



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

UNAM

**“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA INTERACCIÓN OLEAJE-  
SUELOS FINOS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

**FRANCISCO GUTIÉRREZ GARCIA**

TUTOR:

**Dr. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN**

Instituto de Ingeniería

MÉXICO, D.F. ABRIL DE 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Señor  
**FRANCISCO GUTIERREZ GARCIA**  
Presente

**DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA**  
**COMITÉ DE TITULACIÓN**  
**FING/DICyG/SEAC/UTIT/58/2014**

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA CIVIL

**"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA INTERACCIÓN OLEAJE-SUELOS FINOS"**

**INTRODUCCIÓN**

- I. REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DEL OLEAJE**
- II. GENERALIDADES DE MECÁNICA DE SUELOS**
- III. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL**
- IV. RESULTADOS**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 8 de Abril de 2014

**EL PRESIDENTE DEL COMITÉ**

**M. EN I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ**

JLTS/MTH

## Jurado asignado

Presidente: M.I. Gabriel Moreno Pecero

Vocal: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

Secretario: M.I. José Luis Trigos Suarez

1<sup>er.</sup> Suplente: Ing. Marcos Trejo Hernández

2<sup>do.</sup> Suplente: Dr. Rodolfo Silva Casarín

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería de la UNAM

TUTOR DE TESIS:

---

Dr. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

# Agradecimientos

Al Instituto de Ingeniería, UNAM, por brindarme la oportunidad de realizar mi tesis de licenciatura para obtener el grado de Ingeniero Civil. Así como al Dr. Rodolfo Silva Casarín, por abrirme las puertas del Grupo de Costas y Puertos y formar parte del mismo, además de sus contribuciones en dicha tesis.

A mi tutor de tesis, el Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, por compartirme sus conocimientos académicos y por la valiosa asesoría en la dirección de esta tesis.

A mi valiosa familia, por su apoyo incondicional durante estos años de estudio; a mi hermosa madre Alma, a mi querido viejo J. Guadalupe y por supuesto a mi pequeña hermana María Guadalupe.

A mis estimados profesores de carrera, al M.I. Gabriel Moreno Pecero, al M.I. José Luis Trigos Suárez y al Ing. Marcos Trejo Hernández, por haber aceptado ser parte del jurado, eligiéndolos por tener gratas enseñanzas cuando tomé algunas de sus clases, además de sus aportaciones y comentarios para ésta tesis.

A mis compañeros y amigos del laboratorio de Costas y Puertos, que directa o indirectamente estuvieron involucrados en este trabajo, en especial en el manejo de instrumentación y en el desarrollo de las pruebas experimentales, Jacinto León Guzmán, Citlali Salas Barrena y Valeria Chávez Cerón.

Realizar ésta tesis no fue cosa fácil, me ha costado el esfuerzo día con día, turnando tiempos con actividades que desempeño en la ASF por las mañanas, gracias a las facilidades de dicha dependencia y a mi tutor de tesis del Instituto, he logrado realizar este trabajo que me permitirá obtener el grado de Ingeniero civil, que es el principal objetivo en mi vida en este instante.

Gracias!



# Resumen

En esta tesis se presenta un desarrollo experimental enfocado a estudiar la respuesta de una masa de suelo fino bajo la acción de oleaje, donde dicho suelo está sometido inicialmente a una carga muerta. Varias mezclas de caolín comercial y arena con agua en distintas proporciones, fue el objeto de estudio con el que, a través de la medición de las presiones de poro al interior del suelo, se analizó la interacción estructura-suelo-oleaje. Las variables periodo y altura de ola se manejaron como independientes y la presión en 28 sensores colocados al interior del suelo como el elemento indicador de la respuesta a las solicitaciones. De toda la información recabada se eligieron escenarios representativos en los que la combinación de las variables permitió observar resultados destacados. Dichos experimentos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Costas y Puertos, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Con los resultados obtenidos se logró tener un amplio panorama del comportamiento que existe entre oleaje-estructura-fondo marino, mediante una serie de eventos que se fueron modificando de acuerdo al resultado obtenido en cada prueba; manipulando las variables presentes en el desarrollo, como la cantidad de finos, la cantidad de agua y el tipo de oleaje. Mediante el análisis de una serie de gráficas producto del registro obtenido de los sensores de presión, se comprendió la gran influencia del caolín con suelo arenoso, es decir, la combinación de caolín y arena en una proporción adecuada puede ser un material que permita mejoras sobre el comportamiento de alguna estructura sobre el fondo marino bajo la acción de oleaje, disminuyendo las posibilidades de falla en el suelo, calor que éste estudio realizado y presentado no da una solución universal, sino un paso en el estudio de este fenómeno, donde aún existen incógnitas por resolver en beneficio de la ingeniería y de la sociedad.

# Índice general

Resumen	i
Índice general	ii
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	vii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación .....	4
1.2 Objetivos .....	6
1.3 Descripción del trabajo escrito .....	7
<b>2. REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DEL OLEAJE</b>	<b>8</b>
2.1 Descripción de las oscilaciones gravitatorias del mar .....	8
2.1.1 Clasificación de acuerdo con la profundidad relativa .....	9
2.1.2 Clasificación de las ondas oceánicas .....	10
2.1.3 Clasificación del oleaje .....	12
2.1.4 Oleaje local o <i>sea</i> .....	12
2.1.5 Oleaje distante o <i>swell</i> .....	13
2.1.6 Fuentes de datos de oleaje .....	14
2.2 Teorías de ondas .....	14
2.2.1 El oleaje como proceso estocástico .....	14
2.2.2 El oleaje como un proceso estacionario .....	17
2.2.3 El oleaje como proceso ergódico .....	18
2.2.4 Modelo matemático-estadístico del oleaje .....	20
2.2.5 Definición de estado de mar .....	22
2.2.6 Descripción estadística temporal y espectral de un estado de mar .....	23
2.3 Análisis temporal de estados de mar .....	23
2.3.1 La muestra .....	23
2.3.1.1 Corrección del nivel medio .....	25
2.3.1.2 Caracterización de la señal .....	27
2.3.1.3 Determinación de parámetros del oleaje .....	30
2.3.1.4 Determinación de parámetros de las velocidades orbitales.....	32
2.3.1.5 Determinación de la dirección del oleaje .....	32
2.3.1.6 Agrupamiento del oleaje .....	33

<b>3. GENERALIDADES DE MECÁNICA DE SUELOS</b>	<b>39</b>
3.1 <i>Caracterización de mecánica de suelos</i>	39
3.1.1 Distribución granulométrica	39
3.1.1.1 Análisis granulométrico por mallas	39
3.1.1.2 Análisis granulométrico con el hidrómetro	41
3.1.2 Límites del tamaño para suelos	43
3.2 <i>Parámetros representativos de suelos finos</i>	44
3.2.1 Límites de Atterberg	44
3.2.2 Consolidación: Consolidaciones generales	45
<b>4. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL</b>	<b>47</b>
4.1 <i>Instalación experimental</i>	47
4.1.1 Modelo físico	47
4.1.1.1 Canal de oleaje	47
4.1.2 Instrumentación	49
4.1.2.1 Sensores de nivel (SN_XX)	49
4.1.2.2 Sensores de presión (KD_XX)	50
4.1.2.3 Sistema de medición: imc SPARTAN	52
4.1.3 Caracterización del material ensayado	53
4.1.3.1 Material granular	53
4.1.3.2 Material fino	59
4.2 <i>Metodología experimental</i>	61
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>68</b>
5.1 <i>Análisis del material empleado</i>	68
5.2 <i>Respuesta al porcentaje de finos</i>	70
5.2.1 Distribución horizontal de la presión de poro	71
5.2.2 Distribución vertical de la presión de poro	77
5.3 <i>Respuesta a la cantidad de agua</i>	82
5.3.1 Distribución horizontal por la presión de poro	83
5.3.2 Distribución vertical de la presión de poro	89
5.4 <i>Respuesta por el tipo de oleaje</i>	93
5.4.1 Distribución horizontal de la presión de poro	94
5.4.2 Distribución vertical de la presión de poro	99
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>104</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>106</b>

# Índice de figuras

1.1	Deformación elástica de un suelo bajo la acción de ondas progresivas .....	1
1.2	Dispositivo experimental empleado por Feng .....	3
1.3	Dispositivo experimental empleado por Soltampour et al, 2010 .....	3
1.4	Accidente en la plataforma Usumacinta .....	5
1.5	Reparación del rompeolas en las islas Azores .....	5
2.1	Nomenclatura Básica de una Ola .....	9
2.2	Influencia del fondo del océano sobre el perfil de las olas .....	10
2.3	Periodo-energía de las ondas .....	11
2.4	Generación de oleaje .....	13
2.5	Estructura del oleaje aleatorio .....	15
2.6	Ejemplo de una señal aleatoria .....	16
2.7	Parámetros que definen el oleaje .....	23
2.8	Marea semidiurna .....	26
2.9	Discretización de la altura de la ola utilizando el método de pasos ascendentes .....	28
2.10	Definición de olas con el método de pasos descendentes .....	28
2.11	Definición de olas por el método de distancias ente crestas .....	29
2.12	Separación de olas por medio del método de valles .....	29
2.13	Ubicación de un aparato de medición en la costa .....	33
2.14	Ejemplo de un registro de oleaje con agrupamiento .....	34
2.15	Definición de los paquetes de olas .....	35
2.16	Ejemplo de SIWEH con un factor de agrupamiento $GF=1.46$ .....	36
2.17	Ejemplo de SIWEH con un factor de agrupamiento $GF = 0.78$ .....	36
2.18	Ejemplo de SIWEH con un factor de agrupamiento $GF=0.14$ .....	37
2.19	Diagrama de flujo para el análisis temporal de señales de oleaje sin considerar la evaluación del agrupamiento del oleaje .....	38
3.1	Granulometría de un suelo de grano grueso obtenida por un análisis granulométrico por mallas .....	40
3.2	Análisis granulométrico con el hidrómetro .....	42
3.3	Definición de los límites de Atterberg .....	44
3.4	Principios de consolidación .....	46
4.1	Canal de oleaje .....	47
4.2	Pala generadora de oleaje .....	48

4.3	Charola para la colocación del suelo dentro del canal de oleaje .....	48
4.4	Sensor de nivel y Monitores para los sensores de nivel .....	49
4.5	Sensores de presión .....	50
4.6	Distribución de los sensores de nivel (SN) y de presión (KD).....	51
4.7	Sistema de medición imc SPARTAN .....	52
4.8	Ubicación geográfica del material granular obtenido para los ensayos .....	53
4.9	CAMSIZER de la firma Retsch Technology .....	55
4.10	CAMSIZER software .....	55
4.11	Resultado del análisis granulométrico, parte 1.....	56
4.12	Resultado del análisis granulométrico, parte 2.....	57
4.13	Definición de la variable $x_{cmin}$ .....	58
4.14	Caolín comercial .....	59
4.15	Curva granulométrica del caolín .....	60
4.16	Mezcla en seco de caolín y arena .....	61
4.17	Mezcla del material en seco con la proporción de agua correspondiente .....	61
4.18	Colocación del material (suelo) en el cajón y de la cimentación de la estructura .....	62
4.19	Distribución de cubos dentro del cajón de madera.....	62
4.20	Posición final de la estructura (carga muerta) .....	63
4.21	Calibración e inicio del sistema de olas .....	63
4.22	Ensayos con 100A .....	64
4.23	Ubicación de la estructura sobre el suelo así como su colocación antes y después de verter agua en el canal .....	65
4.24	Desplazamientos de la estructura .....	66
4.25	Ensayos con 100C .....	67
5.1	Conjunto de olas en el canal de oleaje .....	68
5.2	Series de tiempo de los sensores de la Fila 1 para el caso 100A .....	72
5.3	Series de tiempo de los sensores de la Fila 1 para el caso 70C30A .....	73
5.4	Series de tiempo de los sensores de la Fila 1 para el caso 85C15A .....	74
5.5	Series de tiempo de los sensores de la Fila 1 para el caso 100C .....	76
5.6	Series de tiempo de los sensores de la Columna 6 para el caso 100A .....	78
5.7	Series de tiempo de los sensores de la Columna 6 para el caso 70C30A .....	79
5.8	Series de tiempo de los sensores de la Columna 6 para el caso 85C15A .....	80
5.9	Series de tiempo de los sensores de la Columna 6 para el caso 100C .....	81
5.10	Series de tiempo de los sensores de la Fila 2 para la prueba A .....	84
5.11	Series de tiempo de los sensores de la Fila 2 para la prueba B .....	86
5.12	Series de tiempo de los sensores de la Fila 2 para la prueba C .....	87
5.13	Series de tiempo de los sensores de la Columna 3 para la prueba A .....	90
5.14	Series de tiempo de los sensores de la Columna 3 para la prueba B .....	91
5.15	Series de tiempo de los sensores de la Columna 3 para la prueba C .....	92
5.16	Series de tiempo de los sensores de la Fila 3 para la prueba regular, 100A .....	95
5.17	Series de tiempo de los sensores de la Fila 3 para la prueba irregular, 100A .....	96

5.18	Series de tiempo de los sensores de la Fila 3 para la prueba regular, 70C30A .....	97
5.19	Series de tiempo de los sensores de la Fila 3 para la prueba irregular, 70C30A .....	98
5.20	Series de tiempo de los sensores de la Columna 5 para la prueba regular, 100A .....	100
5.21	Series de tiempo de los sensores de la Columna 5 para la prueba irregular, 100A .....	101
5.22	Series de tiempo de los sensores de la Columna 5 para la prueba regular, 70C30A .....	102
5.23	Series de tiempo de los sensores de la Columna 5 para la prueba irregular, 70C30A .....	103

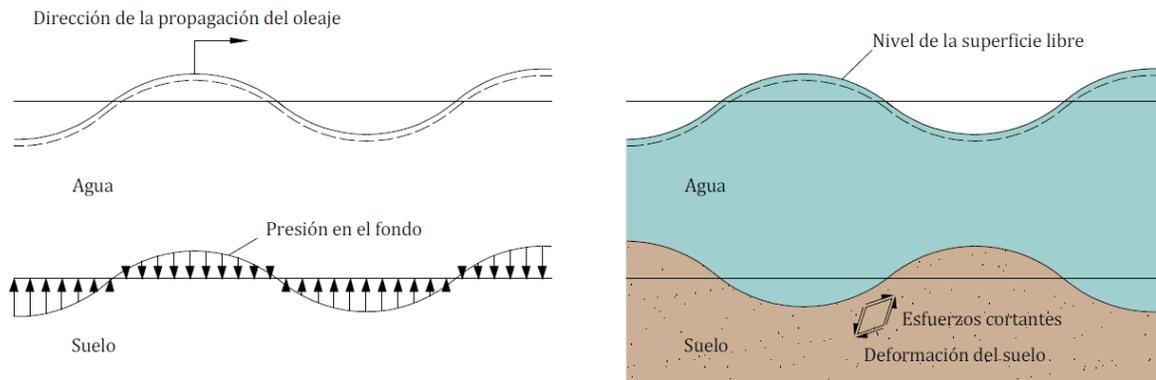
# Índice de tablas

2.1	Clasificación de las ondas por su periodo .....	11
2.2	Metodología para el análisis temporal del oleaje .....	24
3.1	Tamaños de cribas U.S. Standard .....	40
3.2	Límites de tamaño de suelos separados .....	43
3.3	Valores típicos de límites líquido y plástico para algunos minerales y suelos arcillosos .....	45
4.1	Ubicación espacial de los sensores de presión .....	51
4.2	Propiedades de la arena .....	58
4.3	Ficha técnica del caolín .....	59
4.4	Propiedades plásticas del caolín .....	60
4.5	Ensayos con el suelo de 100A .....	64
4.6	Ensayos con el suelo de 70C30A .....	65
4.7	Ensayos con el suelo de 85C15A .....	66
4.8	Ensayos con el suelo de 100C .....	67
5.1	Pruebas para la cantidad de finos .....	70
5.2	Pruebas para la cantidad de agua .....	82
5.3	Pruebas para la cantidad de agua .....	93



# 1. INTRODUCCIÓN

Al propagarse el oleaje sobre el fondo marino, el suelo se encuentra sometido a una deformación periódica provocada por los esfuerzos cortantes y presiones actuando sobre él que son resultado de la oscilación en la presión de poro en exceso (presión de poro oscilatoria), lo cual provoca el reacomodo de las partículas sólidas que ocuparán los vacíos del suelo. Un esquema simplificado de este fenómeno se muestra en la *Fig. 1.1*.



*Fig. 1.1* Deformación elástica de un suelo bajo la acción de ondas progresivas  
(Modificada de Sumer y FredsØe, 2002)

Si la masa de suelo tiene una permeabilidad tan baja que pueda considerarse en condiciones no drenadas, como ocurre en el caso de materiales finos, y tiene una historia corta de consolidación, el reacomodo comprimirá el agua que se encontraba en los poros y la presión presentará un aumento y acumulación de ella (presión de poro residual). Así, mientras el oleaje continúa actuando, la presión de poro seguirá aumentando y provocará una reducción importante en la resistencia del suelo. Si este aumento llega a superar la sobrepresión, el suelo llegará al estado de licuefacción, las partículas sólidas perderán su configuración y quedarán libres, permitiendo así que se comporten como un fluido (Sumer et al., 1999). En cambio, si el tipo de suelo permite el drenado del agua que se encuentra en los poros, la presión oscilará como resultado de la acción del oleaje, pero no existirá una acumulación tal que permita el aumento suficiente para superar la sobrecarga de presión y no se llegará al estado de licuefacción. Por otro lado, las fuerzas gravitatorias y las tormentas inducen también una acumulación de pequeñas deformaciones irreversibles por medio de esfuerzos pico repetitivos inducidos en el suelo (Oumeraci, 1994) que

pueden llegar a superar la resistencia al corte, generando el movimiento horizontal del sedimento que se traducirá en la inestabilidad del fondo.

Se encuentran numerosos trabajos en los que se afronta la realización de ensayos de interacción oleaje-fango.

En 1987, Maa y Mehta ejecutaron dos series de ensayos, la primera para caracterizar las propiedades del sedimento y la segunda para medir la erosión. Se ensayaron dos tipos de fangos: una caolinita comercial (tamaño medio de partícula 1mm) y fango proveniente del estuario de Cedar Key, Florida (tamaño 2  $\mu\text{m}$ ). Ambos fangos estaban en estado floculado. El montaje del fango en el canal de oleaje se inició vertiendo una mezcla de agua y sedimento y dejándolo consolidar entre 2 y 14 días. Se midieron datos de altura de ola (sensores de nivel de capacitancia), presiones sobre el fondo (sensores de presión), concentración de sedimento en el agua (dispositivo óptico), velocidades orbitales (correntómetro). Además, se realizó la caracterización geológica de los fangos ensayados. La conclusión principal de su estudio fue que el oleaje debilita el lecho de fango facilitando su erosión. En cambio, el material erosionado tiende a quedarse en la capa cercana al lecho. No se ha estudiado el efecto de las corrientes, aunque es de esperar que el oleaje y las corrientes colaboren en la resuspensión y transporte del material del lecho. Por otro lado, el lecho provoca sobre el oleaje una atenuación de su energía.

Posteriormente, en 1989, Lindenberg et al analizaron la licuefacción en el suelo fangoso debida a la acción del oleaje. Para ello realizaron una serie de experimentos en canal de oleaje (en Delft Hydraulics), con una longitud de 17 metros, y anchura y altura de 0.3 y 0.5 metros. Un falso suelo de 5 centímetros de espesor se montó bajo las zonas de generación y absorción de oleaje; el falso suelo se rellenó con fango en los 10 metros centrales del canal, poniendo paredes separadoras que separasen esta región de las que no tenían fango. Se dejó consolidarse el suelo (caolinita) durante 3 días, tras los cuales se retiraron las paredes separadoras y se llenó el canal lentamente con agua salada. La profundidad de agua fue de 0.25 m en todos los ensayos.

La metodología de trabajo de Lindenberg se dividió en dos fases: en la Fase 1 se generó un oleaje de altura constante durante 3 horas, después se aumentó la altura de ola para finalmente detener el oleaje. Se dejó consolidar el sedimento durante un periodo de 20 a 40 horas para después pasar a la Fase 2, donde se repitieron las condiciones de oleaje de la Fase 1. Se ensayaron varios tipos de fangos: caolinita al 100%, arena más caolinita, y arena al 100%.

Ya en 1992, Feng afronta el estudio de la fluidificación de los suelos cohesivos por la acción del oleaje, mediante ensayos en laboratorio. Los ensayos se realizaron en un canal de oleaje de 20 m de longitud, 46 cm de anchura y 45 cm de altura, en el que se colocó un fondo de fango de 14 cm de profundidad y con pendientes de 1:12 a ambos lados (*Fig. 1.2*). Antes de realizar los ensayos con fango se colocó un falso suelo sobre la zanja para verificar las condiciones de oleaje de los ensayos. Se ensayaron dos profundidades de agua (15 y 20 cm), y 4 periodos (0.5, 1, 1.5 y 2

segundos). Bajo condiciones de oleaje regular, se midieron datos de superficie libre, velocidad horizontal del flujo, presión total y de poro.

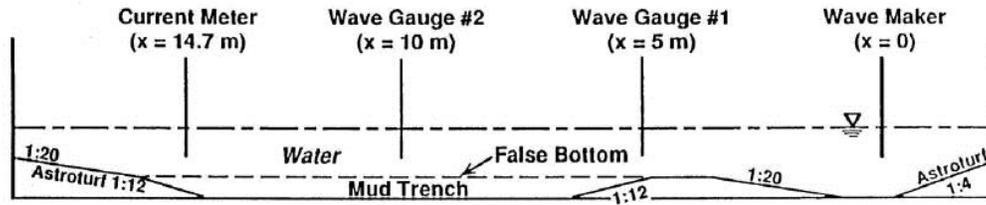


Fig. 1.2 Dispositivo experimental empleado por Feng (Feng, 1992)

En el mismo canal de oleaje se estudió la contribución de la capa de fango a la atenuación del oleaje (Robillard, 2009). En este caso se colocó el fango en una zanja de 12 centímetros de profundidad y 5 metros de longitud, con laterales de inclinación 1:12, y se llenó el canal con agua salada a una profundidad de 0.19 metros. Se pudo demostrar que el comportamiento del fango (viscoelástico o puramente viscoso) depende de la profundidad de agua.

Soltampour et al. (2010) incidieron en el análisis de la disipación del oleaje debido a la existencia de fangos. Los ensayos se realizaron en el canal de oleaje del Laboratorio de Modelos Hidráulicos de la Universidad de Tecnología K. N. Toosi de Teherán (Irán), con 12.5 metros de longitud, 0.30 metros de anchura y 0.50 metros de profundidad. Se introdujo en el canal un falso suelo para poder confinar el fango (Fig. 1.3). El fango (caolinita comercial y agua potable) se colocó en una longitud de 1.5 metros y una profundidad de 8 centímetros. Se ensayaron periodos de 0.7-1.4 segundos. Se concluyó que la disminución de altura de ola sobre la capa de fango puede aproximarse adecuadamente con un ajuste exponencial, en concordancia con los resultados obtenidos en trabajos anteriores por otros investigadores. Se observó además que el ratio de atenuación de altura de ola aumenta débilmente con el incremento de altura de ola.

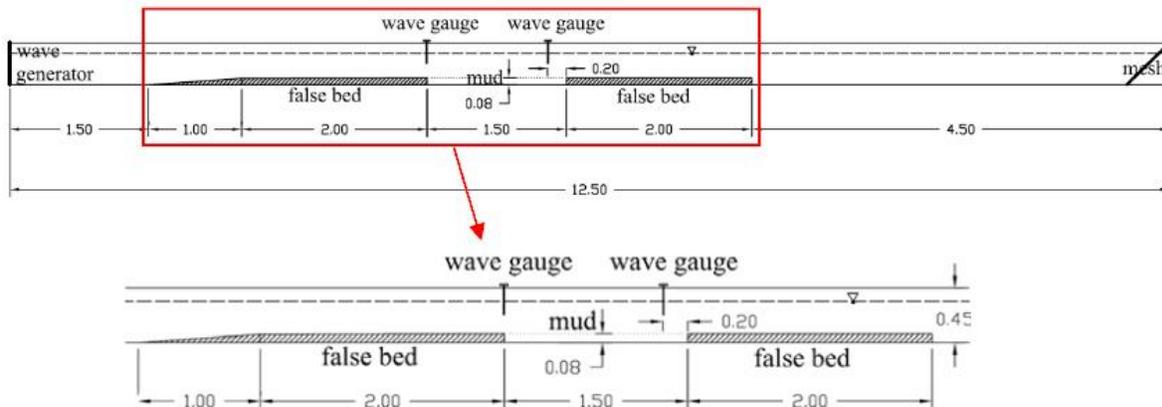


Fig.1.3 Dispositivo experimental empleado por Soltampour et al, 2010

### 1.1 Motivación

En 1978, Bruun realizó un estudio en el que agrupó las posibles causas de falla de un rompeolas, sometido a la acción del oleaje. Estas causas son las siguientes:

1. Extracción de las piezas del manto principal a causa del oleaje.
2. Movimientos continuos de cantos del manto principal, sin grandes desplazamientos instantáneos, pero capaces de deformar a largo plazo la geometría del manto principal. Lo anterior se puede considerar como una rotura por fatiga.
3. Rotura de las piezas del manto principal provocada por choques entre las piezas o por superar la capacidad de tensión de la pieza
4. Desplazamiento del manto principal por falta de fricción con las capas subyacentes, este tipo de falla es más peligroso mientras más rígido sea el talud.
5. Fallas debidas a la falta de capacidad de sustentación del terreno de cimentación.
6. Erosiones al pie del dique o socavaciones en la parte inferior del mismo.
7. Falta de compacidad en las capas subyacentes, que al permitir el paso del agua al interior, producen fuerzas de levantamiento sobre el espaldón y capas inferiores.
8. Avería en el manto interior del dique y coronación por rebase de la ola.
9. Socavación en la base del espaldón.
10. Discrepancias en las características de los materiales.
11. Defectos de construcción que crean zonas débiles.

El posible conjunto de causas de falla se resume en los siguientes tres grupos:

- a) Falla del manto principal por movimiento o pérdida de piezas
- b) Averías de origen geotécnico
- c) Errores de construcción

Por la falta de un entendimiento correcto de la interacción oleaje-estructura-suelo, en México, como en otras partes del mundo, una de las principales causas de daños a la infraestructura marina se originan por el fallo del sustrato que las soporta (averías de origen geotécnico).

La *Fig. 1.4* muestra el accidente ocurrido en 2007 en la plataforma petrolera de Pemex, ubicada en la zona de Campeche, en el Golfo de México, uno de los factores a este desastre que cobro la vida de 22 personas, fue a la interacción entre el lecho marino, que es un material arcilloso, y la zapata (MAT) de la plataforma.



*Fig.1.4* Accidente en la plataforma Usumacinta  
(Tomada de [www.pemex.com](http://www.pemex.com))

En la siguiente imagen (*Fig. 1.5*), se muestra un rompeolas que sufrió daños crónicos desde su construcción en 1961 como resultado de una severa exposición a grandes tormentas del Atlántico Norte, con una falla mayor que ocurrió en 2001. La empresa Baird colaboró con la Armada de EE.UU., para reparar el rompeolas que protege los establecimientos militares de EE.UU. en las islas Azores.



*Fig.1.5* Reparación del rompeolas en las islas Azores  
(Tomada de <http://www.baird.com>)



## *1.2 Objetivos*

El objetivo central de la presente tesis es presentar un estudio analítico-experimental, que sirva como punto de partida, sobre el comportamiento de suelos marinos bajo acción de oleaje, mediante una serie de pruebas de mezclas de caolín comercial y arena en distintas proporciones como simulación del fondo marino, analizando el conjunto de presiones resultantes que existen bajo dicha fuerza, y de ésta manera poder comprender el sistema en busca de mejoras ya sea al suelo marino o al diseño de las estructuras de protección costera a fin de garantizar la seguridad de las actividades que se desarrollan en el litoral.

Los objetivos particulares son:

1. Estudiar el efecto de la acción de oleaje sobre suelos marinos, mediante una simulación de suelos finos y gruesos en distintas proporciones.
2. Encontrar alguna tendencia en los distintos tipos de suelos con el fin de provocar alguna fallar geotécnica y a la vez proponer algunas mejoras para evitar o reducir éste fenómeno.
3. Realizar y proponer modificaciones tanto al modelo como a la metodología experimental para futuras investigaciones.



### *1.3 Descripción del trabajo escrito*

La tesis está organizada en seis capítulos. Se describe el contenido de cada uno de ellos a continuación:

- Capítulo 1. **Introducción:** Dicho capítulo hace una mención del fenómeno ocurrido en la interacción oleaje-suelos finos, algunos estudios que se han llevado a cabo en el ámbito internacional, así como los motivos por los cuales se decidió realizar éste tesis particularmente sobre éste tema.
- Capítulo 2. **Representación matemática del oleaje:** Este capítulo presenta aspectos generales del oleaje, conceptos y clasificaciones básicas, las teorías de ondas más importantes, así como el análisis temporal de los estados de mar.
- Capítulo 3. **Generalidades de mecánica de suelos:** Este capítulo hace referencia a algunas propiedades geotécnicas del suelo, como la distribución del tamaño del grano, la plasticidad y la compresibilidad.
- Capítulo 4. **Descripción del trabajo experimental:** Capítulo donde se describe el área de trabajo en el Laboratorio de Costas y Puertos, mencionando la instrumentación y materiales con los que se llevaron a cabo los experimentos, así como el procedimiento para realizar los ensayos con los distintos tipos de suelos.
- Capítulo 5. **Resultados:** Este capítulo presenta los resultados obtenidos de los distintos tipos de suelos que estuvieron bajo la acción de oleaje. Mediante una serie de gráficas que representan cada caso ensayado, así como la comparación entre los sensores de presión en un plano horizontal y vertical.
- Capítulo 6. **Conclusiones:** En éste último capítulo se presentan las conclusiones a las cuales se llegaron de acuerdo al análisis realizado en cada tipo de suelo, dando razón a si se llegó a un estado de falla o algún otro fenómeno no previsto, y tener argumentos para proponer algunas recomendaciones en el modelo y metodología experimental.



## 2. REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DEL OLEAJE

### *2.1 Descripción de las oscilaciones gravitatorias del mar*

Durante el periodo definido entre los siglos XVI y XIX, las contribuciones más importantes, en el campo de la ingeniería costera, se dieron en el plano teórico, ya que en ese tiempo se desarrollaron la mayor parte de las teorías que se emplean para estudiar el oleaje, como las de Airy (1845) y Stokes (1847). El primer estudio de predicción de oleaje fue desarrollado por Sverdrup y Munk (1947) durante la Segunda Guerra Mundial, aunque sus resultados no estuvieron disponibles hasta 1947.

Quizá la forma más sencilla de poder entender un estado de mar es idealizado, es decir, aceptar que está definido por ondas sinusoidales perfectas, con crestas y valles de idéntica forma, un periodo único y un movimiento orbital progresivo. Bajo este supuesto, sobre una escala espacial, la longitud de onda,  $L$ , se determina como la distancia horizontal entre dos crestas adyacentes, mientras que la distancia vertical desde el máximo de la cresta hasta el fondo del valle definen la altura de la ola,  $H$  (*ver Fig. 2.1*). En la escala temporal, el tiempo necesario para que dos crestas consecutivas pasen por el mismo punto define al periodo de la onda,  $T$ , y su inverso que es la frecuencia,  $f$ . Finalmente, la velocidad con la cual una cresta se mueve horizontalmente a través de la superficie del mar es definida como celeridad,  $c$ , o velocidad de fase. En general, la ecuación para la celeridad ( $c=L/T$ ) es directamente proporcional a la longitud de onda o periodo y a la profundidad,  $h$ .

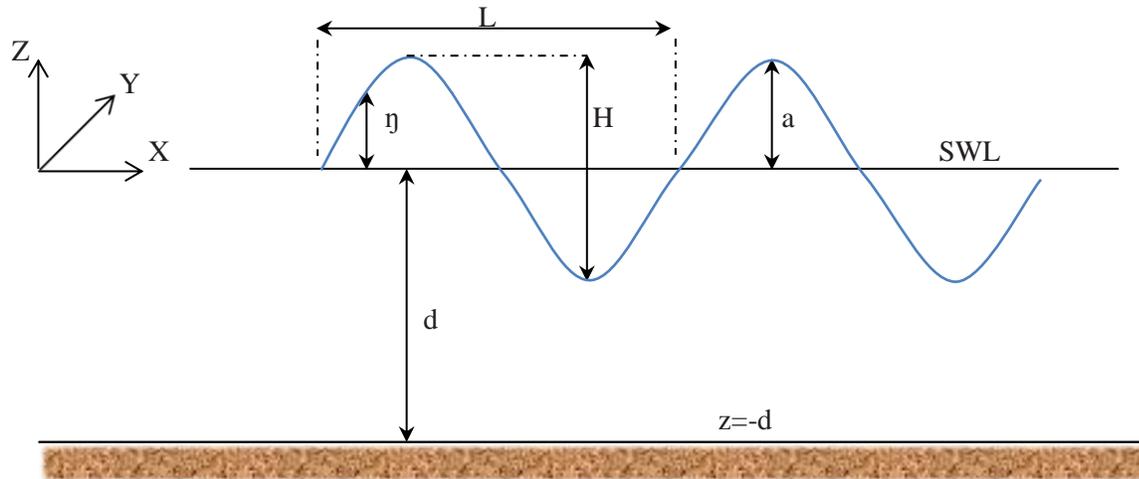


Fig. 2.1 Nomenclatura Básica de una Ola (Valdés, 2005)

El oleaje es un fenómeno que está determinado por la acción de las fuerzas de la naturaleza en cualquier superficie libre del agua, dichas fuerzas condicionan el tipo de ola que será inducida. La más obvia de estas fuerzas es la acción del viento sobre la superficie del mar. Dado que el fenómeno del oleaje no se repite en el espacio ni en el tiempo y cuando se observa una altura de ola en un punto dado del mar, no se puede precisar cuál será la altura de ola siguiente en ese punto. Considerando la gran variabilidad del oleaje real, la forma más razonable de caracterizarlo es a través de los métodos estadísticos, tratando al oleaje como un fenómeno aleatorio.

Siguiendo las ideas anteriores, existen al menos tres formas de clasificar el movimiento oscilatorio que se presenta en el mar, las cuales corresponden a la profundidad relativa sobre la cual se propaga, la fuerza principal que lo genera y su periodo de onda.

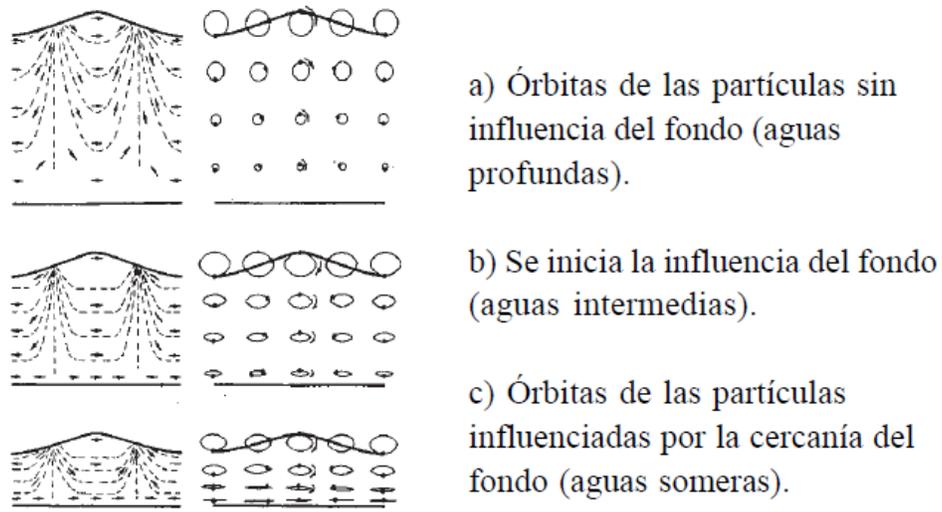
### 2.1.1 Clasificación de acuerdo con la profundidad relativa

Teóricamente, las ecuaciones que representan al oleaje que se propaga en cualquier profundidad relativa,  $h/L$ , se denominan ondas en aguas intermedias o en zona de transición. Frecuentemente, este tipo de ecuaciones se simplifican asumiendo que las ondas sólo son dependientes de su longitud o periodo,  $T$ , y de la profundidad. Esto conlleva a dos extremos de aproximaciones según su profundidad relativa:

- Aguas profundas. Cuando la profundidad  $h$  es igual o mayor que la mitad de su longitud de onda,  $L$ , el oleaje no experimenta modificaciones debidas a la profundidad.
- Aguas poco profundas. Cuando la profundidad  $h$  es igual o menor que un vigésimo de su longitud de onda,  $L$ , el oleaje está completamente controlado por la profundidad del agua.

