona las fuerzas de inercia con las viscosas:

$$\frac{F_i}{F_v} = \frac{ma}{\mu A \frac{v}{h}} = \frac{\rho l^3 l t^{-2}}{\mu l^2 t^{-1} l^{-1}} = \frac{\rho l^2 l t^{-1} l}{\mu l^2} = \frac{\rho v x}{\mu} = Re \quad Ec.:16$$

Dónde:

x : Longitud característica.

Si se relaciona las fuerzas de inercia con las gravitatorias:

$$\frac{F_i}{F_g} = \frac{ma}{mg} = \frac{\rho l^3 l t^{-2}}{\rho l^3 g} = \frac{l^2 l^2 t^{-2}}{l^2 l g} = \frac{v^2}{gL} = Fr^{-2} \quad Ec.:17$$

Dos de los parámetros adimensionales más utilizados en el estudio del comportamiento de los fluidos son el número de Reynolds, y el número de Froude [3].

2.9. Adhesión, cohesión y ángulo de mojado

Adhesión es la propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies de sustancias iguales o diferentes, cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares.

Cohesión es la atracción entre moléculas, que mantiene unidas las partículas de una sustancia. En el agua, la fuerza de cohesión es elevada por causa de los puentes de hidrógeno que mantienen las moléculas fuertemente unidas.

El ángulo de mojado se refiere al ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con un sólido. Depende principalmente de la relación existente entre las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido, y las fuerzas cohesivas del mismo líquido. Cuando las fuerzas adhesivas son muy grandes en relación a las fuerzas cohesivas, el ángulo de contacto es menor a 90°, teniendo como resultado que el líquido "moja" a la superficie.

2.10. Resalto hidráulico

Es un fenómeno que se produce cuando el fluido pasa de un estado supercrítico, correspondiente a un $Fr > 1$, a uno subcrítico, con un $Fr < 1$, en una corta distancia. Tanto la intensidad como la ubicación del resalto están determinadas por las condiciones aguas arriba y aguas abajo del mismo. La aparición se debe a la incompatibilidad de las condiciones de flujo entre dos puntos de un canal, por lo que es un mecanismo de ajuste y transición entre dos situaciones incompatibles. Debido a los procesos irreversibles producidos a través de un resalto hidráulico, existe una disipación de energía, cuya magnitud depende de la intensidad de este [7].

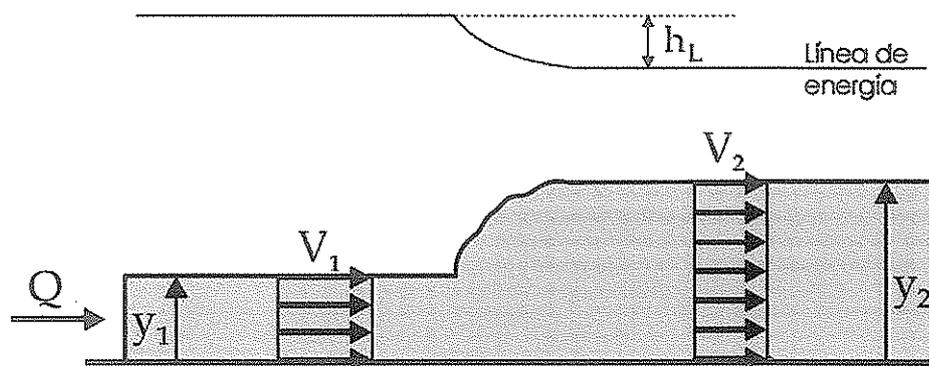


Fig.:13. Resalto hidráulico.

3. Desarrollo

En el mar, una ola se genera en las profundidades, por la acción del viento y avanza en forma de onda. Al llegar a la costa, quiebra y adquiere la forma tradicional a la que se está acostumbrado, permitiendo la práctica del surf. Pero como toda onda, avanza haciendo desplazar a las partículas en forma ortogonal a su dirección de avance.

Para reproducir las condiciones en un lugar confinado, se decide utilizar un esquema como el que se ve en la Figura 14. En este, se diseña el fondo cuya geometría es la responsable de, al hacer circular el fluido sobre él, producir una ola de similares características a las naturales. Así, se recrea de forma análoga la condición, forzando a que se genere una ola estática, es decir, que no se desplaza. Se debe garantizar una profundidad mínima del fluido circulante, tal que el usuario se pueda deslizar por la ola con una tabla convencional, que en su mayoría cuentan con quillas de aproximadamente 15 cm.

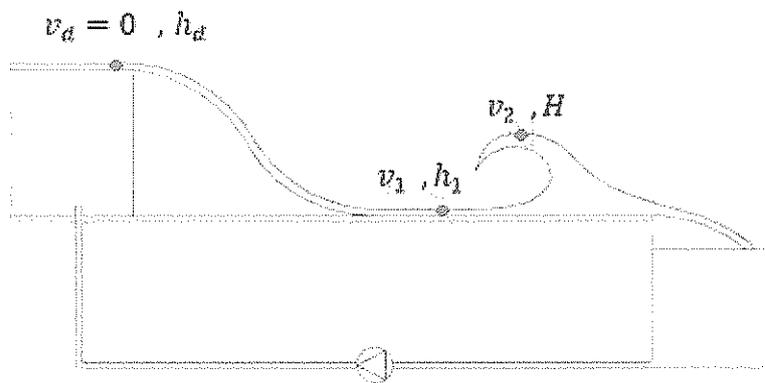


Fig.:14. Esquema básico del sistema.

El fluido forma parte de un circuito cerrado. Se lo hace desbordar desde una altura determinada sobre un canal, acelerándose debido a la acción de la gravedad. Llega a una región plana donde se ubica el obstáculo generador de la ola. Luego continúa su recorrido y desemboca en un tanque receptor para ser recirculado y elevado por una bomba.

3.1. Análisis teórico

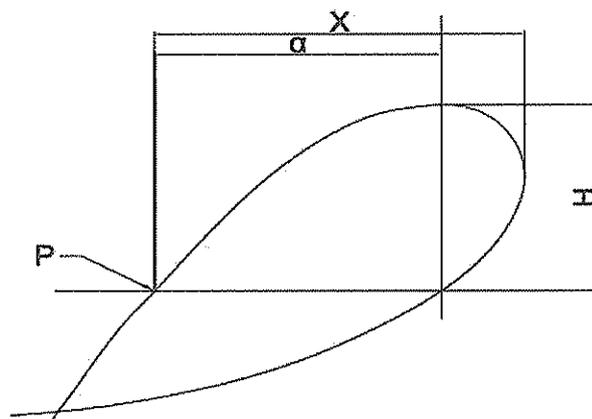


Fig.: 15. Perfil de ola en la naturaleza.

A partir de datos extraídos de la realidad se obtiene la velocidad del fluido que permite obtener el tamaño de ola buscado. La velocidad se determina a partir del tiempo que tarda en caer una partícula de fluido desde la altura "H" al punto "P". Primero, es necesario saber cuál es el tiempo necesario para que una partícula descienda desde esta altura en caída libre.

$$t = \sqrt{\frac{2.H}{g}} \quad \text{Ec.:18}$$

Para poder caracterizar la ola en cuanto a su forma, es necesario establecer un criterio. Para esto se determinaron relaciones geométricas respecto a su ancho y alto. A partir del punto de mayor altitud se traza una vertical hasta cortar la parte inferior de la ola y su longitud es "H". Del análisis de varias imágenes se puede estimar que en ese punto es el lugar donde preferentemente se ubicará el surfista. Una vez determinado este punto, se traza una línea horizontal hacia la izquierda hasta intersectar nuevamente con la ola y llegar al punto "P". Este no es el punto más bajo de la ola, pero tomando este punto como el (0,0) del área a analizar, se simplifica el método. A partir del punto "P" se traza una diagonal hasta el punto más alejado de la ola, conocido como "pared" por ser el punto donde se hace completamente vertical.

Teniendo así la ola dividida, como se ve en la Figura 15 se pueden establecer entonces las distancias "X", ancho total, y "α", distancia recorrida desde el punto más alto.

Además se establecen las relaciones geométricas H/X y α/X. El objetivo es el de tener los parámetros en función de una única variable independiente. Esto se realiza mediante la observación de un número de perfiles de olas reales, promediando las mismas a través de interpolación. Del análisis de imágenes tomadas de diversas olas, utilizando software de diseño vectorial para establecer mejor las relaciones, se pudo determinar que este "α" representa aproximadamente un 70% del valor de "X" en promedio. Las imágenes fueron tomadas de distintos puntos estratégicos del mundo que los surfistas frecuentan por su calidad de ola.

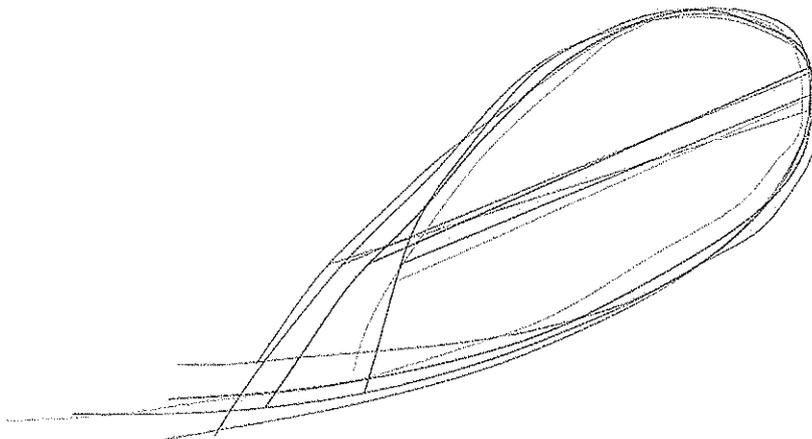


Fig.: 16. Superposición de varios perfiles de olas naturales.

Se reemplaza el tiempo obtenido en la ecuación de un "Movimiento Rectilíneo Uniforme", para la distancia " α ", y se despeja la velocidad.

Ésta queda determinada por:

$$v_2 = \frac{\alpha}{t} \quad \text{Ec.:19}$$

Como se puede ver en la Figura 14, se analizan 3 puntos específicos pertenecientes a la línea de corriente descrita por el fluido. Estos son, el punto más alto de la ola, en el cual se indica su velocidad y altura como v_2 y H respectivamente; el punto previo al ascenso en la ola, en la superficie del fluido, como v_1 y h_1 ; y el punto antes de comenzar el descenso desde el desborde, como v_d y h_d .

A partir de la velocidad v_2 calculada, y las alturas h_1 y H impuestas, se puede determinar por el principio de *Bernoulli* la velocidad del fluido en la base de la ola.

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = H + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} \quad \text{Ec.:20}$$

De la ecuación anterior se despeja la velocidad " v_1 " (teniendo en cuenta que $p_2 = p_1$):

$$v_1 = \sqrt{2g(H - h_1) + v_2^2} \quad \text{Ec.:21}$$

Para lograr esta velocidad, se debe calcular la altura desde la cual se produce el desborde " h_d ". Para esto se aplica nuevamente el principio de *Bernoulli*, en la línea de corriente. Se considera ahora, que la velocidad justo antes del desborde será nula, por ende resulta:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = h_d + \frac{v_d^2}{2g} + \frac{p_d}{\gamma} \quad \text{Ec.:22}$$

$$h_d = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad \text{Ec.:23}$$

Considerando un ancho de canal " A ", impuesto estratégicamente para asegurar un recorrido de ola adecuado para el usuario, la profundidad del fluido " h_1 " y la velocidad " v_1 " se obtiene el caudal " Q ":

$$Q = A \cdot h_1 \cdot v_1 \quad \text{Ec.:24}$$

Al realizar este procedimiento de cálculo se obtuvieron los siguientes resultados:

h_1	0,3	m
H	1,8	m

t	0,55	s
v_2	2,31	$\frac{m}{s}$
v_1	5,89	$\frac{m}{s}$
h_d	2,07	m
A	7	m
Q	12380	$\frac{lt}{s}$

Tabla. 1.

Queda claro entonces que, imponiendo los valores de h_1 , H y A , y estableciendo las relaciones trigonométricas mencionadas, es posible determinar el resto de los datos necesarios para el sistema.

Se recurrió al análisis dimensional debido a que los valores calculados son demasiado elevados. Se realizó un modelo a escala para obtener la forma del obstáculo generador, ensayando diferentes geometrías, hasta que la ola generada se asimiló lo más posible a una real en óptimas condiciones. Así se pudo tener una idea de cómo sería la instalación del prototipo.

Otro método de análisis considerado en un principio fue el de la simulación y modelado numérico. Luego de investigar, fue descartada esta opción debido a los plazos requeridos para su desarrollo, además del conocimiento requerido para su programación, que debía ser adquirido antes de comenzar.

Para escalar el prototipo se determinaron los números adimensionales de Reynolds y Froude. Como se mencionó en 2.8., el primero relaciona las fuerzas de inercia con las viscosas, y el segundo con las gravitatorias. En este caso se desea mantener constante las últimas, por lo tanto el Froude es el que se conserva durante la adimensionalización. Además debe asegurarse un valor de número de Reynolds para lograr un flujo laminar en el modelo.

Del prototipo se obtuvieron para el Reynolds y Froude los siguientes valores:

$$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{g(H-h_1)}} = 1,537 \quad Ec.:25$$

$$Re = \frac{\rho v_1 x}{\mu} = 1,28 \cdot 10^8 \quad Ec.:26$$

Si bien este valor de Reynolds corresponde a un régimen turbulento, esto ocurre por debajo de una profundidad determinada por el espesor de la capa límite. Por encima de esta se conserva el régimen laminar, como fue explicado en 2.7.

El espesor de la capa límite a una distancia de 33 m, resulta igual a la profundidad utilizada en el prototipo. Por lo tanto, colocar el obstáculo a una distancia menor, garantiza la condición de régimen laminar en la superficie.

Espesor de capa límite turbulenta:

$$\delta(x) = \frac{0,38 x}{\sqrt[5]{Re}} = \frac{0,38 \cdot 33m}{\sqrt[5]{1,28 \cdot 10^8}} \cong 0,3m \quad Ec.:27$$

Debe aclararse que el fluido parte del reposo y se acelera de forma no constante en su recorrido. Es por esto que se decidió realizar los cálculos para la velocidad máxima, considerada constante, como peor condición de flujo posible. En la práctica, la distancia a la que el espesor de capa límite turbulenta alcanza la superficie es mayor a la calculada.

Se determinaron las dimensiones del modelo a escala, y se obtuvieron las condiciones de trabajo para las cuales se mantuviera constante el número de Froude. También se determinó la distancia máxima a la cual se puede ubicar el obstáculo, cumpliéndose las mismas condiciones que en el prototipo.

Se calcularon los valores para el modelo a escala a partir del caudal disponible de 150 lts/min, el cual se menciona en 3.2.1.:

h_1	0,0123	m
H	0,0738	m
t	0,112	s
v_2	0,468	$\frac{m}{s}$
v_1	1,194	$\frac{m}{s}$
h_d	0,085	m
A	0,170	m
Q	149,76	$\frac{lts}{min}$

Tabla: 2.

En estas condiciones, se calculó el número de Reynolds para la distancia máxima que asegure el régimen laminar en la superficie, iterando el valor de x hasta obtener los resultados deseados:

$$Re = \frac{\rho v_1 x}{\mu} = 3,15 \cdot 10^5 \quad Ec.:28$$

$$\delta(x) = \frac{0,38 x}{\sqrt[5]{Re}} = \frac{0,38 \cdot 0,41m}{\sqrt[5]{3,15 \cdot 10^5}} \cong 0,0123m \quad \text{Ec.:29}$$

3.2. Análisis práctico

3.2.1. Determinación de caudal disponible en la bomba

Se adquirió una bomba de circulación de piletas, se le extrajo el filtro para disminuir la pérdida de carga, y se procedió a determinar el caudal real disponible.

Para esto se cronometró el tiempo de llenado de un recipiente de 1000 lts., en intervalos de 200 lts.

Luego de 10 mediciones, se determinó que el tiempo medio empleado por la bomba en transportar 200 lts., era de 1:20 min.

Una vez determinado el caudal disponible de la bomba, 150 lts/min, se iteró en la planilla de cálculo, hasta obtener las dimensiones del modelo que cumplieran con este caudal.

3.2.2. Construcción del modelo

Una vez determinadas las dimensiones del modelo a escala, así como todas las magnitudes que intervienen, se procedió a su construcción. El fin de la realización del modelo es el de poder determinar el tamaño y forma del obstáculo que el fluido deberá atravesar para formar una ola con las características adecuadas para considerarla surfeable.

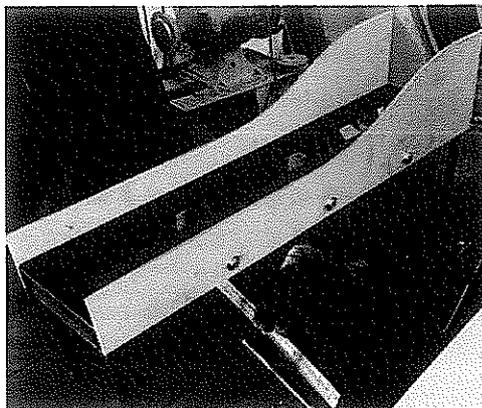


Fig.: 17. Construcción del modelo a escala.

