

JOAQUÍN EDGARDO TORRE MONCADA
ID UD2016SCI6011

RESPUESTA A LAS EXCITACIONES DINÁMICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE
SOPORTE DE DEPÓSITOS DE ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS

TESIS PRESENTADA AL
DEPARTAMENTO ACADÉMICO
DE LA ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERÍA
EN CUMPLIMIENTO AL REQUERIMIENTO
PARA EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS

ATLANTIC INTERNATIONAL UNIVERSITY
NORTH MIAMI, FLORIDA, U.S.A.
DICIEMBRE 2008

CONTENIDO E ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN	1
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL	4
CAPÍTULO II: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DE LOS EFECTOS HIDRODINÁMICOS SOBRE LAS ESTRUCTURAS.	8
2.1 Conclusiones parciales	12
CAPÍTULO III: DEFINICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE LA RESPUESTA A LAS EXCITACIONES DINÁMICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE DEPÓSITOS DE LÍQUIDOS	16
3.1 Metodología.	18
3.2 Consideraciones e hipótesis.	24
3.2.1 Consideraciones	24
3.2.2 Hipótesis	25
3.3 Teoría general de la hidrodinámica.	27
3.3.1 Sistema mecánico equivalente.	34
3.3.2 Conclusiones parciales.	40
3.4 Justificación y viabilidad.	41
CAPÍTULO IV: EXPECTATIVAS	42
4.1 Resultados esperados y usuarios posibles	42
4.2 Aporte y novedad científica	43
CAPÍTULO V: EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS.	44
5.1 Calibración del modelo.	44
5.2 Experimentación	50
5.3 Análisis de resultados.	64
5.4 Comparación de respuestas con las de La norma CHOC-2008.	69
5.5 Discusión	71
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFÍA.	80
ANEXOS.	85

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 3.1: Prototipo del modelo	20
Fotografía 3.2: Tanque de sección circular	21
Fotografía 3.3: Base de la estructura prototipo	22
Fotografía 3.4: Acelerógrafo instalado en la base del prototipo.	23

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1: Actividad sísmica de la región	6
Figura 3.1: Modelo geométrico del edificio en investigación	19
Figura 3.2a: Depósito rectangular tridimensional.	28
Figura 3.2b: Depósito rectangular bidimensional	28
Figura 3.3: Modelo del sistema equivalente	35

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfica 3.1: Modos de vibración	32
Gráfica 3.2: Masas participantes.	37
Gráfica 3.3: Período de la masa convectiva.	37
Gráfica 3.4: Relación de aceleraciones.	38
Gráfica 3.5: Relación de alturas de aplicación de las masas	38
Gráfica 5.1: Serie de tiempo, aceleraciones en los soportes	45
Gráfica 5.2: Serie de tiempo, aceleraciones Suavizadas	45
Gráfica 5.3: Serie de tiempo, velocidad del Movimiento	47
Gráfica 5.4: Serie de tiempo, Desplazamientos.	47
Gráfica 5.5: Comparación de desplazamientos en nivel 5.	49
Gráfica 5.6: Desplazamientos relativos a la base.	50
Gráfica 5.7: Comparación de desplazamientos en nivel 5.	51
Gráfica 5.8: Comparación entre desplazamientos.	52
Gráfica 5.9: Aceleraciones en nivel 5	52

Gráfica 5.10:	Fuerza ejercida sobre la pared Del depósito	54
Gráfica 5.11:	Movimiento de una partícula de agua.	54
Gráfica 5.12:	Espectro elástico de Aceleraciones.	55
Gráfica 5.13:	Respuestas comparativas en serie de tiempo.	56
Gráfica 5.14:	Desplazamientos comparativos h=5cm.	58
Gráfica 5.15:	Desplazamientos comparativos h=7.5cm.	59
Gráfica 5.16:	Desplazamientos comparativos h=10cm	59
Gráfica 5.18:	Desplazamientos relativos Comparativos	62
Gráfica 5.19:	Relación entre respuestas.	62
Gráfica 5.20:	Períodos de vibración en función h/D	63
Gráfica 5.21:	Cortantes en la base comparativas.	64
Gráfica 5.22:	Factor de correlación.	67
Gráfica 5.23:	Correlación de respuesta en términos Para tanques con techo h/H	68

LISTADO DE TABLAS

Tabla 5.1:	Resultados comparativos para H=0.15M.	58
Tabla 5.2:	Valores absolutos comparativos SME versus sólido	60
Tabla 5.3:	Valores absolutos comparativos SME versus vacío.	61
Tabla 5.4:	Análisis comparativo entre las Cortantes obtenidas y las cortantes Determinadas por las expresiones Del CHOC-2008	70

AGRADECIMIENTOS

Quiero reconocer y agradecer, por sus aportaciones, soporte y colaboración, que he recibido en el desarrollo de esta investigación y elaboración del presente documento:

A Dios, quien me brindó la oportunidad de estudiar y de quien estoy absolutamente convencido de su presencia en todos los eventos y de su infinito poder y su omnipresencia.

Al Dr. Ángel Leonel Castillo Aguilar, quien en todo momento estuvo dispuesto a colaborar y aportar para lograr mejores resultados en el proceso de esta investigación.