Visto de otra forma, la clasificación del oleaje se puede también realizar utilizando el concepto de la celeridad, que es una relación directa entre la frecuencia y la longitud de onda.

Ambas condiciones repercuten en las velocidades y trayectorias de las partículas del agua en la columna vertical, según se aprecia en la *Fig.2.2*.



*Fig. 2.2* Influencia del fondo del océano sobre el perfil de las olas (Silvester, 1974)

### 2.1.2 Clasificación de las ondas oceánicas

Las ondas que componen un registro de oleaje son de una amplia gama de periodos, alturas y longitudes. De acuerdo con su periodo, fuerza generadora y la cantidad de energía que normalmente porta, se pueden designar los tipos de ondas, que se presentan en la *Tabla 2.1* y *Fig. 2.3*.

Nombre	Periodo (T)	Longitud (L)	Altura (H)	Fuerza generadora	Fuerza restauradora
Capilares	0 a 0.1 s	2 a 7 cm	1 a 2 mm	Viento	Tensión superficial
Ultragravedad	0.1 a 1 s	Centímetros	Centímetros	Viento	Tensión superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30 s	De metros a cientos de metros	De metros a cientos 15 m	Viento	Gravedad
Infragravedad	30 s a 30 min	100 a 200 m	Pequeña	Viento	Gravedad, fuerza de Coriolis
Periodo largo	5 min a 24 h	Pueden llegar a ser de escala planetaria	1 a 5 m	Sismo, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	Gravedad, fuerza de Coriolis
Transmarea	Más de 24 h	-	0 a 12 m	Oscilaciones climáticas	Gravedad, fuerza de Coriolis

Tabla 2.1 Clasificación de las ondas por su periodo (Johnson et.al, 1978)

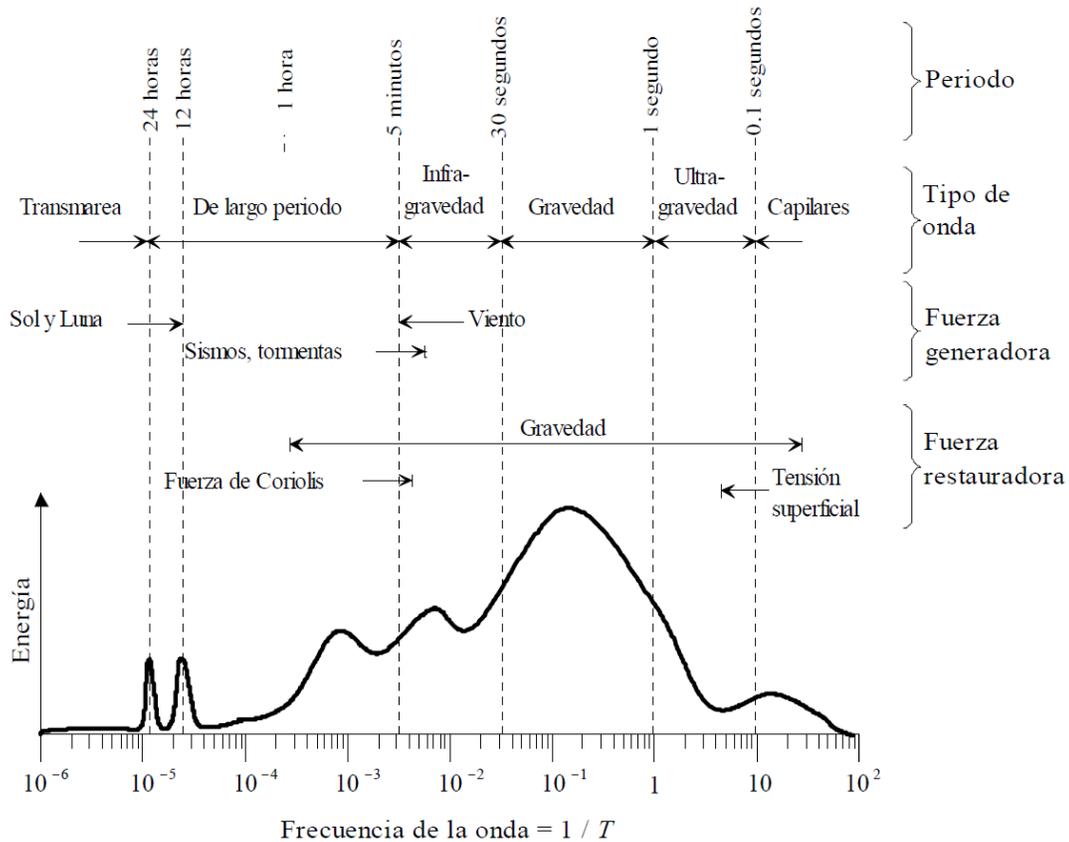


Fig. 2.3 Periodo-energía de las ondas (Kinsman, 1965)

Como se ve en la *Tabla 1.1* y *Fig. 2.3*, las ondas en el océano pueden ser clasificadas de varias formas, una clasificación utiliza las fuerzas que generan al oleaje, las cuales a su vez están asociadas con una longitud de onda característica. Así, por ejemplo:

- Las fuerzas meteorológicas (viento, presión del aire) generan el oleaje local y distante.
- Los maremotos o terremotos generan grandes olas conocidas como tsunamis, los cuales normalmente son clasificados como ondas en aguas poco profundas, ya que su longitud de onda es mucho mayor que la profundidad donde se propagan.
- Las mareas (fuerzas astronómicas) siempre se propagan de acuerdo con su longitud de onda en aguas poco profundas, por lo que son consideradas como ondas largas.

### 2.1.3 Clasificación del oleaje

En ingeniería oceanográfica, se llama área de generación (*fetch*) a la región donde existe transferencia de energía del viento hacia la superficie del mar. Ahí el fenómeno es completamente aleatorio. El oleaje se propaga en diferentes direcciones, aunque la dirección dominante es la del viento. Las olas pueden tener diversas características dependiendo de las fuerzas que influyen en su generación.

De acuerdo con su génesis, se suelen distinguir dos tipos extremos de oleaje, entre los cuales existen un sinnúmero de estados intermedios. Se denominan por las palabras inglesas, universalmente aceptadas, *sea* y *swell* o su traducción al español como *oleaje local* y *oleaje distante*, respectivamente (*ver Fig. 2.4*).

### 2.1.4 Oleaje local o *sea*

Este tipo de oleaje se produce en la zona de generación en alta mar, donde raramente se aprecian crestas de cierta longitud y es difícil observar un periodo bien definido. Las características que definen este tipo de oleaje son:

- Gran irregularidad, ya que la altura de la superficie líquida es impredecible, carece de periodicidad.
- Asimetría o gran desigualdad entre la forma del valle y la cresta de las olas.
- Gran peralte de las olas. Las olas presentan una altura relativamente grande para su longitud de onda.

### 2.1.5 Oleaje distante o *swell*

Cuando el oleaje se propaga y abandona el área de generación ocurren tres fenómenos (Losada y Jiménez-Curto, 1978):

- Pierden energía, las olas viajan a expensas de su propia energía (decaimiento).
- El oleaje sufre una doble dispersión. Una angular, en la que las olas se dispersan en todas direcciones, y otra radial, debida a que la velocidad es función directa del periodo, por lo que las olas más largas viajan más rápido que las más cortas. Se produce un filtrado de olas.
- Fenómeno de soldadura, según el cual las ondas de periodos cercanos se fusionan en largas crestas de onda, lo cual origina que la superficie caótica se simplifique. Al envejecer el oleaje y especialmente cuando abandona el área de generación va tendiendo a un oleaje de tipo *swell*.

Este tipo de oleaje se puede observar sobre la plataforma costera, especialmente en profundidades reducidas, donde a los fenómenos descritos anteriormente se añade el de la refracción, que hace que las olas tiendan a progresar en forma paralela a las líneas batimétricas. Así, el oleaje que se acerca a la costa es más regular, forma frentes de cresta muy grandes y las diferencias entre periodos y longitudes de onda son mínimas, surge una periodicidad, las direcciones no son tan dispersas, y se presentan ciertas direcciones predominantes. Todo esto proporciona un cierto orden al fenómeno.

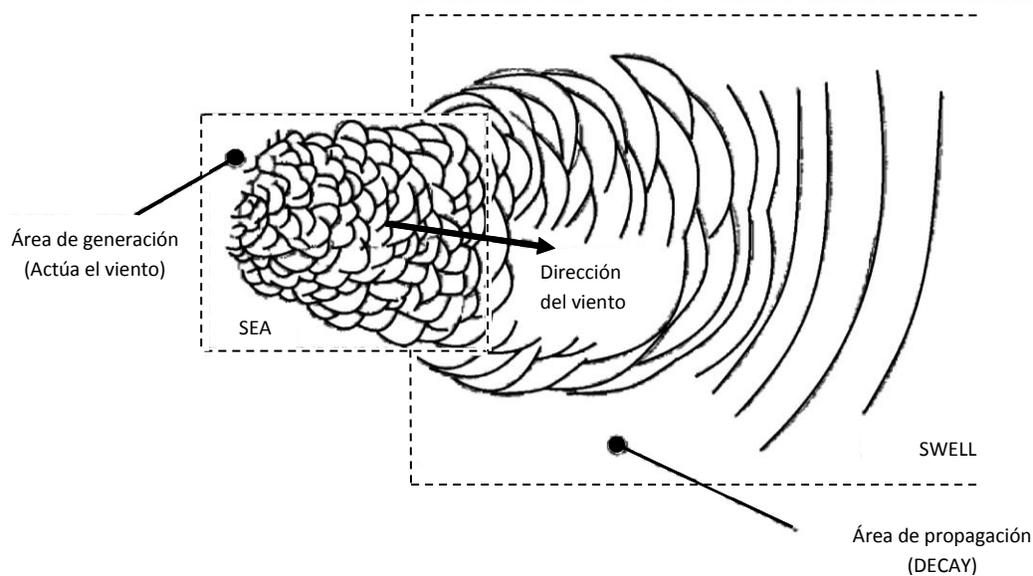


Fig. 2.4 Generación de oleaje (Valdés, 2005)

### 2.1.6 Fuentes de datos de oleaje

Dada la gran gama de equipos y técnicas existentes en la actualidad, sólo se profundizará más sobre el tratamiento de señales digitales y la predicción de oleaje a través de modelos paramétricos.

Por otro lado, cabe señalar que a grandes rasgos las fuentes de datos más comunes pueden ser de los siguientes tipos:

#### Instrumental directo

- Medidores de resistencia (ej. sensores de nivel).
- Equipos acústicos (ej. los equipos que funcionan bajo el principio *doppler*).
- Sensores de presión.

#### No instrumental o instrumental indirecto

- Equipos ópticos (ej. cámaras de video y satélites).
- Datos visuales (ej. medidos por barcos en ruta).
- Retroanálisis basado en información de datos meteorológicos (ej. a través de modelos paramétricos y de tercera generación como el WAM, *wave action model*).

## 2.2 Teorías de ondas

### 2.2.1 El oleaje como proceso estocástico

En general, las olas en el mar no son regulares, es decir no tienen periodicidad con respecto al tiempo, sino que, por el contrario, el oleaje es un proceso esencialmente aleatorio (*ver Fig. 2.5*). El oleaje puede ser considerado en términos prácticos como un conjunto de ondas viajando en diferentes direcciones,  $\theta_i$ , con diferentes amplitudes,  $a_i$ , frecuencias,  $\sigma_i$ , y fases,  $\varepsilon_i$ , de tal forma que puede ser estudiado como una superposición lineal de ondas armónicas simples, es decir que el perfil de la superficie libre,  $\eta_i(x, y, t)$ , puede ser descrito como:

$$\eta_i(x, y, t) = \sum_i a_i \cos \left[ \frac{\sigma_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \sigma_i t + \varepsilon_i \right] \quad (2.1)$$

donde:

$a$  amplitud

$\sigma$  frecuencia angular ( $2\pi/T$ )

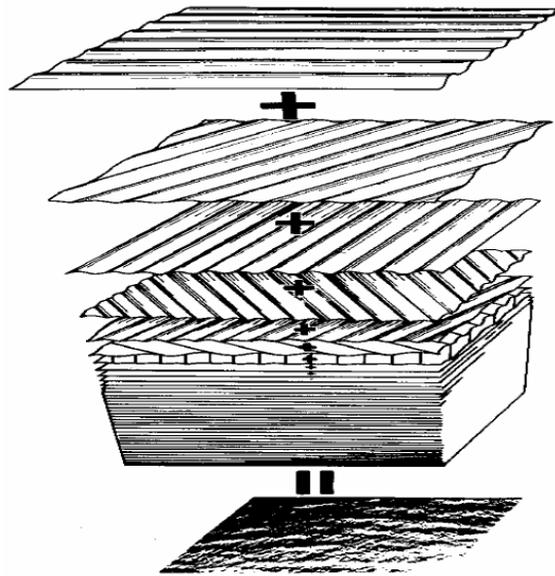
$T$  periodo de la onda

$\theta$  ángulo de incidencia con respecto al eje X

$\varepsilon$  fase

$x, y$  posición espacial de la onda

$t$  tiempo



*Fig. 2.5* Estructura del oleaje aleatorio (Pierson et. al., 1958)

El estudio de dicho oleaje debe realizarse haciendo uso del análisis estadístico.

- El oleaje debe ser considerado como un proceso estocástico, es decir, resultado de un experimento, en el cual no es un número sino una función.
- En el caso del oleaje, una realización corresponde a una función muestra, la cual será determinada como resultado de una observación o medición y será denotada por  $\eta_k(t)$ , observar la *Fig. 2.6*.

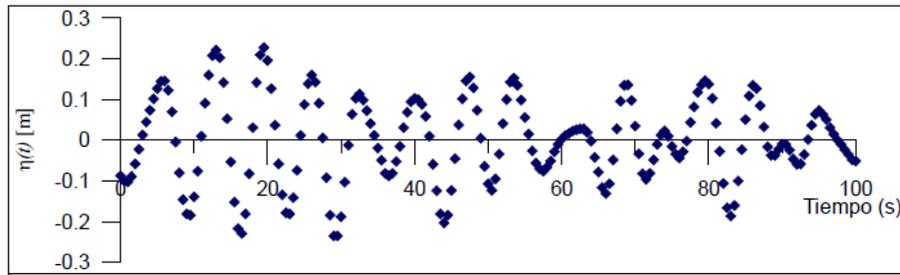


Fig. 2.6 Ejemplo de una señal aleatoria (Rodolfo, 2005)

Si se observa la superficie del mar en un instante determinado,  $t_i$ , es claro que  $\eta(t_i)$  es una variable aleatoria. Considerando ahora el conjunto de  $\eta$  instantes,  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , se puede decir que  $\eta(t_1, t_2, \dots, t_n)$  es una variable enedimensional. De tal forma que el proceso  $\eta(t)$  puede considerarse definido si para cualquier  $\eta$  instante  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , se conoce la función de distribución:

$$F_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = Prob[\eta(t_1) \leq x_1, \eta(t_2) \leq x_2, \dots, \eta(t_n) \leq x_n] \quad (2.2)$$

de la variable aleatoria enedimensional  $\eta(t_1, t_2, \dots, t_n)$ .

Estas distribuciones deben, por ende, satisfacer las siguientes condiciones:

1.- Condición de simetría

$$F_{t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_n}}(x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_n}) = F_{t_1, t_2, \dots, t_m}(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (2.3)$$

donde  $j_1, j_2, \dots, j_n$ , es cualquier permutación de los índices  $1, 2, \dots, n$ .

2.- Condición de compatibilidad

$$F_{t_1, t_2, \dots, t_{m+1}, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, \infty) = F_{t_1, t_2, \dots, t_m}(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (2.4)$$

Para cualquier  $t_{m+1}, \dots, t_n$ , si  $n > m$ .

Con dichas condiciones, se puede concluir que para definir el proceso  $\eta(t)$  sería necesario conocer todas las funciones de distribución dadas por la ec. 2.2 para cualquier  $\eta$ . Si se utiliza la

teoría de la correlación es posible simplificar el estudio de estos procesos, ya que ésta toma en consideración exclusivamente los dos primeros momentos del proceso. De tal forma que:

- El valor medio,  $\mu_\eta(k)$ , queda definido como

$$\mu_\eta(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_\kappa(t) dt \quad (2.5)$$

- Y, la función de correlación (o autocorrelación),  $R_{\eta\eta}(k)$ , es expresada como

$$R_{\eta\eta}(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \eta_\kappa(t) \eta_\kappa(t + \tau) dt \quad (2.6)$$

La media y la función de autocorrelación determinan completamente el proceso  $\eta(t)$ , si se considera que todas las distribuciones dadas por la ec. 2.2 son normales (gaussianas). A pesar de restringir el proceso al uso de los dos primeros momentos, éste sigue siendo inabordable, por lo que se hace necesario admitir dos importantes hipótesis estadísticas: estacionariedad y ergodicidad.

### 2.2.2 El oleaje como un proceso estacionario

Un fenómeno físico se puede considerar estacionario si las características externas que influyen en él permanecen constantes durante cierto periodo de tiempo, es decir, un tiempo durante el cual y debido a la inercia del fenómeno existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo que mantiene su manifestación aproximadamente estacionaria. Este periodo de tiempo es conocido como estado de mar.

Así, el proceso  $\eta(t)$  es estacionario si todas las funciones de distribución que definen el proceso permanecen constantes en un intervalo cualquiera de tiempo  $\tau$ . Lo cual matemáticamente se puede escribir como:

$$F_{t_1+\tau, t_2+\tau, \dots, t_n+\tau}(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.7)$$

para cualesquiera  $n, \tau, t_1, \dots, t_n$ .

Admitida la estacionariedad del oleaje, se deduce que el valor medio es una constante dada por

$$\mu(k) = \mu \quad (2.8)$$

Y la función de correlación depende sólo de la diferencia  $\tau = t + \tau$

$$R_{\eta\eta}(k) = R_{\eta\eta} \quad (2.9)$$

Para fines prácticos, en ocasiones es suficiente con considerar al oleaje débilmente estacionario, lo cual implica que sus funciones de covarianza dependen del paso de tiempo  $\tau$  para todos los  $t$ . Esto es,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \eta(t) dt = \text{constante} \quad (2.10)$$

Por tanto,

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{\eta(t) - \mu\} \{\eta(t + \tau) - \mu\} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \eta(t) \eta(t + \tau) dt - \mu^2 = R(\tau) - \mu^2 \quad (2.11)$$

### 2.2.3 El oleaje como proceso ergódico

El teorema de ergodicidad, aplicable a la mayor parte de los procesos estacionarios, se anuncia como sigue:

*Si un proceso aleatoria  $\eta(t)$  es estacionario y  $\mu_\eta(k)$  y  $R_{\eta\eta}(k)$  definidos en las esc. 2.5 y 2.6 no difieren cuando se calculan sobre diferentes muestras, se dice que el proceso es ergódico.*

De esta forma, la hipótesis de ergodicidad permite sustituir los promedios espaciales de realizaciones por promedios temporales sobre una realización. La descripción de un estado de mar a partir de un único registro (realización temporal,  $\eta_I(t)$ ), se basa en admitir que se trata de un proceso ergódico y estacionario.

Utilizando el teorema de Wiener-Khintchine, se ha demostrado (Khintchine, 1934) que la función de correlación,  $R(\tau)$ , de cualquier proceso estocástico estacionario puede representarse por

$$\int_{-\infty}^{\infty} |R(\tau)| d\Phi(\sigma) \quad (2.12)$$

donde  $\Phi(\sigma)$  es la llamada función de distribución espectral del proceso, la cual es una función acotada, real y no decreciente. Puede demostrarse que si se cumple la condición

$$\int_{-\infty}^{\infty} |R_{\eta\eta}(\tau)| dt < \infty \quad (2.13)$$

$R_{\eta\eta}(\tau)$  puede representarse por la integral de Fourier, tal que

$$R_{\eta\eta}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\eta\eta}(\sigma) e^{i\sigma\tau} d\sigma \quad (2.14)$$

entonces,

$$\Phi(\sigma) = \int_{-\infty}^{\sigma} S_{\eta\eta}(\sigma) d\sigma \quad (2.15)$$

$$S(\sigma) = \frac{d\Phi(\sigma)}{d\sigma} \quad (2.16)$$

La función  $S_{\eta\eta}(\sigma)$  se conoce como función de densidad espectral del proceso  $\eta(t)$ , y tiene la propiedad de ser positiva:

$$S_{\eta\eta}(\sigma) \geq 0 \quad \forall \sigma \quad (2.17)$$

De acuerdo con la ec. 2.14,  $R(\tau)$  es la transformada de Fourier de  $S_{\eta\eta}(\sigma)$  y por tanto, usando la fórmula para evaluar la transformada inversa de Fourier, se obtiene que

$$S_{\eta\eta}(\sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{\eta\eta}(\tau) e^{-i\sigma\tau} d\tau \quad (2.18)$$

En caso de que el proceso  $S_{\eta\eta}(\sigma)$  sea real, como lo es el oleaje, la función  $\Phi(\sigma)$  es una función par y por ende las expresiones dadas en las ecs. 2.14 y 2.18 se pueden escribir como:

$$R_{\eta\eta}(\tau) = \int_0^{\infty} S(\sigma) \cos \sigma\tau d\sigma \quad (2.19)$$

$$S(\sigma) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_{\eta\eta}(\tau) \cos \sigma\tau d\tau \quad (2.20)$$

donde  $S(\sigma)$  es la función de densidad espectral, la cual está definida solamente para  $\sigma \geq 0$ , y está relacionada con  $S_{\eta\eta}(\sigma)$  por

$$S(\sigma) = 2S_{\eta\eta}(\sigma) \quad (2.21)$$

Por tanto, la expresión 2.19, se puede escribir como

$$R(0) = \int_0^{\infty} S(\sigma) d\sigma \quad (2.22)$$

es decir, el área bajo la curva de  $S(\sigma)$  es igual al valor medio de los desplazamientos verticales, y admitiendo que  $\mu = 0$  resulta que dicha área es igual a la varianza de los desplazamientos verticales.

A partir de aquí, el momento de orden  $n$  del espectro estará considerado como

$$m_n = \int_0^{\infty} \sigma^n S(\sigma) d\sigma \quad (2.23)$$

#### 2.2.4 Modelo matemático-estadístico del oleaje

En 1952, Longuet-Higgins por un lado y Pierson y Mark por otro, propusieron que los registros de los desplazamientos de la superficie libre del mar,  $\eta(t)$ , con respecto al nivel medio, pueden representarse a través de la suma de gran número de ondas sinusoidales de diferentes amplitudes, así como de frecuencias y fases aleatorias.

Si no se tuviera en cuenta un parámetro aleatorio, aunque se sumasen infinitas olas de altura, frecuencia y fase diferente, el conjunto constituiría un fenómeno determinista. Es claro que el oleaje se representa de una forma más aproximada a la realidad, salvo en muy raras excepciones, introduciendo una componente aleatoria.

Con dicha suposición, implícitamente se aborda el estudio del oleaje por medio de un modelo lineal, en consecuencia no es aplicable a casos en que la teoría lineal no es válida; como ocurre, por ejemplo, con el fenómeno de rotura.

Para estudiar el oleaje, Longuet-Higgins (1952), basado en los trabajos de Rice (1944 y 1945), definió el modelo de fases aleatorias a través de las siguientes hipótesis:

El desplazamiento de la superficie libre del agua viene dado como la suma de un gran número de ondas sinusoidales de la forma

$$\eta(t) = \sum_i \eta_i(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t - \varepsilon_i) \quad (2.24)$$

Las amplitudes de estas ondas se expresan por

$$a_{2j+1}^2 = 2S(\sigma_{2j+1})[\sigma_{2j+1} - \sigma_{2j}] \quad (2.25)$$

donde  $S(\sigma)$  es una función definida en el intervalo  $(0, \infty)$ , tal que

$$S(\sigma) \geq 0 \quad \forall \sigma$$

$$\lim_{\sigma \rightarrow \infty} S(\sigma) = 0$$

y la integral:  $\int_0^{\infty} S(\sigma) d\sigma$  está acotada.

La fase  $\varepsilon_i$  es una variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo  $(0, 2\pi)$ , es decir,

$$Prob(\alpha \leq \varepsilon_{2j+1} < \alpha + d\alpha) = \frac{d\alpha}{2\pi} \text{ para } 0 \leq \alpha \leq \alpha + d\alpha \leq 2\pi \text{ y cero en el resto.}$$

Como fue demostrado originalmente por Rice (1944 y 1945), y Pierson y Manks (1952), bajo estas hipótesis el modelo propuesto representa un proceso,  $\eta(t)$ , estacionario gaussiano, es decir, que la superficie libre  $\eta(t)$  está normalmente distribuida:

$$\eta(t) = \sum a_{2j+1} \cos(\sigma_{2j+1}t - \varepsilon_{2j+1}) = \sum \sqrt{2S(\sigma_{2j+1})[\sigma_{2j+1} - \sigma_{2j}]} \cos(\sigma_{2j+1}t - \varepsilon_{2j+1}) \quad (2.26)$$

Este modelo puede representarse en forma continua mediante la seudointegral

$$\eta(t) = \int_0^{\infty} \cos(\sigma t - \beta) \sqrt{2S(\sigma)} d\sigma \quad (2.27)$$

La función de correlación del proceso estocástico, definido en la ec.2.24, admitiendo ergodicidad, resulta:

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^{\infty} \eta(t)\eta(t + \tau) dt \quad (2.28)$$

Sustituyendo la ec. 2.24 en la ec. 2.28, se obtiene:

$$R(\tau) = \frac{1}{2} \sum_i a_i^2 \cos \sigma_i \tau \quad (2.29)$$

en forma continua, teniendo en cuenta la ec.2.25:

$$R(\tau) = \int_0^{\infty} S(\sigma) \cos \sigma \tau d\sigma \quad (2.30)$$

Si se comparan las ecuaciones 2.30 y 2.19, se puede deducir que la función  $S(\sigma)$ , introducida en la segunda hipótesis del modelo matemático-estadístico del oleaje (ec. 2.25), es la función espectral del proceso.

El modelo introducido define a un proceso estocástico estacionario y gaussiano, de media cero (lo que se comprueba sustituyendo la ec. 2.24 en la 2.5 y operando), del cual también se admite que es ergódico. Puede demostrarse (Doob, 1953) que un proceso estacionario gaussiano es ergódico si y sólo si la función de densidad espectral  $S(\sigma)$  es finita para cualquier frecuencia.



### 2.2.5 Definición de estado de mar

Un estado de mar se define como aquella situación o periodo de tiempo en que, y debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo cual produce que su manifestación permanezca aproximadamente en estado estacionario.

Otra definición es la que establece que el estado de mar representa cada una de las posiciones de la dinámica del oleaje, admitiendo que éstas tienen una variación lo suficientemente lenta para considerar al proceso como estacionario.

Así pues, el oleaje puede considerarse formado por dos tipos de variaciones:

- *Variación de periodo corto.* La variación es muy rápida, del orden de segundos, durante la cual el proceso se considera estacionario.
- *Variación de periodo largo.* La variación es lenta, del orden de horas, y en ella evoluciona el estado del mar; hay variación de estado.

En la práctica y con el objeto de obtener muestras estadísticamente representativas, cuando se registran variaciones de la superficie libre, se debe fijar un periodo de medición que sea, por un lado, lo suficientemente corto para poder admitir la hipótesis de estacionariedad y, por otro, lo suficientemente largo para que al analizar la muestra se tenga un número representativo de olas para su tratamiento. Dicho periodo se suele fijar en el intervalo de 10 a 20 minutos por cada hora (o más). Los parámetros estadísticos obtenidos de la muestra se extienden a toda la hora del intervalo, con lo que se admite que la duración del estado de mar es de esa hora (o más).

### 2.2.6 Descripción estadística temporal y espectral de un estado de mar

Actualmente existen dos vertientes muy extendidas para el tratamiento de una señal de oleaje, cada una de ellas con sus virtudes y limitaciones, que pueden considerarse complementarias:

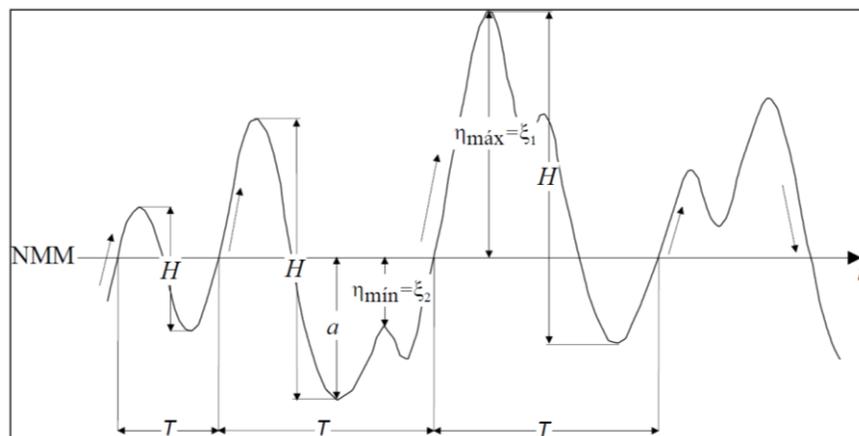
- *Descripción estadística temporal del estado de mar*, la cual considera las propiedades estadísticas, parámetros y distribuciones de  $\eta(t)$ , directamente de una serie de tiempo.
- *Descripción estadística espectral del estado de mar*, que toma en cuenta el estudio del espectro y sus propiedades en el dominio de la frecuencia. El espectro o espectro de energía es una forma de representar cómo está distribuida la energía del oleaje en función de las frecuencias que integran una señal en particular.

### 2.3 Análisis temporal de estados de mar

Respetando el orden cronológico en que ha evolucionado el uso de las diferentes metodologías para el análisis y caracterización de estados de mar, este capítulo se ha dedicado al análisis de señales en el dominio del tiempo, mientras que el siguiente se dedica al análisis de las señales en el dominio de la frecuencia.

#### 2.3.1 La muestra

Normalmente, la muestra que se utiliza para realizar la descripción estadística temporal de un estado de mar es un registro de oleaje medido por un aparato, usualmente un sensor de presión, ubicado en algún punto del mar. Con carácter general, es posible afirmar que estos registros tienen un aspecto similar al de la *Fig. 2.7*. En esta misma figura, se muestran los parámetros fundamentales que definen al oleaje, que previamente se describieron en la introducción.



*Fig. 2.7* Parámetros que definen el oleaje (Rodolfo, 2005)

En primer término se considera el análisis estadístico de la muestra, con lo que se calculan, para el caso de las alturas y periodos de ola, los parámetros estadísticos que se indican a continuación:

Número de sucesos

$$N$$

Media

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

Media cuadrática

$$X_m^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2$$

Media de los  $N/n$  valores mayores

$$X_{1/n}$$

Casos particulares

$X_{1/3}$  valor significativo o  $X_{1/10}$  valor un décimo

Valor máximo del parámetro en la muestra

$$X_{m\acute{a}x}$$

Para realizar algunas operaciones matemáticas que ayuden a evitar errores en el cálculo y que además no alteren la información estadística contenida en la muestra, se sugiere una metodología resumida en la *Tabla 2.2*, detallando posteriormente cada uno de los procesos involucrados.

A. Corrección del nivel medio	Media Lineal Parabólica
B. Discretización de la señal (separa $H$ y $T$ )	<ul style="list-style-type: none"><li>• Método de pasos ascendentes por cero</li><li>• Método de pasos descendentes por cero</li><li>• Método de crestas</li><li>• Método de valles</li></ul>
C. Estimación de cruces	
D. Evaluación de parámetros y velocidades orbitales	
E. Determinación de la dirección del oleaje	<ul style="list-style-type: none"><li>• Método gráfico con las velocidades</li></ul>

*Tabla 2.2* Metodología para el análisis temporal del oleaje (Rodolfo, 2005)

### 2.3.1.1 Corrección del nivel medio

Por lo general, los registros de oleaje contienen la influencia de ondas largas; de mareas, por ejemplo, y en algunos casos llega a ser muy importante su influencia sobre el nivel medio del registro. Por esta razón, es necesario realizar la corrección de dicho nivel y evitar una distorsión en el análisis estadístico.

En el dominio del tiempo, existen tres formas muy utilizadas para llevar a cabo la corrección del nivel medio (Goda, 2000). El procedimiento es el siguiente: se calcula el valor medio que puede ser de orden cero o promedio aritmético, de primer orden o una recta o de segundo orden o una parábola. En los dos últimos casos, los coeficientes de la recta o parábola se pueden obtener aplicando la técnica de mínimos cuadrados. Una vez calculado el valor medio se resta el valor original de cada uno de los datos, tal que

$$\eta_{i\_corregida} = \eta_{i\_corregida} - \bar{\eta}_i \quad (2.31)$$

Con el objeto de ejemplificar el procedimiento, a continuación se presentan las ecuaciones para evaluar el nivel medio.

*Media aritmética.* Consiste en obtener la media aritmética de la superficie libre para todo el registro, para posteriormente restarla a cada dato; así, el valor medio se obtiene como

$$\bar{\eta}_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \eta_n \quad (2.32)$$

siendo  $N$  el número de puntos de la muestra.

Es conveniente hacer mención de que este criterio es adecuado cuando los efectos de ondas largas no tienen gran influencia sobre el registro del oleaje.

*Corrección lineal.* A través del uso de la técnica de ajuste por mínimos cuadrados se obtiene una expresión que representa una variación lineal del nivel medio, la cual se utiliza posteriormente para eliminar el efecto de ondas de más largo periodo. La ecuación para realizar esta corrección es

$$\bar{\eta}_n = A_0 + A_1 n \quad : \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.33)$$

donde

$$A_0 = \frac{N_2 Y_0 - N_1 Y_1}{N_0 N_2 - N_1^2}, \quad A_1 = \frac{N_0 Y_1 - N_1 Y_0}{N_0 N_2 - N_1^2} \quad (2.34)$$

$$N_r = \sum_{n=1}^N n^r, \quad Y_r = \sum_{n=1}^N n^r \eta_n \quad (2.35)$$

Por ejemplo, este tipo de corrección será adecuado si se tiene un registro de oleaje superpuesto a una onda de marea semidiurna y dicho registro tiene una duración mucho menor que el periodo de la marea, y si se encuentra en la franja de ascenso, zona 1 de la Fig. 2.8.

*Corrección parabólica.* Utilizando la técnica de mínimos cuadrados, la ecuación para realizar una corrección de tipo parabólica es:

$$\bar{\eta}_n = B_0 + B_1n + B_2n^2 \quad : \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.37)$$

donde

$$B_0 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_2N_4 - N_3^2) + Y_1(N_2N_3 - N_1N_4) + Y_2(N_1N_3 - N_2^2)] \quad (2.38)$$

$$B_1 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_2N_3 - N_1N_4) + Y_1(N_0N_4 - N_2^2) + Y_2(N_1N_2 - N_0N_3)] \quad (2.39)$$

$$B_2 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_1N_3 - N_2^2) + Y_1(N_1N_2 - N_0N_3) + Y_2(N_0N_2 - N_1^2)] \quad (2.40)$$

$$\Delta = N_0N_2N_4 + 2N_1N_2N_3 - N_2^3 - N_0N_3^2 - N_1^2N_4 \quad (2.41)$$

Este tipo de corrección se emplea en los casos en los que, además de que la carrera de marea es importante, la muestra de oleaje que se desea analizar tiene una influencia que se puede ajustar a una parábola. Por ejemplo, si se tiene un registro de oleaje ubicado en la zona 2 de la Fig. 2.8.

Si en un registro se observa la influencia de variaciones de periodo largo, del orden de minutos, para la determinación correcta del nivel medio se deberá aplicar un filtro espectral.