El modelo se montó encima de una superficie de madera, elevado sobre una estructura metálica fabricada con perfiles L Cuenta con dos recipientes de 35 litros cada uno, unidos entre sí por los cuales se hace desbordar el agua. El canal se construyó sobre dos láminas de aluminio compuesto "Alucobond" a ambos lados, que determinan la pendiente del canal.

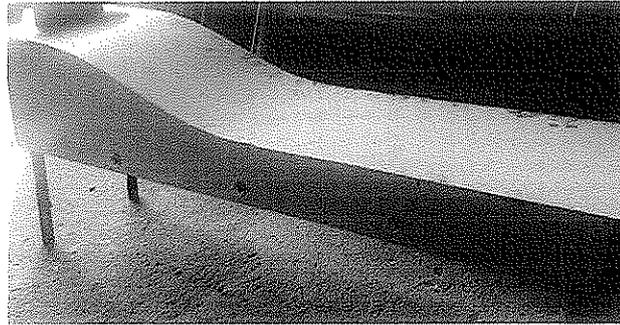


Fig.: 18. Construcción del modelo a escala.

Encima de ellos, se colocó una chapa de acero galvanizado para copiar la cuerda de los perfiles de Alucobond recortados. Se emplearon paredes de vidrio en los laterales de manera de contener el fluido circulante y poder tener una buena visual. Además se agregó una graduación milimétrica en uno de los laterales para poder medir aproximadamente en qué valores, tanto de profundidad como de altura de ola, se estaba trabajando.

El modelo cuenta con dos recipientes de 35 litros cada uno, unidos entre sí por los cuales se hace desbordar agua utilizando una bomba que impulsa el fluido.

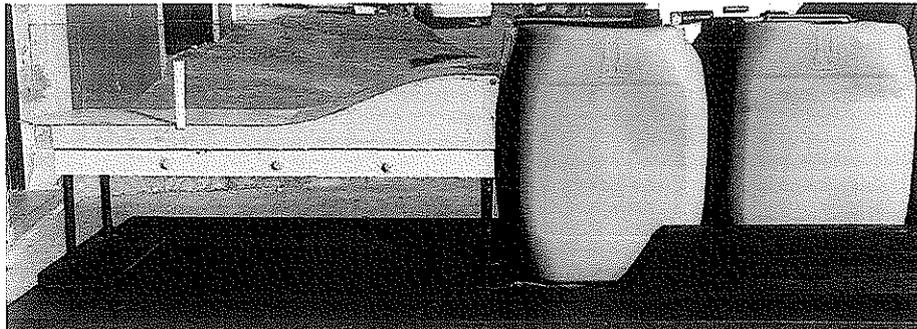


Fig.:19. Modelo a escala terminado.

Una vez ensamblados los componentes constructivos, se elevó el modelo a una altura aproximada de 1,2 metros. A la salida del canal se colocó un recipiente de 200 litros, en el que el agua se deposita, para luego ser aspirada por la bomba.

La bomba cierra el circuito, impulsando el fluido hacia los dos recipientes mencionados inicialmente.

3.2.3. Diseño del obstáculo

3.2.3.1. Ensayos

Posteriormente a la fabricación de la estructura del modelo, se procedió al diseño del obstáculo. Para esto se ensayaron distintas geometrías, realizadas con recortes plásticos. El procedimiento consistió en probar los recortes y modificarlos hasta conseguir aquella que genere una ola de características óptimas. De la experiencia de observar perfiles de ola generados en el mar, se pudo caracterizar cualitativamente los generados en el modelo, para poder calificarlos y aprobarlos o rechazarlos. Los obstáculos ensayados fueron moldeados, recortados, aumentando o disminuyendo su radio de curvatura, y se los colocó en el canal sosteniéndolos sin fijar hasta tener la geometría final.

Obstáculo 1:

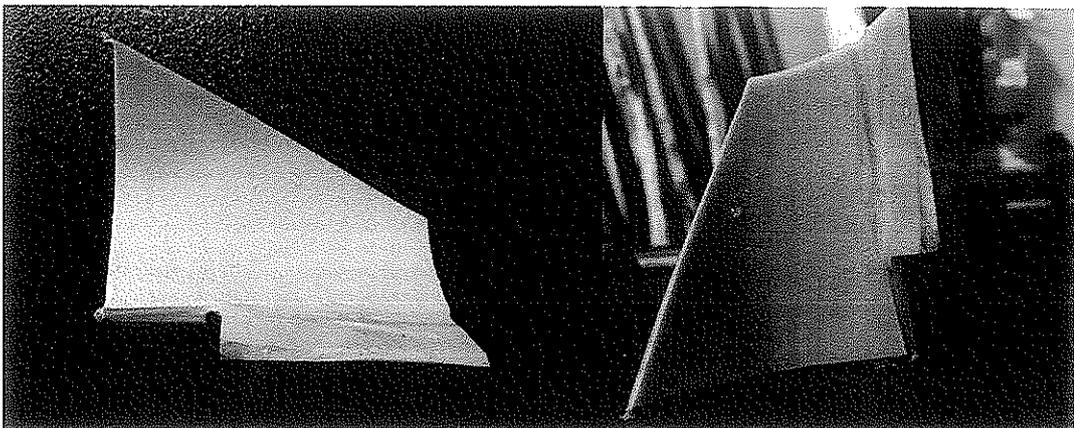


Fig.:20. Obstáculo 1.

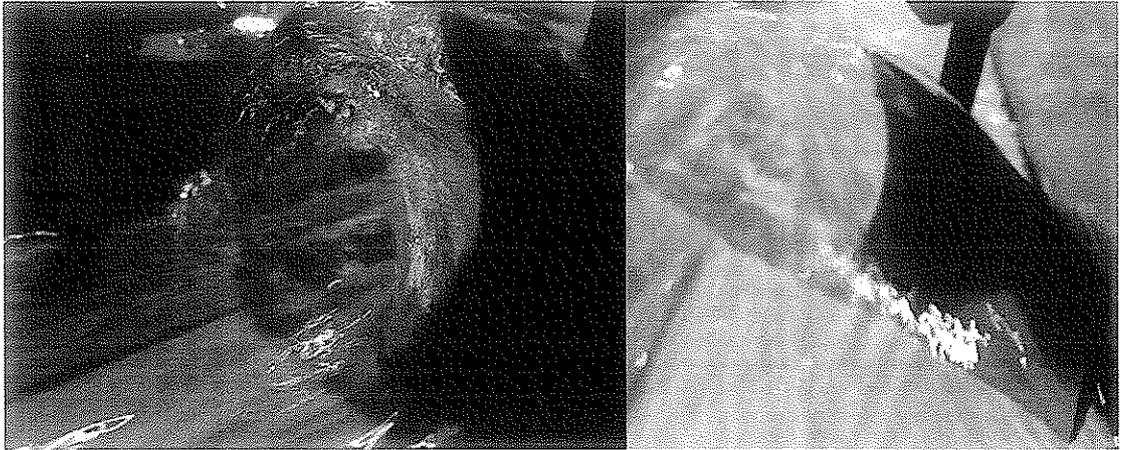


Fig.:21. Obstáculo 1.

Obstáculo 2:

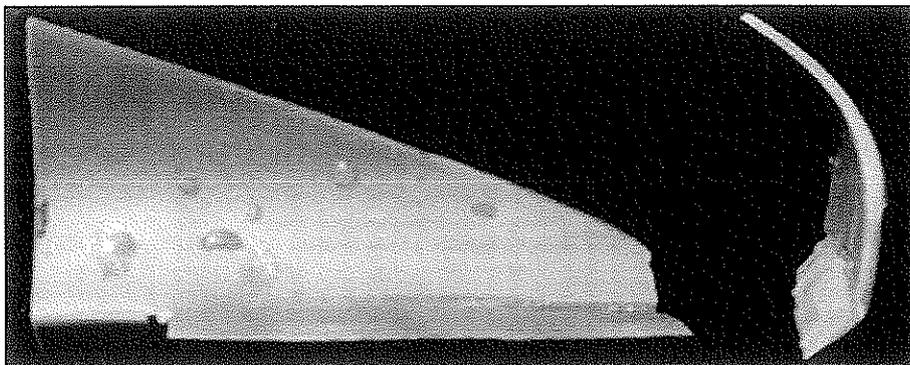


Fig.:22. Obstáculo 2.

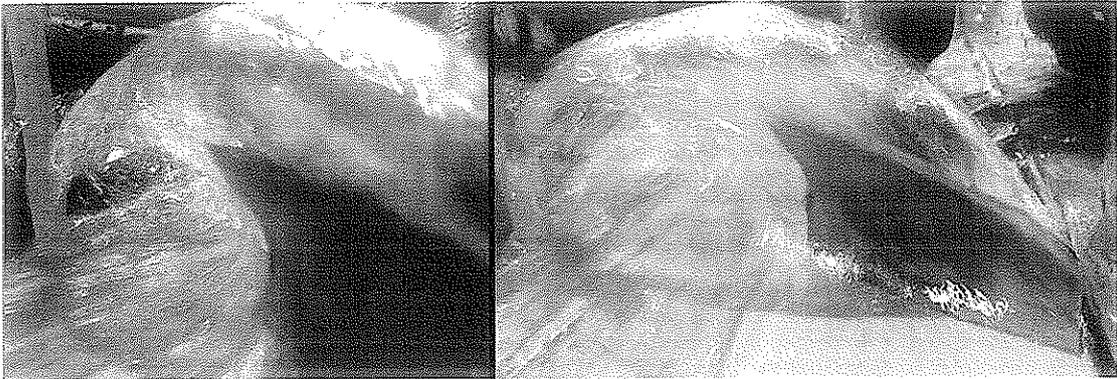


Fig.:23. Obstáculo 2.

Obstáculo 3:

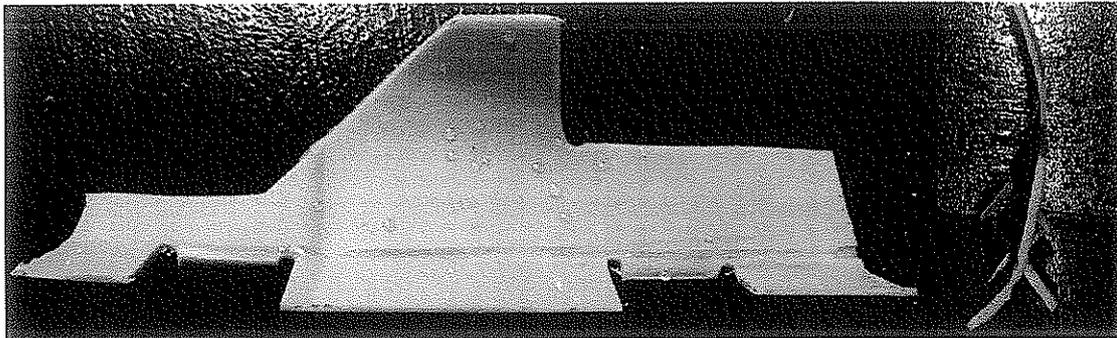


Fig.:24. Obstáculo 3.

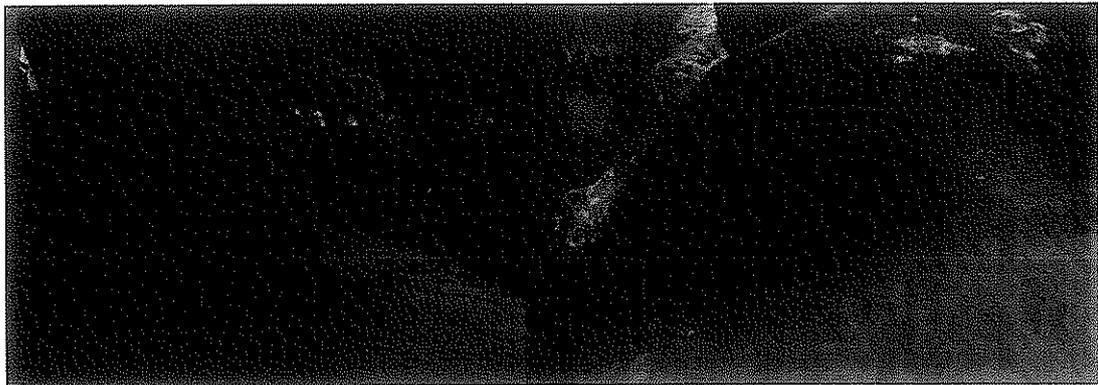


Fig.:25. Obstáculo 3.

3.2.3.2. Problemas detectados

Se observó que la geometría y las dimensiones del obstáculo definían la forma de la ola, tanto en tamaño como en "calidad". Para tamaños de obstáculo excesivamente anchos se presentaba un fenómeno de resalto hidráulico (definido en 1.10.) que atentaba contra formación de la ola.

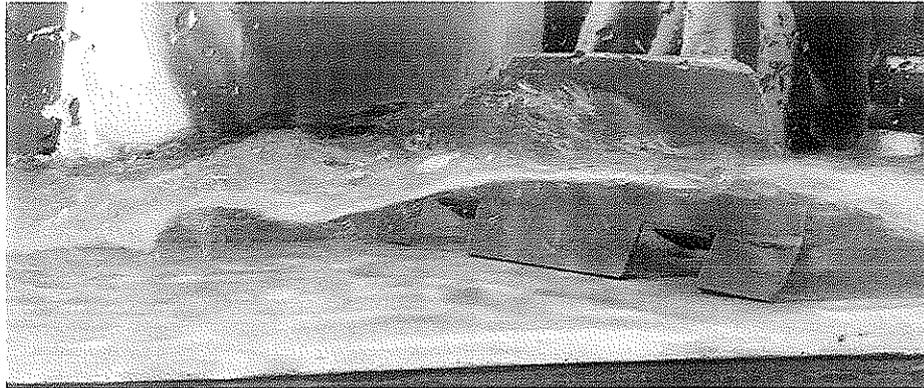


Fig.:26. Resalto hidráulico.



Fig.: 27. Resalto hidráulico

Con tamaños angostos se notaba que la misma corriente de agua arrastraba la rompiente de la ola generando el tubo hacia atrás, fenómeno que no era acorde a las características buscadas.



Fig.: 28. Tubo generado por obstáculo angosto

Durante los primeros ensayos, se pudo observar que el régimen del fluido que circulaba no era completamente laminar y condicionaba la generación de la ola. Esto se debía a que el agua ingresaba con elevada velocidad al bidón trasero, y no lograba estabilizarse. Se podían observar turbulencias en la entrada del canal, además de la formación de vórtices. El inconveniente se solucionó anexando una malla metálica en la ventana que une los dos recipientes, y un deflector de chapa colocado a 10 cm del fondo, de manera de romper los vórtices y evitar las turbulencias.

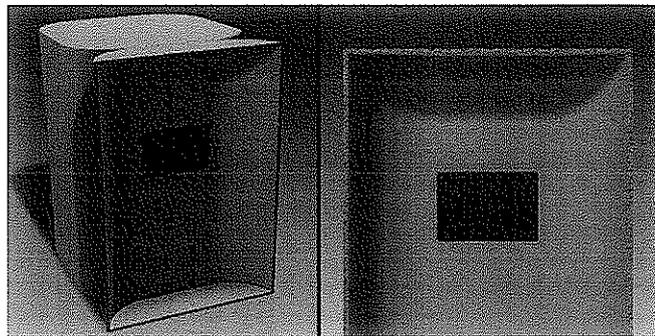


Fig.: 29. Unión entre tanques con malla metálica.

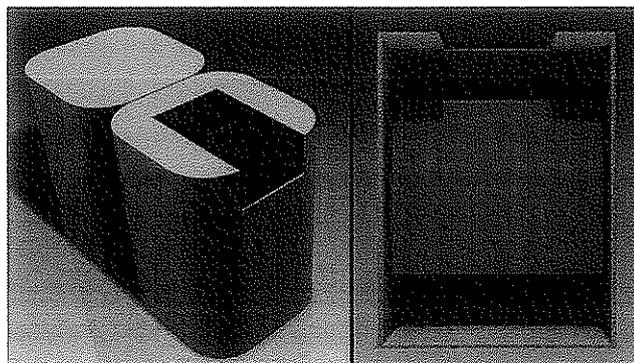


Fig.: 30. Placa deflectora.

Como se puede observar en la parte inferior de la Figura 27, se produce un fenómeno de adhesión del fluido con el vidrio de las paredes del modelo. Las moléculas de agua son atraídas con mayor fuerza al vidrio que entre sí mismas, debido a que éste posee moléculas con mayor polaridad. Esto produce también la presencia de un ángulo de mojado $\theta < 90^\circ$, condición para la cual se dice que el líquido “moja” al sólido, generando meniscos cóncavos. Una vez que esta tensión se rompe, la molécula se desprende, produciendo una leve turbulencia en la superficie.

3.2.3.3. *Diseño final del obstáculo*

A la hora de evaluar la posición adecuada dentro del canal, y luego de una gran cantidad de pruebas, se decidió que al colocar el obstáculo a 45° con respecto a la dirección del movimiento del fluido, se generaba una calidad de ola superior. Esto comprueba lo expresado con respecto al ángulo de rotura, en 2.1.1.2.

Una vez obtenida la geometría deseada, se evaluó la forma de fabricación y se optó por la impresión 3D. Se realizó el diseño en software de diseño 3D y se obtuvo la pieza. Ésta fue fijada a la chapa mediante un bulón a través de un agujero pasante realizado en la pieza durante el modelado 3D, como se ve en la Figura 32.

Para la impresión se utilizó ABS (Acrilotrilo Butadieno Estireno) como material de fabricación, principalmente por ser no biodegradable, además de poder mecanizarse y tener buena resistencia y flexibilidad. Esto es de gran importancia ya que el obstáculo se encuentra inmerso en agua durante el funcionamiento del sistema.

El proceso realizado fue el siguiente:

- Conversión del modelo realizado en software de diseño 3D al formato .STL.
- Utilización de Software para convertir el modelo a un lenguaje que pudiera ser procesado por la impresora.
- Definición de parámetros de impresión adecuados.
- Prueba de impresión.
- Correcciones en los parámetros.
- Impresión definitiva del modelo.

El software utilizado para la conversión del modelo fue el programa de código abierto “Replicator G”.

A la hora de elegir los parámetros de impresión se tomaron en cuenta características de acabado y forma que debía tener el obstáculo.

Se definió un paso adecuado que logre un balance entre buena calidad de terminación y tiempo de impresión. Considerando que las tolerancias dimensionales no son finas, y teniendo en cuenta

que la recomendación del fabricante de la impresora es no superar el 80% del diámetro de la boquilla (0.35 mm), se eligió un paso de 0.2 mm.

Otro aspecto importante a tener en cuenta fue la temperatura de extrusión y de la mesa de impresión. En la prueba de impresión realizada, se evidenció la necesidad de su control. Debido a la diferencia entre su temperatura y la pieza impresa, y por características dimensionales y morfológicas del modelo, se producía la deformación y desprendimiento de las puntas en la superficie inferior. Esto se corrigió aumentando la temperatura de la mesa. La temperatura de extrusión del material fue de 133°C mientras que, luego de correcciones, la temperatura de la mesa se aumentó de 90°C a 95°C .

Debido a que la pieza no debe soportar esfuerzos significativos, se decidió realizar la impresión de un modelo semihueco, con una estructura de tubos hexagonales en su interior, como se puede observar en la Figura 31. Esto permitió ahorrar tiempo y material.

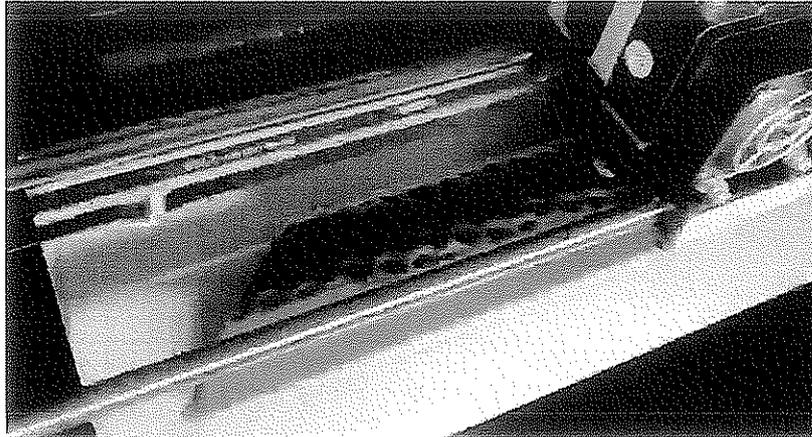


Fig.:31. Estructura interior del obstáculo impreso en 3D.

Solo bastó con una impresión de prueba para obtener una pieza de las características esperadas en la segunda impresión.

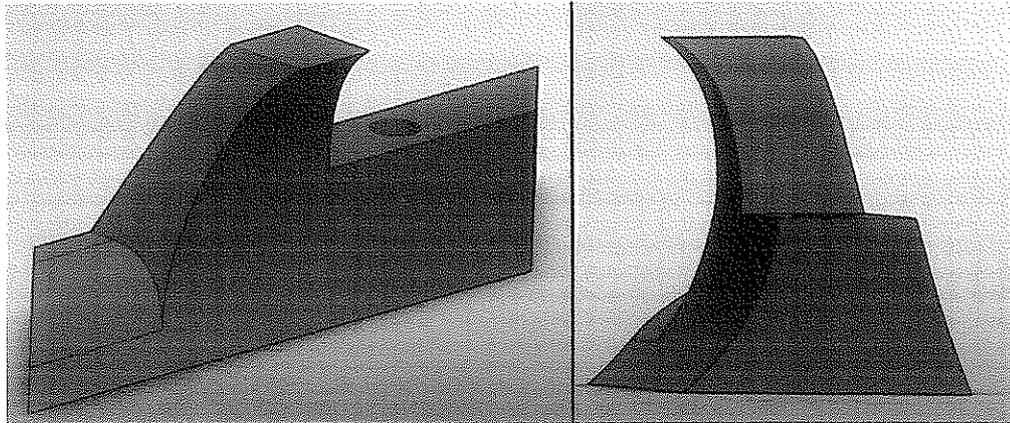


Fig.: 32. Vistas del modelado 3D del obstáculo.

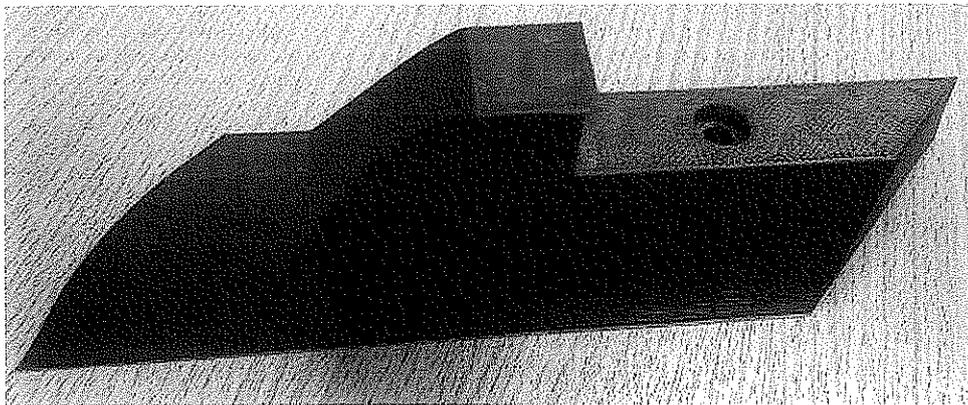


Fig.: 33. Obstáculo impreso.

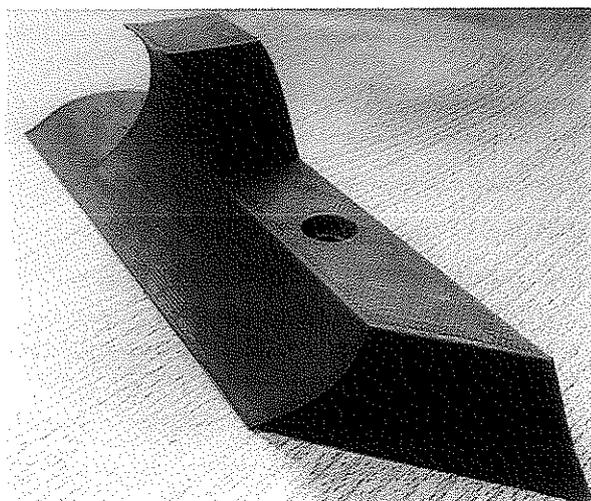


Fig.: 34. Obstáculo impreso.

3.3. Pruebas y mediciones

Una vez obtenido el modelo a escala, se lo sometió a prueba. El funcionamiento del sistema fue el esperado, obteniéndose una ola de características observables en la Figura 35.



Fig.: 35. Modelo en funcionamiento.

Posteriormente se definieron parámetros a medir y a comparar con los obtenidos en forma empírica:

- Profundidad: La medición de ésta fue realizada en la zona plana del canal, luego de que el fluido finaliza su descenso. El valor entregado por la medición fue de 11 mm.

- Altura de ola: Se obtuvo un valor de altura de ola desde la superficie del canal, hasta la máxima altura alcanzada. En este caso el valor fue de 71 mm.

- Longitud del tubo: Para obtener este valor, se midió la distancia desde el comienzo del tubo hasta su cierre, de la forma indicada en la Figura 36. El largo medido fue de 70 mm.

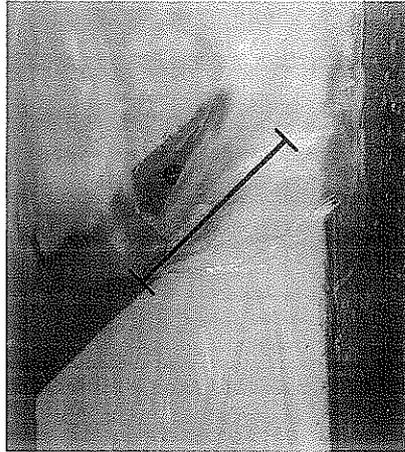


Fig.: 36. Longitud del tubo.

3.3.1. Conclusiones

A la hora de contrastar los resultados obtenidos mediante el cálculo, y aquellos obtenidos mediante la experimentación, se espera encontrar discrepancias. Esto se debe a que en los cálculos matemáticos, en la mayoría de los casos se desprecia el efecto de distintos factores, como el rozamiento con el aire, con las superficies, etc.

En el proyecto, además de estas consideraciones, los cálculos se realizan suponiendo al agua como un fluido incompresible, en flujo permanente y sin fricción.

En la realidad, el fluido de trabajo tiene un comportamiento mucho más aleatorio, y por lo tanto, si bien las predicciones y conclusiones alcanzadas resultan lo suficientemente precisas, presentan diferencias con las obtenidas mediante el cálculo.

En la siguiente tabla puede evidenciar las diferencias entre los valores obtenidos empírica y experimentalmente. Los valores calculados fueron presentados anteriormente en la Tabla 2, mientras que los experimentales fueron medidos sobre el modelo utilizando un calibre:

	Calculados (mm)	Experimentales (mm)
Profundidad	12.3	11
Altura de ola	73.8	71
Largo del Tubo	-	70

Tabla: 3.

Como puede observarse en la Tabla 3, los valores obtenidos tanto empírica como experimentalmente son muy similares.

Además, utilizando el método presentado en 3.1., se pueden comparar las geometrías de la ola generada experimentalmente y las existentes en el mar.

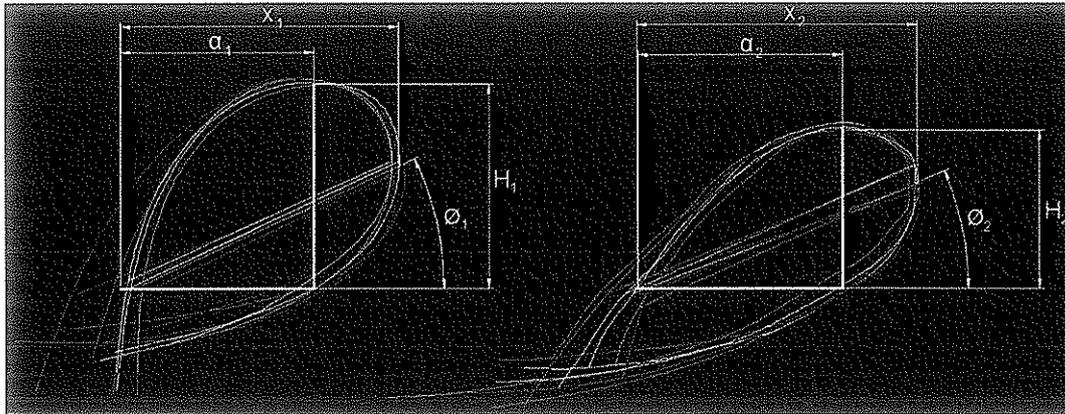


Fig.: 37. Comparación de perfiles: 1- Ola modelada. 2- Ola real.

En la Figura 37 se ve la superposición de varios perfiles de olas, los de la izquierda corresponden al modelo a escala realizado, mientras que los de la derecha son los tomados de 6 olas de la naturaleza de distintos lugares del mundo que fueron consideradas como modelo a recrear. Cabe aclarar que la imprecisión del punto de observación al tomar las fotografías de las olas hace que el ángulo de captura modifique sustancialmente las proporciones de la ola, por lo que se tomaron estas muestras y se realizó un promedio. Para analizar el modelo, se consideraron 7 imágenes, variando el punto de captura adrede para lograr el mismo efecto y poder tener rangos de valores en lugar de un único set.

A simple vista, se puede observar gráficamente las diferencias de forma. La obtenida por el modelo a escala parece estar más achatada y ser más alta. Estableciendo las relaciones mencionadas H/X , α/X y agregando el ángulo ϕ para notar la inclinación que presenta la ola, se obtuvieron los siguientes resultados:

Relación	Modelo	Realidad
H/X	$0,769 \pm 0,058$	$0,573 \pm 0,049$
α/X	$0,682 \pm 0,042$	$0,737 \pm 0,023$
ϕ	$24,14 \pm 1,57^\circ$	$22,17 \pm 2,32$

Tabla: 4.

Como se pudo observar gráficamente, la relación H/X del modelo presenta la mayor diferencia respecto de las olas del mar. No es posible hacer coincidir los valores aun yendo hacia los extremos de los intervalos. Esto indica indudablemente que la ola tendrá una forma más estrecha en extensión, pero conservando la altura máxima. Aun así, la relación es un 35% mayor en el modelo que en la realidad, por lo que no será una variación significativa y que pueda afectar la similitud en cuanto a la experiencia del surfista comparándola con una ola real.

La relación α/X hace mención de la proximidad del surfista con la espuma que se forma cuando la masa de agua impacta sobre la superficie. Esta puede afectar la experiencia del usuario

tendiendo a generar turbulencia en el fluido y dificultando su continuidad encima de la tabla. El surfista se encontrará aproximadamente en 1/3 de la extensión horizontal de la ola hacia la pared de la misma. En esa zona, la superficie se mantiene laminar brindando el efecto de "rampa" característico de la ola. En este caso, si bien el valor promedio difiere en un 7% por debajo de la realidad, las desviaciones de estos valores hacen que los semi-intervalos se solapen y exista una zona de similitud absoluta.

El ángulo de inclinación θ será determinante para asegurar la continuidad del surfista en la ola, puesto que la aprovechará realizando maniobras para poder aumentar su velocidad y poder adelantarse al quiebre de la ola. En este caso, la variación del modelo respecto a la naturaleza es de un 9%. Aunque este número no es representativo ya que indica una variación en la inclinación de 2° y con una desviación tan grande que permite asumir como aceptable este valor y suponer que funcionará adecuadamente.

3.4. Prototipo

3.4.1. Factores de escala

Como fue expresado en 3.1., conservándose el valor del número adimensional de Froude, y respetando la condición de espesor de capa límite turbulenta, es posible usar factores de escala para el diseño del sistema en tamaño real.

Se decidió que un ancho adecuado para el canal es de 7 m. Teniendo en cuenta que el ancho del mismo en el modelo es de 0,17 m, el factor de escala entre el modelo y el sistema real es 41,17.

La altura del obstáculo y de la ola fue escalada con el mismo factor. Siendo 1,8 m la altura deseada de ola y 0,0738 m la del modelo, el valor del factor es 24,39.

El mismo procedimiento se realizó para el caso de la velocidad. La obtenida en el modelo fue de 1,194 m/s, mientras que la determinada para el sistema real, 5,89 m/s. Teniendo en cuenta el ancho del canal y la profundidad de 0,3 m deseada, se determinó un caudal de 12380 lts/s. Considerando un caudal de modelo de 149,76 lts/s, el factor es de 4959,9.

3.4.2. Diseño del prototipo

- 1- Pileta de desborde: cumple la función de acumular el agua para que una vez alcanzado el nivel de desborde, abastezca al sistema.

Fue dimensionada de modo que la velocidad de ascenso del agua durante el llenado respete una relación de 1/25 con la que lleva el fluido dentro de las cañerías. Este aspecto es muy

importante para lograr que el fluido alcance la zona de desborde a una velocidad lo suficientemente baja como para ser considerada nula.

- 2- Rampa: responsable de acelerar el fluido de manera que alcance la velocidad requerida antes de incidir sobre el obstáculo. Se ubica anexa a la pileta de desborde. Posee una altura máxima de dos metros sobre el nivel del suelo y un ancho de siete metros. En la superficie del canal se colocan placas de "Polyfan" con el objetivo de amortiguar los golpes ocasionados por la caída de los usuarios.
- 3- Obstáculo: tiene como función darle forma de ola al fluido. La mayor parte del agua incide sobre éste y luego sigue el recorrido. Se coloca a continuación de la rampa, en la parte plana del canal.
- 4- Pileta recibidora: encargada de recibir la totalidad de agua que atraviesa el canal, contenerla y abastecer las cañerías que alimentan el circuito. Se ubica en la parte inferior del canal. Parte del volumen de agua contenido por la misma, es dirigido a través de las cañerías hacia la pileta de desborde.
- 5- Enrejado de seguridad: se encuentra en la pileta recibidora. Su principal función es la protección del usuario contra el ingreso en una zona de alta velocidad de succión. Su diseño permite al surfista caminar sobre esta, para facilitar su salida. Se coloca de manera de abarcar la totalidad de la superficie, a una profundidad de 0,75 metros. El mismo se realiza en material desplegado, y sobre este se colocan rejillas de polipropileno y carbonato de calcio, para proteger al usuario del contacto directo con el material metálico, debido a que éste es filoso y puede ocasionar lesiones en caso de caídas.