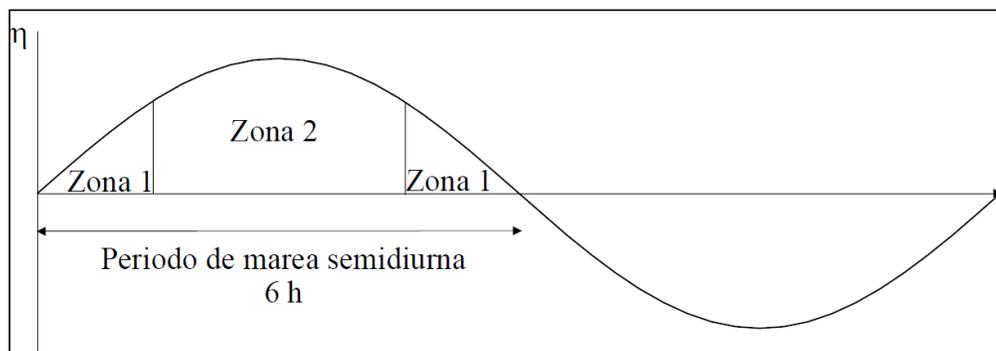


Fig. 2.8 Marea semidiurna (Rodolfo, 2005)

### 2.3.1.2 Caracterización de la señal

Una vez que se ha corregido el nivel medio, se debe caracterizar la señal, esto es, calcular las alturas y los periodos de ola individuales. Para este propósito existen diversos métodos, que se enuncian a continuación:

#### Método de pasos ascendentes por cero

Para la implementación de este método se determinan los pasos ascendentes a través del siguiente criterio:

$$\eta_i * \eta_{i+1} < 0 \quad \text{y} \quad \eta_{i+1} > 0 \quad (2.42)$$

donde  $\eta_i$  representa el  $i$ ésimo dato de la elevación de la superficie después de la corrección del nivel medio. El tiempo en el cual cruza el nivel medio se determina por medio de una interpolación lineal entre el tiempo de muestreo de  $\eta_i$  y  $\eta_{i+1}$ . La diferencia temporal de este punto al siguiente paso ascendente define el periodo.

La condición para definir un máximo en el perfil es

$$\eta_{i-1} < \eta_i \quad \text{y} \quad \eta_i > \eta_{i+1} \quad (2.43)$$

Con el fin de eliminar el problema de subestimación del máximo real entre dos puntos discretos, deben ser estimados el tiempo y la elevación máxima después de ajustar la curva parabólica en función de tres puntos  $\eta_{i-1}$ ,  $\eta_i$  y  $\eta_{i+1}$ . La ecuación para el ajuste parabólico se puede expresar como:

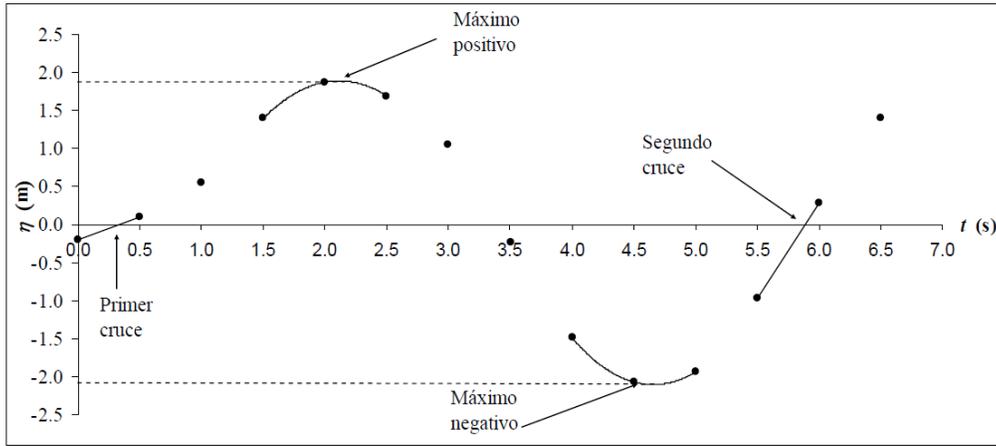
$$\eta_{m\acute{a}x} = C - \frac{B^2}{4A} \quad \text{y} \quad t_{m\acute{a}x} = t_i - \frac{\Delta t B}{2A} \quad (2.44)$$

donde

$$A = \frac{1}{2}(\eta_{i-1} - 2\eta_i + \eta_{i+1}), \quad B = \frac{1}{2}(\eta_{i+1} - \eta_{i-1}) \quad \text{y} \quad C = \eta_i \quad (2.45)$$

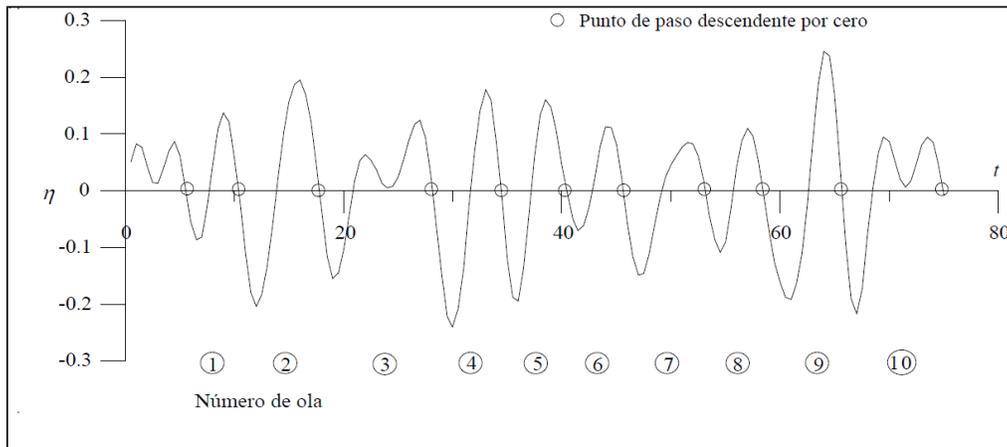
Para determinar la altura de la ola, el punto más alto sobre la elevación de la superficie libre debe ser encontrado dentro del intervalo entre dos pasos ascendentes. Una vez que se identificó este punto, se denota como  $\eta_i$  y entonces  $\eta_{m\acute{a}x}$  es estimada por medio de las ecs. 2.44 y 2.45. El punto más bajo o valle de la elevación,  $\eta_{m\acute{i}n}$ , es calculado por medio de un proceso similar, y la altura de ola es calculada como la resta del valor máximo menos el mínimo,  $\eta_{m\acute{a}x}$  y  $\eta_{m\acute{i}n}$ .

En la Fig. 2.9 se representa el procedimiento de forma gráfica.



Método de pasos descendentes por cero

Este método es análogo al de pasos ascendentes por cero, la única diferencia estriba en que ahora las olas se definen en el cambio de signo de positivo a negativo, como se puede ver en la Fig. 2.10.



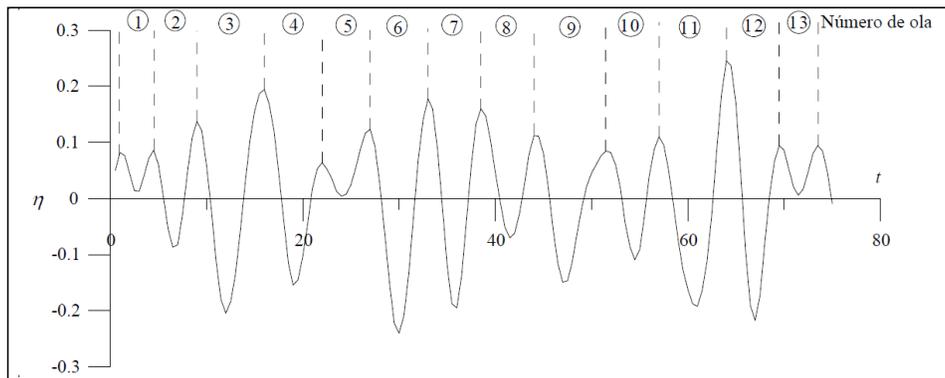
El criterio para definir cada ola es el siguiente:

$$\eta_i * \eta_{i+1} < 0 \quad \text{y} \quad \eta_{i-1} > 0 \tag{2.46}$$

### Método de distancia entre crestas

Debido a la asimetría natural que se presenta en el oleaje, es decir, a que no se tiene el mismo número de puntos del lado positivo que del negativo, el IAHR (1989) recomendó que una altura de ola se debe definir a partir de la distancia entre cresta y cresta de la serie, tal como se muestra en la *Fig. 2.11*.

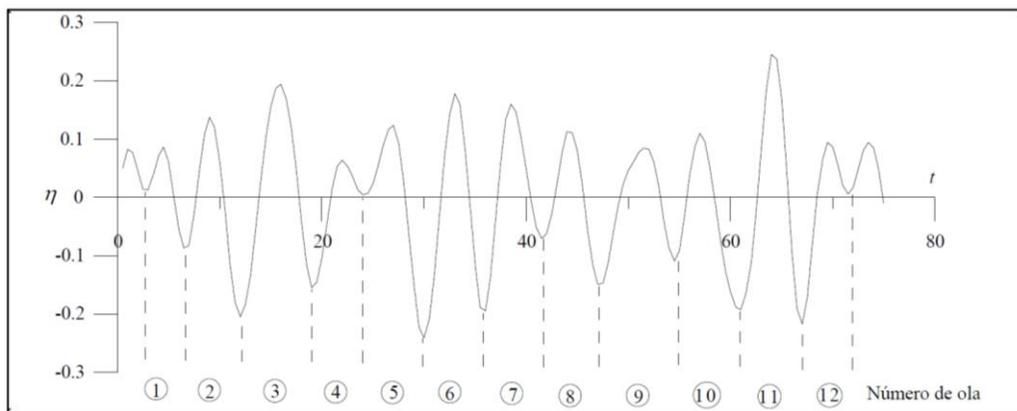
Como resultado de este procedimiento, si se compara con el método de pasos ascendentes o descendentes por cero, se contabilizan un mayor número de olas. Sin embargo, tiene el inconveniente de agregar a la estadística olas pequeñas que suelen distorsionar los resultados.



*Fig. 2.11* Definición de olas por el método de distancias entre crestas (Rodolfo, 2005)

### Método de distancia entre valles

Este método es análogo al de la distancia entre crestas, la diferencia estriba en encontrar los mínimos para separar las olas, como se muestra en la *Fig. 2.12*.



*Fig. 2.12* Separación de olas por medio del método de valles (Rodolfo, 2005)

### 2.3.1.3 Determinación de parámetros del oleaje

Los parámetros estadísticos más importantes para definir un estado de mar a partir de una serie de tiempo son:

La variación del nivel del mar:

$$\bar{\eta}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (2.47)$$

donde

$\eta_i$  elevación de la superficie libre del mar en el tiempo  $t_i$

$N$  número de eventos o muestras

La variación de la media cuadrática (la varianza) de superficie del agua,  $\eta_{rms}^2$ :

$$\eta_{rms}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2 \quad (2.48)$$

La altura media y el periodo medio:

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i \quad (2.49)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i \quad (2.50)$$

donde

$N_0$  número de olas individuales de todo el registro

$H_i$  altura de la ola

$T_i$  periodo de la ola

La altura cuadrática media,  $H_{rms}$ , queda definida por:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad (2.51)$$

La falta de oblicuidad o asimetría es evaluada a través de la siguiente expresión:

$$Skw = \frac{1}{N_0 \eta_{rms}^3} \sum_{i=1}^N \eta_i^3 \quad (2.52)$$

Para evaluar otros parámetros relevantes, como los estadísticos de orden, significativo, un décimo, etc., primero se ordenan, en función de la altura de la ola, de mayor a menor los valores correspondientes de altura-periodo de ola ( $H, T$ ), de manera que, por ejemplo:

- La altura de ola un medio,  $H_{1/2}$ , es el promedio del 50% de las olas más altas
- La altura un tercia o significativo,  $H_s = H_{1/3}$ , está definido como la media aritmética del 33% de las alturas de ola más altas.
- La altura de ola un décimo,  $H_{1/10}$ , es el promedio del 10% de las olas más altas
- La altura de ola un centésimo,  $H_{1/100}$ , es el promedio del 1% de las olas más altas
- La altura de ola un milésimo,  $H_{1/1000}$ , es el promedio del 0.1% de las olas más altas, etc.

Mientras que, para el caso de los periodos:

- El periodo de ola un medio,  $T_{1/2}$ , es el promedio de los periodos asociados al 50% de las olas más altas de un registro.
- El periodo de ola un tercio o significativo,  $T_{1/3} = T_s$ , es el promedio de los periodos asociados al 33% de las olas más altas de un registro.
- El periodo de ola un décimo,  $T_{1/10}$ , es el promedio de los periodos asociados al 10% de las olas más altas de un registro.
- El periodo de ola un centésimo,  $T_{1/100}$ , es el promedio de los periodos asociados al 1% de las olas más altas de un registro.
- El periodo de ola un milésimo,  $T_{1/1000}$ , es el promedio de los periodos asociados al 0.1% de las olas más altas de un registro, etc.

En ocasiones, para evaluar las estadísticas de los periodos de ola se aplica el mismo criterio que para las alturas de ola. Sin embargo, en ingeniería y sobre todo en el proceso de diseño o caracterización, lo más conveniente es asociar las alturas con los periodos de ola.

Otro parámetro importante de calcular en las series ordenadas son las estadísticas de orden  $H_{i;q}$ , donde  $q$  es el número de muestras e  $i$  es el lugar que ocupa desde el inicio, de tal forma que, por ejemplo, el estadístico de orden 1,  $H_{1;q}$ , corresponde al valor máximo de la muestra, que también se conoce como altura de ola máxima,  $H_{m\acute{a}x}$ .

#### 2.3.1.4 Determinación de parámetros de las velocidades orbitales

Es común que cuando los equipos de medición proporcionan datos de corriente se determine el valor máximo y la media para ambas componentes. A partir de las siguientes expresiones, se puede evaluar el valor medio:

$$\overline{Ux} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Ux_i \quad (2.53)$$

$$\overline{Uy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Uy_i \quad (2.54)$$

#### 2.3.1.5 Determinación de la dirección del oleaje

En la naturaleza, normalmente el oleaje no se propaga en una dirección específica, por el contrario, se distribuye a lo largo de varias direcciones, dependiendo de factores como la intensidad del viento, que el oleaje se encuentre en el área de generación o no, efectos de refracción, difracción, reflexión, por citar algunos de los más importantes. Para mediciones de oleaje cerca de la costa, fuera del área de generación, la dirección del oleaje tiende a asemejarse a la dirección del viento; sin embargo, para determinarla a través de las mediciones temporales, se utilizan los datos de velocidades orbitales asociadas al oleaje. La metodología para lograr esto se basa principalmente en utilizar los registros de  $Ux$  y  $Uy$ , junto con el dato de brújula para determinar la orientación del sistema de referencia del equipo.

En la *Fig. 2.13*, se muestra un esquema tipo de la ubicación de un aparato de medición cerca de la costa, y se puede observar que los ejes que conforman el sistema de referencia del aparato están rotados con respecto al norte, este ángulo es el dato que normalmente se almacena en la brújula y se emplea para obtener la dirección del oleaje respecto al norte.

A continuación se presenta la metodología recomendada para determinar la dirección del oleaje a partir de datos temporales de velocidad:

1. Obtener las velocidades orbitales,  $U_x$  y  $U_y$ .
2. Estimar los valores medios por registro.
3. Dibujar ambas velocidades en el sistema de referencia del aparato XY.
4. Rotar el sistema de referencia XY los grados que indica la brújula en el aparato.
5. Determinar el sentido del oleaje de acuerdo con la posición de la costa.

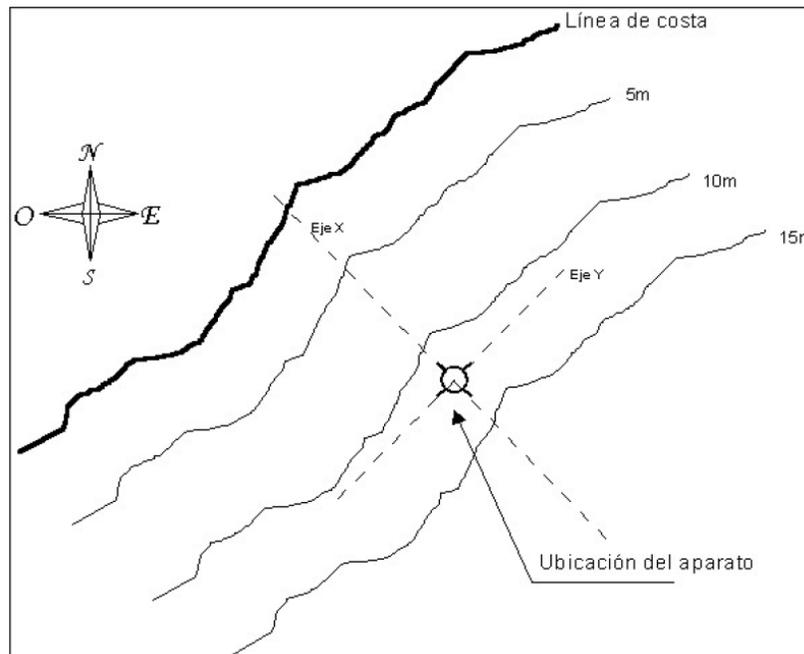


Fig. 2.13 Ubicación de un aparato de medición en la costa (Rodolfo, 2005)

### 2.3.1.6 Agrupamiento del oleaje

Estudios recientes han comprobado que la caracterización de un estado de mar puede ser más adecuada si se analizan factores como el agrupamiento de las olas en un registro de oleaje, pues a pesar de su naturaleza aleatoria, se sabe que las olas de mayor magnitud no se dan de forma individual sino que tienden a aparecer en grupos o paquetes de olas que poseen mayor energía. Como ejemplo, la Fig. 2.14 muestra un perfil de oleaje que exhibe dicho agrupamiento.

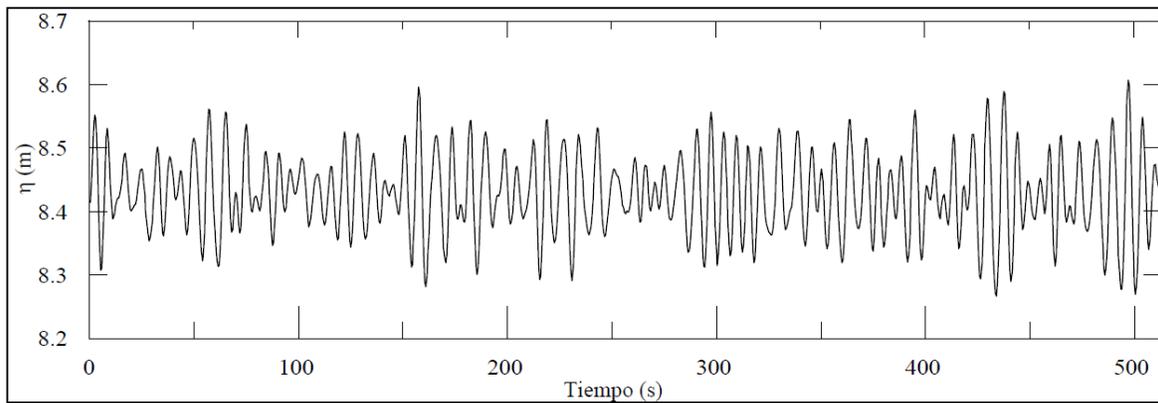


Fig. 2.14 Ejemplo de un registro de oleaje con agrupamiento (Rodolfo, 2005)

En 1987, Johnson *et al* (1978) mostraron que dicho fenómeno es muy relevante, pues se sabe que tiene influencia en:

- El número de olas necesarias para generar resonancia en las estructuras o para voltear embarcaciones.
- La estabilidad de las piezas del manto de rompeolas y estructuras de protección costera.

Además, algunos autores, como Goda (2000), han hecho notar que un agrupamiento bien desarrollado de un campo de oleaje está regularmente asociado a la presencia de ondas de periodo largo.

El agrupamiento del oleaje puede ser cuantitativamente descrito si se agrupan conjuntos de olas que exceden un cierto valor umbral de altura de ola,  $H_c$ . A la sucesión de estas alturas de ola se les denomina *paquetes* de alturas de ola de magnitud importante y el número de olas que constituye el conjunto se conoce como longitud del conjunto.

La Fig. 2.15 es un esquema que define gráficamente un conjunto de olas, su longitud,  $j_l$ , y el valor umbral que los define. Como se observa, los paquetes se determinan de forma muy parecida a como se define el periodo por medio del método de pasos ascendentes por cero.

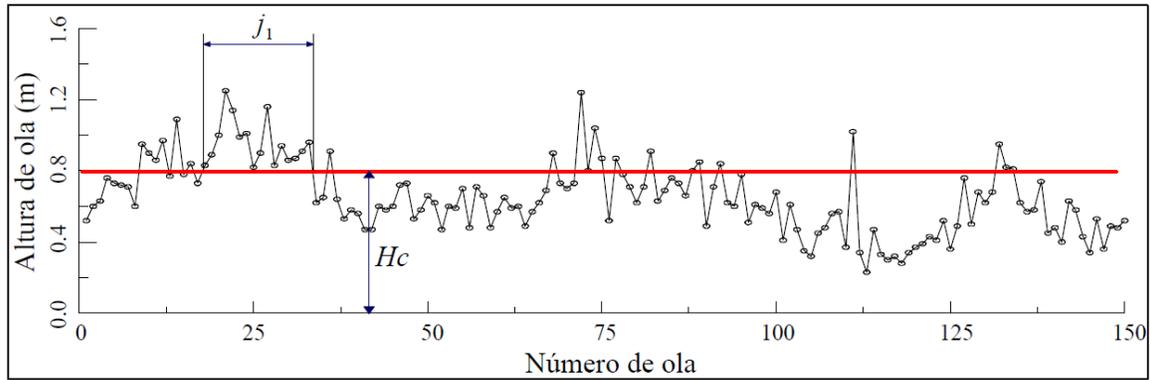


Fig. 2.15 Definición de los paquetes de olas (Rodolfo, 2005)

Existe otro método para describir el agrupamiento del oleaje, mediante la envolvente de energía del oleaje, que fue originalmente desarrollado por Funke y Mansard (1979). Ellos proponen una función envolvente conocida como SIWEH (*Smoothed Instantaneous Wave Energy History*). Se seleccionó este nombre para evitar confusiones con respecto a otras energías del oleaje, pues cada palabra describe una característica en particular, *historia de energía de ondas instantánea suavizada*; así, *historia* hace referencia a que se trata de una función del tiempo, *instantánea* se refiere a que la energía está dada para un instante determinado y *suavizado* implica una operación de suavizado. Se define al SIWEH como

$$E(t) = \frac{1}{T} \int_{\tau=T_p}^{T_p} \eta^2(t + \tau) Q_1(\tau) \partial\tau \quad \text{para } T_p \leq t \leq T_n - T_p \quad (2.55)$$

donde  $T_n$  es el tiempo total del registro. Para el inicio y el final, se tiene:

$$E(t) = \frac{2}{T_p + t} \int_{\tau=-t}^{T_p} \eta^2(t + \tau) Q_1(\tau) \partial\tau \quad \text{para } 0 \leq t \leq T_p \quad (2.56)$$

$$E(t) = \frac{2}{T_p + t} \int_{\tau=-T_p}^{T_n-1-t} \eta^2(t + \tau) Q_1(\tau) \partial\tau \quad \text{para } T_n - T_p \leq t \leq T_n \quad (2.57)$$

Para estos casos, se utiliza:

$$Q_1(\tau) = 1 - \frac{|\tau|}{T_p} \quad \text{para } -T_p \leq \tau \leq T_p \quad (2.58)$$

$$Q_1 = 0 \quad \text{para los demás valores.} \quad (2.59)$$

El factor de agrupamiento se obtiene a partir del SIWEH, por medio de la siguiente expresión:

$$GF = \frac{\sqrt{m_{\varepsilon 0}}}{m_0} \quad (2.60)$$

$$GF = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} (E(t) - \bar{E})^2 \partial \tau}}{\bar{E}} \quad (2.61)$$

donde  $m_{\varepsilon 0}$  y  $m_0$  son los momentos de orden cero de la función de densidad espectral del SIWEH y dentro del oleaje original respectivamente.

Las Figs. 2.16, 2.17 y 2.18 presentan el aspecto que guardan tres señales con diferente factor de agrupamiento, 1.46, 0.78 y 0.14.

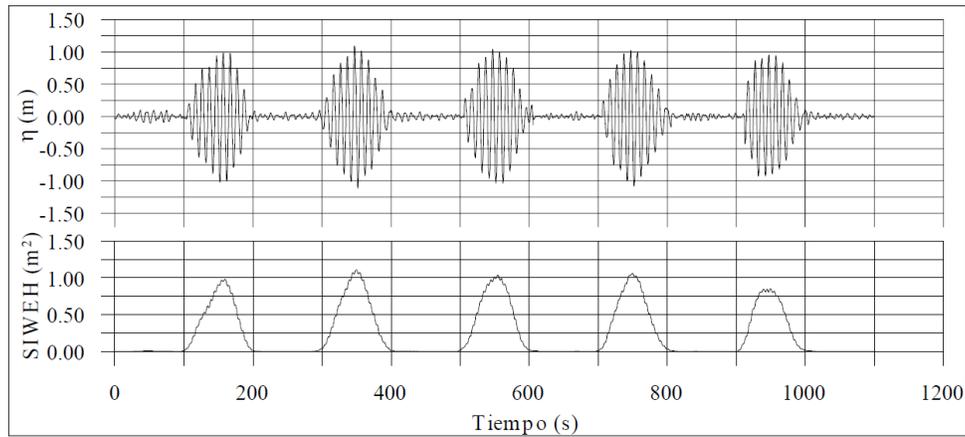


Fig. 2.16 Ejemplo de SIWEH con un factor de agrupamiento  $GF=1.46$  (Rodolfo, 2005)

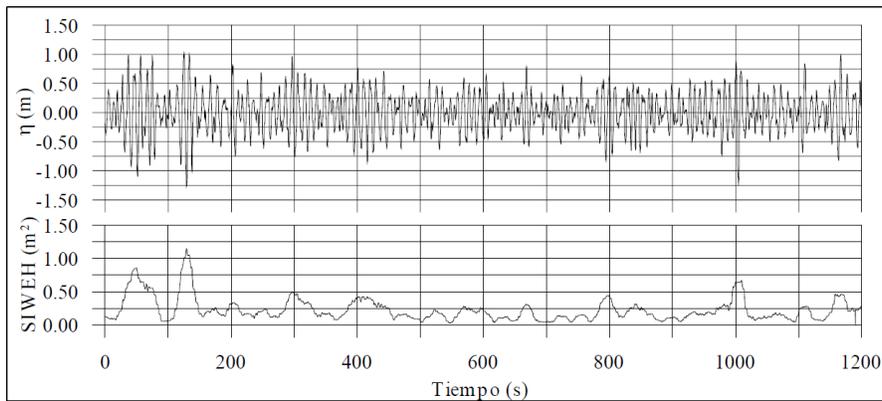
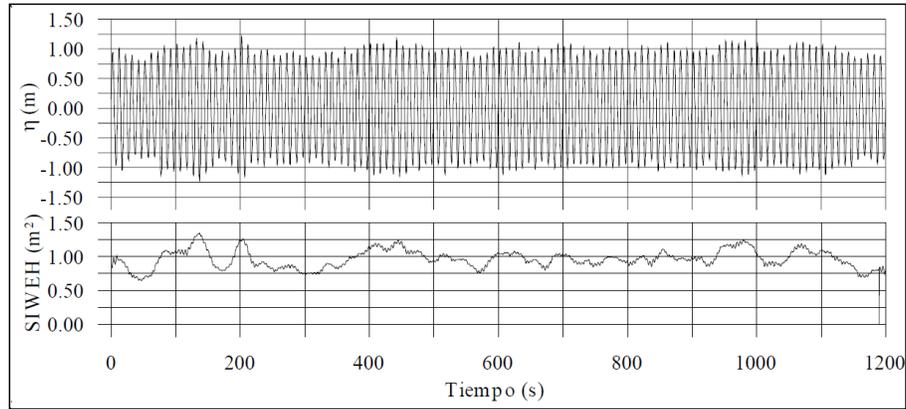


Fig. 2.17 Ejemplo de SIWEH con un factor de agrupamiento  $GF = 0.78$  (Rodolfo, 2005)



*Fig. 2.18* Ejemplo de SIWEH con un factor de agrupamiento  $GF=0.14$  (Rodolfo, 2005)

Como puede observarse, a medida que el oleaje es más regular, el factor de agrupamiento tiende a valores más pequeños.

A manera de resumen, en la *Fig. 2.19* se presenta un diagrama de flujo para llevar a cabo la metodología necesaria para realizar el análisis temporal del oleaje.

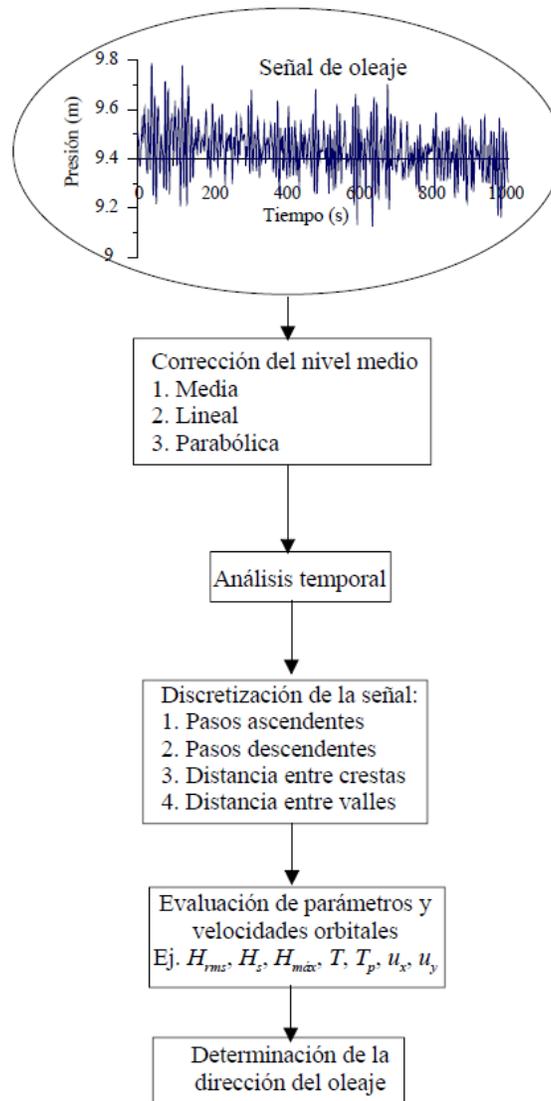


Fig. 2.19 Diagrama de flujo para el análisis temporal de señales de oleaje sin considerar la evaluación del agrupamiento del oleaje (Rodolfo, 2005)

## 3. GENERALIDADES DE MECÁNICA DE SUELOS

### 3.1 Caracterización de mecánica de suelos

Las propiedades geotécnicas del suelo, como la distribución del tamaño del grano, la plasticidad, la compresibilidad y la resistencia por cortante, pueden ser determinadas mediante pruebas de laboratorio. A continuación se describe brevemente cada una de ellas.

#### 3.1.1 Distribución granulométrica

En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían considerablemente. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su *distribución granulométrica*. La distribución granulométrica de suelos de *grano grueso* es generalmente determinada mediante *análisis granulométrico por mallas*. Para suelo de *grano fino*, la distribución granulométrica puede obtenerse por medio de *análisis granulométrico con el hidrómetro*.

##### 3.1.1.1 Análisis granulométrico por mallas

Un análisis granulométrico por mallas se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de mallas cada vez más pequeñas y con una charola en el fondo. La cantidad de suelo retenido en cada malla se mide y el por ciento acumulado de suelo, en peso, que pasa a través de cada malla es determinado. Este porcentaje es generalmente denominado el “porcentaje que pasa”. La *Tabla 3.1* contiene una lista de los números de mallas usadas en Estados Unidos y el correspondiente tamaño de sus aberturas. Estas mallas se usan comúnmente para el análisis de suelos con fines de clasificación.

Criba no.	Abertura (mm)
4	4.750
6	3.350
8	2.360
10	2.000
16	1.180
20	0.850
30	0.600
40	0.425
50	0.300
60	0.250
80	0.180
100	0.150
140	0.106
170	0.088
200	0.075
270	0.053

Tabla 3.1 Tamaños de cribas U.S. Standard (M., Das Braja, 2001)

El porcentaje que pasa por cada malla, determinado por un análisis granulométrico por mallas, se grafica sobre *papel semilogarítmico*, como muestra la Fig. 3.1.

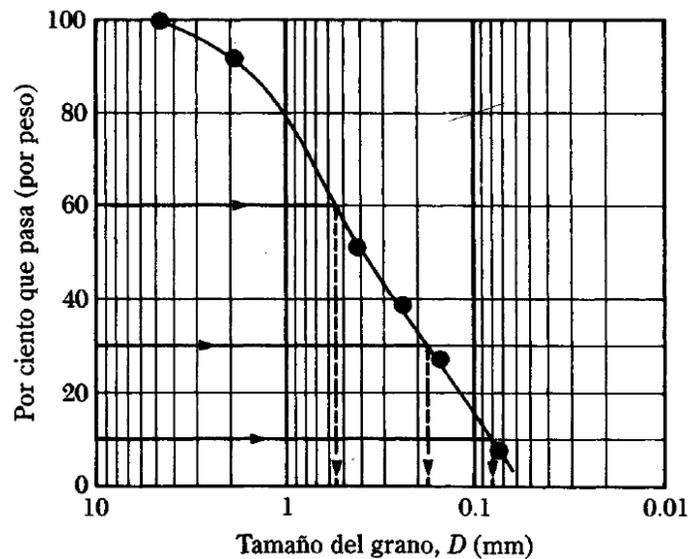


Fig. 3.1 Granulometría de un suelo de grano grueso obtenida por un análisis granulométrico por mallas (M., Das Braja, 2001)

Dos parámetros se determinan de las curvas granulométricas de suelos de grano grueso: (1) el *coeficiente de uniformidad* ( $C_u$ ) y (2) el *coeficiente de graduación* o *coeficiente de curvatura* ( $C_c$ ). Estos factores son:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{y} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (3.1)$$

donde  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  y  $D_{60}$  son los diámetros correspondientes al porcentaje que pasa 10, 30 60%, respectivamente.

Los parámetros  $C_u$  y  $C_c$  se usan en el *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos*.

### 3.1.1.2 Análisis granulométrico con el hidrómetro

El análisis granulométrico con el hidrómetro se basa en el principio de la sedimentación de las partículas de suelo en agua. Para esta prueba se usan 50 g de suelo seco, pulverizado. Un agente *defloculante* se agrega siempre al suelo. El defloculante más usado para el análisis granulométrico con el hidrómetro es 125 cc de solución al 4% de exametafosfato de sodio. Se deja que el suelo se sature por lo menos 16 horas en el defloculante. Después de este periodo de saturación se agrega agua destilada y la mezcla suelo-agente defloculante es agitada vigorosamente. La muestra se transfiere a una probeta de 1000 ml. Se agrega más agua destilada a la probeta hasta la marca de 1000 ml y luego la mezcla es agitada vigorosamente. Un hidrómetro se coloca dentro de la probeta para medir, generalmente durante un periodo de 24 horas, la densidad de sólidos de la suspensión de suelo-agua en la vecindad de su bulbo (*Fig. 3.2*). Los hidrómetros están calibrados para mostrar la cantidad de suelo que está aún en suspensión en cualquier tiempo dado,  $t$ . El diámetro máximo de las partículas de suelo aún en suspensión en el tiempo  $t$  se determinan mediante la ley de Stokes:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\gamma_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (3.2)$$

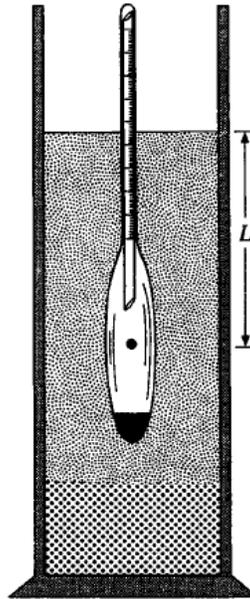


Fig. 3.2 Análisis granulométrico con el hidrómetro (M., Das Braja, 2001)

donde

$D$  = diámetro de la partícula de suelo

$G_s$  = peso específico de los sólidos del suelo

$\eta$  = viscosidad del agua

$\gamma_w$  = peso específico del agua

$L$  = longitud efectiva (es decir, longitud medida de la superficie del agua en la probeta al centro de gravedad del hidrómetro)

$t$  = tiempo

Las partículas de suelo con diámetros mayores que los calculados con la ecuación 3.2 se habrán asentado más allá de la zona de medición. Así, con las lecturas tomadas en tiempos diferentes en el hidrómetro, el *porcentaje de suelo* más fino que un diámetro dado,  $D$ , puede calcularse y prepararse una gráfica de la distribución granulométrica. Los procedimientos de cribado e hidrométrico pueden combinarse para un suelo que tenga granos finos y gruesos.