Características del material, según proveedor:

- Rigidez y resistencia que permiten hasta el paso de vehículos por encima. Indicado tanto para exterior como para interior, resistente a los rayos ultra violeta, temperaturas y condiciones climatológicas extremas tanto de frío como de calor, ácidos, disolventes, aceites.
- La superficie cuenta con un patrón de nido de abeja mixto liso/rejado que se adapta a todas las necesidades.
- Gracias a tener toda su superficie no porosa es inmune a hongos y bacterias. Superficie antideslizante.
- De fácil manejo e instalación, sus aplicaciones son múltiples.
- Fácil y rápido montaje. No requiere de ninguna herramienta.

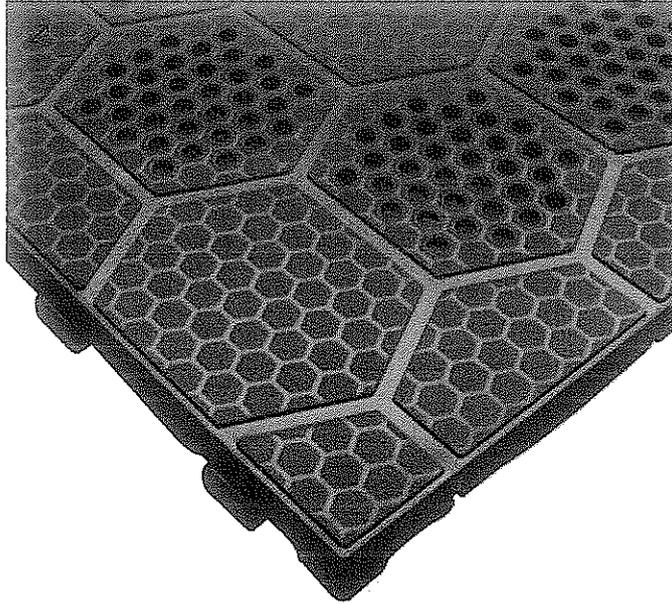


Fig.: 38. Rejillas de polipropileno y carbonato de calcio.

- 6- Cañerías: el sistema cuenta con tres conductos encargados de transportar el agua desde la pileta recibidora hacia la de desborde.
- 7- Conjunto de bombas: cumplen la función de hacer circular el agua al caudal requerido para generar la ola deseada, desde una pileta hacia la otra a través de las cañerías. A un caudal máximo de 12380 lts/s.

Estos componentes se pueden observar las Figuras 39, 40 y 41:

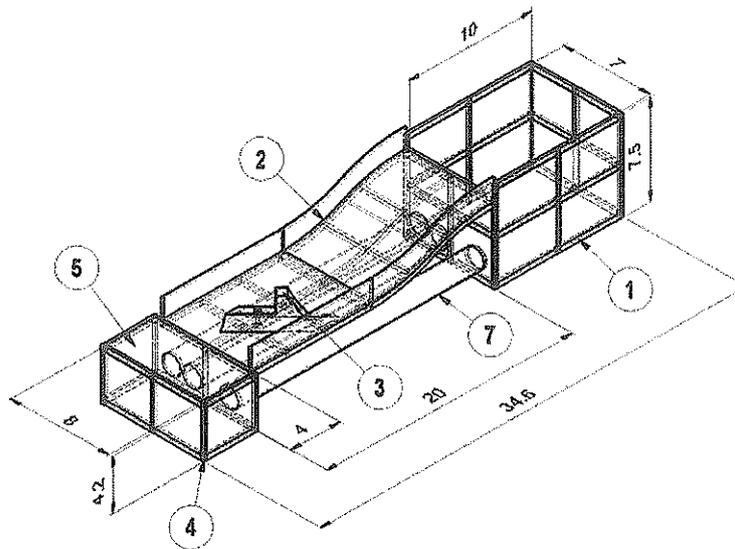


Fig.: 39. Isometría con cotas generales – Norma DIN

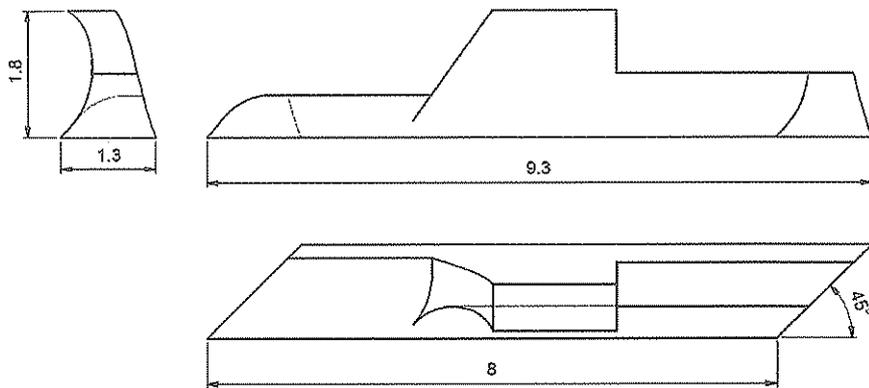


Fig.: 40. Vistas y cotas del obstáculo – Norma DIN

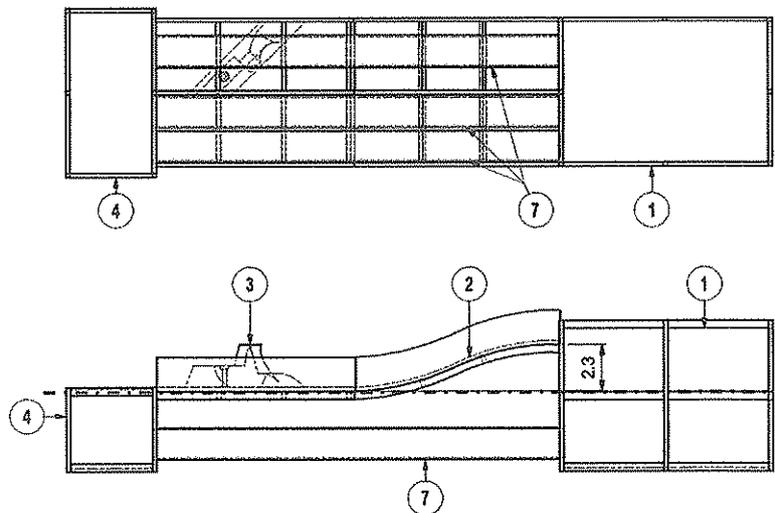


Fig.: 41. Planos del prototipo. (La línea punteada en vista lateral corresponde al nivel del suelo) – Norma DIN

La instalación cuenta con una sala de máquinas, ambiente destinado a realizar tareas de mantenimiento o de reparación. Posee un interruptor de puesta en marcha o reanudación del sistema, provee el acceso al tablero que maneja el sistema de control, y también cuenta con una parada de emergencia, que se encuentra comunicada directamente al circuito de bombas, de manera de poder detener el funcionamiento ante una situación de riesgo. Esta sala se ubica debajo de la rampa.

El sistema de control está compuesto por un conjunto de dispositivos encargados de regular el comportamiento del sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y mantener los parámetros requeridos de funcionamiento.

Para el correcto funcionamiento de la instalación se debe mantener un nivel y estado del agua adecuado, para así asegurar el óptimo desempeño de los equipos. El sistema de control es responsable además de regular el estado del agua en cuanto al pH, sólidos disueltos en el fluido, contaminantes, factores biológicos, entre otros. Por otro lado, debe controlar la temperatura de los equipos.

El pH es una unidad que indica el grado de acidez o alcalinidad del agua. Cuanto menor es éste, más ácida es el agua. Del grado de acidez dependerá el desarrollo de microorganismos. En las piletas es fundamental controlar el pH, ya que su valor influye sobre la efectividad del cloro, cuya función principal es la de eliminar los microorganismos más resistentes (bacterias y hongos), contribuyendo de esta forma a que el agua se mantenga cristalina y libre de suciedad. El pH ideal del agua debe estar entre 7,2 y 7,6.

3.5. Obra civil

Para el diseño del sistema en tamaño real se pidió asesoramiento a un arquitecto. De esta manera se determinaron las características estructurales que debían ser consideradas, la forma de construcción más adecuada y los materiales necesarios.

Teniendo en cuenta la considerable profundidad de las piletas, se optó por construirlas con paredes y pisos de hormigón armado de 20 cm de espesor, con columnas de 20x20 cm (cada una de ellas montada sobre una base de hormigón de 40x40 cm), vigas de 40x20 cm en el caso de la pileta recibidora, y encadenados de las mismas medidas en el caso de la de desborde, dispuestos como muestra la Figura 42.

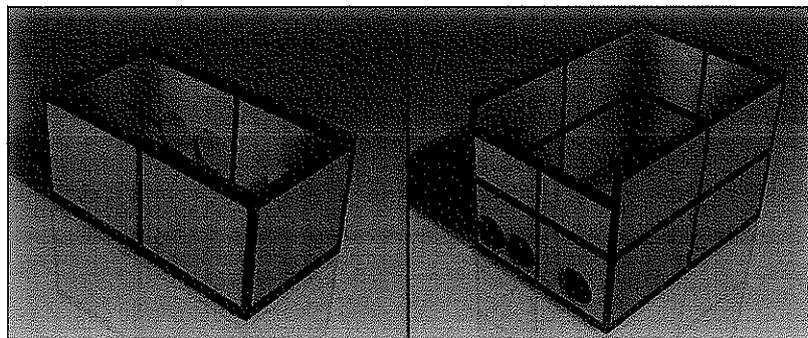


Fig.:42. Diseño de Piletas del prototipo

Para la construcción de la rampa en la cual el fluido se acelera y luego atraviesa el obstáculo dispuesto para la formación de la ola, se decidió utilizar nuevamente hormigón armado, con un espesor de 20 cm. Esta superficie debe ser soportada por vigas longitudinales y transversales, como las observadas en la Figura 43. Las paredes a los costados de esta parte del sistema se realizan en dos materiales: en la sección plana se utiliza acrílico, mientras que en la sección de descenso de fluido, se utiliza hormigón armado. En uno de los laterales de acrílico se coloca una puerta del mismo material, para permitir el acceso del usuario.

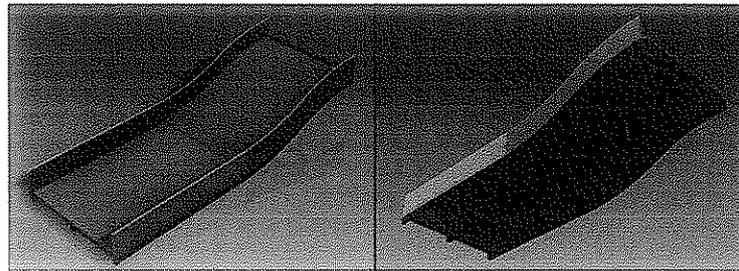


Fig.:43. Diseño de la rampa.

Las cañerías que transportan el fluido desde la pileta recibidora hasta la de desborde se realizan de hormigón y fueron diseñadas con un diámetro interior de 140 cm, y un espesor de 10 cm. Estas quedan enterradas debajo del terreno y en su interior se colocan las tres bombas impulsoras.

En caso de ser necesaria la extracción de las bombas con motivo de su mantenimiento, podrá ser realizado desde el interior de la pileta de desborde, la cual cuenta con las dimensiones adecuadas para realizar la tarea.

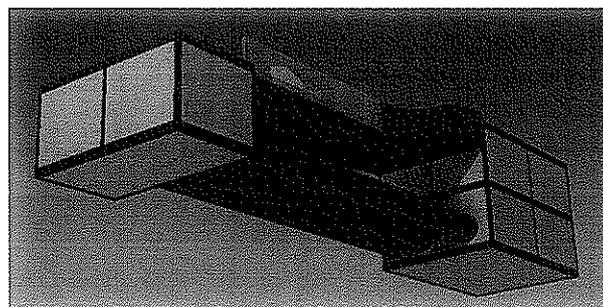


Fig.:44. Disposición de cañerías.

Por motivos de seguridad, sobre la pileta recibidora se consideró de gran importancia la colocación de un enrejado, cuyo objetivo es impedir la caída de un usuario en zonas de alta velocidad de fluido.

Una vez definidas las características estructurales y constructivas, se dibujó el prototipo en tamaño real mediante el uso de Software adecuado CAD de modelado de información de

construcción, que permite obtener el volumen de hormigón armado necesario, para luego obtener el costo total del mismo.

Se generaron las siguientes tablas, con los componentes, cantidades y volúmenes de hormigón armado que involucran:

PILETA DE DESBORDE		HORMIGON m ³	
COMPONENTE	CANTIDAD	VOLUMEN	SUBTOTAL
Columnas largas	7	0.3	2.1
Columnas cortas	1	0.252	0.252
Encadenados	3	2.656	7.968
Placas grandes	8	3.087	24.696
Placas chicas	8	2.142	17.136
Fondo	1	14	14
		TOTAL	66.152

Tabla: 5.

PILETA RECIBIDORA		HORMIGON m ³	
COMPONENTE	CANTIDAD	VOLUMEN	SUBTOTAL
Columnas	6	0.168	1.008
Vigas cortas	8	0.312	2.496
Vigas largas	4	0.32	1.28
Placas grandes	2	2.72	5.44
Placas chicas	4	2.652	10.608
Fondo	1	6.4	6.4
		TOTAL	27.232

Tabla: 6.

CAÑERIAS		HORMIGON m ³	
COMPONENTE	CANTIDAD	VOLUMEN	TOTAL
Caño	3	9.519	28.557

Tabla: 7

RAMPA		HORMIGON m3	
COMPONENTE	CANTIDAD	VOLUMEN	SUBTOTAL
Superficie	1	28	28
Vigas largas	3	1.588	4.764
Vigas transversales	10	0.272	2.72
Costados	2	3.388	6.776
		TOTAL	42.26

Tabla: 8.

V. TOTAL HORMIGON	164.201 m ³
PRECIO m ³	\$ 3150
COSTO HORMIGON	\$ 517233.15

Tabla: 9.

3.5.1. Verificación de pared de acrílico

Para verificar la resistencia de las paredes de acrílico del canal, se realizó el modelo en Software de modelado 3D, y se lo sometió a un análisis tensional. Se seleccionó acrílico de 2 cm de espesor y 45 MPa de tensión de fluencia. La placa tiene 10 x 0.3 m.

Se determinaron las condiciones de borde que simulen la realidad en forma más precisa posible. Se inhibió el movimiento en los tres ejes coordenados de los laterales y el borde inferior de la placa, mientras que la presión fue aplicada en forma no uniformemente distribuida, ya que la presión aumenta a medida que aumenta la profundidad (con un máximo en la parte inferior de 2940 Pa).

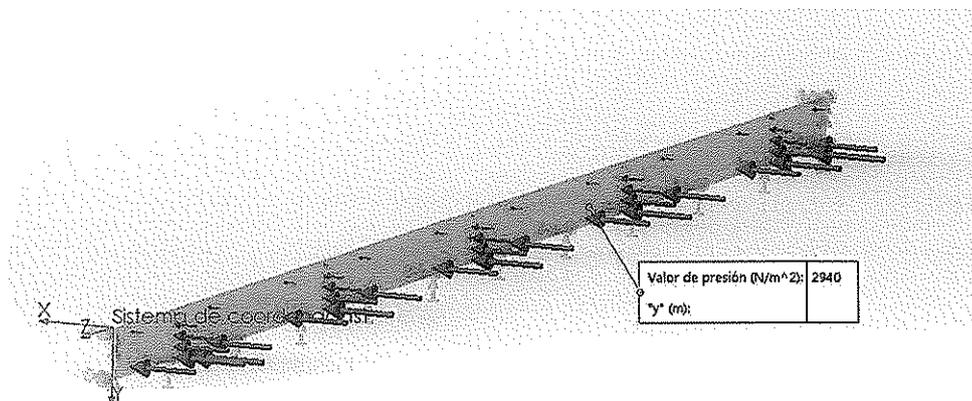


Fig.:45. Condiciones de borde.

Se determinaron las tensiones máximas y desplazamientos máximos:

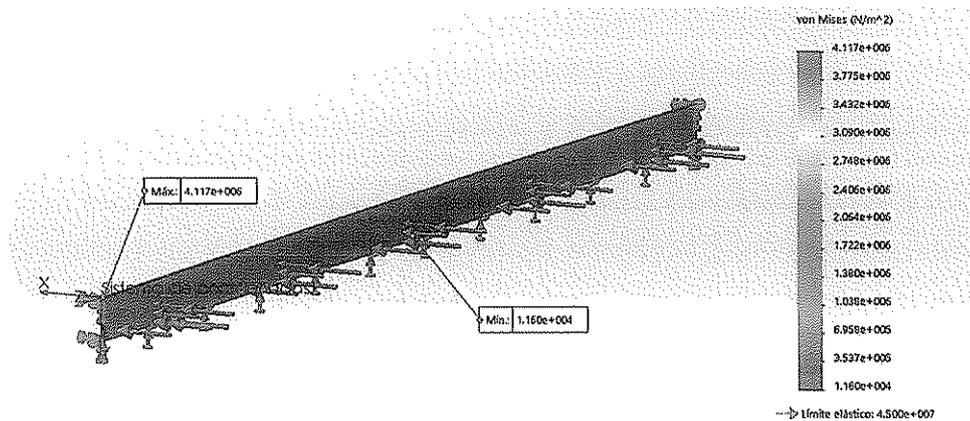


Fig.:46. Tensiones máximas.