### 3.1.2 Límites del tamaño para suelos

Varias organizaciones han intentado desarrollar los límites de tamaño para *gravas*, *arenas*, *limos* y *arcillas* con base en los tamaños de las partículas de los suelos. La *Tabla 3.2* presenta los límites de tamaño recomendados en el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y en el sistema Unified Soil Classification (Corp of Engineers, Department of the Army y Bureau of Reclamation).

Sistema de clasificación	Tamaño del grano (mm)
Unificado	Grava: 75 mm a 4.75 mm Arena: 4.75 mm a 0.075 mm Limo y arcilla (finos): <0.075 mm
AASHTO	Grava: 75 mm a 2 mm Arena: 2 mm a 0.05 mm Limo: 0.05 mm a 0.002 mm Arcilla: <0.002 mm

*Tabla 3.2* Límites de tamaño de suelos separados (M., Das Braja, 2001)

La tabla anterior muestra que las partículas de suelo más pequeñas que 0.002 mm son clasificadas como arcillas. Sin embargo, las arcillas por naturaleza son cohesivas y pueden convertirse en un filamento cuando están húmedas. Esta propiedad es causada por la presencia de *minerales de arcilla* tales como la *caolinita*, la *ilita* y la *montmorilonita*. En contraste, algunos minerales como el *cuarzo* y el *feldespato* pueden estar presentes en un suelo en partículas de tamaño tan pequeño como los minerales de arcilla. Pero éstas no tienen la propiedad de cohesión de los minerales arcillosos. Por tanto, se denominan *partículas de tamaño arcilla* y no *partículas arcillosas*.

### 3.2 Parámetros representativos de suelos finos

#### 3.2.1 Límites de Atterberg

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, éste puede fluir como un *semilíquido*. Si el suelo es secado gradualmente, se comportará como un material *plástico*, *semisólido* o *sólido*, dependiendo de su contenido de agua. Este último, en por ciento, con el que el suelo cambia de un estado líquido a un estado plástico se define como *límite líquido (LL)*. Igualmente, los contenidos de agua, en por ciento, con los que el suelo cambia de un estado plástico a un semisólido a un sólido se definen como el *límite plástico (PL)* y el *límite de contracción (SL)*, respectivamente. Éstos se denominan *límites de Atterberg (Fig.3.3)*.

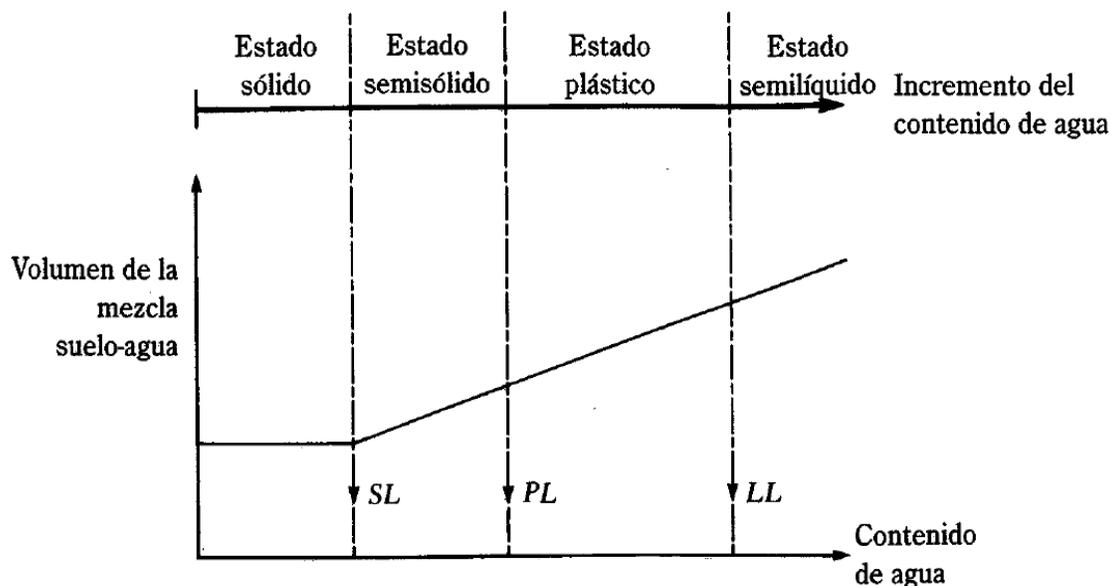


Fig. 3.3 Definición de los límites de Atterberg (M., Das Braja, 2001)

- El *límite líquido* de un suelo es determinado por medio de la copa de Casagrande (Designación de Prueba D-4318 de la ASTM) y se define como el contenido de agua con el cual se cierra una ranura de  $\frac{1}{2}$  in (12.7 mm) mediante 25 golpes.
- El *límite plástico* se define como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de  $\frac{1}{8}$  pulg. (3.18 mm) de diámetro (Designación de Prueba D-4318 de la ASTM).
- El *límite de contracción* se define como contenido de agua con el cual el suelo no sufre ningún cambio adicional de volumen con la pérdida de agua (Designación de Prueba D-427 de la ASTM). La Fig. 3.3 muestra este límite.

La diferencia entre el límite líquido y el plástico de un suelo se define como *índice de plasticidad* ( $PI$ ), o

$$PI = LL - PL \quad (3.3)$$

La *Tabla 3.3* muestra algunos valores representativos de los límites líquido y plástico para varios minerales y suelos arcillosos. Sin embargo, los límites de Atterberg para varios suelos variarán considerablemente, dependiendo del origen del suelo y de la naturaleza y cantidad de minerales arcillosos.

Descripción	Límite líquido	Límite plástico
Caolinita	35-100	25-35
Ilita	50-100	30-60
Montmorillonita	100-800	50-100
Arcilla azul Boston	40	20
Arcilla Chicago	60	20
Arcilla Louisiana	75	25
Arcilla Londres	66	27
Arcilla Cambridge	39	21
Arcilla Montana	52	18
Lodo Mississippi	95	32
Suelos loesianos del norte y noroeste de China	25-35	15-20

*Tabla 3.3* Valores típicos de límites líquido y plástico para algunos minerales y suelos arcillosos (M., Das Braja, 2001)

### 3.2.2 Consolidación: Consideraciones generales

En campo, cuando el esfuerzo sobre una capa de arcilla saturada se incrementa –por ejemplo, por la construcción de una cimentación–, la presión de poro del agua se incrementará. Debido a que la permeabilidad hidráulica de las arcillas es muy pequeña, se requerirá algún tiempo para que el exceso de presión de poro del agua se disipe y el incremento del esfuerzo se transfiera gradualmente a la estructura del suelo. De acuerdo con la *Fig. 3.4*, si  $\Delta p$  es una sobrecarga en la superficie del terreno sobre un área muy grande, el incremento del esfuerzo total  $\Delta\sigma$  en cualquier profundidad del estrado de arcilla será igual a  $\Delta p$ , o  $\Delta\sigma = \Delta p$ . (3.4)

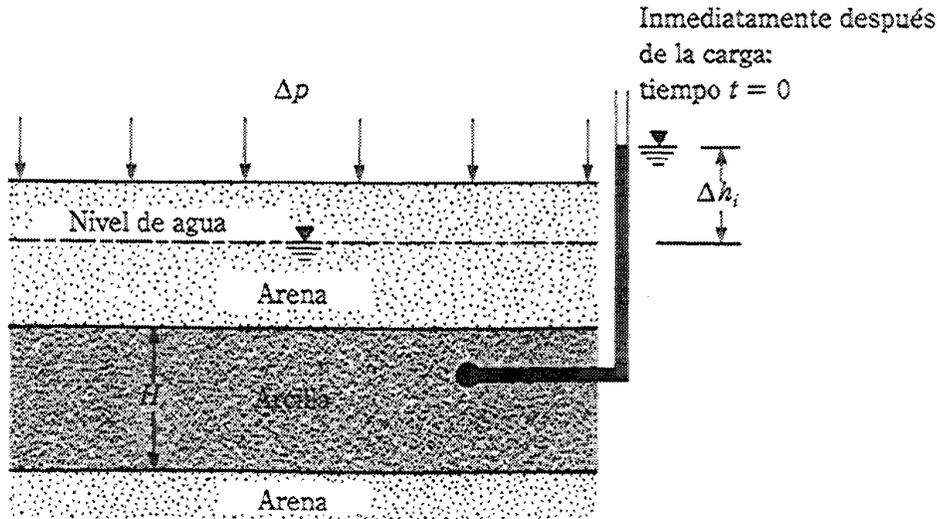


Fig. 3.4 Principios de consolidación (M., Das Braja, 2001)

Sin embargo, en el tiempo  $t=0$  (es decir, inmediatamente después de la aplicación del esfuerzo), el exceso de presión de poro del agua en cualquier profundidad  $\Delta u$ , será igual a  $\Delta p$ , o

$$\Delta u = \Delta h_i \gamma_w = \Delta p \quad (\text{en el tiempo } t = 0) \quad (3.5)$$

Además, el incremento de esfuerzo efectivo en el tiempo  $t = 0$  será

$$\Delta \sigma' = \Delta \sigma - \Delta u = 0 \quad (3.6)$$

Teóricamente, en el tiempo  $t = \infty$ , cuando todo el exceso de presión de poro en el estrato de arcilla se ha disipado como resultado del drenaje hacia los estratos de arena,

$$\Delta u = 0 \quad (\text{en el tiempo } t = \infty) \quad (3.7)$$

Entonces, el incremento del esfuerzo efectivo en la capa de arcilla es

$$\Delta \sigma' = \Delta \sigma - \Delta u = \Delta p - 0 = \Delta p \quad (3.8)$$

Este incremento gradual ocasionará asentamientos durante cierto tiempo y se conoce como *consolidación*.

Pruebas de laboratorio sobre muestras de arcilla saturada inalteradas pueden efectuarse (Designación de prueba D-2435 del ASTM) para determinar el asentamiento por consolidación causado por varios incrementos de carga.

## 4. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

### 4.1 Instalación experimental

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Costas y Puertos, del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

#### 4.1.1 Modelo físico

##### 4.1.1.1 Canal de oleaje

Para la realización de las pruebas, se ocupó el canal de oleaje mostrado en la *Fig. 4.1*, el cual tiene 22 m de largo, 0.60 m de alto, 0.40 m de ancho, con paredes de vidrio templado y una estructura de acero inoxidable. Cuenta con dos secciones de 0.90 m de largo y 0.30 m de ancho con fondo removible ubicada a 13 y 15.5 m de la pala generadora, respectivamente.



*Fig. 4.1* Canal de oleaje

El sistema de generación de oleaje, de la firma HR Wallingford, con el que fue equipado el canal, está integrado por una pala de tipo pistón de acero inoxidable montada debajo de un transmisor de accionamiento eléctrico, el cual se encuentra suspendido de una estructura ajustada a las paredes del canal, mostrado en la *Fig. 4.2*.

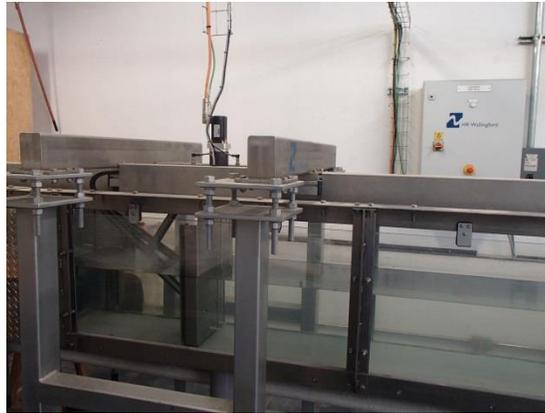


Fig. 4.2 Pala generadora de oleaje

Para la simulación de distintos estados de mar, el software HR Merlin permite generar oleaje regular e irregular al indicar distintos parámetros como amplitud de la onda, frecuencia, o el espectro de oleaje, altura significativa y periodo pico, de acuerdo al tipo de oleaje seleccionado. Además, el generador de olas está equipado con un sistema de absorción dinámica de ondas reflejadas para el control preciso de las condiciones de oleaje, el cual es activado de manera opcional. En la parte final de dicho canal se cuenta con una estructura disipadora de grava de río para disminuir la reflexión del oleaje y poder estar así bajo un estado de ondas progresivas.

La colocación del material ensayado requirió la construcción de una charola de acrílico de 10 mm de espesor con una armadura de soleras y ángulos de acero inoxidable de 1 pulgada, con medidas de 27\*84.5\*20 cm ( $a*l*d$ ) de dimensiones interiores y fue ubicada en una de las secciones de fondo removible del canal, la más cercana a la generadora (ubicada a 13 m), ver Fig. 4.3.

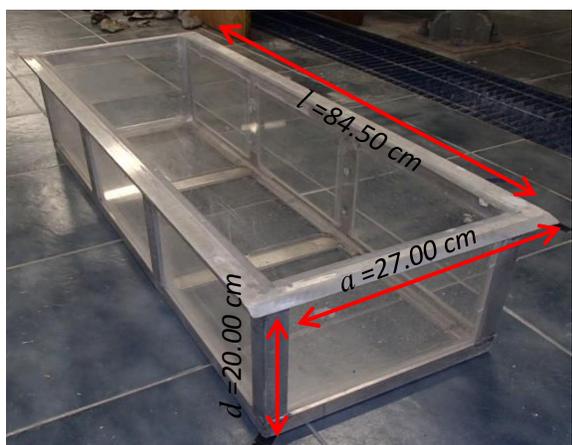


Fig. 4.3 Charola para la colocación del suelo dentro del canal de oleaje (acotaciones en cm)

#### 4.1.2 Instrumentación

##### 4.1.2.1 Sensores de nivel (SN\_XX)

Para determinar la variación de la superficie libre del agua se utilizaron sensores de nivel conectados a dos monitores de la firma HR Wallingford, de 8 y 4 canales (*Fig. 4.4*).



*Fig. 4.4* Sensor de nivel (izquierda) y Monitores para los sensores de nivel (derecha)

El principio de medición de este equipo está basado en el flujo de corriente en una sonda sumergida, la cual consiste en un par de barras paralelas de acero inoxidable: el flujo de corriente entre las barras de la sonda será proporcional a la profundidad sumergida; así la corriente es convertida en un voltaje de salida proporcional a la profundidad instantánea de inmersión.

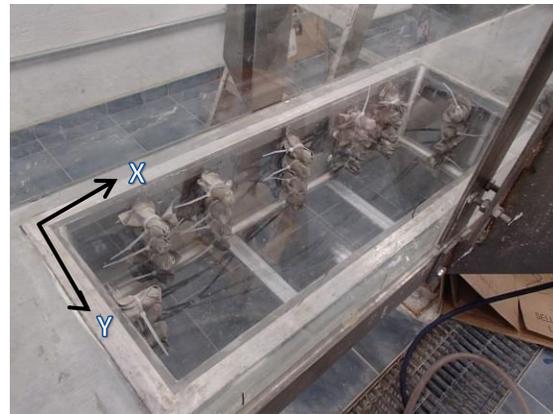
El voltaje de salida puede ser calibrado a partir de la variación en la profundidad de inmersión en agua estática si se conoce el valor del cambio en el nivel de la señal de salida. Este procedimiento fue realizado con la ayuda del sistema de medición, imc SPARTAN.

Para los ensayos realizados se emplearon 11 sensores a lo largo de 5.05 m del canal, estando el primer sensor ubicado a 10.5 m de la pala generadora de oleaje. La distribución de los sensores a lo largo del canal se presenta en la *Fig. 4.6*.

#### 4.1.2.2 Sensores de presión (KD\_XX)

El registro del cambio espacial y temporal de la presión de poro en el suelo contenido en la charola fue determinado mediante la instrumentación de la misma por medio de 28 transmisores de presión piezoresistivos PR-36X de la firma Keller Druck. Los sensores indican el valor de la presión relativa a partir de una variación en la resistencia de la célula de medida, inducida por el cambio de la presión, la cual es transformada en una señal analógica de manera que el voltaje es registrado en unidades de presión. Dicha célula es de silicio monocristalino y está cubierta con una membrana de acero inoxidable, que a su vez está protegida por un tapón de plástico, además de cubrirlos con tela para reducir el desgaste debido al material fino al que está sometido. El transmisor tiene 94 mm de longitud y 21 mm de diámetro y es capaz de registrar una presión relativa de 0 hasta 1 bar con una precisión de  $\mp 1$  mbar.

Mediante perforaciones en tres paredes de la charola de acrílico, se introdujeron los sensores de presión distribuidos con base en un sistema de referencia fijo previamente establecido (*ver Fig. 4.5 y 4.6*).



*Fig. 4.5 Sensores de presión*

La ubicación espacial de los sensores de presión de describe en la *Tabla 4.1*:

Sensor	x (m)	y (m)	z (m)
KD_01	0.050	0.135	0.040
KD_02	0.050	0.135	0.080
KD_03	0.050	0.135	0.120
KD_04	0.050	0.135	0.160
KD_05	0.120	0.070	0.040
KD_06	0.120	0.070	0.080
KD_07	0.120	0.070	0.120
KD_08	0.120	0.070	0.160
KD_09	0.240	0.070	0.040
KD_10	0.240	0.070	0.080
KD_11	0.240	0.070	0.120
KD_12	0.240	0.070	0.160
KD_13	0.423	0.070	0.040
KD_14	0.423	0.070	0.080

Sensor	x (m)	y (m)	z (m)
KD_15	0.423	0.070	0.120
KD_16	0.423	0.070	0.160
KD_17	0.605	0.070	0.040
KD_18	0.605	0.070	0.080
KD_19	0.605	0.070	0.120
KD_20	0.605	0.070	0.160
KD_21	0.725	0.070	0.040
KD_22	0.725	0.070	0.080
KD_23	0.725	0.070	0.120
KD_24	0.725	0.070	0.160
KD_25	0.795	0.135	0.040
KD_26	0.795	0.135	0.080
KD_27	0.795	0.135	0.120
KD_28	0.795	0.135	0.160

Tabla 4.1 Ubicación espacial de los sensores de presión

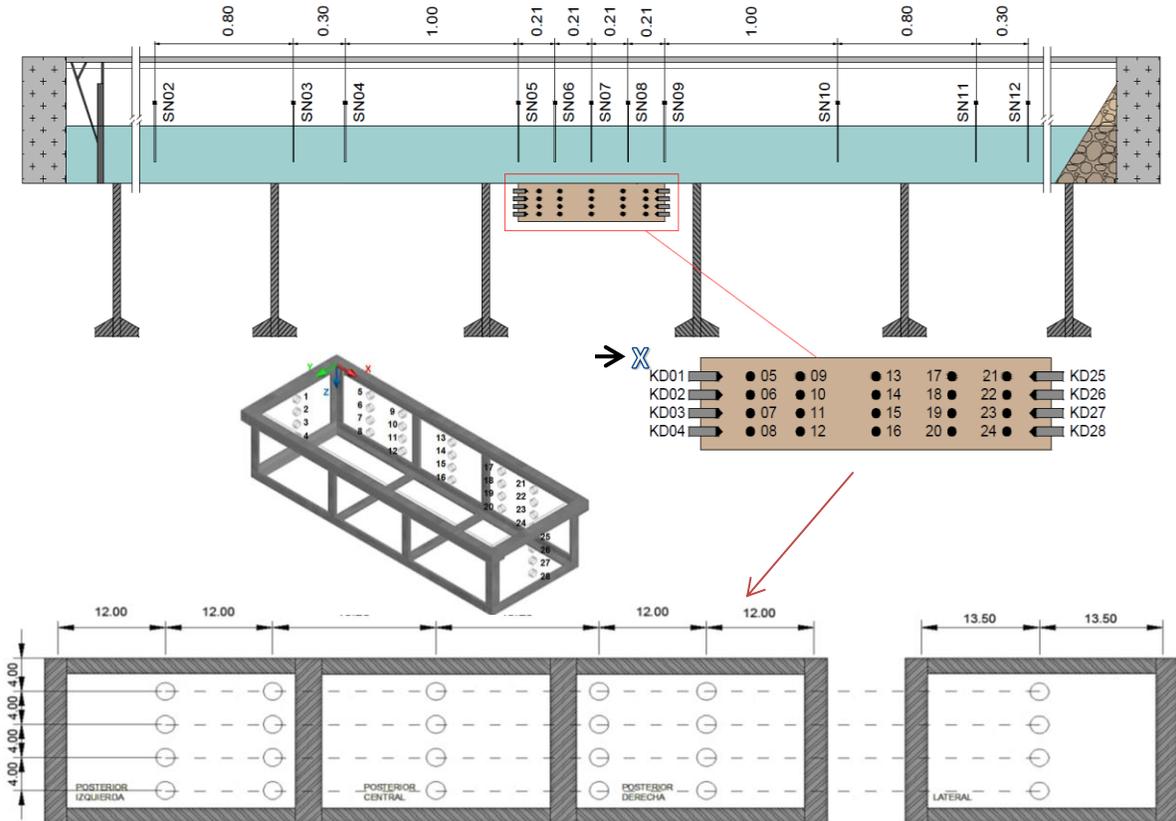


Fig. 4.6 Distribución de los sensores de nivel (SN) y de presión (KD) (acotaciones en m)

#### 4.1.2.3 Sistema de medición: imc SPARTAN

El sistema de medición de alta precisión de nombre SPARTAN de la firma imc, se utilizó para llevar a cabo los registros de los sensores de nivel y los de presión. Dicho sistema permite el control integrado de distintos tipos de señales (de voltaje, corrientes, temperatura y tensión), el uso de múltiples frecuencias de muestreo (hasta 500 Hz) y condiciones de inicio de medición, y la realización de cálculos en tiempo real en canales sincrónicos.

El SPARTAN empleado tiene capacidad de entrada de 48 canales analógicos (12 conectores de 4 canales) y 16 digitales (4 conectores de 4 canales). Para el caso de las señales analógicas generadas por los sensores de nivel, se adaptaron las salidas de los monitores en 3 grupos para la entrada a conectores de 15 pines que van conectados al SPARTAN, de esta manera quedaron disponibles del canal 1 al 12 para los sensores de nivel, aunque se emplearon únicamente 11. Las señales analógicas de los 28 sensores de presión fueron adaptadas de la misma forma, en 7 conectores del canal 13 al 40. El SPARTAN con los conectores empleados se presentan en la *Fig. 4.7*.



*Fig. 4.7* Sistema de medición imc SPARTAN

La adquisición de los datos recabados por el SPARTAN se realizó a través del software de operación y configuración imc STUDIO, el cual permite capturar, procesar y visualizar las señales analógicas y digitales, además, es posible automatizar las mediciones con duraciones desde un segundo hasta un año. El procesamiento de los datos obtenidos, fue realizado con la ayuda del software imc FAMOS (Fast Analysis and Monitoring of Signals), el cual es un programa de la misma forma para el análisis y evaluación de los resultados de las mediciones.

### 4.1.3 Caracterización del material ensayado

#### 4.1.3.1 Material granular

El material granular empleado para los ensayos, corresponde a sedimento de la zona costera de Puerto Morelos, en el estado de Quintana Roo, cuyas coordenadas geográficas son: 20° 50' 0" Norte, 86° 52' 0" Oeste, el cual fue tomado frente a la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales de la UNAM, mostrando la ubicación en la *Fig. 4.8*.



*Fig. 4.8* Ubicación geográfica del material granular obtenido para los ensayos

Dicho material se clasifica como una arena sílica ( $\text{Si O}_2$ ), su composición química está formada por un átomo de sílice y dos átomos de oxígeno, formando una molécula muy estable:  $\text{Si O}_2$ , caracterizándose físicamente por sus colores claros y sus pesos específicos que varían entre 2.6 a 3.0.

Los usos industriales del sílice derivan de sus importantes propiedades físicas y químicas, destacándose especialmente su dureza, resistencia química, alto punto de fusión, piezoelectricidad, piroelectricidad y transparencia.

Es la materia prima fundamental para la fabricación del vidrio (aproximadamente el 70 % de su composición es de sílice) y de la porcelana. Sus arenas son utilizadas especialmente como lecho filtrante para depuración y potabilización de las aguas (para la retención de los flóculos de tamaños muy pequeños que no son separados por decantación), y por su dureza son utilizados para la fabricación de lejías, abrasivos industriales y arenados.

También es muy importante en la composición de las fórmulas de detergentes, pinturas, hormigones y morteros especiales, y constituyen la materia prima básica para la obtención del silicio, así mismo son la base para la fabricación de cierto tipo de refractarios dado su alto punto de fusión. A partir de las arenas silíceas se pueden producir fracciones granulométricas específicas destinadas a mercados industriales tan diversos como: filtros de agua, perforaciones, fundición, vidrio, morteros, plantas potabilizadoras, arenados, pisos de cerámica, pinturas, resinas, loza, epoxi, campos deportivos (fútbol, golf, paddle, tenis, etc.), piletas de natación.

Otra utilidad que tiene la arena sílica es para fabricar piezas de fundición, para estimular la producción de pozos productores en la industria petrolera, para la fabricación de ferroaleaciones, para elaborar moldes y corazones de diferentes piezas fundidas, para la elaboración del ladrillo refractario, como relleno en plástico, hule, ornamento en pastas de alta resistencia para revocar muros y fabricación de resinas de protección al desgaste.

La curva granulométrica y densidad de la arena fueron determinadas utilizando el CAMSIZER de la firma Retsch Technology (ver *Fig. 4.9*), instrumento de laboratorio para la medición simultánea del tamaño y forma de partículas sueltas y en seco, que utiliza el principio de procesamiento de imagen digital. La muestra se transporta en el campo de medición a través de un alimentador vibratorio donde las partículas caen entre una fuente de luz extendida y dos cámaras digitales. Las sombras de las partículas proyectadas se graban a una velocidad de más de 60 imágenes por segundo y se analizan por una computadora equipada con el CAMSIZER software (ver *Fig. 4.10*), el cual realiza un análisis estadístico de la muestra en función del número de partículas detectadas o del volumen de la muestra, y cuenta además con algoritmos que permiten simular el análisis por tamices. De esta manera, cada partícula individual en el flujo de material a granel se registra y evalúa. Por lo tanto, es posible medir una amplia gama de partículas de 30 micras a 30 mm extremadamente con precisión, sin tener que cambiar los rangos de medida o hacer ajustes.





ANÁLISIS DE ARENA DE PUERTO MORELOS

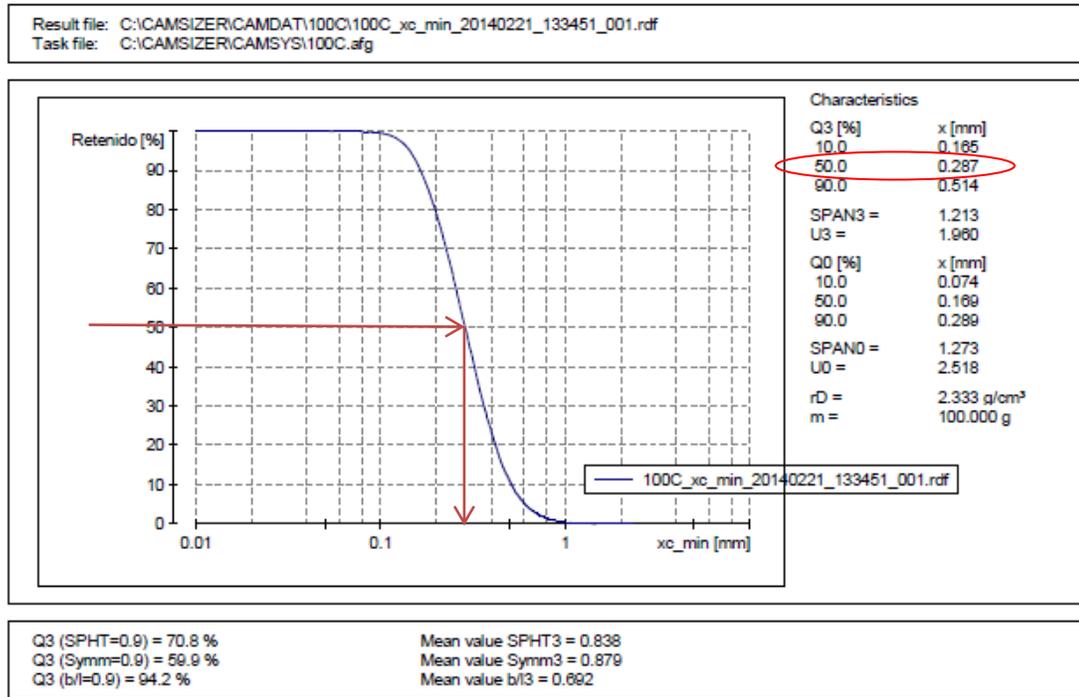
Company: INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM  
 User: GGF  
 Result file: C:\CAMSIZE\CAMDAT\100C\100C\_xc\_min\_20140221\_133451\_001.rdf  
 Task file: C:\CAMSIZE\CAMSYS\100C.afq  
 Time: 21.02.2014 , 13:34 , duration 9 min 21 s at 1.0 % covered area, image rate 1:1 and 60 mm feeder

Particle model: xc\_min  
 No. of particles: CCD-B = 8707727 , CCD-Z = 599974  
 Fitting: no

Material: PUERTO MORELOS (SECA)

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.050	PAN	0.00197*	99.95	0.934	0.864	642025
0.050 -	0.100	0.00197*	0.00394*	99.46	0.882	0.741	876465
0.100 -	0.150	0.00394*	#100	93.68	0.878	0.708	2649677
0.150 -	0.200	#100	0.00787*	79.19	0.873	0.720	3115141
0.200 -	0.250	0.00787*	#60	62.14	0.865	0.723	1875635
0.250 -	0.300	#60	#50	46.38	0.850	0.718	882581
0.300 -	0.350	#50	#45	33.18	0.843	0.719	445505
0.350 -	0.400	#45	0.01575*	23.28	0.835	0.721	229086
0.400 -	0.450	0.01575*	0.01772*	15.89	0.831	0.727	115927
0.450 -	0.500	0.01772*	#35	11.10	0.828	0.732	51090
0.500 -	0.550	#35	0.02165*	7.57	0.823	0.730	29848
0.550 -	0.600	0.02165*	#30	5.35	0.818	0.725	13808
0.600 -	0.650	#30	0.02559*	3.79	0.824	0.735	7587
0.650 -	0.700	0.02559*	#25	2.78	0.814	0.701	3457
0.700 -	0.750	#25	0.02953*	2.00	0.803	0.711	2402
0.750 -	0.800	0.02953*	0.03150*	1.45	0.805	0.699	1397
0.800 -	0.850	0.03150*	#20	1.07	0.829	0.750	729
0.850 -	0.900	#20	0.03543*	0.81	0.797	0.701	502
0.900 -	0.950	0.03543*	0.03740*	0.65	0.833	0.757	222
0.950 -	1.000	0.03740*	#18	0.47	0.810	0.726	234
1.000 -	1.050	#18	0.04134*	0.37	0.822	0.666	108
1.050 -	1.100	0.04134*	0.04331*	0.30	0.841	0.768	46
1.100 -	1.150	0.04331*	0.04528*	0.20	0.804	0.633	64
1.150 -	1.200	0.04528*	#16	0.18	0.808	0.727	35
1.200 -	1.250	#16	0.04921*	0.13	0.844	0.762	22
1.250 -	1.300	0.04921*	0.05118*	0.10	0.833	0.732	17
1.300 -	1.350	0.05118*	0.05315*	0.08	0.851	0.725	7
1.350 -	1.400	0.05315*	#14	0.07	0.843	0.718	6
1.400 -	1.450	#14	0.05709*	0.06	0.866	0.759	3
1.450 -	1.500	0.05709*	0.05906*	0.05	0.859	0.737	5
1.500 -	1.550	0.05906*	0.06102*	0.05	0.802	0.759	2
1.550 -	1.600	0.06102*	0.06299*	0.04	0.880	0.837	2
1.600 -	1.650	0.06299*	0.06496*	0.03	0.752	0.688	3
1.650 -	1.700	0.06496*	#12	0.03			0
1.700 -	1.750	#12	0.06890*	0.03	0.817	0.660	1
1.750 -	1.800	0.06890*	0.07087*	0.02	0.825	0.717	1
1.800 -	1.850	0.07087*	0.07283*	0.02	0.891	0.874	1
1.850 -	1.900	0.07283*	0.07480*	0.02			0
1.900 -	1.950	0.07480*	0.07677*	0.01			0
1.950 -	2.000	0.07677*	#10	0.01	0.844	0.748	2
> 2.000		> #10		0.00	0.892	0.702	1

Fig. 4.11 Resultado del análisis granulométrico, parte 1



User

Fig. 4.12 Resultado del análisis granulométrico, parte 2

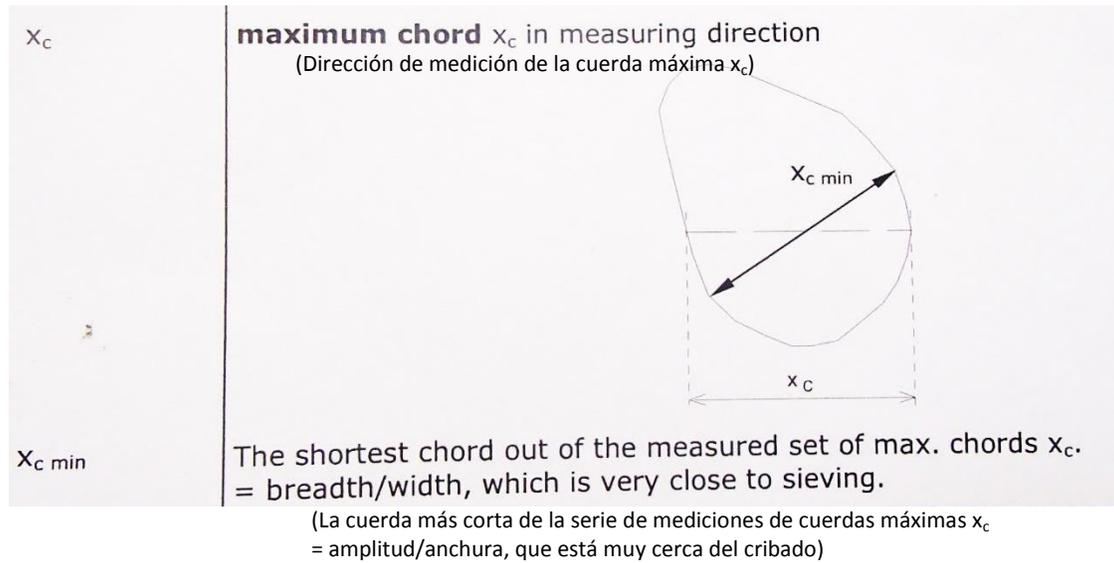


Fig. 4.13 Definición de la variable  $x_{c \text{ min}}$   
(Tomado del Manual de instrucciones de uso-CAMSIZER-)

Por otro lado, en el laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería, se obtuvieron las propiedades siguientes, *Tabla 4.2*:

Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	$\omega_L$ (%)	$\omega_P$ (%)	PI	Gs	Clasificación SUCS
0	99.73	0.27	-	-	-	2.62	SP – Arena mal graduada

Tabla 4.2 Propiedades de la arena

#### 4.1.3.2 Material fino

El material fino empleado para los ensayos, es caolín comercial, fabricado por la empresa Moliendas Tizayuca, S.A. de C.V., *Fig. 4.14*.



*Fig. 4.14* Caolín comercial

El nombre caolín se origina del chino “Kau-ling” y significa “cerro alto”, sitio donde el caolín fue extraído por primera vez y fue el nombre de la montaña de la que por primera vez se embarcó la caolinita a Europa para usos cerámicos. El caolín es un polvo que se compone de silicatos de aluminio de origen natural, generalmente blanco o con ligera tonalidad grisácea, de textura suave y que se usa principalmente en la industria de pintura, hule, cerámica, papel, adhesivos, en la perforación de pozos petroleros y agua, en la preparación de alimentos balanceados; como auxiliar en la clarificación de aceites, grasas y ceras; abrasivos, pinturas, etc.

La ficha técnica de la empresa Moliendas Tizayuca, S.A. de C.V. sobre este caolín, se muestra a continuación (ver *Tabla 4.3*):

<b>Contenido de sílice (Si O<sub>2</sub>)</b>	<b>60.0 – 70.0 %</b>
<b>Contenido de alúmina (Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>)</b>	15.0 – 25.0 %
<b>Absorción al aceite de linaza</b>	30.0 – 35.0
<b>pH al 5 %</b>	4.0 – 6.8
<b>Blancura (fotovolt)</b>	74.0 % min.
<b>Humedad</b>	1.0 % máx.
<b>Contenido de hierro</b>	0.8 % máx.
<b>Malla 325 retenido en</b>	1.0 % máx.