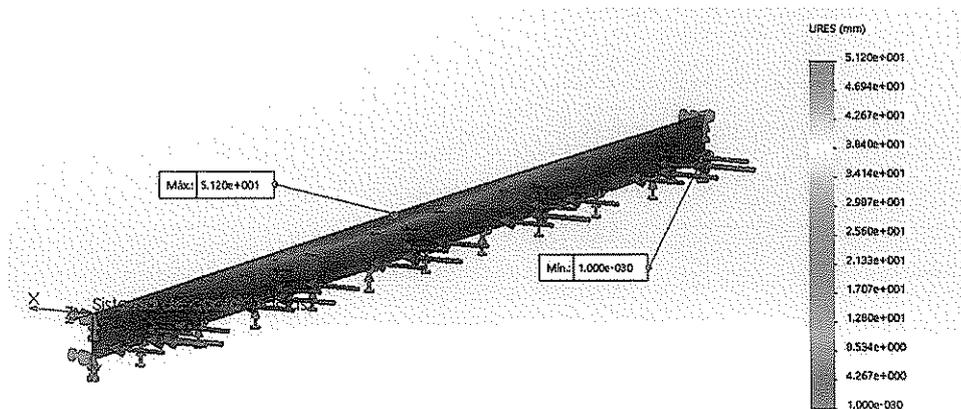


Fig.:47. Desplazamientos máximos.

Como se puede observar en las imágenes, la tensión máxima corresponde a aproximadamente un 10% de la tensión de fluencia, y los desplazamientos máximos no son significativos.

3.5.2. Características del agua

La corrosión es el deterioro de un material metálico como consecuencia de un ataque químico causado por su entorno.

Siempre que la corrosión esté originada por una reacción química, la velocidad a la que tiene lugar dependerá de la temperatura, la salinidad y las propiedades de los metales en contacto.

Éste fenómeno, que habitualmente afecta a tuberías y maquinarias es un proceso electroquímico que necesita tres condiciones para desarrollarse espontáneamente: ánodo, cátodo y electrolito (solución acuosa eléctricamente conductora). Si alguno falta, la corrosión se detiene.

La corrosión se desarrolla en las zonas anódicas, mientras que las catódicas permanecen siempre inalteradas. Cuanto mayor sea la conductividad del electrolito, tanto mayor será la corrosión. En un agua salina, que tiene una conductividad alta, cualquier proceso corrosivo se verá incrementado en actividad y en velocidad. Un agua dulce será poco conductora, por lo que la corrosión será más lenta y menos activa en relación al primer caso.

Por lo tanto, para el funcionamiento del prototipo se implementará agua dulce como fluido de circulación. Se selecciona ésta por una cuestión de simplicidad en mantenimiento, además de lo explicado anteriormente.

3.6. Obstáculo

Una vez realizado el diseño y cálculo de los materiales para el sistema, se procedió a realizar lo mismo con el obstáculo.

Para esto, se tuvo en cuenta la necesidad de fabricar una estructura capaz de resistir los esfuerzos generados por el fluido que circula sobre la superficie. Por otro lado, una característica buscada en este componente es la posibilidad de desmontarlo y trasladarlo, por lo que el peso no debe ser muy elevado.

Se optó por el diseño de una estructura reticulada de tubo de diámetro nominal 2", con un espesor de pared de 3,9 mm. Ésta debe ser recubierta por material desplegado, de modo de generar la base adecuada para sostener el material amortiguador. Estas tres etapas generales se pueden observar en la Figura 48.

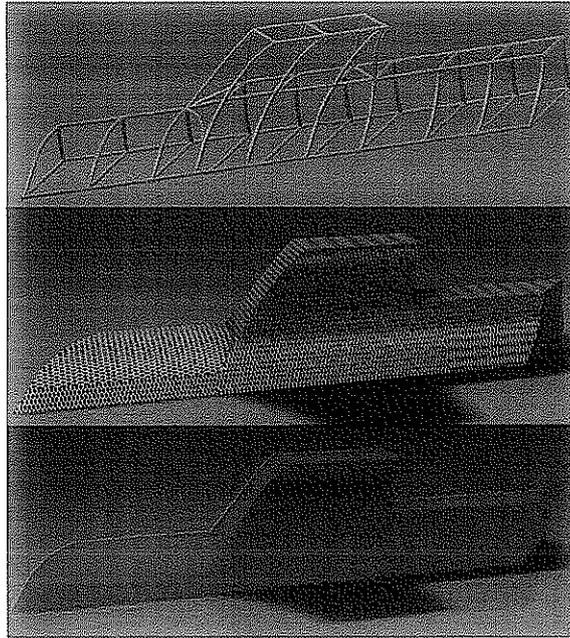


Fig.: 48. Etapas de construcción del obstáculo

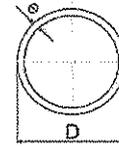
El obstáculo es fijado a la superficie por la cual se desplaza el fluido mediante un sistema de sujeción ubicado en la parte inferior. Este consiste en perfiles L ubicados de forma que la estructura reticulada pueda ser fijada mediante bulones.

3.6.1. Análisis tensional y de desplazamientos

El material seleccionado es un Acero SAE 1020 que posee una tensión de fluencia de 350 MPa. Las características de los tubos seleccionados se pueden observar en la Figura 49.

Cañerías ASTM A-53/Gr. A/B

Especificaciones Generales	
Diámetros:	1/2" a 6"
Largo normal:	6 m. Otros largos previa consulta.
Recubrimiento:	Negro, galvanizado.
Terminación:	Extremos: Refrenado, biselado y roscado.
Inspección:	Prueba Hidrostática.
Acoples a pedido:	Roscado Cañerías ASTM; Hilo NPT



Designación Diámetro nominal	Diámetro exterior D	Espesor nominal e	Peso teórico P	Presión de prueba		Propiedades			
				Grado A kg/cm ²	Grado B kg/cm ²	Área cm ²	I cm ⁴	W cm ³	l cm
1/2"	21,3	2,77	1,27	49,2	49,2	1,61	0,71	0,66	0,66
3/4"	26,7	2,87	1,69	49,2	49,2	2,15	1,55	1,16	0,85
1"	33,4	3,38	2,50	49,2	49,2	3,19	3,64	2,18	1,07
1 1/4"	42,2	3,56	3,39	84,4	91,4	4,32	8,13	3,85	1,37
1 1/2"	48,3	3,68	4,05	84,4	91,4	5,16	12,93	5,35	1,58
2"	60,3	3,91	5,44	161,7	175,8	6,93	27,66	9,18	2,00
2 1/2"	73,0	5,16	8,63	175,8	175,8	11,00	63,63	17,43	2,41
3"	88,9	5,49	11,29	156,1	175,8	14,39	125,65	28,27	2,86
4"	114,3	6,02	16,07	133,6	155,4	20,46	301,05	62,68	3,83
6"	168,3	7,11	28,26	106,9	125,1	36,00	1171,62	139,23	5,70
6"	168,3	5,00	20,14	75,2	87,9	25,65	855,84	108,13	5,78
6"	168,3	6,00	24,02	90,2	105,2	29,46	1008,69	119,87	5,85

Fig.:49. Características de los tubos seleccionados.

El reticulado se sometió a un análisis en Software de diseño 3D. Como primera condición, se consideró movimiento nulo en todos los ejes coordenados, de los tubos ubicados en la parte inferior.

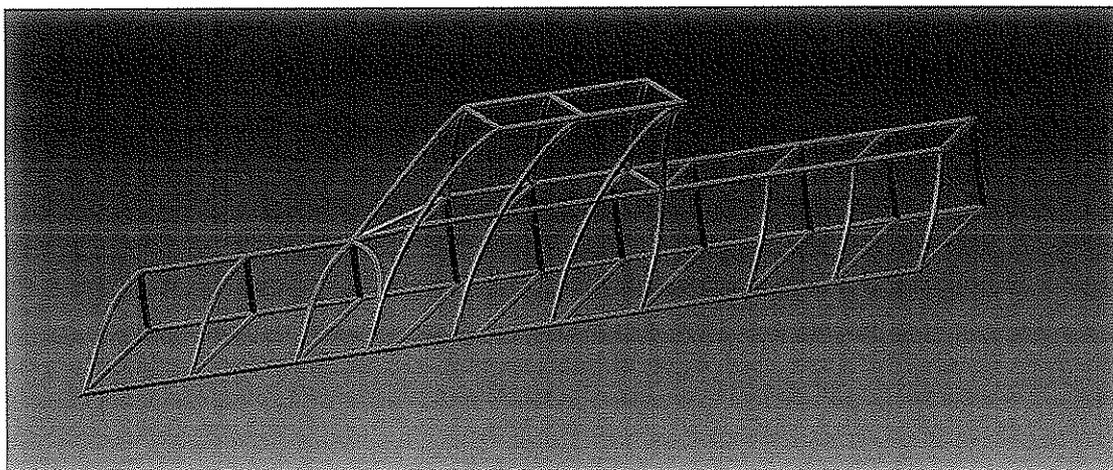


Fig.:50. Modelado 3D.

Para el cálculo de la fuerza que ejerce el fluido sobre el obstáculo se consideró la peor condición posible: un caudal que impacta en forma normal a una pared. De esta forma, se verifica en forma conservativa la estructura propuesta.

La fuerza se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$F = \dot{m} \cdot v \quad \text{Ec.:40}$$

Donde:

\dot{m} : Caudal másico del fluido.

v : Velocidad del fluido.

Se obtiene:

$$\dot{m} = 12,38 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 12380 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{Ec.:41}$$

$$F = \dot{m} \cdot v = 12380 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 5,89 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 72918,2 \text{ N} \cong 73 \text{ KN} \quad \text{Ec.:42}$$

Esta fuerza se aplica en forma distribuida de la forma indicada en la Figura 51:

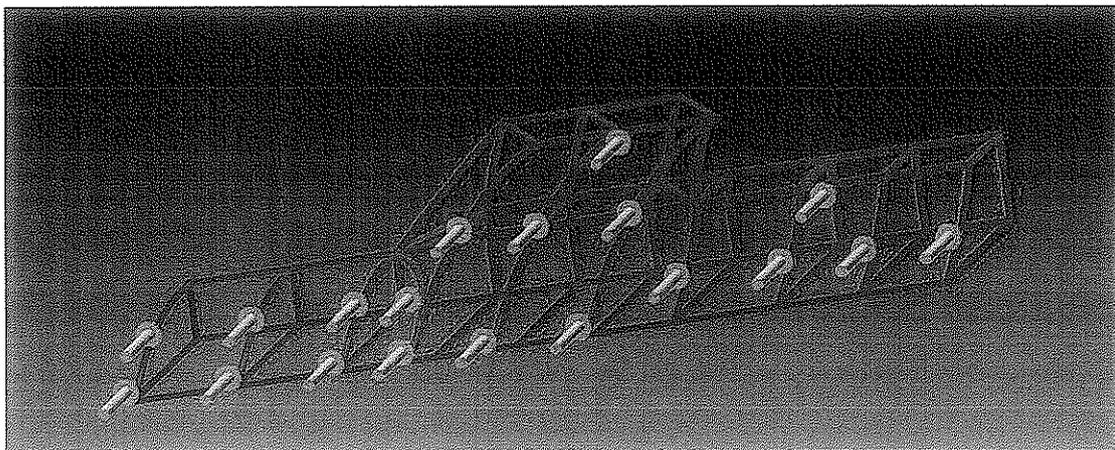


Fig.:51. Fuerza aplicada.

Posteriormente se realizó el mallado del modelo, con condiciones que permitieran una precisión adecuada para el estudio. Estas se muestran en la Figura 52.

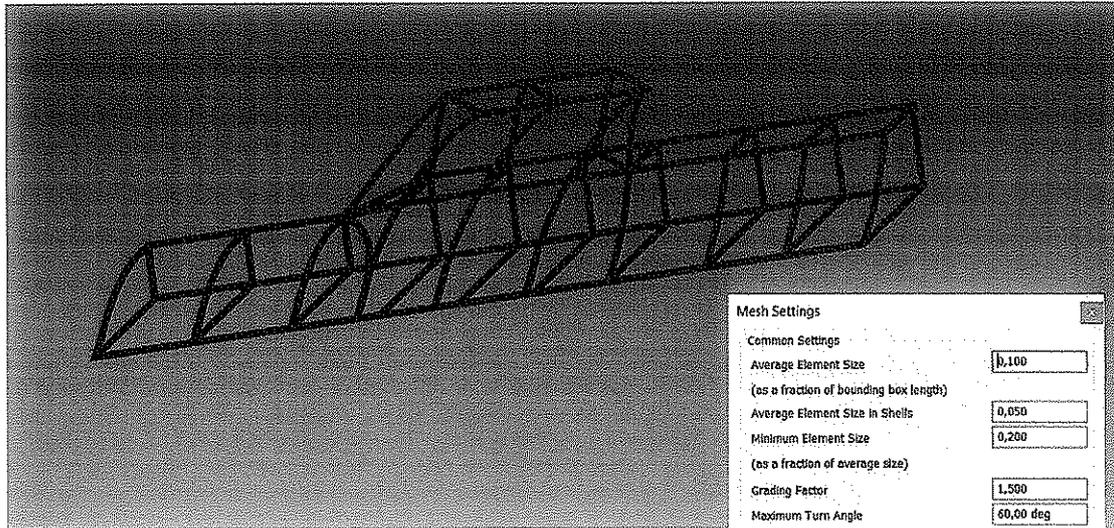


Fig.:52. Condiciones de mallado (áreas expresadas en mm²).

Los resultados para las tensiones y desplazamientos máximos se observan en las Figuras 53 y 54.

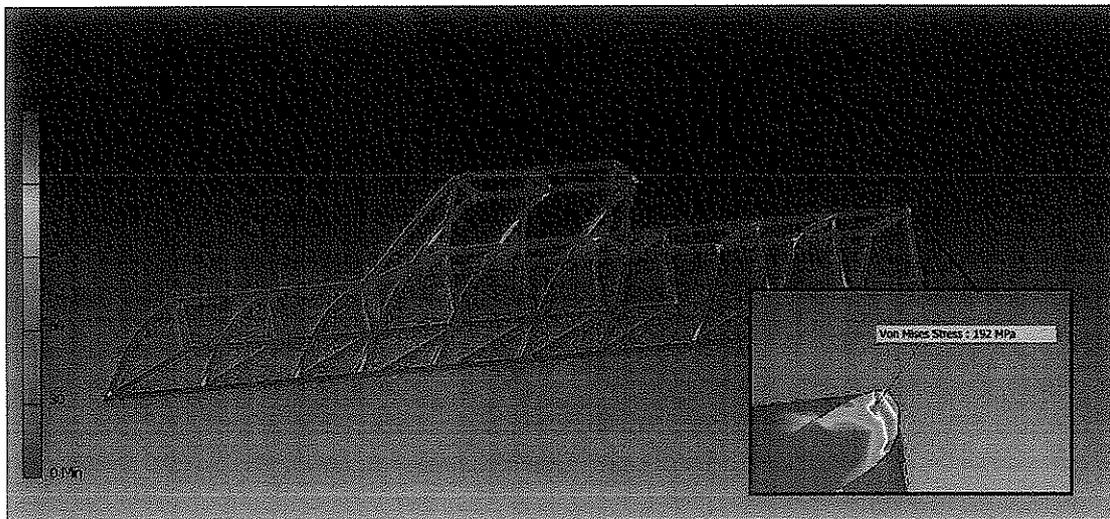


Fig.:53. Tensión Máxima de Von Mises.

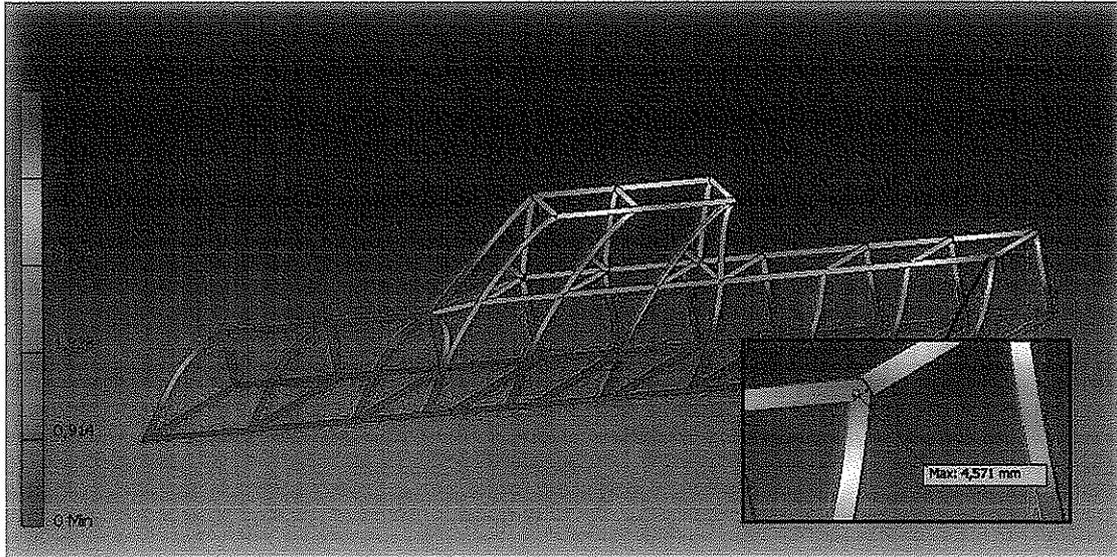


Fig.:54. Desplazamientos máximos.