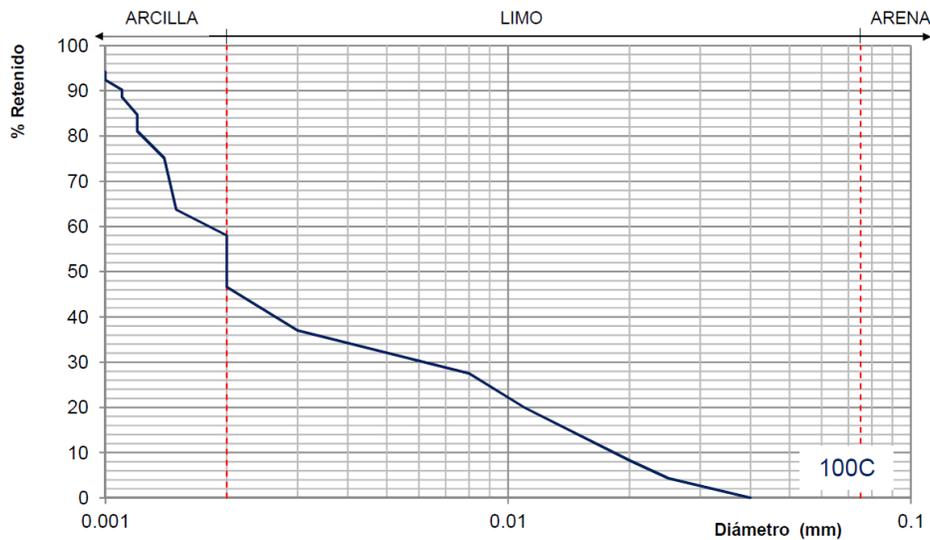
*Tabla 4.3* Ficha técnica del caolín

En colaboración del laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se realizaron las pruebas de los Límites de Atterberg (límite líquido (LL) y límite plástico (LP)) y el índice de plasticidad (IP), siguiendo las especificaciones de la norma ASTM D 4318. Las características de plasticidad obtenidas de dicho caolín se presentan en la *Tabla 4.4*.

$\omega_L$ (%)	$\omega_P$ (%)	PI	Gs	Clasificación SUCS
34.2	26.15	8.05	2.5	CL – Arcilla de baja plasticidad

*Tabla 4.4* Propiedades plásticas del caolín

La curva granulométrica de este material fino fue solicitada a la empresa Soil Mechanics de México, S.A. de C.V., aplicando el método del hidrómetro aplicable para partículas que pasan el tamiz No. 200 ( $D = 75 \mu m$ ), quien proporcionó la curva siguiente, ver *Fig.4.15*.



*Fig.4.15* Curva granulométrica del caolín

De dicha gráfica se observa que para el 50% de la muestra retenido, se obtiene un diámetro de partícula  $d_{50} = 0.002 \text{ mm}$ . Además, se proporcionó la densidad relativa de sólidos, igual a 2.165.

#### 4.2 Metodología experimental

Se realizaron ensayos del material a estudiar en cuatro proporciones, es decir, para obtener cuatro tipos de suelos; un suelo donde el 100% fue arena (100A), un suelo compuesto por un 70% de caolín comercial y un 30% de arena (70C30A), otro suelo donde fue 85% de caolín comercial y 15% de arena (85C15A), y finalmente un suelo de 100% caolín comercial (100C); para preparar el suelo, se realizó el cálculo correspondiente de acuerdo a cada proporción para 65 kg, cantidad aproximada para cubrir el volumen de  $0.04563 \text{ m}^3$  de la charola que se encuentra dentro del canal.

En una carretilla se vertieron las cantidades correspondientes de caolín y arena, y con ayuda de una pala se mezcló en seco estos dos materiales.



Fig.4.16 Mezcla en seco de caolín y arena

El suelo, tanto en cada una de las proporciones como en las cantidades para mezclarlo por litro de agua, se cuidó el reducir la cantidad de grumos para obtener un suelo con la mayor homogeneidad posible.



Fig.4.17 Mezcla del material en seco con la proporción de agua correspondiente

Repitiendo este paso hasta llenar la charola con el material se colocó un tirante de agua de 30 cm en función de una carga muerta y el suelo se pudiera consolidar durante una semana. Después se coloca en cima una rejilla cuadrada que limita una superficie de  $0.090 \text{ m}^2$  por 0.15 m de alto, llenando la rejilla con rocas, simulando una especie de cimentación, subsecuentemente se colocó un cajón de madera llena de cubos y por último un cubo de concreto junto con cinco pesas de 5 kg cada uno, es decir, en total se colocó aproximadamente 120 kg sobre el suelo a ensayar.



*Fig.4.18* Colocación del material (suelo) en el cajón y de la cimentación de la estructura

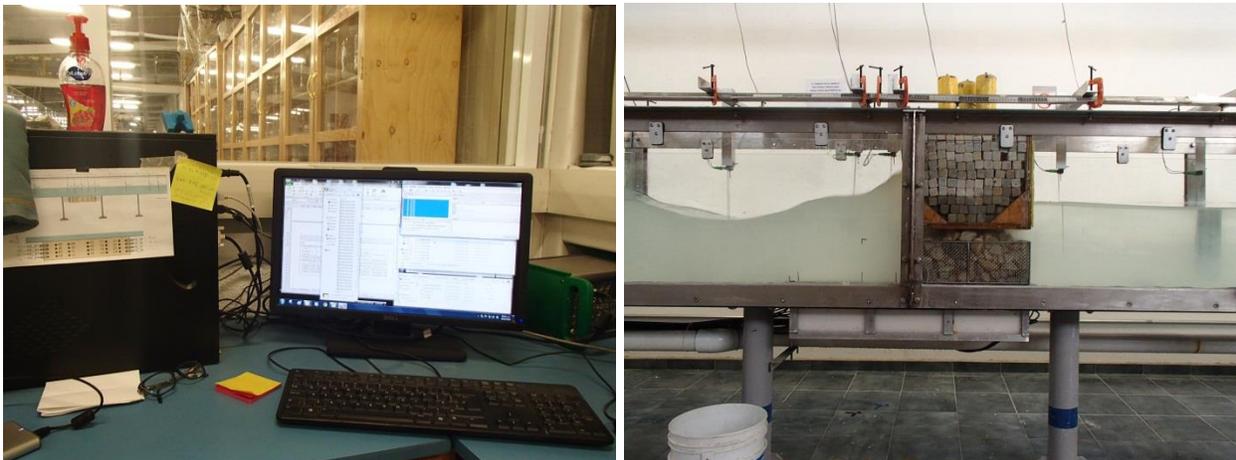


*Fig.4.19* Distribución de cubos dentro del cajón de madera



*Fig.4.20* Posición final de la estructura (carga muerta)

Inmediatamente se colocaran los sensores de nivel y poder calibrar junto con el SPARTAN y los monitores. Una vez terminado éstos pasos, el siguiente era echar las olas correspondientes, verificando que tanto el SPARTAN como el sistema de la firma HR Wallingford estuvieran encendidos, manipulando éste sistema mediante el software HR Merlin, para poder introducir la frecuencia, la frecuencia, el tiempo y el tipo de oleaje (regular e irregular) y lograr que la pala genere las olas deseadas, donde se realizaron varias corridas para cada tipo de suelo. Con ayuda del imc FAMOS Professional se exportaron los datos generados para representarlos mediante gráficas.



*Fig.4.21* Calibración e inicio del sistema de olas

Para el caso de 100A:

Primero la charola se llenó de agua, después se fue vertiendo arena desplazando la cantidad necesaria de agua, con el fin de obtener un suelo sobresaturado. Posteriormente se colocó la estructura y después se llenó el canal con un tirante de agua de 30 cm.



Fig.4.22 Ensayos con 100A

Las pruebas que se llevaron a cabo con éste tipo de suelo para los análisis posteriores, son mencionadas en la *Tabla 4.5*:

Tipo de análisis	Dur. Ensayo (min)	T	H (m)	Tiempo STUDIO (s)	Tiempo WAVE (s)	Fr	a
Por la cantidad de finos	01:15	1.05	0.08	100	75	0.95238	0.04
Por el tipo de oleaje	Regular	02:45	3.00	0.08	180	165	0.33
	Irregular	10:10	3.00	0.10	625	610	0.33

Tabla 4.5 Ensayos con el suelo de 100A

Para el caso de 70C30A:

El suelo en esta proporción se llevó a cabo bajo tres circunstancias; la primera consistió en agregar un litro de agua por cada 3.10 kg del suelo en seco, colocando la estructura antes de llenar el canal con agua; la segunda consistió en agregar un litro de agua por cada 3.15 kg del suelo en seco, colocando la estructura antes de llenar el canal con agua; y la tercera fue de un litro de agua por cada 3.10 kg del suelo en seco, colocando la estructura después de haber llenado el canal con agua; para los tres casos, la estructura se colocó en una posición *aproximadamente central* a la zona del suelo, tal y como lo ilustra la Fig.4.22.

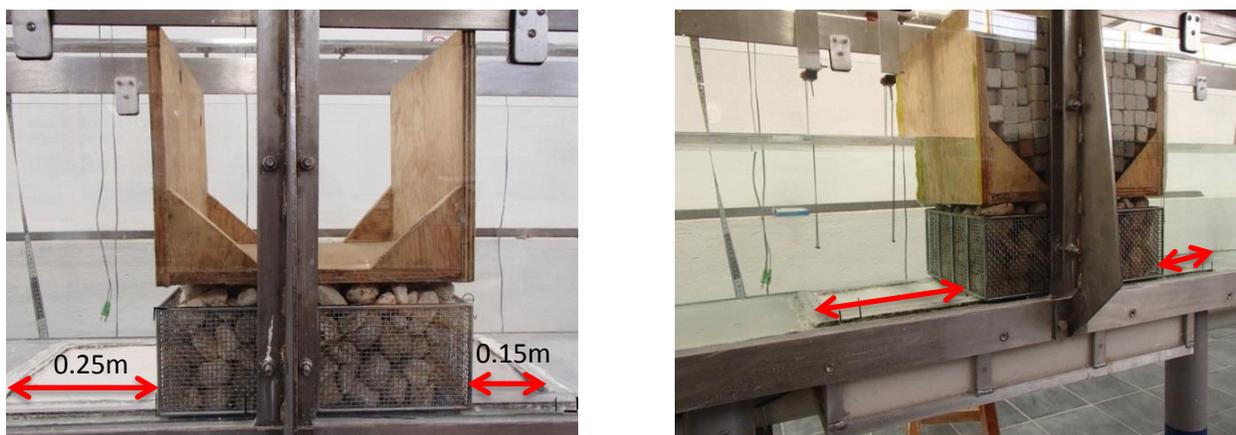


Fig.4.23 Ubicación de la estructura sobre el suelo así como su colocación antes y después de verter agua en el canal

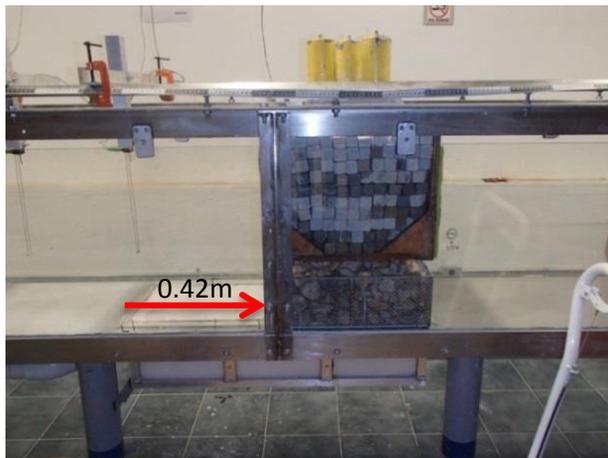
Las pruebas donde éste tipo de suelo fue considerado, se especifican en la *Tabla 4.6*:

Tipo de análisis	Dur. Ensayo (min)	T	H (m)	Tiempo STUDIO (s)	Tiempo WAVE (s)	Fr	a
Por la cantidad de finos	10:00	1.00	0.08	Indefinido	1800	1.00	0.04
Por la cantidad de agua	01:15	1.05	0.08	160	75	0.95238	0.04
	01:15	1.05	0.08	160	75	0.95238	0.04
	01:15	1.05	0.08	160	75	0.95238	0.04
Por el tipo de oleaje	02:45	3.00	0.08	240	165	0.33	0.04
	10:10	3.00	0.10	745	610	0.33	0.04

Tabla 4.6 Ensayos con el suelo de 70C30A

Para el caso de 85C15A:

Las pruebas en esta proporción se llevaron a cabo agregando un litro de agua por cada 3.10 kg del suelo en seco, dejándola consolidar por una semana con un tirante de agua de 30 cm en el canal, posteriormente se continuo con la colocación de la estructura recorriéndola hasta el borde de la charola, alrededor de 0.12 m más de la posición inicial, tal y como lo muestra la *Fig.4.23*.



*Fig.4.24* Desplazamiento de la estructura

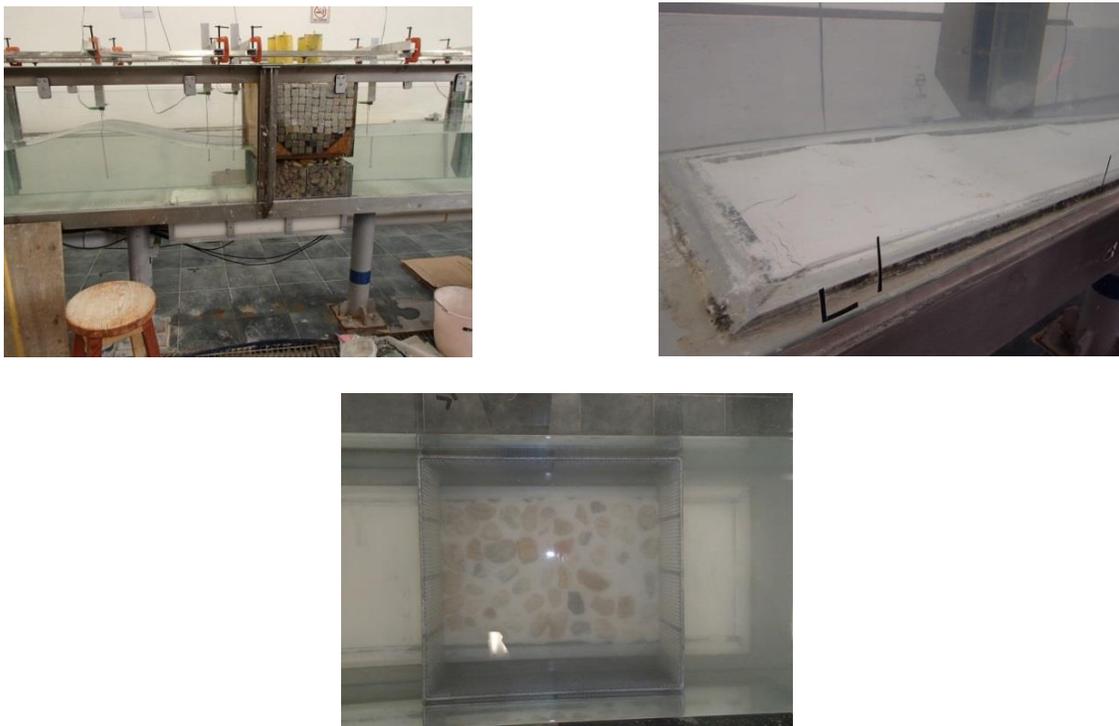
Las pruebas donde éste tipo de suelo fue considerado, se especifican en la *Tabla 4.7*:

Tipo de análisis	Dur. Ensayo (min)	T	H (m)	Tiempo STUDIO (s)	Tiempo WAVE (s)	Fr	a
Por la cantidad de finos	20:00	1.00	0.08	Indefinido	1200	1.00	0.04
Por el tipo de transmisión	60:00	0.80	0.06	Indefinido	1200	1.25	0.03
			0.08				0.04
			0.10				0.05
Por su construcción (segunda comparación)	60:00	1.00	0.06	Indefinido	1200	1.00	0.03
			0.08				0.04
			0.10				0.05
Por su construcción (segunda comparación)	20:00	1.00	0.08	Indefinido	1200	1.00	0.04

*Tabla 4.7* Ensayos con el suelo de 85C15A

Para el caso de 100C:

Las pruebas en esta proporción se llevaron a cabo agregando un litro de agua por cada 3.10 kg del suelo en seco, dejándola consolidar por una semana con un tirante de agua de 30 cm en el canal, posteriormente se continuo con la colocación de la estructura (ver *Fig.4.23*) para dar paso a las pruebas de oleaje.



*Fig.4.25* Ensayos con 100C

Las pruebas en donde estos suelos fueron empleados, se especifican en la tabla siguiente:

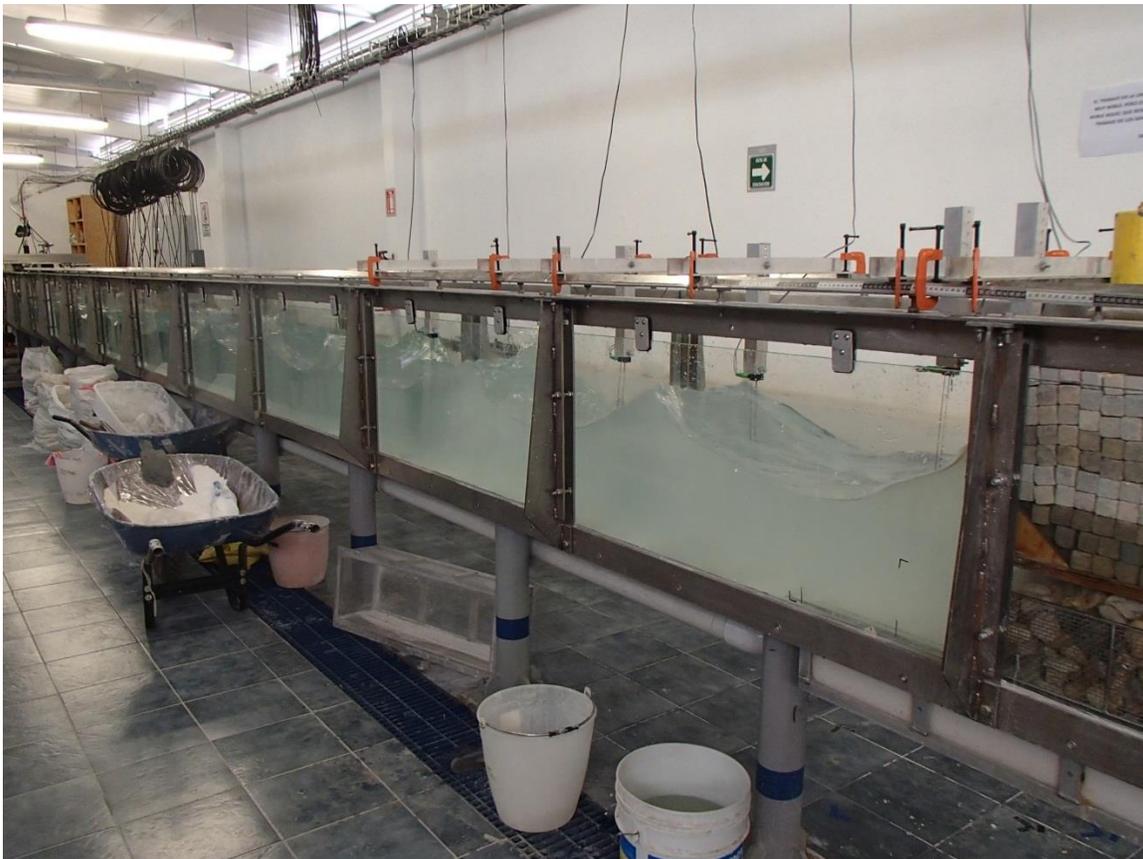
Tipo de análisis	Dur. Ensayo (min)	T	H (m)	Tiempo STUDIO (s)	Tiempo WAVE (s)	Fr	a
Por la cantidad de finos	20:00	0.80	0.06	Indefinido	1200	1.25	0.03
Por el tipo de transmisión	60:00	0.80	0.06	Indefinido	1200	1.25	0.03
			0.08				0.04
			0.10				0.05
Por su construcción (segunda comparación)	20:00	0.60	0.06	Indefinido	1200	1.67	0.03
			0.08				0.04
			0.10				0.05
Por su construcción (segunda comparación)	20:00	0.80	0.06	Indefinido	1200	1.25	0.03

*Tabla 4.7* Ensayos con el suelo de 100C

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Análisis del material empleado

Para poder tener un mejor panorama del comportamiento de la presión en el material ensayado se decidió realizar el análisis agrupando los datos obtenidos de los sensores de presión de manera horizontal y vertical, destacando los registros que hayan tenido una variación considerable.



*Fig.5.1* Conjunto de olas en el canal de oleaje

El análisis corresponderá a la numeración de los sensores de presión previamente mostrada en la descripción del trabajo experimental (*Fig. 4.6*). Se analizaron cuatro grupos de manera horizontal:

- Fila 1: KD\_01, KD\_05, KD\_09, KD\_13, KD\_17, KD\_21 y KD\_25
- Fila 2: KD\_02, KD\_06, KD\_10, KD\_14, KD\_18, KD\_22 y KD\_26
- Fila 3: KD\_03, KD\_07, KD\_11, KD\_15, KD\_19, KD\_23 y KD\_27
- Fila 4: KD\_04, KD\_08, KD\_12, KD\_16, KD\_20, KD\_24 y KD\_28

Por otro lado, los grupos en sentido vertical se componen de:

- Columna 1: KD\_01, KD\_02, KD\_03 y KD\_04
- Columna 2: KD\_05, KD\_06, KD\_07 y KD\_08
- Columna 3: KD\_09, KD\_10, KD\_11 y KD\_12
- Columna 4: KD\_13, KD\_14, KD\_15 y KD\_16
- Columna 5: KD\_17, KD\_18, KD\_19 y KD\_20
- Columna 6: KD\_21, KD\_22, KD\_23 y KD\_24
- Columna 7: KD\_25, KD\_26, KD\_27 y KD\_28

Las figuras que se presentan con los resultados de la presión de poro están organizadas con respecto a las filas y columnas listadas y se presentan como series de tiempo tal como las muestra el programa imcFAMOS; donde el eje de las abscisas representa el tiempo en segundos, mientras que en el eje de las ordenadas la variación en la presión de poro en cm de columna de agua. En la parte superior de cada figura se indica el color y número de sensor de acuerdo a su gráfica correspondiente.

### 5.2 Respuesta al porcentaje de finos

En este análisis se consideraron cuatro tipos de suelo, a saber, 100A, 70C30A, 85C15A y 100C. Solo se analiza, en este trabajo una corrida de oleaje de cada prueba para poder realizar una comparación entre ellas. En la primera columna de la *Tabla 5.1* se indica el tipo de material que intervino para éste análisis; la segunda columna indica la duración que tuvo cada corrida en minutos; la tercera columna es el periodo de oleaje (T) en segundos, el cual varió de 0.80 a 1.05 s; la cuarta columna es la altura de ola (H) en metros, el cual varió de 0.06 a 0.08 m; la quinta columna es la duración, en segundos, que duró el tren de olas.

Las corridas de cada tipo de suelo, se eligieron considerando aquellas que mantuvieran un periodo y altura de ola parecidas, con el fin de comparar los resultados de un sistema de olas semejantes.

Por lo tanto, el primer análisis es respecto a la cantidad de finos que contiene el tipo de suelo, empezando con un suelo que contiene cero por ciento de suelos finos (100A), es decir, un suelo grueso, después con uno que contiene setenta por ciento de suelos finos, es decir, 70% de caolín, incrementando la cantidad a 85% y posteriormente a un suelo completamente fino (100C).

<b>Material</b>	<b>Dur. Ensayo (min)</b>	<b>T (s)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Tiempo WAVE (s)</b>
100A	01:15	1.05	0.08	75
70C30A	10:00	1.00	0.08	1800
85C15A	20:00	1.00	0.08	1200
100C	20:00	0.80	0.06	1200

*Tabla 5.1* Pruebas para el análisis de la respuesta a la cantidad de finos



### 5.2.1 Distribución horizontal de la presión de poro

A continuación se muestra la distribución horizontal de la presión de poro en los cuatro tipos de suelos de las figuras 5.2 a la 5.7; en cada figura se han dibujado las series temporales de los sensores, donde el eje de las abscisas representa el tiempo en segundos, mientras que en el eje de las ordenadas la variación en la presión de poro en cm de columna de agua. Tomando en cuenta que son cuatro filas por cada uno, resultan 16 gráficas lo que viene siendo muy extenso para éste trabajo, por lo que se ha decidido representar solo una fila por cada tipo de suelo, seleccionando aquella que presenta resultados representativos.

Material 100A:

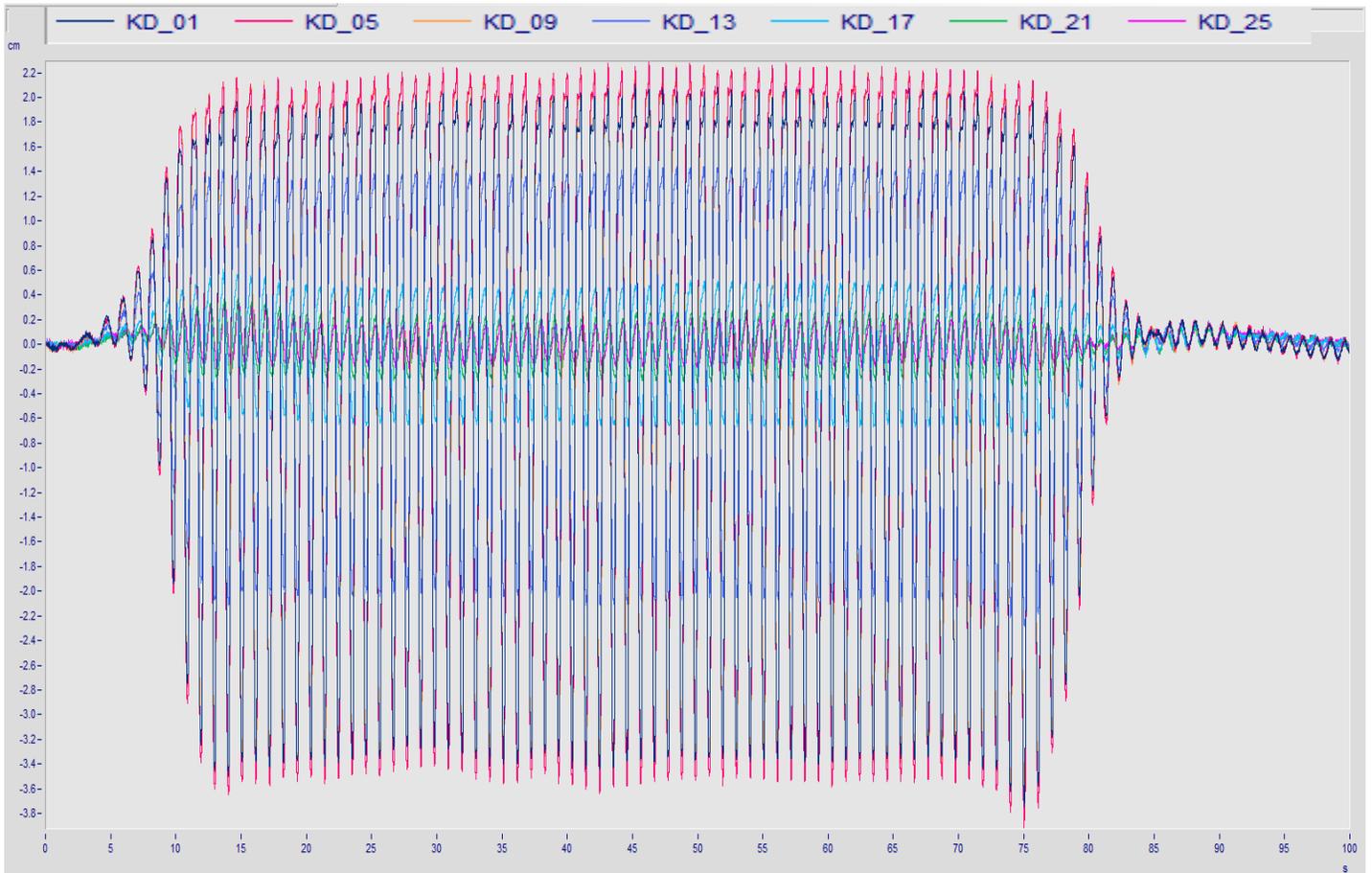


Fig.5.2 Series de tiempo de los sensores de la Fila 1 para el caso 100A

En la Fig.5.2 se presenta la Fila 1 de sensores para el caso de un suelo con nulo contenido de finos. Como se puede observar, la variación de la presión en el tiempo responde directamente a la variación de la superficie libre (olas), lo cual se verifica al considerar el periodo de las oscilaciones que es el mismo que el del oleaje generado, esto es, 1.05 s. Es de notar que los sensores que están en la zona de suelo libre de estructura (KD\_01 y KD\_05) muestran una amplitud de variación de la presión cercana a la de las olas, mientras que los sensores que están debajo de la estructura (KD\_09, KD\_13 y KD\_17) presentan un decaimiento importante pero siempre mantienen la fase, es decir, las oscilaciones tienen la misma periodicidad. Los sensores KD\_21 y KD\_25 tienen también muy baja amplitud, pero en estos casos es una combinación del efecto de la estructura y de la propiamente nula transmisión del oleaje a través de la estructura. Dadas las características del material (solo arena) no se observa acumulación de presión alguna. Por otro lado, la asimetría de las series de tiempo respecto al valor medio se debe a que el material es capaz de drenar agua y este proceso significa una pérdida de presión adicional.

Material 70C30A:

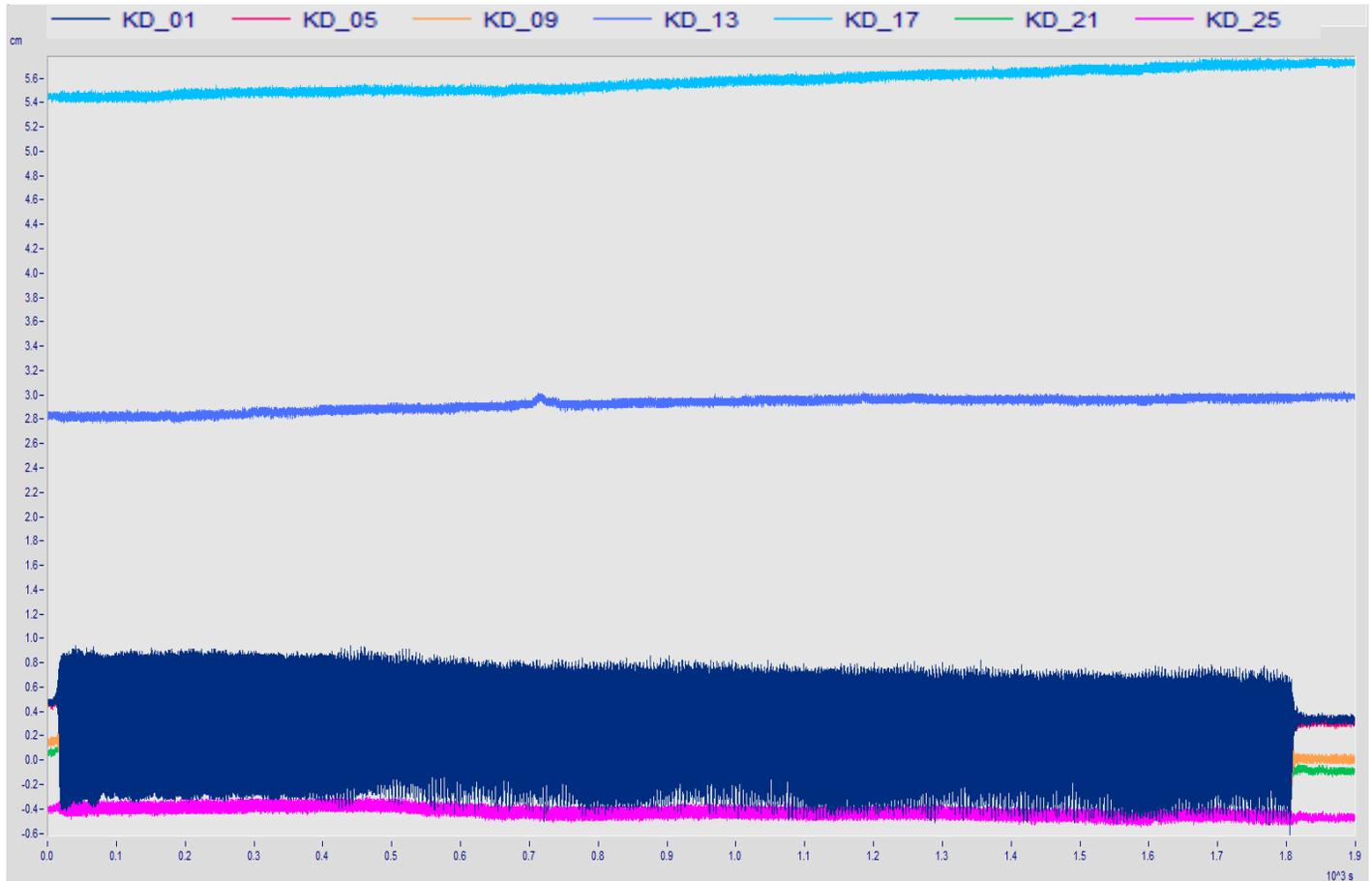


Fig.5.3 Series de tiempo de los sensores de la Fila 1 para el caso 70C30A

En la Fig.5.3 se presenta el grupo de sensores Fila 1 para el caso de un suelo con 70 % de fino. Se observa que los sensores colocados fuera del efecto de la estructura vertical (KD\_01 y KD\_05) responden, con el caso anterior a la variación de la superficie libre del agua. En contraste, los sensores que son afectados por la carga muerta muestran muy poca variación vertical pero las oscilaciones son cercanas al periodo de las olas. Es de notar que, con excepción del sensor KD\_09, los dos medidores que se encuentran debajo del rompeolas registran una presión mucho mayor y, en el tiempo, se observa un ligero incremento de presión (alrededor de 0.3 cm). Por su parte, los sensores afectados por la carga pero que no están debajo de ellas (KD\_21 y KD\_25), acusan una disminución en la presión, evidencia de un proceso de drenaje que es el principal mecanismo que impide la acumulación de presión de poro en la masa del suelo.

Material 85C15A:

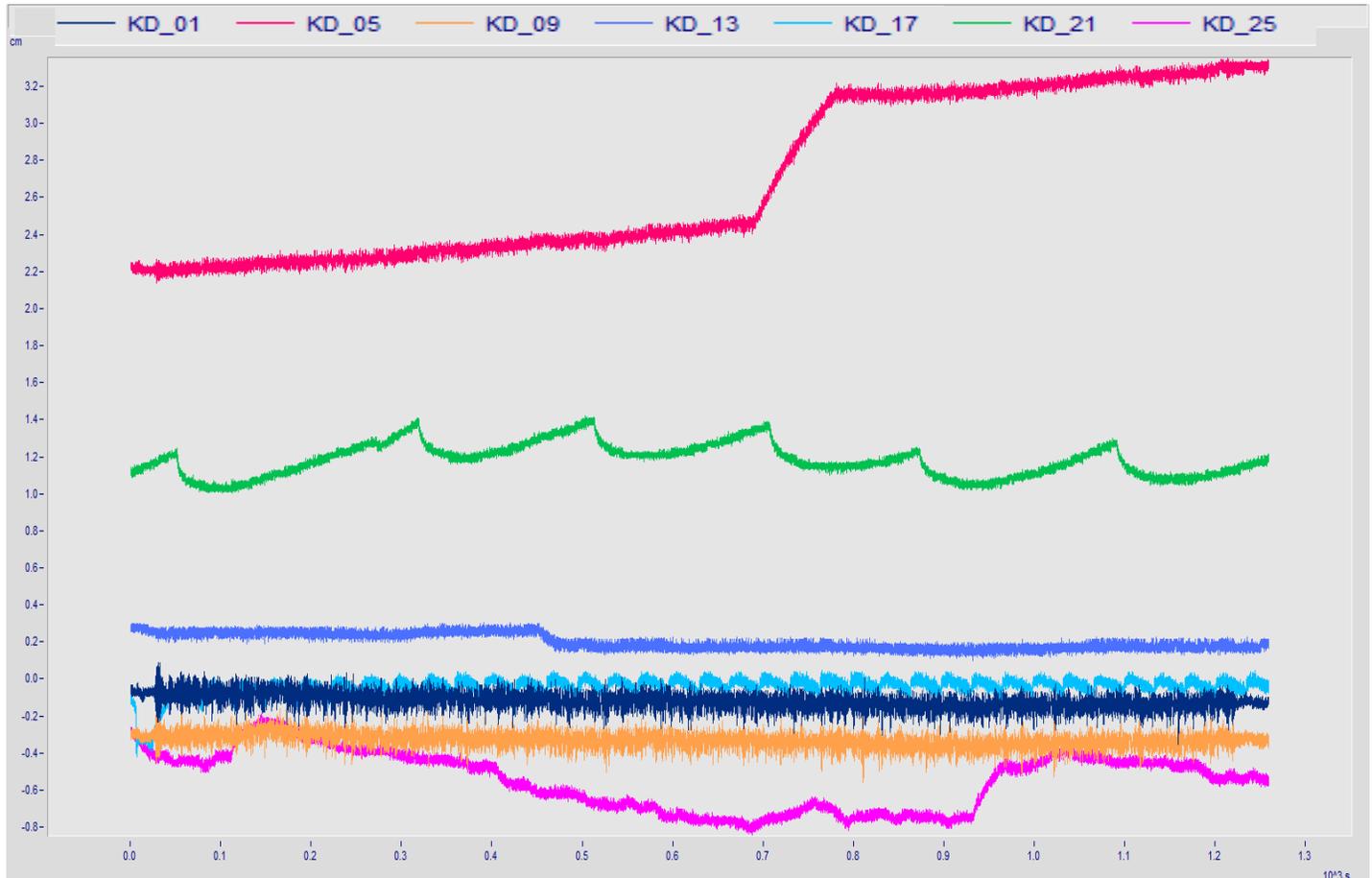


Fig.5.4 Series de tiempo de los sensores de la Fila 1 para el caso 85C15A

En la Fig.5.4 para el caso de un suelo con el 85% de contenido fino, se observa claramente una respuesta del suelo mucho menos predecible que en los casos anteriores. En este caso, la estructura se colocó de tal forma que los sensores KD\_13, KD\_17, KD\_21 y KD\_25 quedaron debajo de la estructura. El sensor KD\_01 responde, como antes, a la variación del oleaje pero esta vez con mayor decaimiento. El sensor KD\_05 muestra bajas oscilaciones verticales y tres fases de acumulación de presión: una muy lenta, otra (que dura cerca de 200 segundos) súbita y una tercera muy lenta, sin embargo y aunque la acumulación continúa hasta el final del ensayo, no alcanza a registrarse falla del suelo. El sensor KD\_09 muestra comportamiento de zona de suelo afectada por la carga pero sin capacidad de acumular presión, la presión media es muy baja, lo cual sorprende considerando que se encuentra en la zona de mayor reflexión del oleaje. Respecto de los sensores colocados debajo de la estructura, el sensor KD\_13 libera alrededor de 0.2 cm de presión a los 450 s de ensayo y el resto del tiempo no muestra alteración alguna; El KD\_17 registró una serie de oscilaciones de mayor periodo que el del oleaje (30 s) pero de muy baja amplitud y prácticamente sin acumulación de presión. El caso que mas llama la atención es



el sensor KD\_21, el cual presenta una serie de episodios de acumulación y liberación de presión con duración de alrededor de 200 s pero sin alcanzar la falla del suelo, lo cual es verificado precisamente por la capacidad de volver a acumular presión. Esta serie de tiempo es un claro indicativo de que en presencia de mayor peso o de oleaje de mayor intensidad, el suelo podría alcanzar la falla por licuación. Finalmente, el sensor KD\_25 alcanza a acumular un poco de presión, drena durante un poco más de 800 s y vuelve a acumular durante 150 s aproximadamente y comienza a drenar de nuevo de manera muy lenta.

Es claro que esta mezcla de suelo es la que presenta una respuesta más significativa al estado de esfuerzo inducido por la carga muerta y la acción del oleaje, en el sentido que la masa de suelo muestra un comportamiento que podría, en condiciones más severas, llegar a la falla. Esto es, el material con menor cantidad de finos no es capaz de acumular presión en virtud de la baja permeabilidad de la arena. En contraste, el suelo 85C15A, muestra claramente que el suelo puede acumular presión tanto en la zona debajo de la estructura como en la región donde solo actúa el oleaje total (incidente más reflejado).

Material 100C:

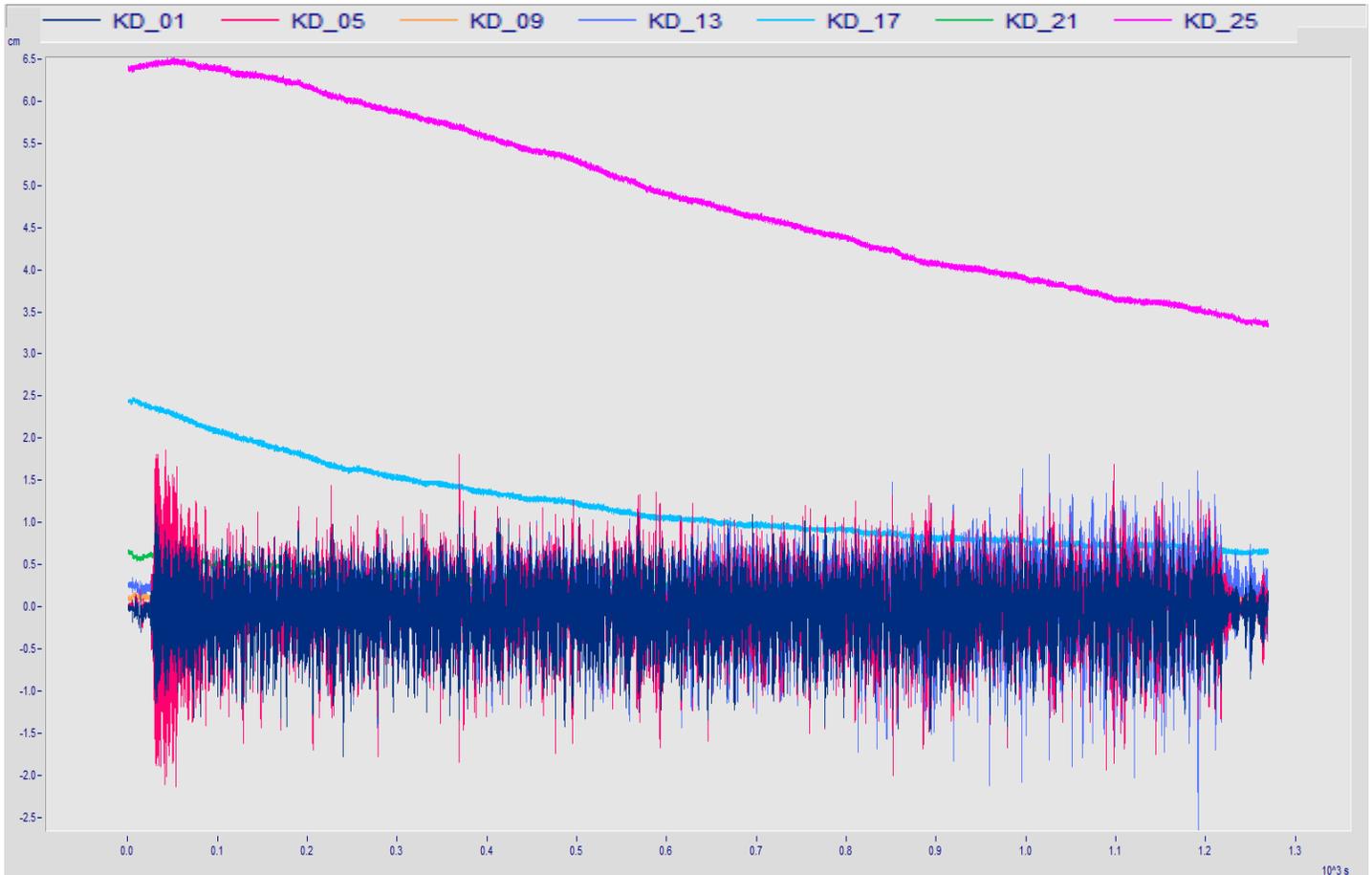


Fig.5.5 Series de tiempo de los sensores de la Fila 1 para el caso 100C

En la Fig.5.5 para el caso de un suelo completamente fino, se puede observar que los sensores más alejados de la estructura replican el comportamiento del oleaje en periodo y amplitud (con el decaimiento correspondiente). Los sensores KD\_09 y KD\_13 mantienen una presión prácticamente nula. La señal KD\_17 muestra un incremento de la presión de 2.5 cm pero sin acumulación posterior, más aún, muestra un proceso de drenaje permanente. A diferencia del caso anterior el KD\_21 aun estando bajo la estructura, mantienen una presión menor a 1 cm durante todo el ensayo. El sensor KD\_25 acusa una acumulación de presión inicial, que alcanza los 6.5 cm, que luego se libera durante todo el ensayo; dado que esta liberación no es súbita y que no se registró asentamiento de la estructura, se considera que el suelo no alcanzó a fallar.

Este suelo, a pesar de estar conformado únicamente por material fino no responde a la acción del oleaje de manera clara. La posible razón es que es una mezcla muy impermeable, por lo que no permite la entrada de agua y su única respuesta a la carga muerta es la consolidación y con ella la expulsión de agua y la disminución en la presión de poro.



### 5.2.2 Distribución vertical de la presión de poro

A continuación se muestra la distribución vertical de la presión de poro en los cuatro tipos de suelo (figuras 5.8 a la 5.13); en cada figura se han dibujado las series temporales de los sensores, en ellas el eje de las abscisas representa el tiempo en segundos, mientras que en el eje de las ordenadas la variación en la presión de poro en cm. Se presenta solo la columna 6 en cada mezcla de suelo, que corresponde a los resultados más representativos puesto que es una columna que siempre queda debajo de la estructura.

Material 100A:

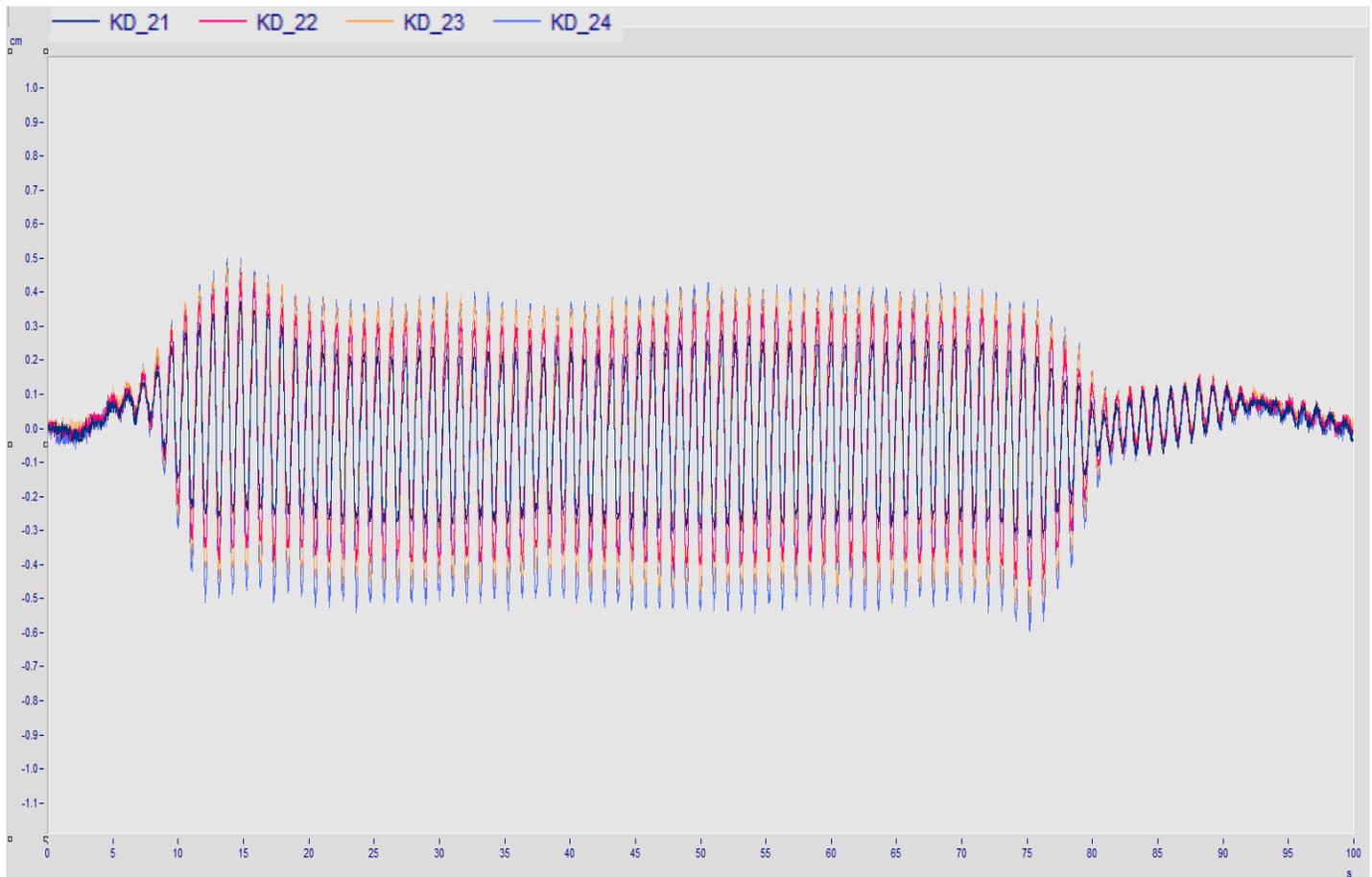


Fig.5.6 Series de tiempo de los sensores de la Columna 6 para el caso 100A

En la Fig.5.8 para el caso de un suelo con nulo contenido de finos. Se puede observar que, la variación de la presión en el tiempo responde directamente al oleaje que se generó. Es interesante señalar que, los sensores colocados más profundos en el suelo, presentan mayores amplitudes, los cuales en todos los sensores, son mucho menores que las de las olas. Como ya se dijo antes, este material es incapaz de acumular presión de poro.

Material 70C30A:

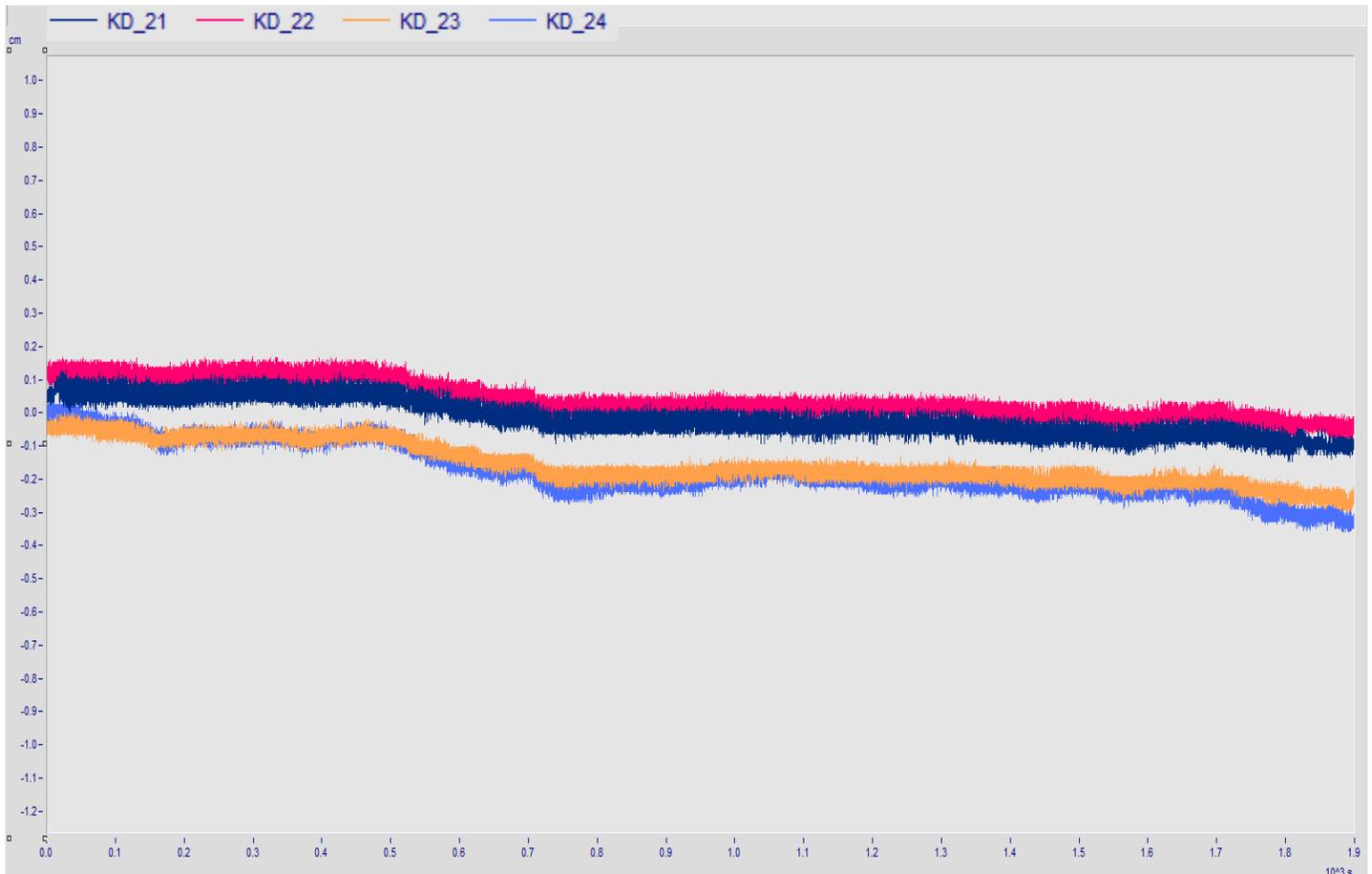


Fig.5.7 Series de tiempo de los sensores de la Columna 6 para el caso 70C30A

En la Fig.5.9 para el caso de un suelo con 70 % de suelo fino, se observa que la presión registrada en los cuatro sensores (KD\_21, KD\_22, KD\_23 y KD\_24) presentan un periodo similar al oleaje inducido ( $T = 1$  s) pero con una amplitud muy pequeña. La señal del KD\_21 inicia con una presión de -0.05 cm, durante el tiempo del ensayo libera alrededor de 0.15 cm de presión; misma cantidad que se libera en el sensor KD\_22 solo que este inicia con una presión positiva poco mayor de 0.1 cm y finaliza con una presión negativa de 0.05 cm. El registro de los sensores KD\_23 y KD\_24 manifiesta un comportamiento similar, inician con una presión nula y de -0.05 cm, y finalizan con valores de -0.3 y -0.25 cm respectivamente, debido al efecto de drenado que se presenta en la masa de suelo no existe acumulación de presión de poro.

Material 85C15A:

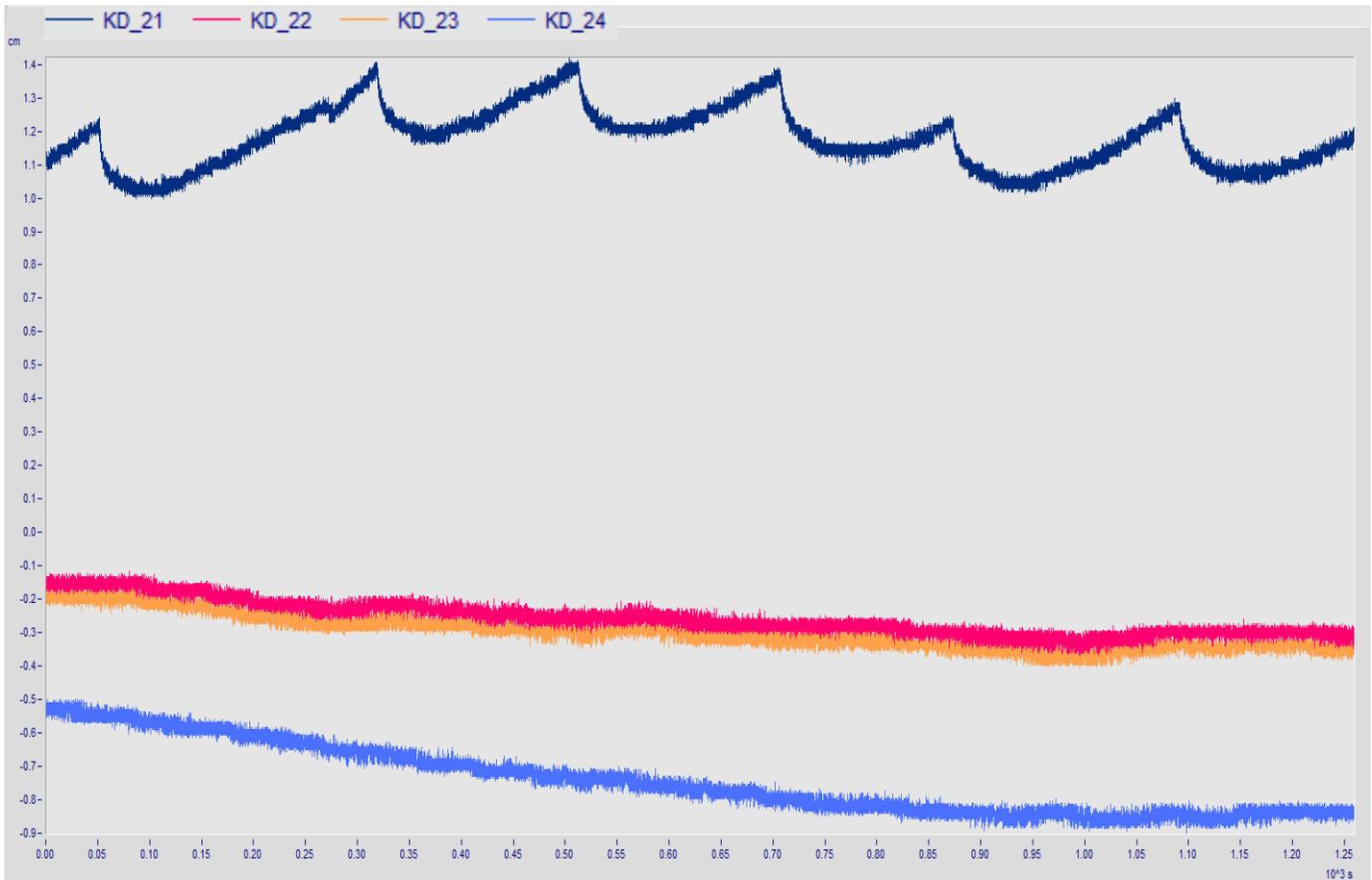


Fig.5.8 Series de tiempo de los sensores de la Columna 6 para el caso 85C15A

En la Fig.5.10 para el caso de un suelo con el 85% de contenido fino, se puede observar que en el sensor KD\_21 se presenta la serie de acumulación y liberación de presión con duración de 200 s aproximadamente, caso que se presentó y describió para el análisis horizontal. Mientras que el par de sensores KD\_22 y KD\_23 presentan el mismo fenómeno que para el caso de 70C30A, liberando presión alrededor de 0.15 cm. En cambio el sensor que registra una mayor liberación de presión debido al posible drenado y asentamiento de la carga muerta, es el sensor KD\_24, que comienza con un valor de -0.53 cm y finaliza con -0.83 cm, valor que se mantiene constante desde los 900 s hasta que termina la prueba, por lo tanto, se liberó una presión de 0.30 cm en tres cuartos del tiempo que duró el ensayo. Las características de éste suelo señalan que a mayor profundidad se registra mayor liberación de presión, y recordando lo observado en el análisis horizontal se puede decir que ésta combinación, 85C15A, ha sido la más idónea por obtener la mayor información respecto a los demás casos.

Material 100C:

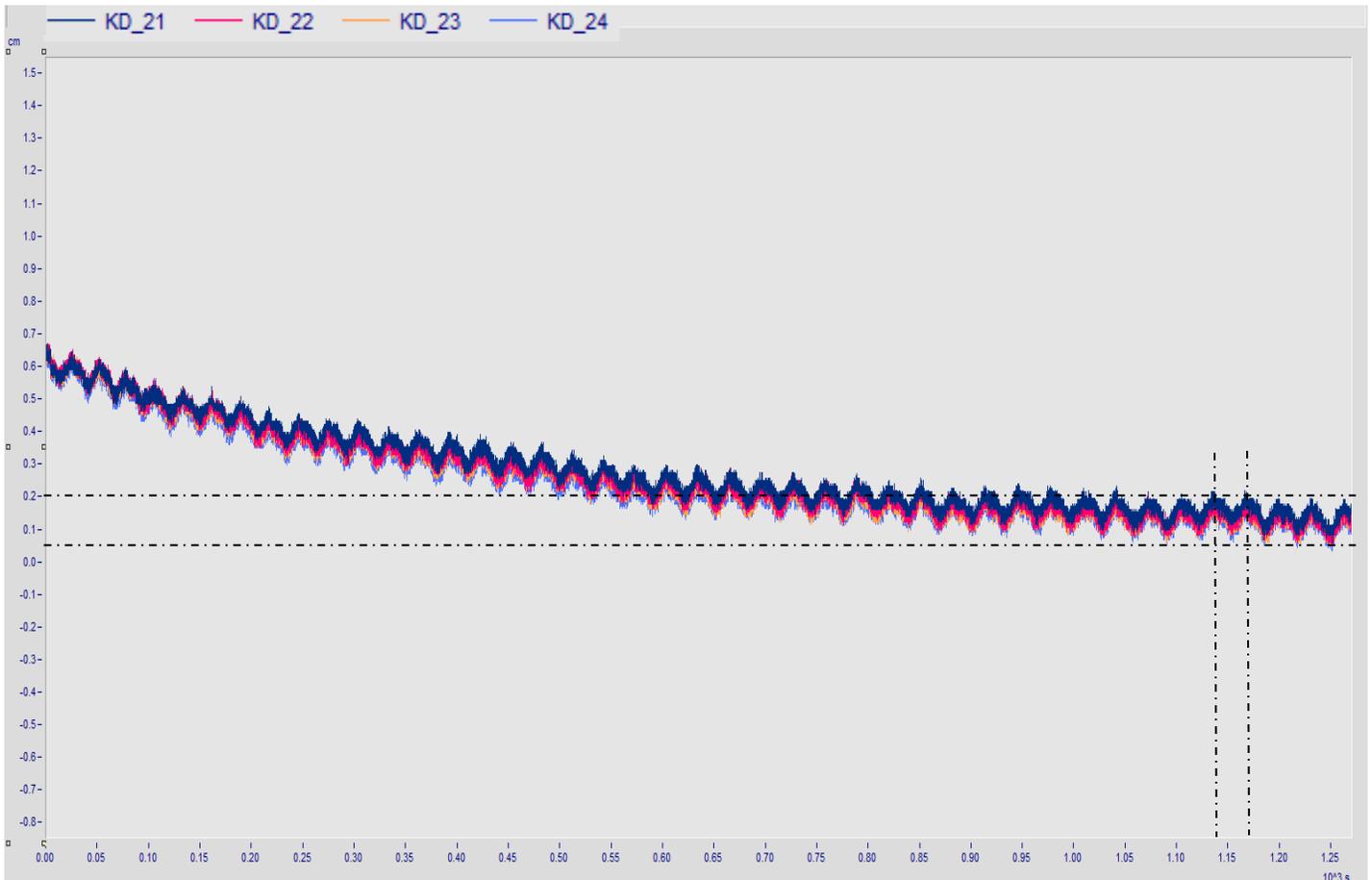


Fig.5.9 Series de tiempo de los sensores de la Columna 6 para el caso 100C

En la Fig.5.11 para el caso de un suelo completamente fino. El registro obtenido por los cuatro sensores participantes, KD\_21, KD\_22, KD\_23 y KD\_24, presentan el mismo comportamiento durante el tiempo que dura la prueba. Tomando en cuenta que dichos sensores se encuentran debajo de la estructura, se hubiera esperado comportamientos diferentes conforme la profundidad variaba, sin embargo, se observa que los cuatro sensores inician con una presión de 0.65 cm y finalizan con un descenso de 0.55 cm, teniendo el mayor decaimiento de presión en un lapso de 700 s. Además, las señales muestran un pequeño proceso de acumulación y liberación de presión constante, con un periodo de 40 s y amplitud de 0.075 cm. Dada la alta impermeabilidad del suelo, se impide la entrada de agua, dando paso a un posible drenado producto del asentamiento de la estructura debido a la interacción oleaje-estructura, provocando así disminución de presión de poro.

### 5.3 Respuesta a la cantidad de agua

Este análisis corresponde solo a un tipo de suelo, el de 70C30A, que fue la única combinación en donde se varió la cantidad de agua, como se puede apreciar en la *Tabla 5.2*. En la primera columna se indica la prueba realizada con letras del abecedario, ya que la combinación 70C30A se mantiene constante; la segunda columna muestra la cantidad de mezcla en seco por litro de agua; la tercera columna indica la duración que tuvo cada corrida en minutos; la cuarta columna es el periodo de oleaje (T) en segundos, el cual se mantuvo en 1.05 s; la quinta columna es la altura de ola (H) en metros, el cual se mantuvo en 0.08 m y la sexta columna es la duración en segundos que se ingresa en el software HR Merlin, es decir, especificando el tiempo de duración de cada ciclo de olas.

Las corridas elegidas para este análisis se eligieron considerando un mismo periodo y altura con el fin de poder comparar los resultados de un sistema de olas semejantes.

La prueba A se llevo a cabo con 3.10 kg de mezcla en seco por litro de agua, colocando la estructura y posteriormente el tirante de agua de 30 cm para poder empezar con el conjunto de olas; para la prueba B su utilizó 3.15 kg de mezcla en seco por litro de agua, colocando la estructura y posteriormente el tirante de agua de 30 cm para poder empezar con el conjunto de olas; y finalmente para la prueba C se retomó la cantidad de 3.10 kg de mezcla en seco por litro de agua, colocando primero el tirante de agua de 30 cm y posteriormente la estructura para poder empezar con el conjunto de olas.

<b>Prueba</b>	<b>Cant. H<sub>2</sub>O</b>	<b>Dur. Ensayo (min)</b>	<b>T (s)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Tiempo WAVE (s)</b>
A	3.10 kg/L	01:15	1.05	0.08	75
B	3.15 kg/L	01:15	1.05	0.08	75
C	3.10 kg/L	01:15	1.05	0.08	75

*Tabla 5.2* Pruebas para la cantidad de agua



### 5.3.1 Distribución horizontal de la presión de poro

A continuación se muestra la distribución horizontal de la presión de poro en las tres pruebas de la muestra 70C30A de las figuras 5.14 a la 5.18; en cada figura se han dibujado las series temporales de los sensores, donde el eje de las abscisas representa el tiempo en segundos, mientras que en el eje de las ordenadas la variación en la presión de poro en cm. Tomando en cuenta que son cuatro filas por cada uno, resultan 12 gráficas lo que viene siendo muy extenso para éste trabajo, por lo que se ha decidido representar solo una fila por cada tipo de prueba, seleccionando aquella que presenta mejores resultados.

Prueba A:

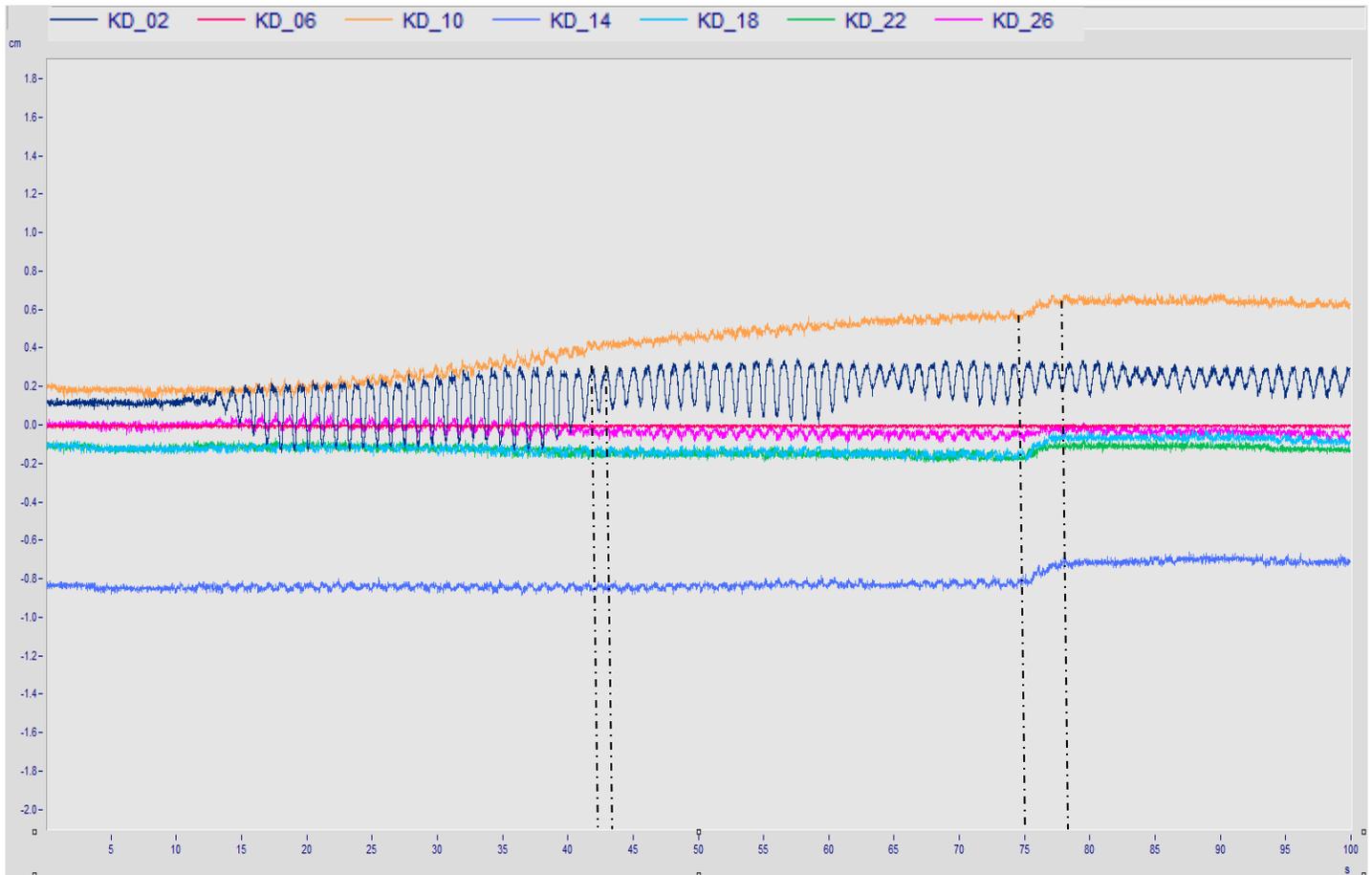


Fig. 5.10 Series de tiempo de los sensores de la Fila 2 para la prueba A

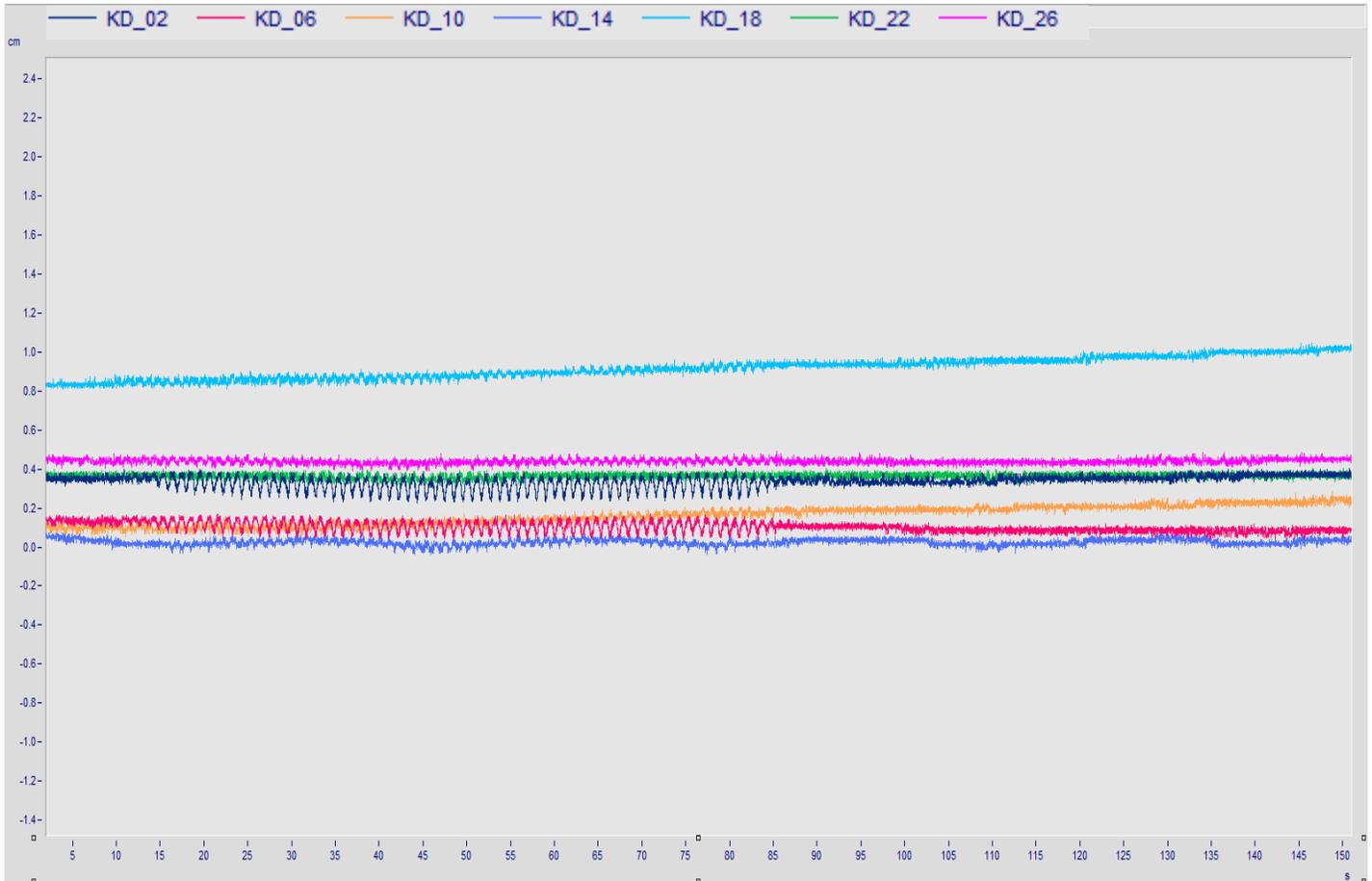
En la Fig. 5.14 se presenta la Fila 2 de sensores para la prueba A, con 3.10 kg/L y colocación de la estructura antes del tirante de agua de 30 cm. Se observa que el registro obtenido del sensor KD\_02 responde directamente a la variación de la superficie libre por mantener un periodo de 1.05 s, igual al que fue inducido al sistema de oleaje, pero con un decaimiento en la amplitud mayor, acompañado de un ligero aumento de presión de 0.1 cm. Es de notar que los sensores KD\_06 y KD\_26 se encuentran fuera del área de carga, registrando un comportamiento despreciable durante el tiempo de prueba. El registro del sensor KD\_10 se ubica debajo de la estructura cuyo comportamiento se presenta en tres secciones; la primera, con un aumento de presión de 0.4 cm en un lapso de tiempo de 55 s, la acumulación de presión inicia a los 20 s y concluye a los 75 s; la segunda, con un súbito aumento de presión de 0.1 cm en un corto tiempo de 3 s; y tercero, el comportamiento en el resto del tiempo presenta una estabilización sin aumento ni disminución de presión. En el caso del sensor KD\_14 que se encuentra justamente debajo de la estructura responde directamente a la variación de la superficie libre al igual que en el sensor KD\_02, pero con una amplitud mucho menor, como en los casos del KD\_18 y KD\_26.