Como se puede observar, los resultados de tensiones y desplazamientos máximos son adecuados, para la estructura estudiada, y el material seleccionado: la tensión máxima es inferior a la tensión de fluencia del material, con un valor máximo de 192 MPa en una de las uniones entre tubos, producto de la concentración de tensiones, dando como resultado un coeficiente de seguridad de 1.8. A su vez, los desplazamientos no resultan significativos, con un máximo de 4.571 mm .

3.7. Sistema de bombeo

Los elevados valores de caudal necesarios requieren equipos especiales, fabricados a medida, de alta potencia y gran porte.

SULZER® es una empresa de manufactura e ingeniería que fabrica sistemas de bombeo centrífugos, mezcladores para las industrias del petróleo, hidrocarburos, agua, etc. La empresa cuenta con catálogos de selección, además de representantes de ventas en todo el mundo para evaluar las necesidades del cliente y fabricar o acondicionar un sistema a medida.

Según los requerimientos del proyecto, se seleccionó el siguiente sistema el cual consta de 3 bombas axiales de hélice en paralelo.

Datos de diseño			
Caudal	14900 m ³ /h	Altura	5,65 m
Rendimiento	85%	Potencia absorbida en el eje	271Kw
NPSH(ANPA)	7,09m	Fluido	Agua
Temperatura	20°C	Tipo de instalación	Bombas simples en paralelo
N.º de Bombas	3		
Datos de la bomba			
Tipo	VUPX 1201 50 Hz	Marca	Sulzer
Serie	VUPX	Impulsor	Hélice
N.º de álabes	3	Tipo de instalación	Tubería de acero
Paso de sólidos	285 mm		
Boca de impulsión	DN 1400		
Datos del motor			
Tensión nominal	400 V	Frecuencia	50 Hz
Potencia absorbida en el eje	400 KW	Velocidad nominal	1490 RPM
N.º de polos	4	Rendimiento	96,2%
Factor de potencia	0,853	Corriente nominal	704 A
Intensidad de arranque	5840 A	Par nominal	2570Nm
		Grado de protección	IP68
		N.º de arranques/hora	10

Tabla: 10

A continuación se presenta el plano con las dimensiones de las bombas seleccionadas VUPX 1201 y sus curvas de altura de impulsión, potencia absorbida en el eje y NPSH (ANPA). Los valores analizados corresponden a un tercio el caudal total.

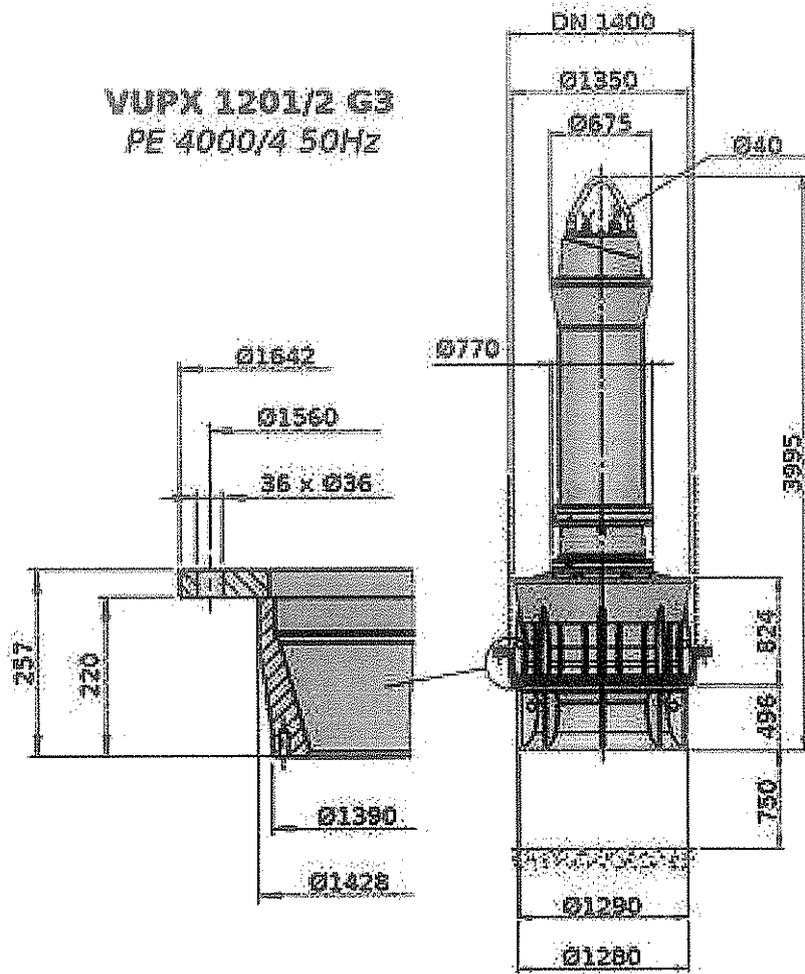


Fig.:55. Plano de la bomba – Norma DIN

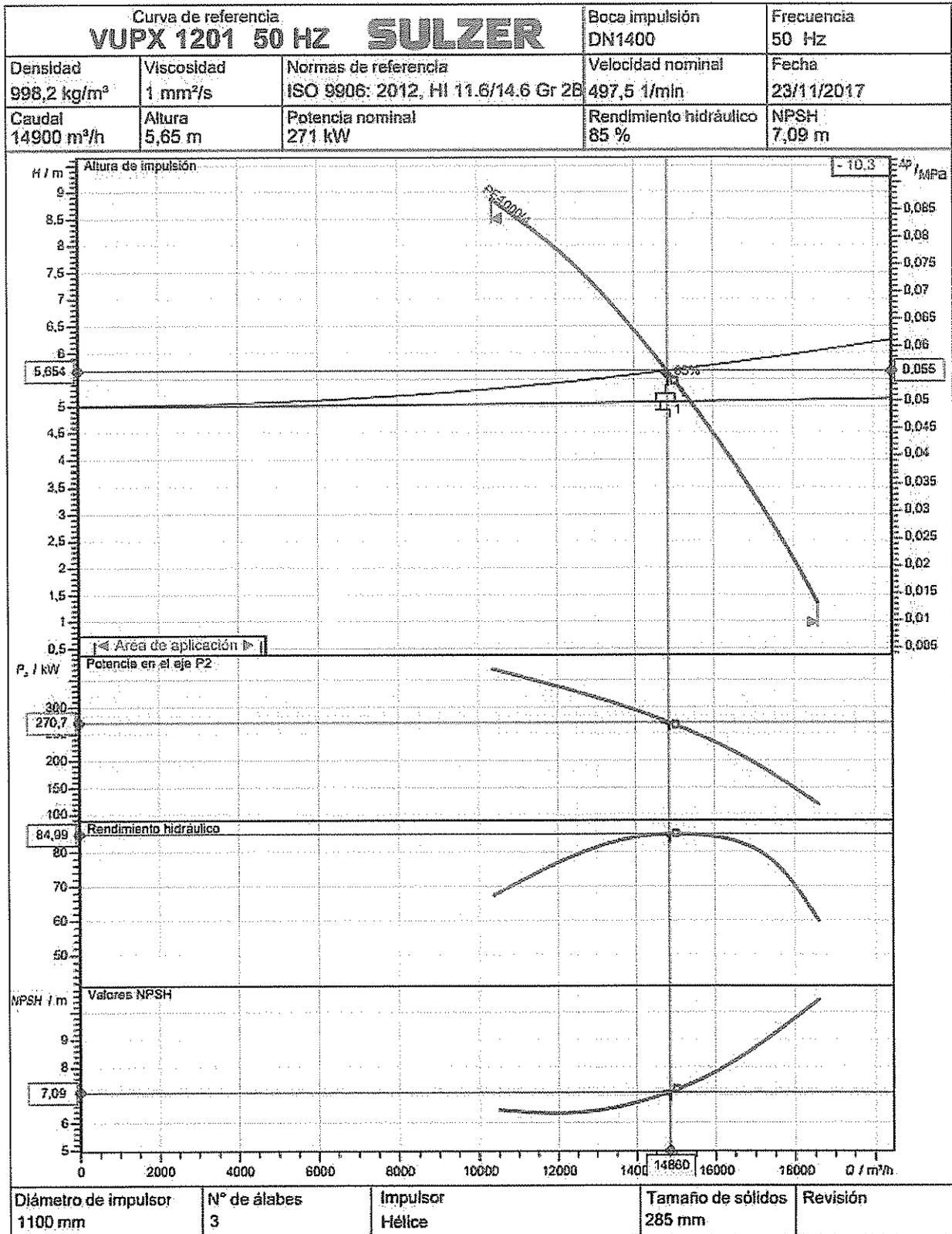


Fig.:56. Curva de referencia VUPX 1201

Como se puede ver en la gráfica de caudal vs. altura de impulsión de la Figura 56, para el caudal requerido de 14860 m³/h, se obtiene una altura de impulsión de 5,65 m, o lo que es igual, una variación de presión de 0,055 MPa. Se observa que el rendimiento al que trabaja el sistema es de 85%.

En la gráfica de potencia en el eje vs. caudal, para el caudal requerido, se obtiene una potencia en el eje de 270,7 kW.

Del gráfico de NPSH en función del caudal, para el valor requerido de 14860 m³/h, se obtiene un valor de NPSH requerido de 7,09 m. Ya que la aspiración de la bomba se realiza directamente desde el tanque receptor de agua luego de atravesar el obstáculo, el NPSH disponible será el correspondiente a la presión atmosférica sumado a la presión hidrostática debida a la profundidad del tanque, resultando este de 12,78 m.

Así, se verifica que el NPSH disponible es mayor al mínimo requerido.

$$NPSH_{disponible} = \frac{P_e}{\rho g} + \frac{V_e^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} = 12,78m \quad Ec.:43$$

Dónde:

- P_e = presión absoluta de aspiración.
- V_e = velocidad del fluido en la aspiración.
- P_v = presión de vapor del fluido.
- ρ = densidad del fluido.
- g = aceleración de la gravedad.

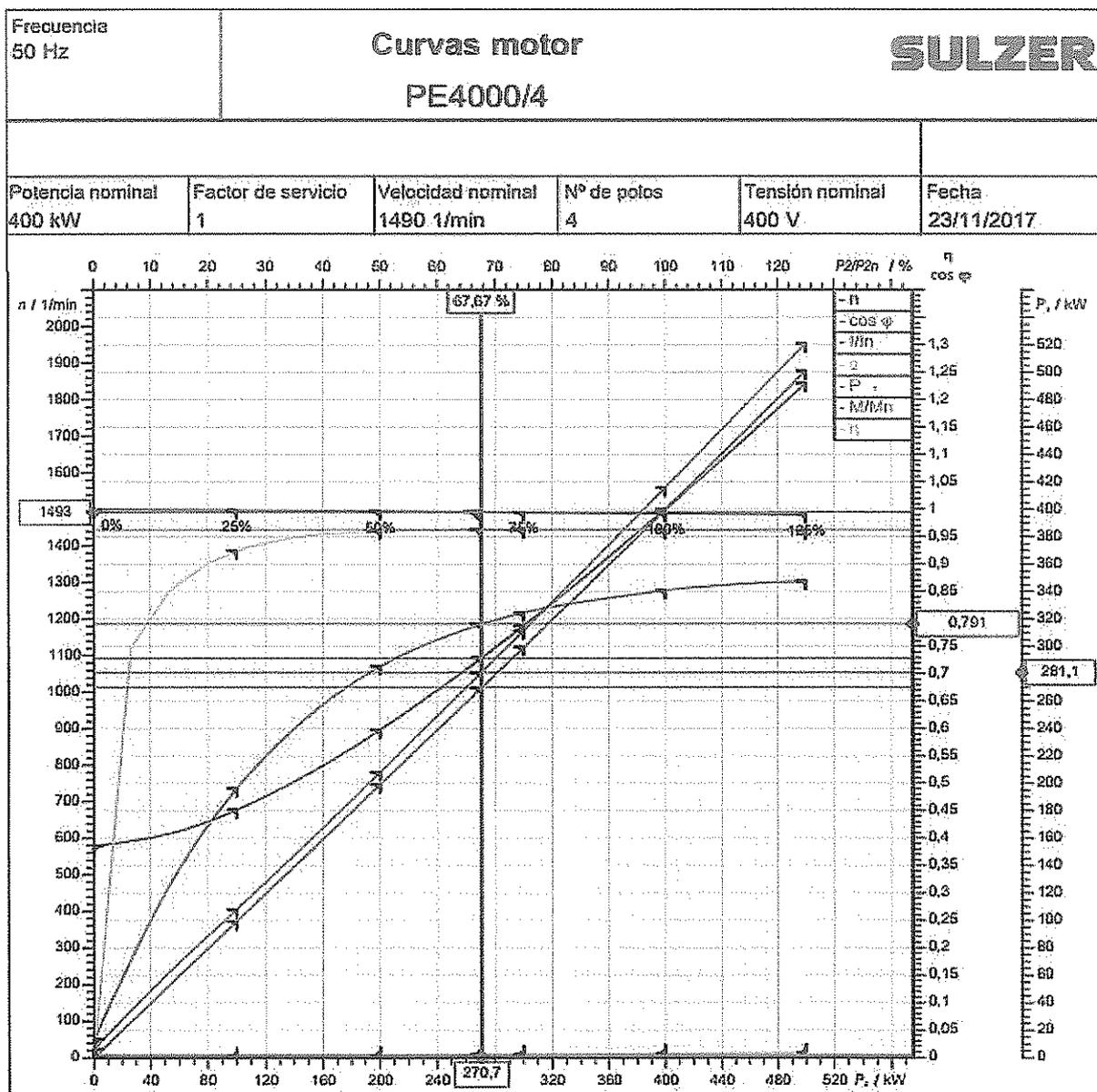


Fig.:57. Curvas del motor.

En la Figura 57, se grafican los datos de cada motor acoplado a las bombas del sistema. Estos valores son rpm, factor de potencia, corriente nominal, potencia eléctrica absorbida, par motor y rendimiento. Para mayor simplicidad se superponen todas las curvas y se las interseca con el valor de potencia mecánica requerido en el eje x.

En la tabla se detallan valores numéricos para distintas condiciones de carga del motor.

Magnitud	Vacío	25%	50%	75%	100%	125%
Potencia del eje [kW]	0	100	200	300	400	500
Potencia eléctrica [kW]	6,285	108,1	205,1	311,6	415,8	520,9
H	0	92,52	96,12	96,29	96,2	95,99
RPM	1500	1497	1495	1492	1489	1486
cos ϕ	0,03342	0,4909	0,7142	0,8118	0,8531	0,8691
Intensidad de Corriente [A]	271,4	317,8	420,5	554	703,5	865,1
Par Motor [Nm]		637,8	1278	1920	2565	3212
Intensidad de arranque	Par de arranque		Momento de Inercia			
5840 A	5900 Nm		7,72 kg m ²			

Tabla: 11.

Una vez obtenidos los requerimientos del sistema de impulsión, se puede determinar la ubicación donde se montarán los equipos. La misma debe estar ubicada bajo nivel para favorecer aún más los valores de NPSH. Estos se ubican dentro de las cañerías de concreto, bajo tierra en el punto más bajo posible. El tanque recibidor debe contar con 3 salidas correspondientes a cada una de las bombas dispuestas en paralelo, en lugar de usar un solo conducto, para disminuir la pérdida de carga. Luego de ser bombeado, el fluido se inyecta en la pileta de desborde de la misma forma en la que se extrae de la recibidora.

El sistema debe contar con sistemas de seguridad para evitar que por desperfectos corra riesgo de inundación. Sensores de nivel y de sobrepresión deben ser instalados para detener el sistema de impulsión en caso de emergencia. Además debe contar con un sistema de control que verifique nivel de agua en el tanque recibidor, monitoreo de condiciones del fluido tales como contaminantes y pH, temperatura de los equipos.

Se debe contar además con una bomba de achique de emergencia en caso que existiera algún desperfecto que impida realizar el vaciado ocasional por mantenimiento.

Es controlado desde un tablero en planta baja donde se puede poner en funcionamiento el sistema, realizar paradas de emergencia y tiene además información del estado de los equipos y del fluido.

3.7.1. Sujeción del sistema de bombeo

Según se puede observar en el plano de la Figura 55, cuenta con una brida para sujetar la bomba a la estructura. La misma consta de 36 agujeros de 36 mm de diámetro distribuidos uniformemente en un diámetro mayor de 1560 mm. Se ensaya para la sujeción utilizar bulones de 1 3/8" – 6h.

Se verificará a la tracción el diámetro del núcleo de los bulones, y a la compresión de la brida de la bomba y el conducto de iguales dimensiones.

Cada bomba hace circular un caudal volumétrico de $4,138 \frac{m^3}{s}$. La fuerza generada al hacer circular este caudal es:

$$F = \dot{m} \cdot v = \rho \cdot Q \cdot \frac{Q}{A} = \frac{\rho \cdot Q^2}{\pi \cdot \frac{\phi_b^2}{4}} \quad Ec.:44$$

Donde:

\dot{m} es el caudal másico impulsado por la bomba.

v es la velocidad del fluido.

Q es el caudal volumétrico.

ϕ_b es el diámetro de salida de la bomba.