Es de destacar que los comportamientos en KD\_14, KD\_18 y KD\_22 son muy semejantes, por no tener cambio de presión alguna durante los primeros 75 s, logrando el mismo efecto de escalón que en el sensor KD\_10, con el mismo aumento de presión (0.1 cm) en los 3 s posteriores, concluyendo el resto del tiempo sin cambio alguno.

Dada las condiciones de esta prueba colocando la estructura antes que el tirante de agua sobre una masa de suelo de 3.10 kg/L de agua, se tiene de manera general un aumento de presión que varía de 0.1 a 0.4 cm en un lapso de 60 s, teniendo un tiempo de respuesta lento.

### Prueba B



*Fig.5.11* Series de tiempo de los sensores de la Fila 2 para la prueba B

En la *Fig.5.15* se presenta la Fila 2 de sensores para la prueba B, con 3.15 kg/L y colocación de la estructura antes del tirante de agua de 30 cm. Como se puede observar, existe una sensible variación de la presión en el tiempo que responde ligeramente a la variación de la superficie libre, lo cual se verifica al considerar el periodo de las oscilaciones que es el mismo al oleaje generado, esto es, 1.05 s, manteniendo la misma periodicidad sin aumento o decaimiento de presión, excepto por el sensor KD\_18 que se encuentra debajo de la estructura, presentando un ligero aumento de presión apenas de 0.2 cm aproximadamente. Dadas las características del material, no se observa acumulación de presión considerable.

### Prueba C

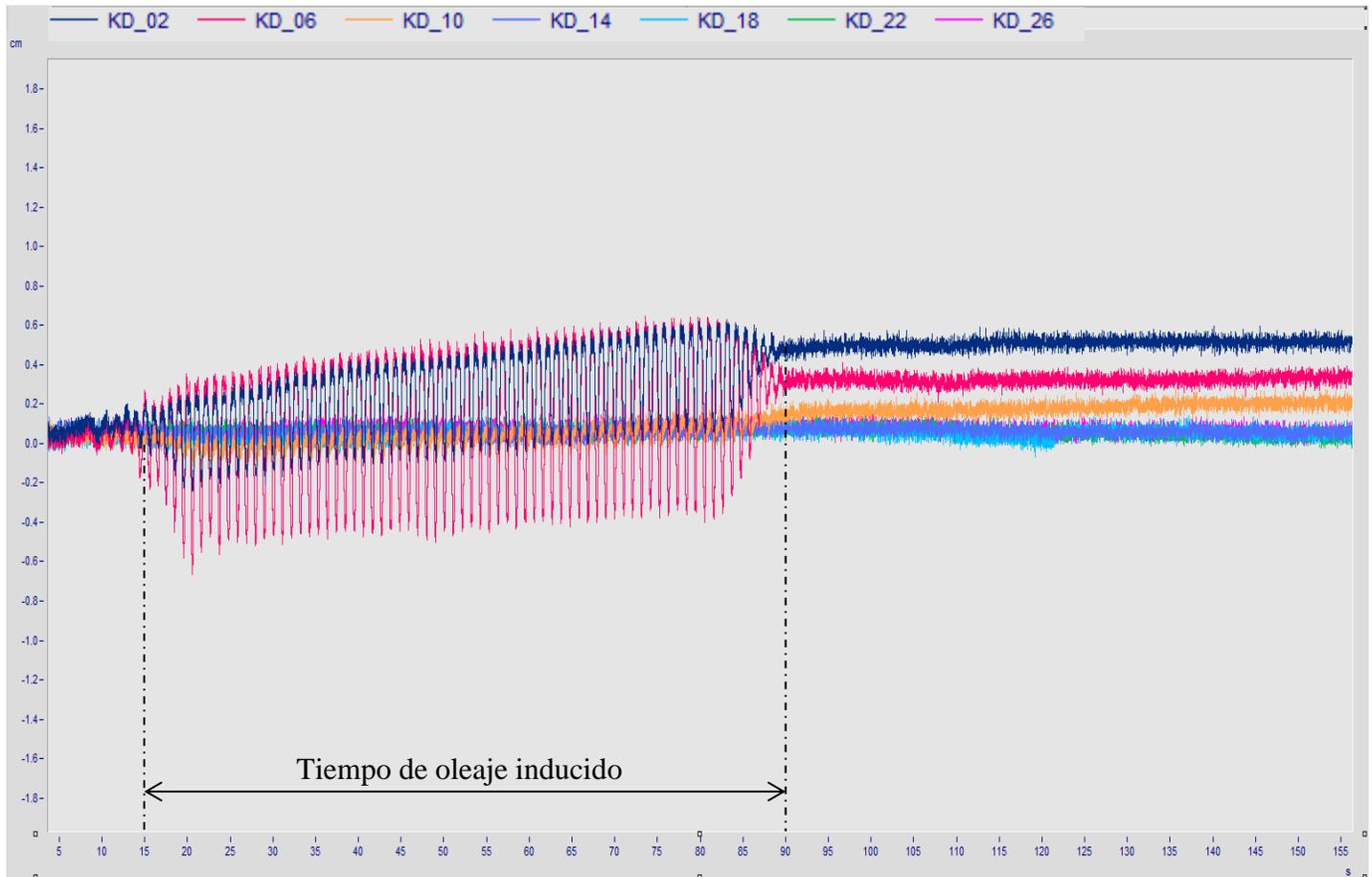


Fig.5.12 Series de tiempo de los sensores de la Fila 2 para la prueba C

En la Fig.5.16 se presenta la Fila 2 de sensores para la prueba C, con 3.10 kg/L y colocación de la estructura después del tirante de agua de 30 cm. Tomando en cuenta que el inicio del registro de datos inicio antes de la generación de oleaje, de igual manera, termina tiempo después de haber concluido el paquete de olas. De este modo se puede apreciar que en el sensor KD\_02 existe una variación que responde directamente con la variación de la superficie libre, con un periodo de 1.05 s por el lapso de 75 s (tiempo de generación de oleaje-Tiempo Wave-) acumulando presión de manera lineal hasta llegar al valor de 0.5 cm, iniciando este fenómeno a los 15 s y finalizando a los 90 s; el registro posterior a los 90 s no presenta cambio alguno de presión de poro. El sensor KD\_06 también presenta una variación de presión similar durante 75 s, pero con una mayor amplitud en el decaimiento de presión, llegando a acumular 0.3 cm de presión. Lo observado para el sensor KD\_10 que se encuentra debajo de la estructura, indica que a los primeros 8 s de haber iniciado el oleaje se presenta una ligera disminución de presión, presentándose un efecto de drenado causado por el impacto de las primas olas sobre la estructura,



y esta a su vez con la masa de suelo; sin embargo, empezó a recuperar presión durante el resto del ensayo acumulando hasta 0.2 cm de presión en columna de agua.

El resto de los sensores KD\_14, KD\_18, KD\_22 y KD\_26 no presentan cambio alguno de presión de poro.



### 5.3.2 Distribución vertical de la presión de poro

A continuación se muestra de las figuras 5.19 a la 5.23 la distribución vertical de la presión de poro para las tres pruebas; en cada figura se han dibujado las series temporales de los sensores, donde el eje de las abscisas representa el tiempo en segundos, mientras que en el eje de las ordenadas la variación en la presión de poro en cm. Tomando en cuenta que son siete columnas por cada uno, resultan 21 gráficas lo que viene siendo muy extenso para éste trabajo, por lo que se ha decidido representar solo una columna por cada prueba, seleccionado aquella que presenta mejores resultados. Siendo la columna 3 a analizar, que se encuentra en la zona libre de estructura.

Prueba A:

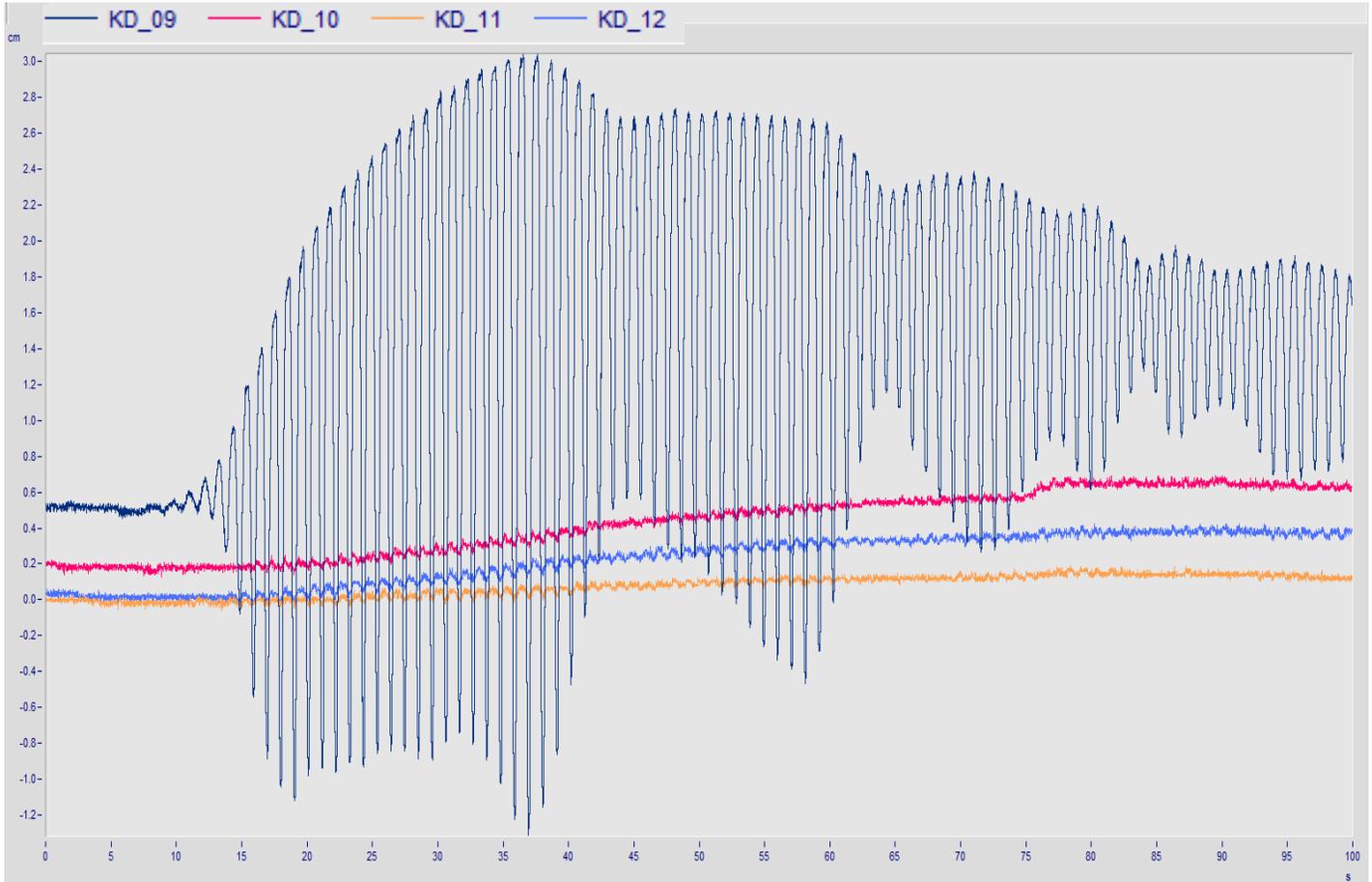


Fig.5.13 Series de tiempo de los sensores de la Columna 3 para la prueba A

En la Fig.5.19 se presenta la Columna 3 de sensores para la prueba A, con 3.10 kg/L y colocación de la estructura antes del tirante de agua de 30 cm. Como se puede observar, la variación de la presión en el tiempo responde directamente a la variación de la superficie libre con un periodo de 1.05 s, pero a mayor profundidad la amplitud se reduce al igual que la acumulación de presión, sin olvidar que los cuatro sensores se ubican debajo de la estructura. La variación en la amplitud del sensor KD\_09 se presenta como una serie de paquetes de descensos y ascensos que se repiten constantemente, proceso que es acompañado de 0.9 cm en acumulación de presión de poro. En los demás sensores KD\_10, KD\_11 y KD\_12 presentan incrementos de presión de 0.4, 0.35 y 0.1 cm, respectivamente. Es de notar que todos los sensores presentan un incremento de presión, que varía de 0.0 a 0.7 cm, reflejando que a medida que la profundidad aumenta, la acumulación de presión es disminuye.

Prueba B:

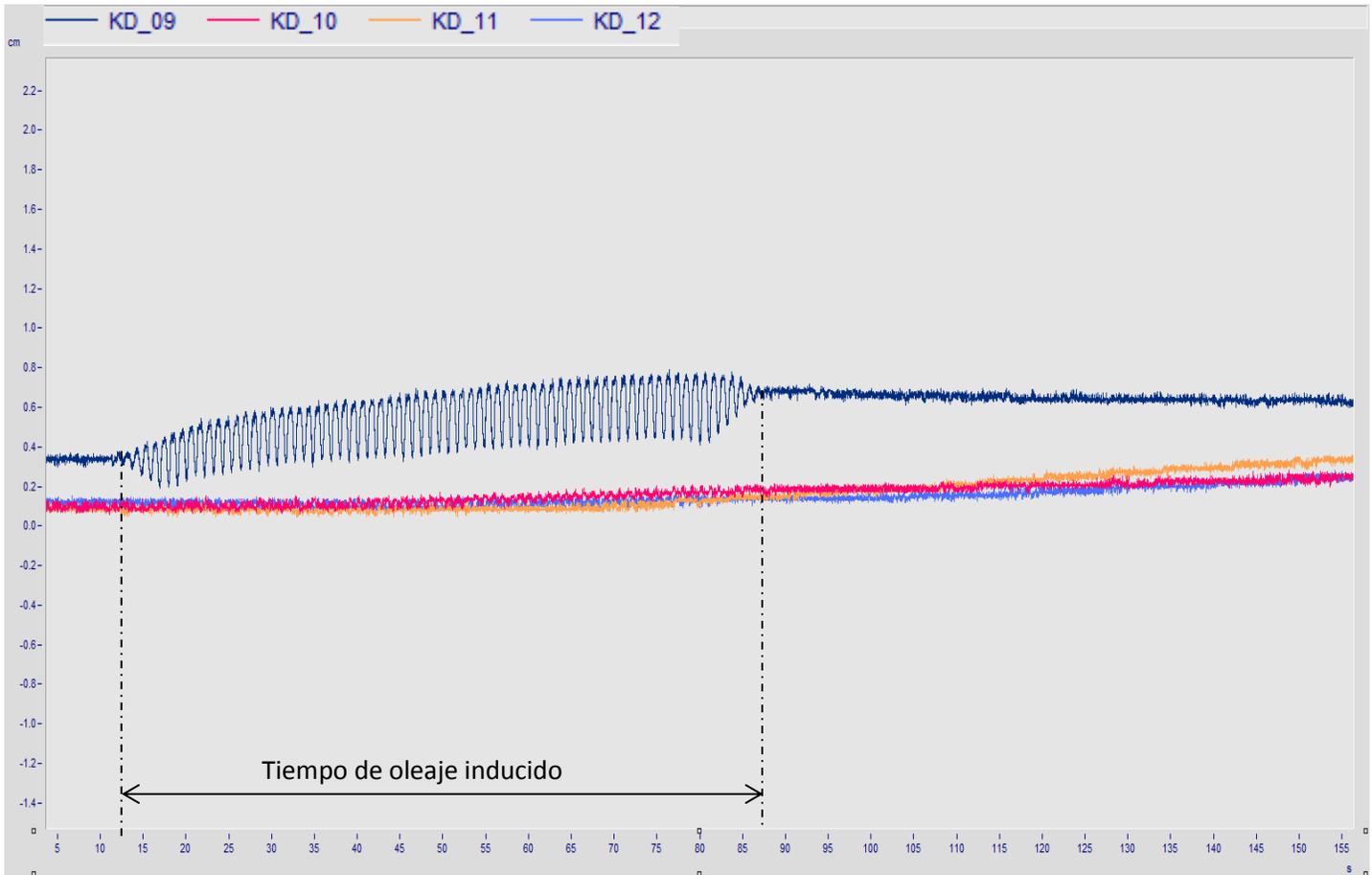


Fig.5.14 Series de tiempo de los sensores de la Columna 3 para la prueba B

En la Fig.5.20 se presenta la Columna 3 de sensores para la prueba B, con 3.15 kg/L y colocación de la estructura antes del tirante de agua de 30 cm. Como se puede observar, la variación de la presión en el tiempo responde directamente a la variación de la superficie libre, de acuerdo al periodo de 1.05 s durante los 75 s que dura el paquete de olas inducido. Es de notar que todos los sensores presentan un ligero incremento de presión, donde el sensor KD\_09 registro un incremento de 0.25 cm, KD\_10 y KD\_12 de 0.15 cm y KD\_11 de 0.2 cm.

La variación en la amplitud obtenida por KD\_09 es mayor al resto de los sensores donde sus amplitudes son apenas perceptibles, por el hecho de estar más cerca a la superficie y recibir la presión que se produce en la masa de suelo cuando la fuerza de oleaje impacta con la estructura.

Aclarando que el instante en que la primera ola llega a impactarse con la estructura inicia el registro de los 75 s de oleaje sobre la carga muerta, ya que en el instante “0” la primera ola recorre 12.5 m hasta llegar a la charola con la masa de suelo y la estructura.

Prueba C:

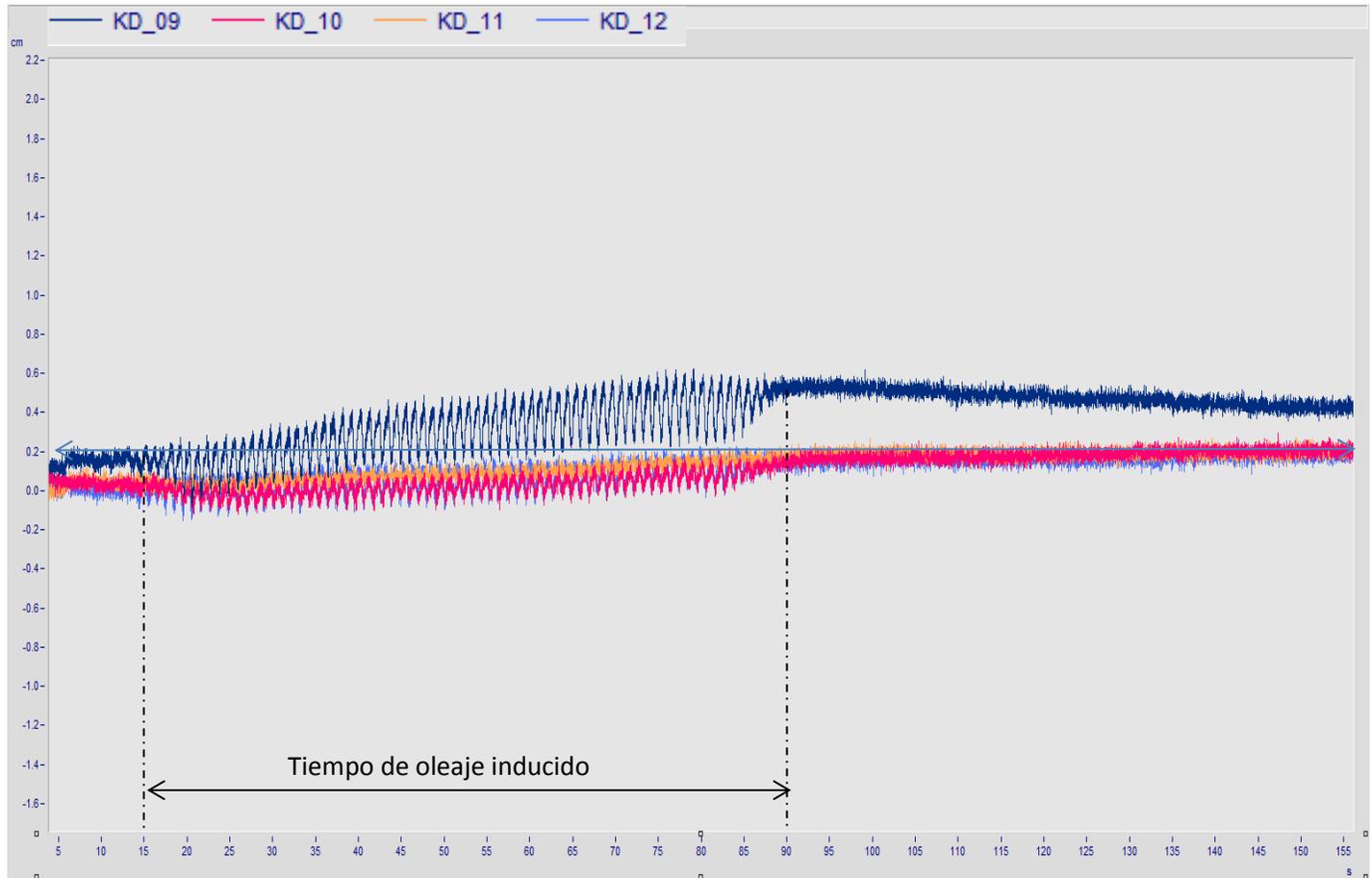


Fig.5.15 Series de tiempo de los sensores de la Columna 3 para la prueba C

En la Fig.5.21 se presenta la Columna 3 de sensores para la prueba C, con 3.10 kg/L y colocación de la estructura después del tirante de agua de 30 cm. De igual modo que en los dos casos anteriores, la variación de la presión en el tiempo responde a la variación de la superficie libre, manteniendo el periodo de 1.05 s. Los cuatro sensores se ubican por debajo de la estructura, obteniendo del sensor KD\_09 una acumulación de presión de 0.3 cm, mientras que para los demás sensores KD\_10, KD\_11 y KD\_12 tuvieron un comportamiento similar mediante el incremento de 0.15 cm. Observando que cuando la profundidad aumenta la amplitud en la variación de presión decrece.

Aclarando que el instante en que la primera ola llega a impactarse con la estructura inicia el registro de los 75 s de oleaje sobre la carga muerta, ya que en el instante “0” la primera ola recorre 12.5 m hasta llegar a la charola con la masa de suelo y la estructura.

#### 5.4 Respuesta por el tipo de oleaje

En este análisis se consideraron los suelos: 100A y 70C30A, donde el tipo de ola inducido fue regular e irregular, como se puede apreciar en la *Tabla 5.3*, ya que en los materiales posteriores donde se incrementó el porcentaje de caolín se realizaron pruebas con oleaje regular. En la primera columna se indica el material empleado; la segunda columna muestra el tipo de oleaje, regular e irregular; la tercera columna indica la duración que tuvo cada corrida en minutos; la cuarta columna es el periodo de oleaje (T) en segundos, el cual se mantuvo en 3.0 s; la quinta columna es la altura de ola (H) en metros, de 0.08 m para oleaje regular y 0.10 m para irregular; la sexta columna es la duración en segundos que se ingresa en el software HR Merlin, es decir, especificando el tiempo de duración de cada ciclo de olas.

Las corridas elegidas para ambos materiales se eligieron considerando un mismo periodo y una misma altura para el mismo tipo de oleaje.

<b>Material</b>	<b>Tipo de oleaje</b>	<b>Dur. Ensayo (min)</b>	<b>T</b>	<b>H (m)</b>	<b>Tiempo WAVE (s)</b>
100A	Regular	02:45	3.00	0.08	165
	Irregular	10:10	3.00	0.10	610
70C30A	Regular	02:45	3.00	0.08	165
	Irregular	10:10	3.00	0.10	610

*Tabla 5.3* Pruebas para la cantidad de agua



#### 5.4.1 Distribución horizontal de la presión de poro

A continuación se muestra la distribución horizontal de la presión de poro obtenidas por oleaje regular como irregular, de las figuras 5.24 a la 5.31, para el par de materiales empleados; en cada figura se han dibujado las series temporales de los sensores, donde el eje de las abscisas representa el tiempo en segundos, mientras que en el eje de las ordenadas la variación en la presión de poro en cm. Tomando en cuenta que son cuatro filas por cada uno, resultan 16 gráficas en total, lo que viene siendo muy extenso para éste trabajo, por lo que se ha decidido representar solo una fila por cada tipo de oleaje, seleccionando aquella que presenta mejores resultados.

Oleaje regular:

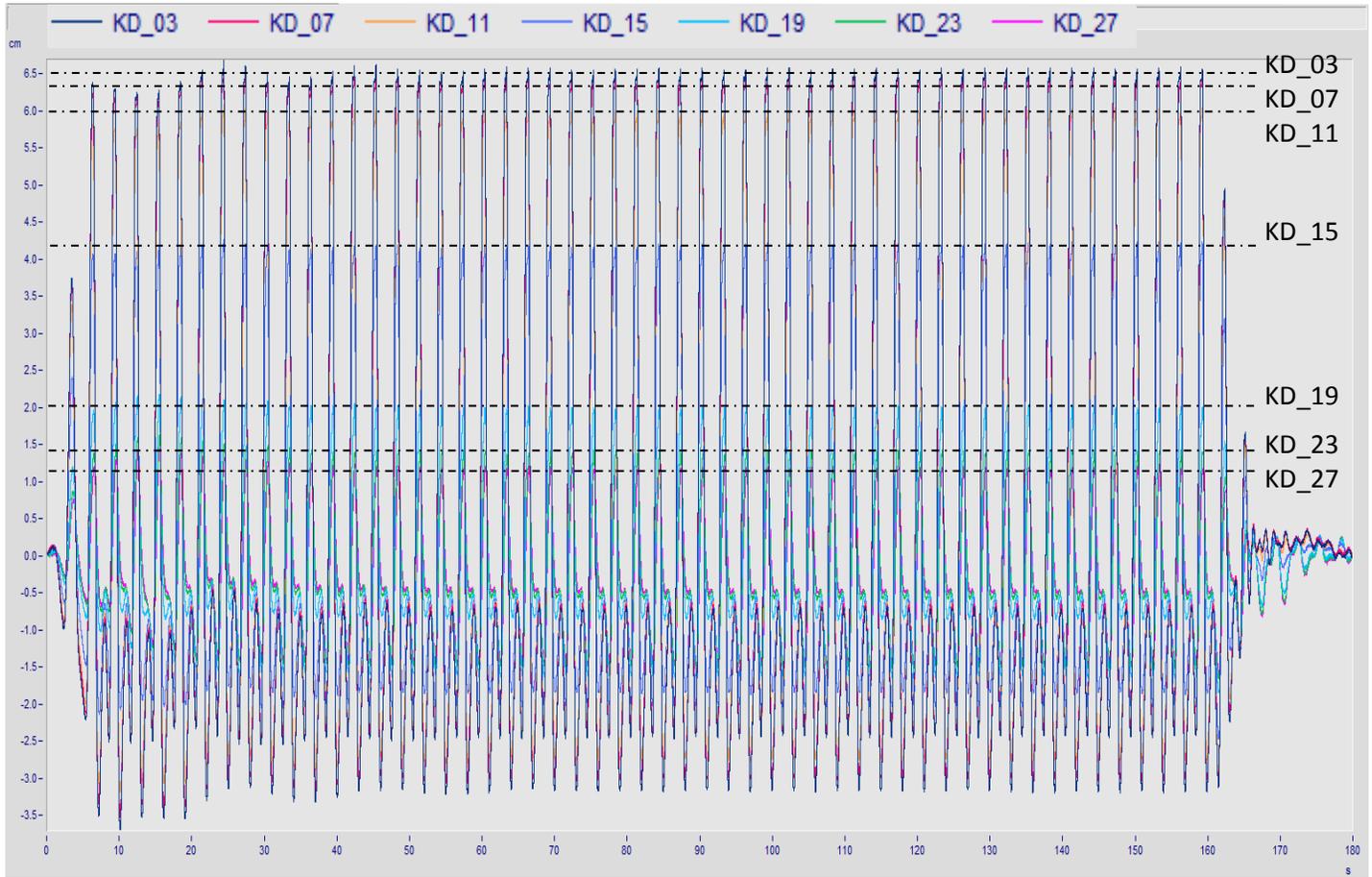


Fig.5.16 Series de tiempo de los sensores de la Fila 3 para la prueba regular, 100A

En la Fig.5.24 se presenta la Fila 3 de sensores para el caso de un suelo con nulo contenido de finos en oleaje regular. Como se puede observar, la variación de la presión en el tiempo responde directamente a la variación de la superficie libre, lo cual se verifica al considerar el periodo de las oscilaciones que es el mismo que el del oleaje generado, esto es, 3.0 s. Es de notar que la amplitud de variación de presión decrece conforme a la ubicación de los sensores, pues los que se ubican fuera del área de carga (KD\_03, KD\_07, KD\_23 y KD\_27) su amplitud decrece alrededor de 0.2 cm, mientras que los sensores ubicados debajo de la estructura (KD\_11, KD\_15 y KD\_19) su amplitud en la variación de presión presenta mayor decremento alrededor de 2.0 cm entre cada par, sin embargo a lo largo de los siete sensores que cubre el plano horizontal no existe cambio en la presión de poro dada las características del suelo (solo arena).

Oleaje irregular:

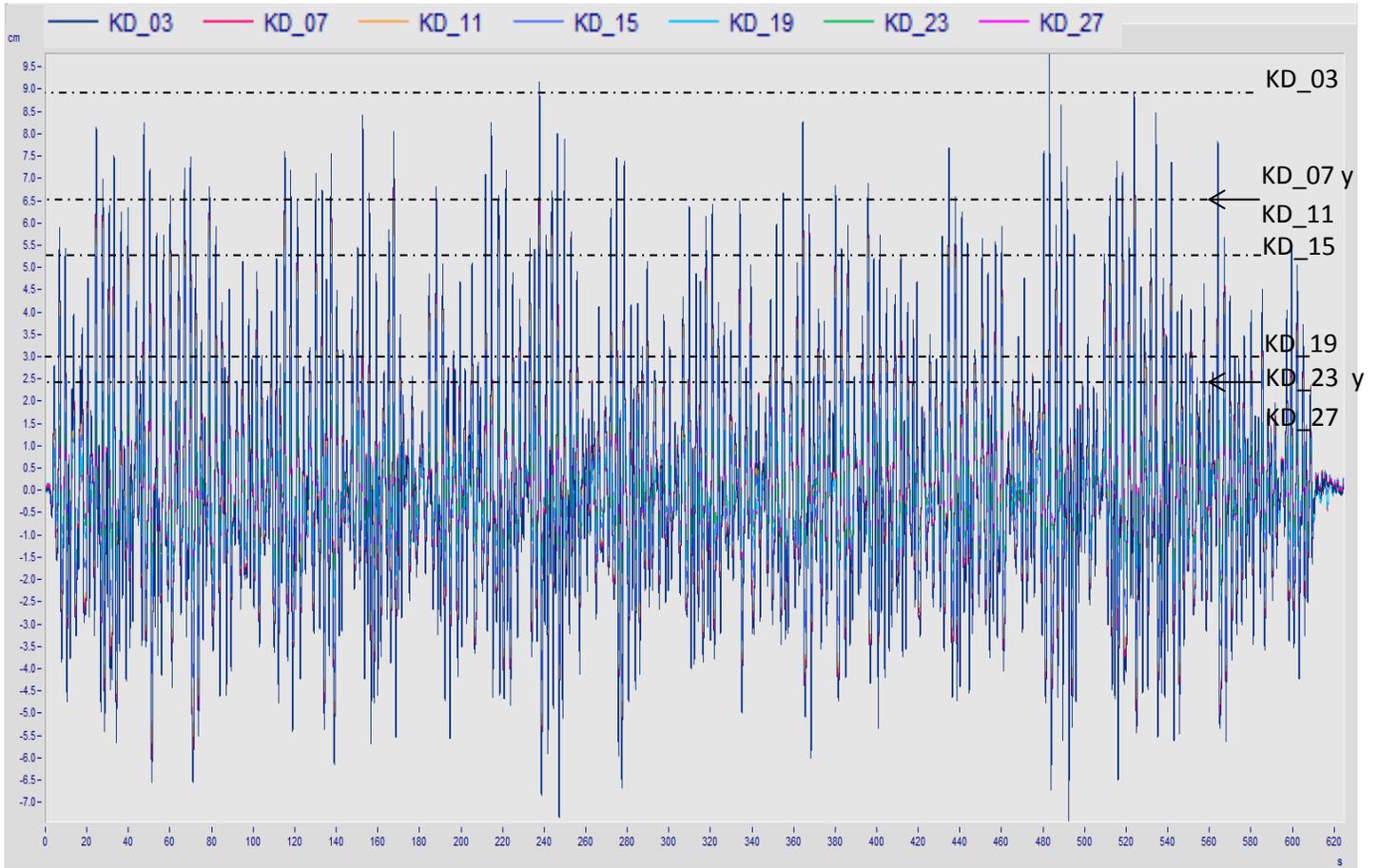


Fig.5.17 Series de tiempo de los sensores de la Fila 3 para la prueba irregular, 100A

En la Fig.5.25 se presenta la Fila 3 de sensores para el caso de un suelo con nulo contenido de finos en oleaje irregular. Al igual que en el caso para oleaje regular, la variación de presión responde a la variación de la superficie libre, manteniendo el periodo de 3.0 s. Sin embargo, la amplitud en la variación de presión es muy errática, no existe algún patrón de semejanza entre los sensores que están fuera o dentro del área de carga, así como la nula acumulación de presión de poro para un caso total de arena.