ρ es la densidad del fluido.

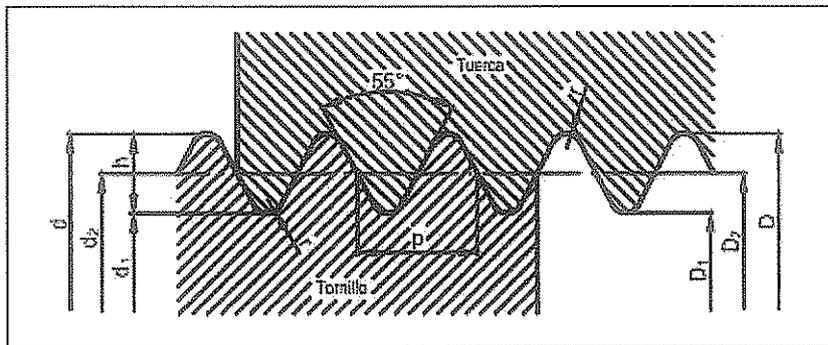
Se tiene entonces que:

$$F = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} \cdot \left(4,138 \frac{m^3}{s}\right)^2}{\pi \cdot \frac{(1,29 m)^2}{4}} = 13106,85 N \quad Ec.:45$$

Esta será la fuerza total ejercida por el fluido en circulación, por lo que cada bulón deberá resistir una carga constante de:

$$F_{bulón} = \frac{F}{36} = 364,1 N \quad Ec.:46$$

Según norma, las dimensiones de los bulones seleccionados se detallan a continuación.



Diámetro Nominal	Diámetro Exterior	Diámetro en el Núcleo	Sección en el Núcleo
1 3/8"	34,925 mm	29,505 mm	551,75 mm ²

Fig.:58. Dimensiones de bulones a utilizar.

Por lo que la tensión a la que se solicitará cada bulón será:

$$\sigma = \frac{F_{\text{bulón}}}{A_{\text{núcleo}}} = \frac{364,1 N}{551,75 \text{ mm}^2} = 0,6598 \frac{N}{\text{mm}^2} = 0,6598 \text{ Mpa} = 6,733 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \text{Ec.:47}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores nominales del límite elástico f_{yb} y de la resistencia última a tracción f_{ub} del acero empleado en la fabricación de bulones de distintos tipos, donde se observa que superan ampliamente la tensión a la que se someterían en este caso:

Valores nominales del límite elástico f_{yb} y de la resistencia a tracción última f_{ub} de tornillos							
Tipo de tornillo	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

Fig 59.: Valores de límite elástico y tracción última para distintos tipos de bulones.

Para verificar la resistencia de los bulones, se debe asegurar en primera medida que se cumpla la siguiente condición:

$$3 < \frac{\pi \cdot \phi_c}{N \cdot \phi_{\text{bulón}}} < 6 \quad \text{Ec.:48}$$

Donde:

ϕ_c es el diámetro entre centros de los agujeros de la brida.

N es el número de bulones.

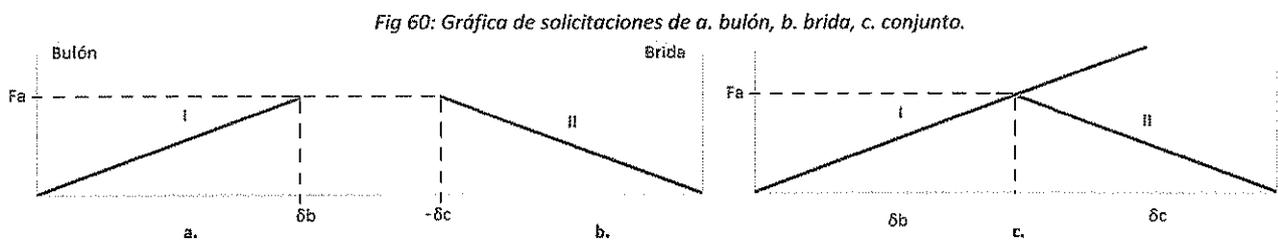
$\phi_{\text{bulón}}$ es el diámetro del núcleo de los bulones.

Ya se mencionó anteriormente que $\phi_c = 1560 \text{ mm}$, $N = 36$ y $\phi_{\text{bulón}} = 29,505 \text{ mm}$. A partir de estos datos, se verifica:

$$\frac{\pi \cdot 1560 \text{ mm}}{36 \cdot 29,505 \text{ mm}} = 5,136 \quad \text{Ec.:49}$$

Para realizar un análisis de mayor profundidad, se debe verificar el conjunto bulón-bridas bajo carga. El bulón trabajará a la tracción, y las bridas a la compresión.

Para este análisis se utiliza un método [8] que puede ser graficado para facilitar la conclusión a que se llega en el conjunto. Cuando se grafican las deformaciones del bulón y de las bridas en función de la carga, como se ve en la Figura 60, se observan dos rectas I y II de signos contrarios por ser sus deformaciones de inverso sentido. Las rectas representan los módulos de elasticidad de los componentes. La recta I representa el elemento solicitado a la tracción, y la II, a la compresión.



Como se ve en el caso c, del conjunto. La fuerza máxima a la que se puede cargar el sistema dependerá en primera instancia de la resistencia a la tracción del bulón, y además deberá asegurar la estanqueidad. Esto quiere decir que la brida debe estar actuando en compresión. Si el bulón se siguiera deformando, al superar el valor de $\delta_b + \delta_c$ ocurrirá la separación de los elementos.

F_a es la fuerza de apriete a la que se somete el sistema antes de entrar en régimen para asegurar la situación graficada en el ejemplo.

Para continuar con el análisis es necesario primero exponer los valores de los datos necesarios para poder graficarlos adecuadamente.

$E_1 = 210000 \text{ Mpa}$. Módulo de elasticidad del bulón a la tracción (acero).

$E_2 = 20594 \text{ Mpa}$. Módulo de elasticidad de las bridas a la compresión (hormigón).

$L = 74 \text{ mm}$. Espesor de los elementos a unir.

$F_a = 600 \text{ N}$. Fuerza de apriete impuesta.

El último dato necesario es la fuerza a la que se somete cada bulón debida a la circulación del fluido, calculada anteriormente.

Con estos datos se procede a graficar las deformaciones producidas por los esfuerzos según la ley de Hooke:

3.7.2. Alimentación del sistema de bombeo

Ya que los valores de potencia eléctrica necesarios son demasiado elevados como para obtenerlos directamente de la red doméstica, se consultó con un especialista acerca los equipos necesarios para instalar una subestación de servicios auxiliares para la empresa EDEA SA.

Subestación de servicios auxiliares:

Se deberá construir y montar una Cámara de Transformación contigua a la Sala de comando para alojar el Transformador de Servicios Auxiliares.

Sus principales componentes serán:

- Transformador: Tipo trifásico en baño de aceite, de Potencia nominal 1000 KVA, Tensión nominal 13,2 kV +/- 2x2,5 %, Servicio continuo, Grupo de conexión, según norma IRAM 2250.
- Celdas tipo secundaria con seccionadores bajo carga y barras en SF6, Marca Ormazábal, modelo CGM Cosmos - 2LP
- Un tablero IP 20 con las siguientes características:
 - Interruptor automático en caja moldeada 500 V – 2000 A, con retardo lento ajustable entre 0,8 y 1,0 x In y disparo instantáneo ajustable entre 4 y 10 x In. Será capaz de soportar una Corriente máxima > 20 KA (sim., trif., eq., 1s).
 - TI en la fase central relación 800 / 5, con núcleo de medición clase 0,5 y un amperímetro con indicación de valor eficaz instantáneo y de acción retardada con aguja de arrastre.
 - Salidas serán mediante 6 seccionadoras portafusibles tripolares, de accionamiento unipolar, IP 20, para fusibles NH tamaño DIN 02, marca Pronutec, Pfisterer, Jean Müller o ABB.
 - Barras principales aptas para 2000 A (entrada y salida del interruptor).
 - Barras secundarias 630 A (vinculación entre barras principales y bases portafusibles verticales).
 - Barra de Neutro apta para 1000 A.
 - Envolverte de chapa compartimentada, separando compartimento de cables, de interruptor, de barras y bases portafusibles y de baja tensión.
 - Bornera de contraste de corriente (con bornes duplicados y con puente) y tensión.
 - Riel tipo "C" (tipo Olmar) para sujeción de cables.
 - Fusibles tipo Diazed para salida a tablero de SACA propios de la subestación media tensión/baja tensión.
 - Fusibles tipo HH de bajas pérdidas marca SIBA, corriente nominal de 32 A (6 unidades).

- Fusibles Tipo NH tamaño DIN 02, de bajas pérdidas, corriente nominal de 355 A (9 unidades).
- Para la conexión de media tensión entre la celda primaria de 13,2 kV y la secundaria de línea, tipo L, se utilizará cable armado subterráneo unipolar, Un 13,2 kV, Al 185 mm², Aislación XLPE, Pantalla de cobre de 16 mm², armadura de doble fleje de aleación de aluminio, cubierta de PVC, de acuerdo a IRAM 2178.
- Para la conexión de media tensión entre la celda secundaria con fusibles, tipo P, se utilizará cable armado subterráneo tripolar, Un 13,2 kV, Aislación XLPE, conductor de cobre 3 x 35 mm², pantalla alambres y/o cintas de cobre se sección mínima 10 mm² por fase, resto según IRAM 2178.
- Las conexiones en baja tensión entre transformador y tablero de baja tensión propio de la cámara de transformación se realizará mediante cables unipolares de baja tensión, 1,1 kV, aluminio, 240 mm², a razón de dos cables por fase y uno para el neutro.
- Las conexiones en Baja Tensión entre el tablero de baja tensión de la cámara de transformación y los Tableros de SACA tanto de EDEA como de TRANSBA se realizarán mediante cables armados subterráneos, tetrapolares, para 1,1 kV, aluminio, 3 x 240 / 120 mm², armadura de doble fleje de chapa galvanizada, a razón de un cable hacia el tablero de EDEA y uno hacia el de TRANSBA.
- Deberá respetarse los lineamientos contenidos en la Reglamentación Sobre Centros de Transformación y Suministros en Media Tensión de la Asociación Electrotécnica Argentina, AEA 95401.

3.8. Medidas de seguridad

Es indispensable que el prototipo cuente con las medidas de seguridad necesarias, de modo de minimizar en la mayor medida posible el peligro al cual se expone el cliente durante el uso de la instalación. Para esto se analizan los riesgos potenciales a los cuales se enfrenta el usuario, y se busca la forma más eficiente de disminuirlos.

Los peligros presentes son:

- Caída del usuario.
- Ingreso a la zona de succión dentro de la pileta recibidora.
- Realización de la actividad en piletas.

Los riesgos presentes son:

- Contusión en alguna parte del cuerpo.
- Fractura de huesos.
- Conmoción cerebral por golpe en la cabeza.
- Ser succionado por el sistema de bombas.
- Ahogarse.

3.8.1. Superficie amortiguadora de impactos

Es de vital importancia colocar un material capaz de disminuir el impacto ante caídas. De no utilizarse podrían ocurrir lesiones graves e incluso la muerte de los usuarios.

Para mitigar este riesgo se consultó con especialistas sobre distintos materiales que logren reducir el impacto. El seleccionado se denomina "Polyfan", Poliestireno Extruido en forma de planchas o placas.

Este material, en su composición, posee la misma estructura que el Poliestireno Expandido (aproximadamente 95% de Poliestireno y 5% de gas). La diferencia radica en el proceso de fabricación. Mediante la extrusión se produce una estructura de burbuja cerrada, lo cual es muy importante ya que esto impide la penetración de agua en espacios vacíos, pudiendo generar el deterioro de las planchas.

Como características principales del Polyfan se pueden enumerar:

- LIVIANO: Un m³ pesa 33 kg.
- DURABLE: Su estabilidad dimensional y el hecho de no absorber agua/humedad, hacen que la placa sea durable con el paso de los años, conservando intacta sus propiedades.
- IMPERMEABLE: Es una poderosa barrera contra el agua y el vapor. Tolera prolongadas inmersiones sin absorber agua. Esto permite que funcione en forma óptima en esta aplicación, en contacto con cemento y hormigón, en cámaras frigoríficas o en ambientes con elevada humedad.
- FUERTE: Tolera un peso de 2,2 a 4 Tn./m², dependiendo el espesor.
- ECOLÓGICO: Es un producto ecológicamente limpio, aún durante sus aplicaciones. No se adhiere a las manos, ni irrita la piel. No tiene olor y no resulta nocivo para la salud. Es un material 100 % reciclable.

Encima de este material se coloca lona PVC de 650 gr/m² como recubrimiento.

El Polyfan se fija a la superficie mediante el adhesivo "Sikadur – 30 adhesive normal", éste es un adhesivo epoxi tixotrópico para el pegado de refuerzos estructurales, que se adapta a las superficies utilizadas y sus especificaciones cumplen con las requeridas para el montaje material sobre el canal. Es de dos componentes, libre de solventes.

USO

Sikadur-30 tiene las siguientes aplicaciones:

- Une y rellena elementos de hormigón, acero, epoxi, etc.
- Unión estructural de láminas de fibras de carbono Sika Carbodur al hormigón y a mampostería.
- Unión estructural de láminas metálicas al hormigón.
- Fijación de elementos, anclajes, nervios, soportes o tirantes.
- Relleno de oquedades en el hormigón y reperfilado del mismo.

CARACTERÍSTICAS

Sikadur-30 posee las siguientes ventajas:

- Pot life y tiempo abierto, extensos.
- Fácil de mezclar y aplicar.
- Elevada resistencia mecánica inicial y final
- Altas resistencias mecánicas a la abrasión y al impacto.
- No requiere imprimante.
- Elevada resistencia adhesiva.
- Tixotrópico, no escurre aplicado sobre superficies verticales o invertidas.
- Rápido curado, aún a bajas temperaturas.
- Alta resistencia a la deformación bajo carga permanente.
- Excelente resistencia al creep bajo carga permanente.
- Buena resistencia a altas temperaturas (punto de vitrificación: 62° C)
- Excelente adherencia al hormigón, acero, fibras de carbono Sika Carbodur.
- También muy buena adherencia a albañilería, piedra, hierro fundido, aluminio y madera
- Impermeable a líquidos y al vapor de agua.
- El endurecimiento no se ve afectado por la alta humedad.
- Puede ser aplicado sobre superficies ligeramente húmedas.
- Componentes de diferentes colores (para control de mezclado).

3.8.2. Uso de casco

En su mayoría, los surfistas no utilizan equipamiento de seguridad. Sí lo hacen aquellos de “olas gigantes” que utilizan casco y chaleco debido al gran oleaje de hasta 25 metros. En ocasiones, estas olas arrastran al surfista a zonas rocosas, como en el caso de Nazaré, Portugal. En estos casos resulta indispensable la utilización de este equipamiento y contar con un equipo de rescate.



Fig.: 61. Imagen tomada en Nazaré, Portugal.

El proyecto, que recrea la forma y tamaño de una ola surfable convencional, de 1.8 metros, necesita de cierto equipamiento de seguridad, debido a su poca profundidad. Durante la práctica, una caída del usuario podría significar un golpe contra el fondo, además de ser arrastrado por la corriente de agua.

El prototipo cuenta con una superficie de Polyfan que disminuye notablemente el impacto. Como equipamiento para el usuario será necesario un casco aprobado por la norma CE-1385.

La marca CE (Comunidad Europea), indica que un producto cumple con los requerimientos esenciales de seguridad, salud y protección ambiental, que la comunidad plasma en sus normas.

3.8.2.1. CE-1385

Norma seis requerimientos esenciales para que un casco sea aprobado:

- Campo de visión: asegurar que el diseño del casco no interfiera con la visual del usuario.
- Extensión de cobertura: asegurar que el casco cubra todas las partes necesarias de la cabeza.
- Capacidad de absorción: El aspecto más importante a tener en cuenta en un casco es la absorción del golpe. Es probado con una maquinaria específica que hace caer el casco a 2,5 m/s con un yunque de metal de 4 Kg dentro. Dentro de la cabeza de metal se encuentra un acelerómetro que mide la fuerza de impacto. Los cascos son testeados en cuatro condiciones: Alta temperatura (+35°C), baja temperatura (0°C), luego de envejecimiento artificial y luego de haber sumergido el casco por cuatro horas en agua.

- Cada casco es testeado en distintas áreas, como el frente, los laterales y la parte posterior. El pico de aceleración no debe exceder los 250 G en ninguno de los impactos.
- Efectividad del sistema de retención: esta prueba mide la fuerza de retención de las correas, así como su eficacia, es decir la capacidad de mantener el casco de forma segura en la cabeza.
- Flotabilidad: luego de estar sumergido por al menos cuatro horas, el casco debe flotar a la superficie.
- Durabilidad: luego de todos estos test, el casco no debe mostrar ningún daño que pueda causar daño adicional al usuario.

3.8.2.2. Aspectos a considerar cuando se compra un casco

Nunca se debe comprar un casco de segunda mano, o de algún sitio del cual se desconozca su procedencia, tal que pueda haber sufrido algún tipo de daño por otro usuario con anterioridad.

Los cascos varían ampliamente en precio y según dos características particulares. La primera y más importante es el nivel de protección ofrecida por el casco, seguida por el confort y la comodidad del mismo. La mayoría de los cascos modernos proveen una capa interna suave con un sistema de regulación adicional para asegurar su correcta retención, y agujeros de ventilación.