Oleaje regular:

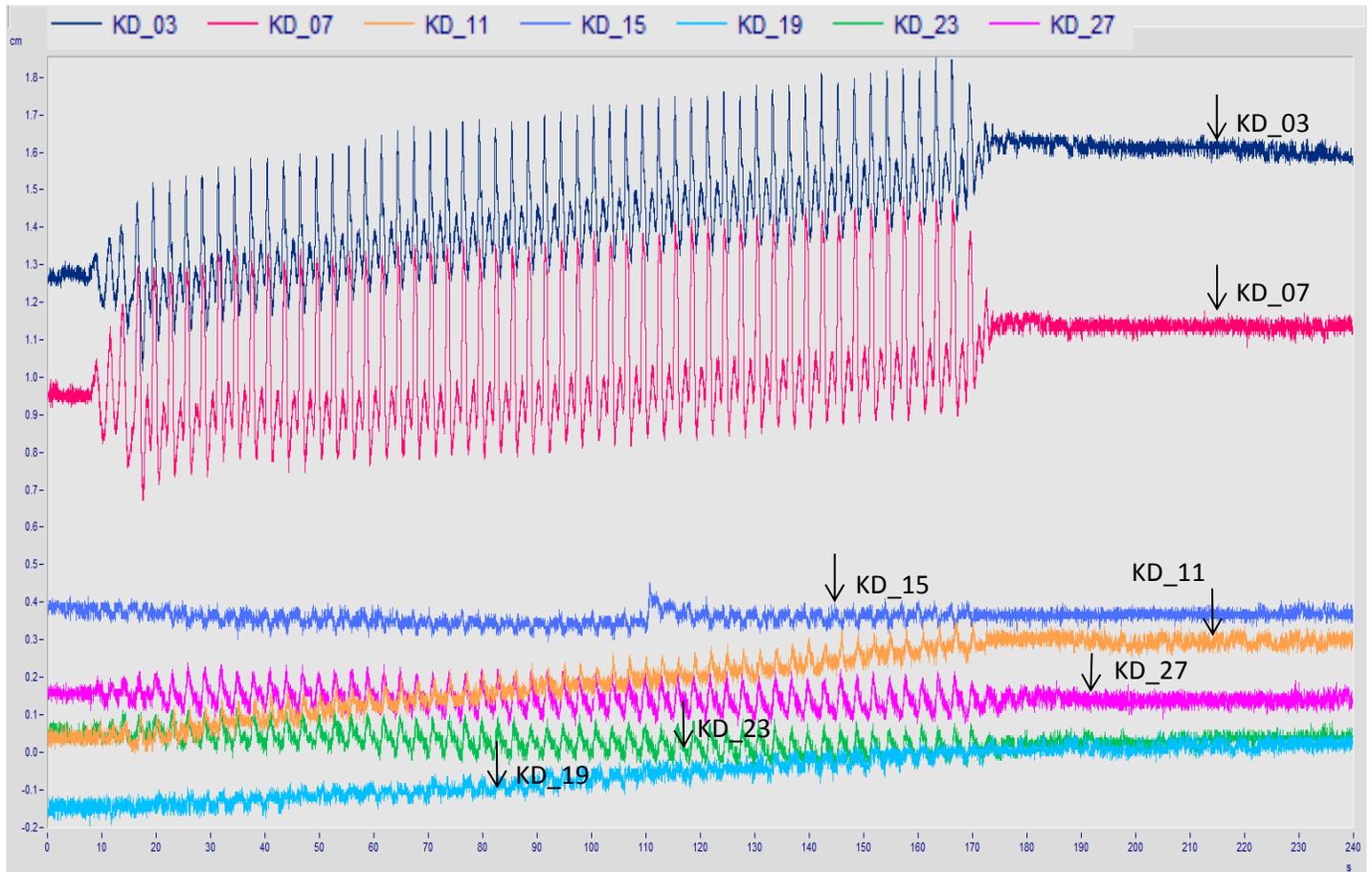


Fig.5.18 Series de tiempo de los sensores de la Fila 3 para la prueba regular, 70C30A

En la Fig.5.28 se presenta la Fila 3 de sensores para el caso de un suelo con 70% de contenido fino en oleaje regular. Como se puede observar, la variación de la presión en el tiempo responde directamente a la variación de la superficie libre (olas), lo cual se verifica al considerar el periodo de las oscilaciones que es el mismo que el del oleaje generado, esto es, 3.0 s. Es de notar que los sensores que están en la primera zona de suelo libre de estructura muestran un incremento de presión considerable, con variación de 0.1 a 0.3 cm, mientras que los sensores que están debajo de la estructura presentan un menor incremento, alrededor de 0.1 y 0.2 cm, y para los sensores en la segunda zona de suelo libre de estructura la presencia de algún incremento de presión en el suelo es prácticamente nula. De modo que la acumulación de presión va disminuyendo a lo largo de la muestra de suelo.

Oleaje irregular:

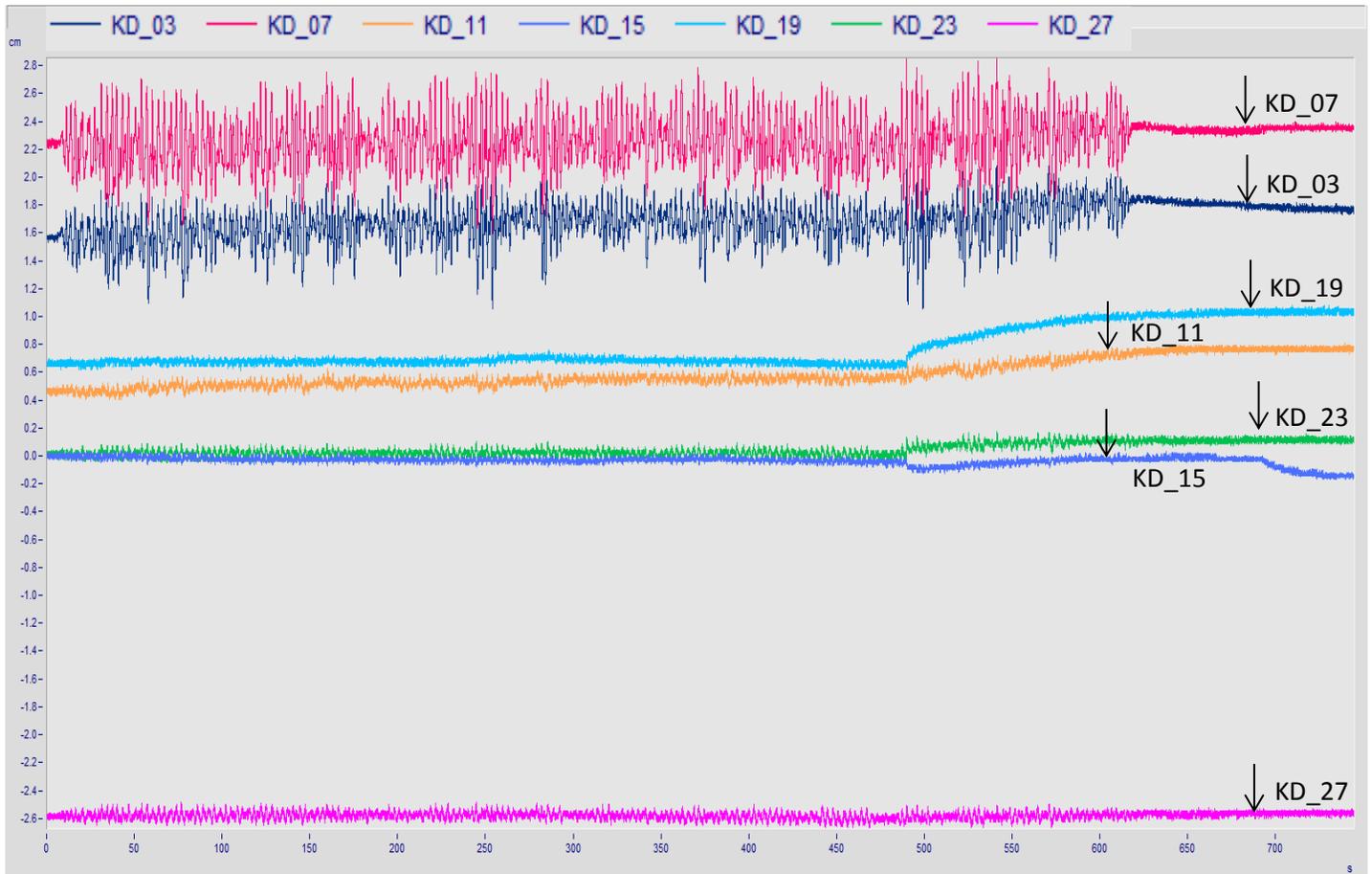


Fig.5.19 Series de tiempo de los sensores de la Fila 3 para la prueba irregular, 70C30A

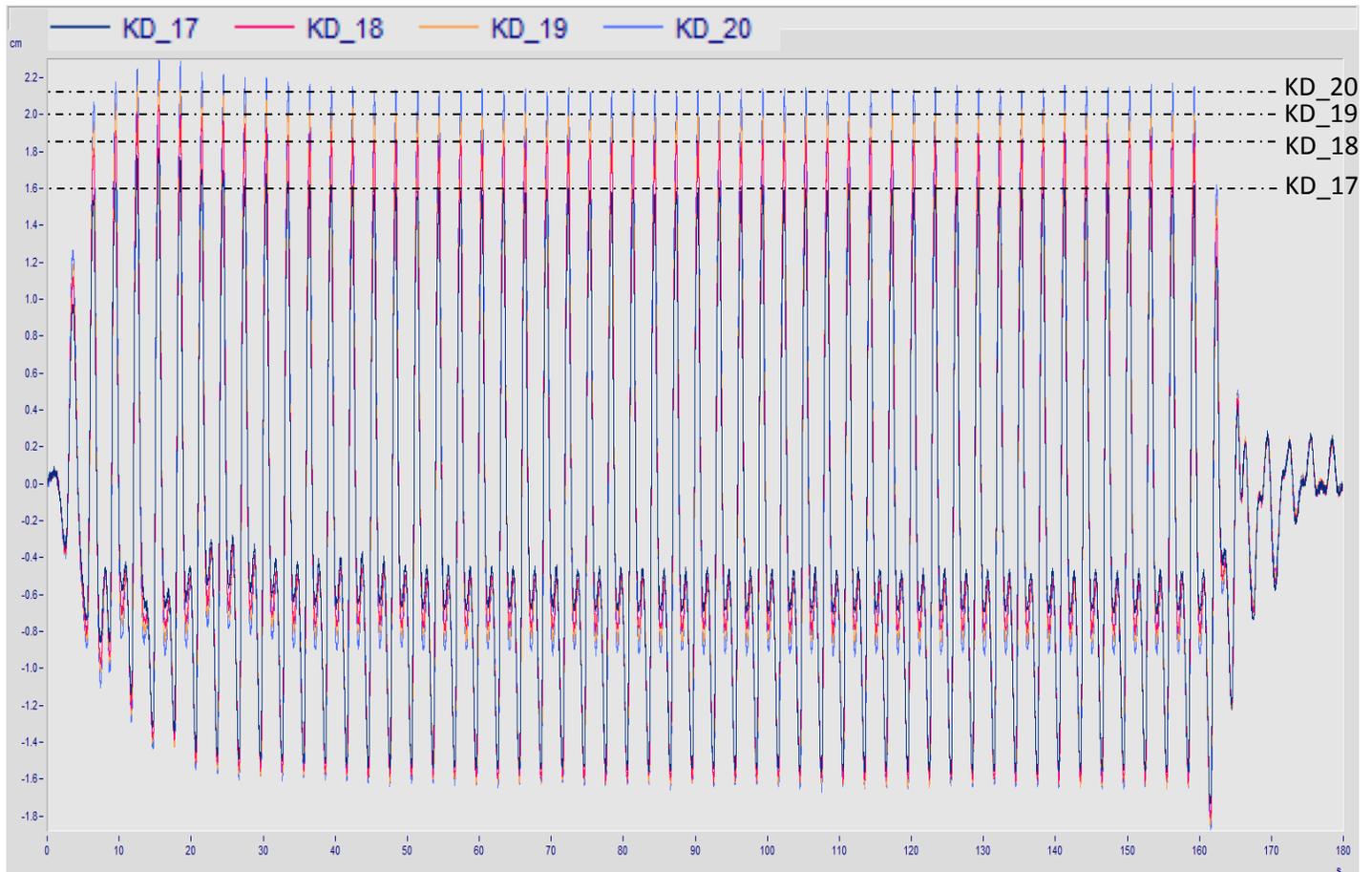
En la Fig.5.29 se presenta la Fila 3 de sensores para el caso de un suelo con 70% de contenido fino en oleaje irregular. Como se puede observar, en comparación con el oleaje regular, la presencia de acumulación de presión igual o mayor a 0.2 cm no se hizo presente, claro, en los sensores que se encuentran debajo de la estructura existe cierto incremento de presión, pero éstos son prácticamente despreciables, además de observar que en el sensor 15 se presentó un fenómeno similar a un escalón, que podría haberse tratado de una pequeña falla o grieta por donde hubo drenado de agua, pero de manera instantánea se recuperó a la presión inicial y al parecer dicho fenómeno es cíclico. Si estos fenómenos hubieran sido de mayor escala, sin duda hubieran sido una gran aportación. Por lo tanto, ésta condicione de oleaje para ésta muestra no presentan acumulación o decaimiento de presión.



#### 5.4.2 Distribución vertical de la presión de poro

A continuación se muestra la distribución vertical de la presión de poro obtenidas por oleaje regular como irregular, de las figuras 5.32 a la 5.39, para el par de materiales empleados; en cada figura se han dibujado las series temporales de los sensores, donde el eje de las abscisas representa el tiempo en segundos, mientras que en el eje de las ordenadas la variación en la presión de poro en cm. Tomando en cuenta que son siete columnas por cada uno, resultan 28 gráficas en total, lo que viene siendo muy extenso para éste trabajo, por lo que se ha decidido representar solo una columna por cada tipo de oleaje, seleccionando aquella que presenta mejores resultados.

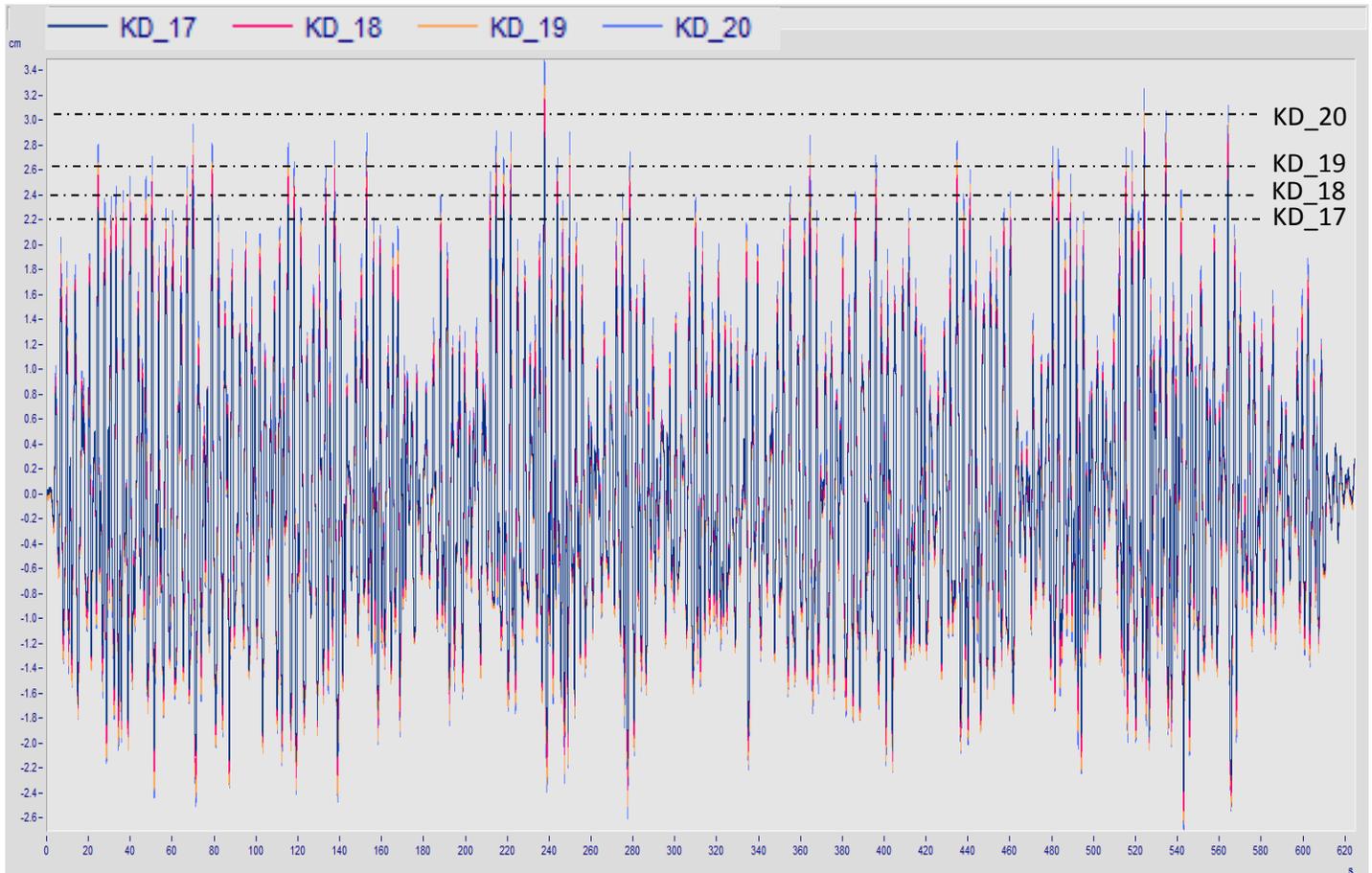
Oleaje regular:



*Fig.5.20* Series de tiempo de los sensores de la Columna 5 para la prueba regular, 100A

En la *Fig.5.32* se presenta la Columna 5 de sensores para el caso de un suelo con nulo contenido de finos en oleaje regular. Como se puede observar, la variación de la presión en el tiempo responde directamente a la variación de la superficie libre (olas), lo cual se verifica al considerar el periodo de las oscilaciones que es el mismo que el del oleaje generado, esto es, 3.0 s. Es de notar que la columna de sensores se encuentra debajo de la zona de carga (estructura), mostrando una gran amplitud en la variación de presión cercana a la de las olas, acompañado de un decaimiento menor manteniendo la fase, es decir, las oscilaciones tienen la misma periodicidad. Dicho comportamiento es muy relevante, ya que la amplitud de presión aumenta a mayor profundidad, es decir, el sensor 17 se encuentra más cercano a la superficie y llega hasta valores de 1.6 cm, en cambio, el sensor 20 se encuentra más próximo a la base de la charola, presentando valores alrededor de 2.2 cm. pero siempre. Dadas las características del material (solo arena) no se observa acumulación de presión alguna.

Oleaje irregular:



*Fig.5.21* Series de tiempo de los sensores de la Columna 5 para la prueba irregular, 100A

En la *Fig.5.33* se presenta la Columna 5 de sensores para el caso de un suelo con nulo contenido de finos en oleaje irregular. Como se puede observar, el comportamiento en la variación de presión en el tiempo en cada uno de los sensores, presenta el mismo caso que se obtuvo para oleaje regular, donde se existe una mayor amplitud en el fondo de la muestra, además de responder directamente a la variación de la superficie libre. Dadas las características de éste material no se observa acumulación de presión alguna.

Oleaje regular:

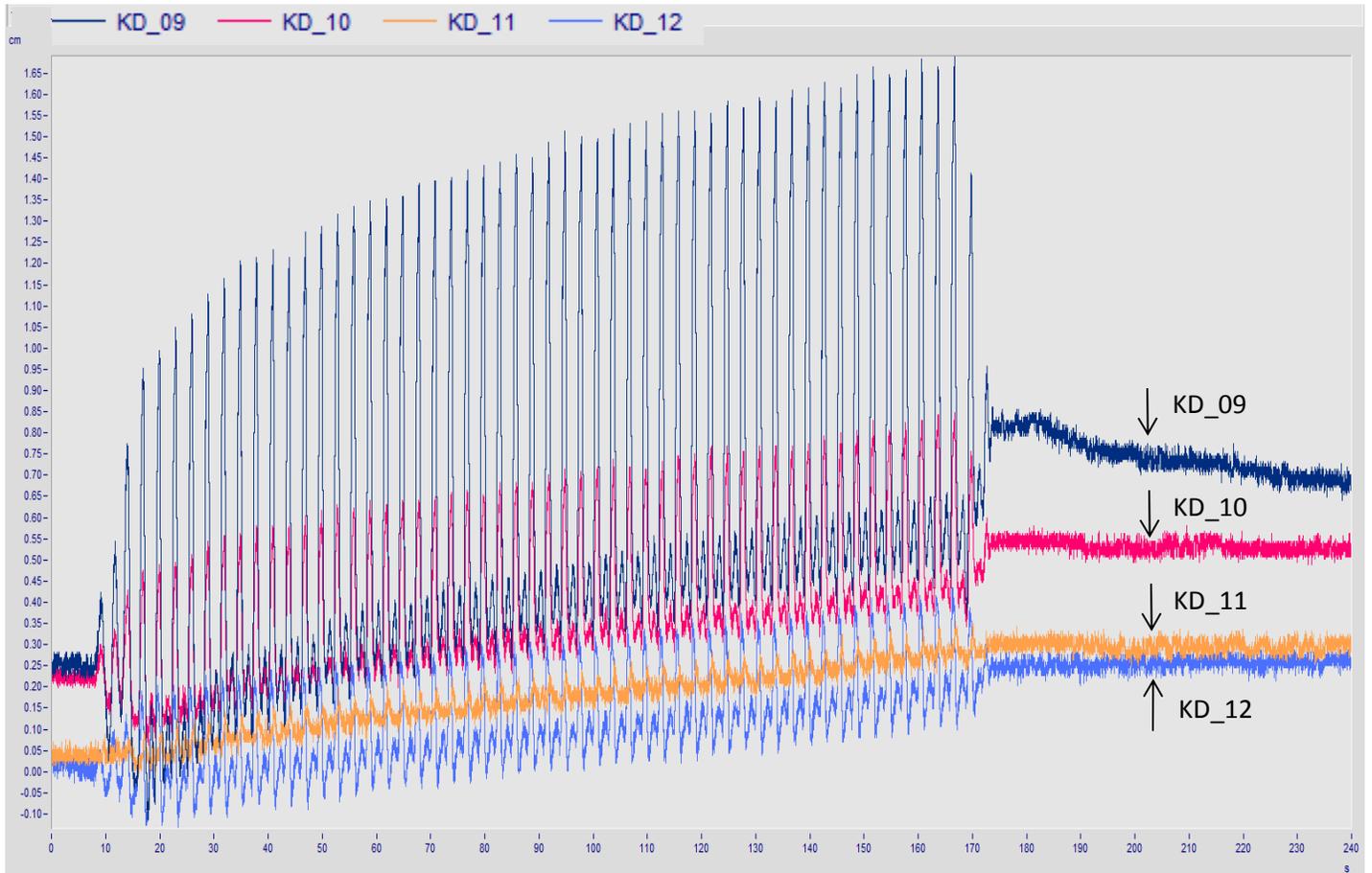


Fig.5.22 Series de tiempo de los sensores de la Columna 5 para la prueba regular, 70C30A

En la Fig.5.36 se presenta la Columna 5 de sensores para el caso de un suelo con 70% de contenido fino en oleaje regular. Recordando que los sensores se encuentran dentro de la zona de estructura y de acuerdo a los resultados obtenidos, se obtiene una variación de la presión en el tiempo que responde directamente a la variación de la superficie libre (olas), acompañado de un incremento de presión de 0.1 a 0.3 cm. Así que las características de esta muestra presentan incremento de presión.

Oleaje irregular:

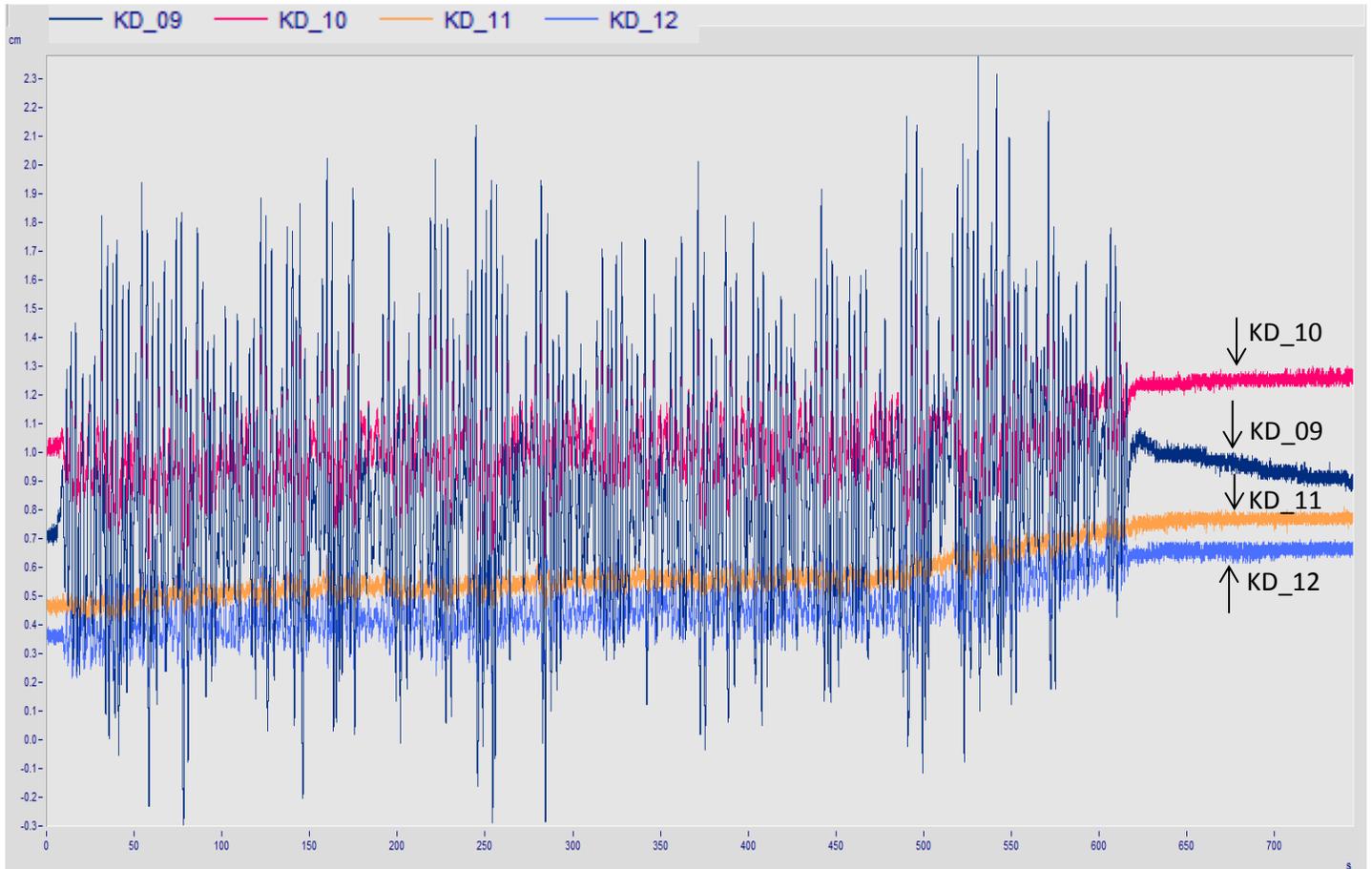


Fig.5.23 Series de tiempo de los sensores de la Columna 5 para la prueba irregular, 70C30A

En la Fig.5.37 se presenta la Columna 5 de sensores para el caso de un suelo con 70% de contenido fino en oleaje irregular. Como se puede observar, el comportamiento que se presenta en la variación de presión en el tiempo en el sensor que se ubica más cerca de la superficie responde directamente a la variación de la superficie libre, además de presentar un incremento de presión; posteriormente, a medida que la diferencia de fondo en la muestra es mayor, la variación y el incremento de presión disminuye. Por lo tanto, ésta condicione de oleaje para ésta muestra presentan cierta acumulación de presión.



## 6. CONCLUSIONES

El trabajo antes presentado es solo una parte de un gran estudio que se lleva a cabo a nivel mundial sobre el comportamiento del fondo marino bajo la acción de oleaje, sujeto a condiciones de cargas muertas, tal y como lo son las plataformas petroleras, de éste modo, dicho estudio tuvo por objetivo comprender el fenómeno que existe entre la interacción oleaje-suelos finos, y de ser posible dar ciertas sugerencias en el tratamiento del suelo, mediante una serie de experimentos en un canal y con la debida instrumentación que brindó el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería, en la UNAM; donde se pudieron realizar simulaciones de la interacción de los elementos en estudio.

Los resultados fueron satisfactorios, logrando así poder tener un panorama del cual se pueden descartar o minimizar ciertas condiciones en la elaboración de la mezcla que representa el suelo marino, así como resultados que pueden funcionar como base para demás prototipos en un futuro.

De acuerdo a las distribuciones tanto horizontales como verticales, se puede concluir por cada análisis, lo siguiente:

Por la cantidad de finos.- es claro que las pruebas de 100A y 100C fueron los límites que solo sirvieron para tener una idea del comportamiento en ambos extremos, pero por razones obvias tener un suelo de 100% arena o 100% caolín, no son objetivo primordial de estudio. Por lo tanto, las proporciones con 85C15A y 70C30A proporcionaron mejores resultados para ser considerados en investigaciones futuras.

Por la cantidad de agua.- la variación que se representó para este análisis, fue poco perceptible, siendo uno de los casos donde no hubo grandes respuestas para ser consideradas.

Por el tipo de oleaje.- la decisión final para el resto de las pruebas después de haber realizado las de 70C30A, fue echar olas de tipo regular, ya que proporcionaron acumulación de presión en el suelo, caso que no se dio para el oleaje de tipo regular.





## BIBLIOGRAFÍA

- Airy, G.B., 1845. *Tides and waves*, Encycl Metrop, Art. 192, 241-396.
- Bruun, P., 1978. *Common reasons for damage or breakdown of mound breakwaters*, Coastal Engineering, 2, 261-273.
- Camimex, 2012. *Arena Sílica (Si O<sub>2</sub>)*, México, (Disponible en: <http://www.camimex.org.mx/index.php/secciones1/sala-de-presa/uso-de-los-metales/arena-silica/>).
- Chávez, Cerón Valeria, 2013. *Comportamiento de suelos marinos bajo la acción del oleaje*, Tesis que para obtener el grado de: maestro en ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Coastal Engineering, 1999. *Sinking/floatation of pipelines and other objects in liquefied soil under waves*, Dinamarca.
- C., Winterwerp Johan and G.M., van Kesteren Walther, 2004. *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment*, Ed. Elsevier, UK.
- Doob, J. L., 1953. *Stochastic Processes*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- Feng, J., 1992. *Laboratory experiments on cohesive soil bed fluidization by water waves*, PhD Thesis. University of Florida.
- Funke, ERM, y Mansard, E. P. D., 1979. *Synthesis of realistic sea states in a laboratory flume*, National Research Council of Canada, Ottawa, 54 pp.
- Goda, Y., 2000. *Random seas and design of maritime structures*, University of Tokyo Press, 323 pp.
- IAHR, W. G., 1989. List of sea –state parameters, *Jour Wat, Port, Coast and Oce Eng*, 115 (6), 793-808.
- Instituto Mexicano del Transporte, SCT, 1998. *Génesis, identificación y uso de los suelos de México: distribución, propiedades, clasificación y manejo de suelos residuales y*



*transportados con aplicaciones a la ingeniería civil*, México (Disponible en: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt19.pdf>).

International Association of Sedimentologists, 2006. *The sequence of sediment behaviour during wave-induced liquefaction*, Dinamarca.

International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2006. *A new approximation for pore pressure accumulation in marine sediment due to water waves*, Canada.

International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2001. *Solutions of pore pressure build up due to progressive waves*, Australia.

International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2012. *Experimental Validation of a Mathematical Model for Seabed Liquefaction Under Wave*, Dinamarca, (Disponible en: <http://www.isoqe.org/publications>).

Johnson, R, Mansard, E y Ploeg, J., 1978. *Effects of wave grouping on breakwater stability*, Int Conference on Coastal Engineering, ASCE, Hamburgo.

Journal of Waterway, Coastal and Ocean Engineering, 2007. *Simplified analytical approximation for pore-water pressure buildup in marine sediments*, Portugal.

Khintchine, A., 1934. *Korrelations theorie de stationaren stochastischen prozesse*, *Math Ann*, 109 pp.

Kinsman, B., 1965. *Wind waves*, Printice-Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey.

Lindenberg, J., van Rijn, L. C. y Winterwerp, J. C., 1989. *Some experiments on wave-induced liquefaction on soft cohesive soils*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue N°. 5, pp. 127-137.

Longuet-Higgins, M. S., 1952. On the statistical distribution of the heights of sea waves, *J. Marine Research*, 11, 245-266.

Losada, M. A. y Jiménez-Curto, L. A., 1978. Análisis estadístico y espectral de regímenes, *Curso de Puertos*, Universidad de Santander, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Santander, España, 56 pp.

M. Das Braja, 2001. *Principios de ingeniería de cimentaciones*, cuarta edición, International Thomson, México.

Maa, P. Y. y Mehta, A.J., 1987. *Soft mud response to water waves*, *Continental Shelf Research*, Vol. 7, N° 11/12, 1269-1284.



- Márquez, Quintos Erick, 2013. *Aligeramiento de un suelo compactado con perlas de poliestireno expandido*, Tesis que para obtener el grado de: maestro en ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Oumeraci, H., 1994. Review and analysis of vertical breakwater failures – lessons learned, *Coastal engineering*, Vol. 22, Issues 1-2, 3-29.
- Pierson, W. J., Neumann, G, y James, R. W., 1958. Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics, U. S., Navy Hydrogr, Washington, D. C.
- Pierson, W. J., y Marks, W., 1952. The power spectrum analysis of ocean wave records, *Trans Amer Geophys Union*, 33, 834-44.
- Retsch Technology, 2014. *Camsizer*, Alemania, (Disponible en: <http://www.retsch-technology.com/rt/products/dynamic-image-analysis/camsizer/function-features/>).
- Rice, S. O., 1944. The mathematical analysis of random noise, *Bell System Technical Journal*, 23, 282-332.
- Rice, S. O., 1945. The mathematical analysis of random noise, *Bell System Technical Journal*, 24, 46-156.
- Robillard, D. J., 2009. *A laboratory investigation of mud seabed thickness contributing to wave attenuation*, PhD Thesis, University of Florida.
- Rodolfo, Silva Casarín, 2005. *Análisis y descripción estadística del oleaje*, Serie Docencia-UNAM, México.
- Sainz, Pascual Jorge, 2013. *Estudio geotécnico*, INZAMAC Asistencias Técnicas, S.A., España.
- Soltanpour, M., Samsami, F. y Sorourian, S., 2010. *Wave-flume experiments of dissipating wave on soft mud*, Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China.
- Stokes, G. G., 1847. On the oscillatory waves, *Transactions Cambridge Phil Soc*, 8(441), 157-229.
- Sumer, B. M., & Fredsøe, J., 2002. *The mechanics of scour in the marine environment*, Singapore: World Scientific.



- Sumer, B. M., & Cheng, N.-S., 1999. A random-walk model for pore pressure accumulation in marine soils. *Proceedings of the ninth (199) International offshore and polar engineering conference*, Brest, France.
- Sumer, B. M., Fredsøe, J., Cristensen, S., & Lind, M. T., 1999. Sinking/floatation of pipelines and other objects in liquefied soil under waves, *Coastal engineering*, 38:53-90.
- Sverdrup, H. U., y Munk, W. H., 1947. *Wind, sea and swell: theory of relation for forecasting*, U.S., Navy Hydrographic Office Publication, 44 pp.
- Silvester, R. Elsevier, 1974. *Coastal Engineering*, Vol. 1 and 2, Elsevier Scientific Pub. Co.
- Valdés, Rubio Víctor M., 2005. *Conceptos básicos de ingeniería civil costa afuera*, segunda edición, SEP-INDAUTOR, México.