3.9. Análisis de aceptación del proyecto

Con el fin de analizar la factibilidad de realización del proyecto, se decidió que era importante consultar el segmento de potenciales clientes, el cual corresponde a miembros de la comunidad surfista de Mar del Plata.

Es por esto que se llevó adelante una encuesta en las redes sociales, que refleje la opinión de las personas con respecto a aspectos claves. La misma fue realizada en grupos de surfistas marplatenses. Las preguntas tuvieron en cuenta el gusto personal, la importancia que le otorga la persona al proyecto, y el interés en invertir dinero para surfear en una ola como la propuesta.

En estadística, el tamaño de la muestra es el número de sujetos que componen una muestra extraída de la población a la que se someterá a análisis. Este tamaño tiene un valor fijo necesario para que los datos obtenidos sean representativos de la población. El tamaño de la muestra es necesario determinarlo principalmente para evitar la necesidad de analizar a la población en su totalidad. Se estima un parámetro determinado con el nivel de confianza deseado. El nivel de confianza indica la probabilidad de que los resultados de la investigación sean ciertos.

Según grupos vistos en redes sociales, se estimó que en Mar del Plata existen aproximadamente 9000 surfistas.

Una fórmula que orienta sobre el cálculo del tamaño de la muestra para datos globales es el siguiente:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 N p q}{e^2 (N-1) + Z_{\alpha}^2 p q} \quad \text{Ec.:51}$$

Dónde:

- N es el tamaño de la población.
- Z_{α} es una constante que depende del nivel de confianza a asignar. Se obtienen de la tabla de distribución normal N (0,1). Para un nivel de confianza del 95% corresponde $Z_{\alpha} = 1.96$
- e es el error muestral deseado, en porcentaje. Es la diferencia que puede haber entre el resultado que se obtiene de analizar la muestra y el que se obtendría preguntando al total de la población.
- p es la probabilidad de éxito del estudio; q es la probabilidad de fracaso. Cuando no se conoce con exactitud estos valores se asume $p=q=0.5$

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 9000 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,1^2 (9000-1) + 1,96^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5} \cong 95 \quad \text{Ec.:52}$$

Por ende, para asegurar un nivel de confianza del 95%, y con un error máximo del 10%, el tamaño de la muestra debe ser de 95 personas.

Las preguntas y los resultados fueron los siguientes:



Fig.:63. Resultados de encuestas.

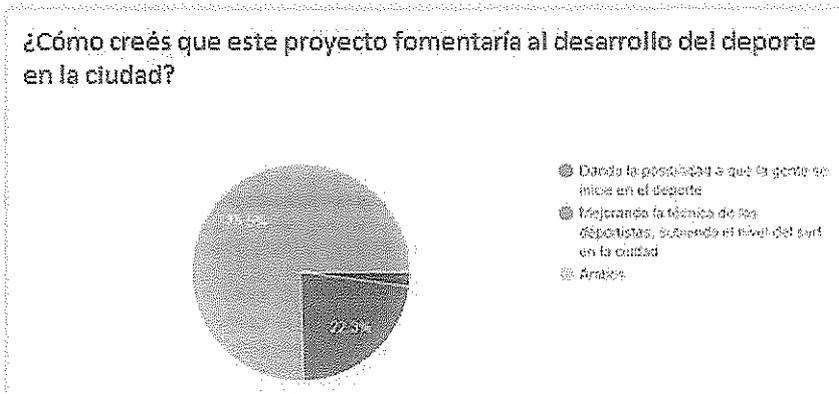


Fig.:64. Resultados de encuestas.

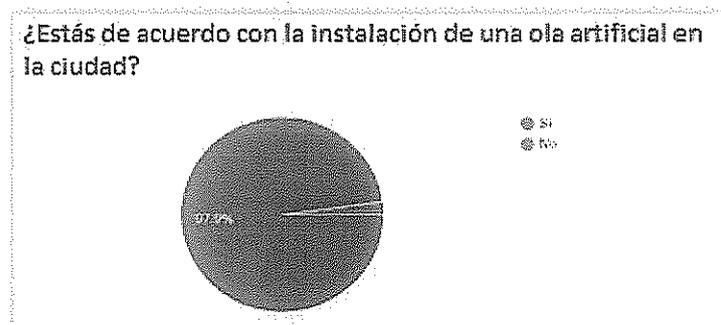


Fig.:65. Resultados de encuestas.

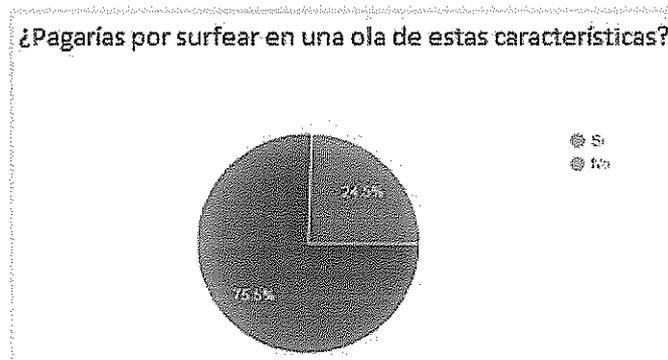


Fig.:66. Resultados de encuestas.

Los resultados entregados por la encuesta son alentadores y reflejan una gran expectativa por el público marplatense.

3.10. Estimación de la inversión

Para estimar la inversión total del proyecto, se utiliza el método de estimación por factores.

El equipo, en éste caso, el conjunto de bombas no se encuentra instalado. El monto de instalación de equipos es función de la complejidad del equipo y del tipo de planta donde se lo instala, variando desde el 20% al 55% del precio de compra del equipo. Se asume un 37,5 %, ya que la instalación es de complejidad intermedia.

$$I_E = \text{Precio de Bombas} * 1,375 = \$10.300.000 \quad \text{Ec.:53}$$

Dentro de los factores directos se encuentra:

Tuberías de proceso (f_1). Los gastos en cañerías pueden variar ampliamente dependiendo del tipo de proceso (sólidos, sólidos y fluidos, fluidos) y de las condiciones del proceso (temperatura, presión). En nuestro caso:

- Gasto en cañerías: \$ 28.557 (Detallado anteriormente en Tabla 7 de "Obra Civil")

Instrumentación (f_2). Este rubro incluye la compra, instalación y calibración de todos los equipos auxiliares e instrumentos para control y registro de las distintas variables del proceso en cada una de sus etapas. En nuestro caso:

- Parcialmente automatizado: 0,075

Edificios de fabricación (f_3). Este componente incluye los gastos de mano de obra, materiales, y suministros involucrados en la construcción de todos los edificios conectados con la planta. Se incluyen los servicios para los edificios de: plomería, instalación eléctrica, ventilación, aire acondicionado. En nuestro caso:

- Costo de hormigón: \$ 488.676,15, valor extraído del cálculo de hormigón, sin tener en cuenta cañerías, ya que se contempla en tuberías de procesos.
- Costo de mano de obra por $m^2 = 3.500$ \$, para $262 m^2$, un total de \$ 917.000

Plantas de servicios (f_4). Incluye todas las estructuras, equipos y servicios que no entran directamente en el proceso. Normalmente incluyen las instalaciones para suministrar vapor, agua, electricidad, aire comprimido y combustibles. En nuestro caso:

- Adición considerable a las existentes: 0,15

Conexiones entre unidades f_5 : No se poseen conexiones entre unidades

Inversión directa:

$$I_E(1 + \sum f_i) = 10.300.000 * (1 + 0,075 + 0,15 + 0) + 28.557 + 488.676,15 + 917.000 \quad \text{Ec.:54}$$

$$I_E(1 + \sum f_i) = \$ 14.051.733 \cong \$ 14.052.000 \quad \text{Ec.:55}$$

Ingeniería y construcción (f_{i1}). Estos gastos corresponden no sólo al pago de los servicios técnicos y administrativos necesarios para dirigir y administrar el proyecto durante la construcción, sino también incluyen todo el trabajo de ingeniería general, confección de planos finales de construcción y especificaciones para licitar o contratar diversas tareas o equipos. En nuestro caso:

- Ingeniería compleja: 0,425

Factores de tamaño (f_{i2}):

- Unidad experimental: 0,25

Contingencias (f_{i3}). Este factor compensa los acontecimientos imprevistos. Su monto es variable y depende de la exactitud de la estimación. En nuestro caso:

- Variaciones imprevistas: 0,25

$$\text{Factor de inversión indirecta} = f_I = \sum f_{i_i} + 1 = 0,425 + 0,25 + 0,25 + 1 = 1,925 \quad \text{Ec.:56}$$

Inversión fija:

$$I_F = I_E(1 + \sum f_i)f_I = \$14.052.000 * 1,925 = \$27.050.100 \quad \text{Ec.:57}$$

Inversión fija total:

$$I_{FT} = I_F + \text{Valor del terreno (520 m}^2\text{)} = \$ 27.050.100 + \$ 1077000 = \$ 28.127.100 \quad \text{Ec.:58}$$

Capital propio, se estima como el 20% de la inversión fija total:

$$I_W = 0,2 I_{FT} = 0,2 * \$ 28.127.100 = \$ 5.625.420 \quad \text{Ec.:59}$$

$$\text{Inversión total: } I_T = I_{FT} + I_W = \$ 28.127.100 + \$ 5.625.420 = \$ 33.752.520 \quad \text{Ec.:60}$$

A Dólar de hoy 19 de marzo de 2018:

$$1 \text{ USD} = \$ 20,35$$

Inversión total: $I_T \cong 1.658.600 \text{ USD}$

3.11. Alternativas

Ensanchamiento del canal:

Teniendo en cuenta que el caudal aprovechado para generar la ola, es únicamente el que incide sobre el obstáculo, se observa que queda una fracción del canal por el que circula el agua libre. Para optimizar esta situación, una alternativa puede ser rediseñar la parte del canal por la que ingresa el agua aun ancho igual a la proyección frontal del obstáculo. Una vez que el agua lo atraviesa, realizar un ensanchamiento para evitar reflujos o inconvenientes como el resalto hidráulico. De esta manera se lograría disminuir la cantidad de agua que se necesita bombear. Esto se puede ver en la Figura 67.

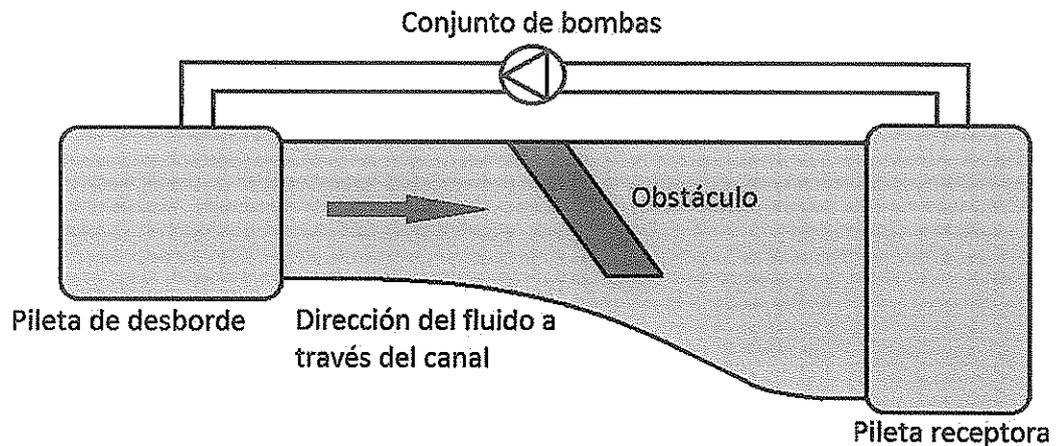


Fig.: 67. Alternativa 1.

Aumento de profundidad en zona de uso:

Como se vio antes, la profundidad de agua que circula por el canal influye considerablemente en el caudal necesario. Una alternativa posible podría ser, realizar un desnivel en la zona donde surfea el usuario, que contenga agua. De manera que en ese lugar a un mismo caudal se tendría una mayor profundidad sin depender del caudal impulsado por el conjunto de bombas. Esto se puede ver en la Figura 68.

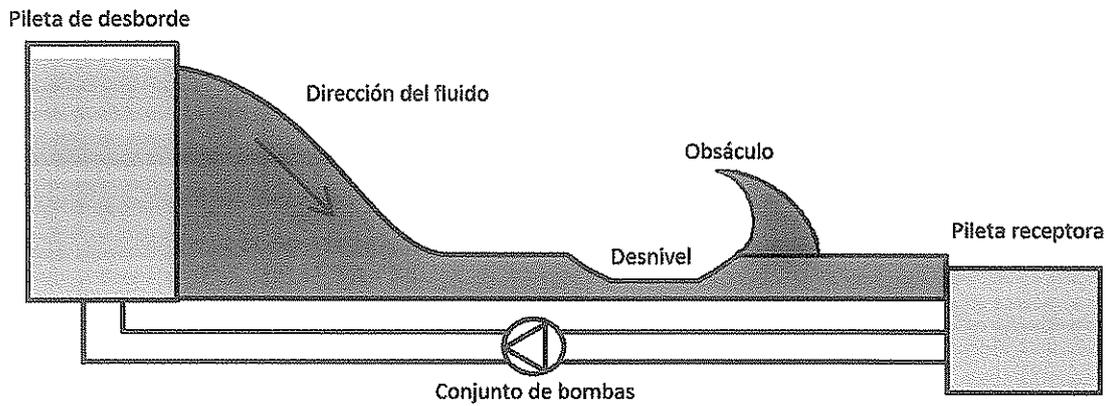


Fig.: 68. Alternativa 2.

Varios sistemas anexados:

Otra alternativa puede ser realizar varios canales contruidos en serie, colocando un reservorio entre medio de estos, de manera de estabilizar el fluido para utilizarlo como entrada en el siguiente canal. Si esto no es suficiente, se podría implementar material desplegado junto con deflectores dentro del reservorio para romper los vórtices generados en el recorrido y evitar que se formen nuevos. Esto se podría hacer cuantas veces se quiera, pero deberían respetarse las alturas de manera que el agua desborde e ingrese al siguiente circuito.

Esta alternativa tiene la ventaja de poder alimentar cuantos sistemas se quiera con el mismo conjunto de bombas, pero contemplando la limitación del espacio. Para que ésta sea viable, es necesario respetar la diferencia de alturas originales para el correcto funcionamiento de las bombas.

3.12. Conclusión

Durante la realización de este trabajo se logró el diseño preliminar de un sistema capaz de generar una ola artificial, estática y continua de características deseadas.

Se desarrolló un método de caracterización de olas, independientemente de sus dimensiones, estableciendo relaciones geométricas. Éste hizo posible el diseño de un modelo a escala que permitiera ensayar distintas formas y tamaños de obstáculo.

Fue de gran importancia la utilización del análisis dimensional, para la predicción del comportamiento del sistema en tamaño real, a partir de ensayos sobre el modelo a escala.

Se determinaron las dimensiones generales y se realizó la selección de equipos y materiales, para obtener una estimación de la inversión con el error característico de la ingeniería básica.

Por otro lado se plantearon posibles alternativas y modificaciones al proyecto, que en un futuro pudieran ser aplicadas.

De esta forma se lograron los objetivos planteados, desarrollando un sistema que soluciona las problemáticas definidas. Además representa una oportunidad de negocios viable, con la posibilidad de explotación tanto en el ámbito profesional como amateur.

Es por esto que representa una gran satisfacción personal para los miembros del grupo, dando por finalizada una etapa muy importante para el desarrollo de nuestras carreras futuras.

3.13. Bibliografía

- [1]. Fernández Díez, P. *Energía De La Olas*. Recuperado el 17 del 06 de 2017 de kimerius.com/app/download/5785621866/Energía+de+las+olas.pdf
- [2]. Espejo Hermosa, A. (2011). *Variabilidad Espacial Y Temporal Del Recurso Surf: Metodología Y Resultados* (Tesis doctoral). Universidad de Cantabria.
- [3]. Streeter, V. L. (1999). *Mecánica de los Fluidos*. Buenos Aires, Argentina: Mc Graw Hill.
- [4]. REYNOLDS, N. Y. (2006). *Fluidos.eia*. Recuperado el 7 del 7 de 2017, de *Fluidos.eia*: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/conceptosbasicosmfluidos/reynolds/numero.html>
- [5]. Alvarado Yunuary C.I. (2008) *Mecánica de Fluidos. Flujo en Canales Abiertos*. Recuperado el 23 del 08 de 2017 de <http://mecanicafluidos7mo.blogspot.com.ar/2008/04/flujo-en-canales-abiertos.html>
- [6]. Calzaretto, R. Apunte de Cátedra "Mecánica de Fluidos". UBA (Universidad de Buenos Aires). Recuperado el 05 del 07 de 2017 de: materias.fi.uba.ar/6718/Capa%20Limite.pdf
- [7]. Gherardelli Dezerega, C. Apunte de Cátedra "Introducción de la Mecánica de Fluidos", U. de Chile. Recuperado el 20 del 08 de 2017 de https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/ME33A/1/material_docente/bajar?id_material=138200
- [8]. Zucal Ricardo. Apunte de Cátedra "Cálculo de Elementos de Máquinas", Facultad de Ingeniería de UNMDP. Recuperado el 10 del 3 de 2018 de http://www3.fi.mdp.edu.ar/emaquinas/files/tornillo_fijacion.pdf