A la Lic. Nora Isabel Bolaños G. quien colaboró extensamente en el seguimiento del desarrollo del prototipo utilizado en el proceso de investigación, en la logística y en la forma y estilo de este documento.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la memoria de mis padres: Dr. J. Edgardo Torre A. y Doña Leda Moncada de Torre de quienes Dios me permitió gozar de su presencia, guía y orientación por 44 años de mi vida a lo largo de los cuales siempre recibí de ambos la motivación, el coraje y el ejemplo para seguir adelante con mis metas y objetivos.

RESUMEN

Cuando se representa una estructura para su análisis, lo que se realiza es una aproximación matemática de la misma, independientemente del tipo de estructura, de manera que podemos decir, que resolvemos mediante métodos exactos una aproximación y consecuentemente obtenemos una aproximación.

En el proceso de análisis, se acopla un modelo geométrico que representa la forma y dimensión de la estructura a un modelo de materiales representativo de los parámetros físico-mecánicos de los mismos y a un modelo de cargas que representa las solicitaciones con las que dará servicio la estructura.

Un problema mayor que el ingeniero estructural enfrenta, es la representación de los modelos antes descritos debido a la incertidumbre de ciertas variables implícitas de manera que tiene que recurrir a modelos estocásticos, especialmente en el modelo de cargas y respecto del modelo de materiales, tiene que apoyarse en los factores de reducción que recomienda el código observado para minimizar los efectos de la incertidumbre del modelo, especialmente cuando lo que se está intentando representar son condiciones poco estudiadas.

Una de las condiciones poco estudiadas es el efecto del movimiento del agua dentro de los depósitos, siendo costumbre general, modelar el agua como un sólido y no como un fluido, despreciando con esta visión, el efecto hidrodinámico dentro del contenedor. Cuando la estructura es de baja altura esto podría no ser importante, pero cuando se habla de edificios de gran altura a los que se le ha instalado un tanque de almacenamiento de agua en la cima del edificio, la diferencia en los resultados entre una visión y otra es importante.

Este documento presenta los resultados de una investigación realizada al efecto de encontrar la respuesta de estructuras que soportan depósitos de agua, mediante experimentación física y teórica, desde la calibración del modelo con el prototipo.

Los modelos teóricos se desarrollaron sobre la hipótesis de los materiales son homogéneos, continuos e isotrópicos, los nudos del modelo geométrico se consideraron rígidos y se representó los miembros de la estructura mediante barras para las vigas y columnas y mediante placas o elementos finitos para las losas. Así mismo, el agua en los contenedores, se consideró como un material continuo, homogéneo e isotrópico no viscoso.

El estudio comprende un análisis comparativo entre los resultados de modelos donde el agua se trata como un sólido y los resultados de modelos donde el agua se trata como un fluido. Para estos últimos, se aproximó el comportamiento del agua mediante la consideración de dividir la masa de agua en dos partes: una parte se considera como una masa sólida y otra parte se considera como una masa convectiva.

La calibración de los modelos se realizó a escala completa comparando los resultados entre la experimentación teórica y las mediciones realizadas con un prototipo de un edificio de 5 niveles con un tanque en su último nivel. Las mediciones se obtuvieron mediante un acelerómetro que se instaló en diferentes niveles de la estructura.

Los resultados obtenidos permiten visualizar la diferencia entre las consideraciones antes apuntadas lo que a su vez permitió formular las conclusiones y el desarrollo de una aportación a la comunidad científica consistente en una expresión que correlaciona ambos tipos de modelos para una primera aproximación al problema estudiado.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

La investigación presentada en este documento trata del comportamiento o respuesta de las estructuras que soportan depósitos de agua y se realizó en forma comparativo entre un modelo teórico donde se representa el agua contenida en el depósito como un sólido y un modelo teórico donde el agua es representada con una porción de su masa total como masa convectiva de cuyos resultados fue posible hacer una comparación con las mediciones realizadas en un prototipo construido a escala natural.

La motivación para realizar esta investigación descansa en el hecho de aproximar la respuesta de las estructuras entre el método convencional en el que la masa de agua se trata como un sólido despreciando con esta aproximación los efectos hidrodinámicos y la importancia del efecto de considerar esos efectos hidrodinámicos en la respuesta de la estructura.

La investigación permitió llegar a conclusiones respecto a las diferencias encontradas y a los efectos que sobre la estructura tiene considerar una porción de la masa de agua como masa convectiva y con todo el juego de resultados se presenta en

calidad de aportación científica, una correlación entre los resultados que permitirá una rápida aproximación al problema estudiado. La expresión presentada se desarrolló usando coeficientes empíricos que fueron determinados del análisis de los resultados obtenidos.

Afortunadamente en nuestro medio, la frecuencia de eventos de carácter sísmico es muy baja, no obstante, no estamos exentos de enfrentar este tipo de fenómenos naturales y de hecho, el Código Hondureño de la Construcción, presenta la recomendación de considerar aceleraciones importantes como consecuencia de eventos sísmicos probables en el territorio, además, de enfrentar la necesidad de conocer en mejor forma y con simplicidad la respuesta del problema mediante el uso de expresiones simples que permitan una rápida predicción de los resultados como una aproximación de carácter preliminar.

La baja frecuencia de eventos sísmicos en el país, ha llevado a una falsa percepción de seguridad, no obstante, Honduras se encuentra localizada en las proximidades de los bordes de tres placas tectónicas y los países vecinos han enfrentados eventos altamente destructivos donde se han visto colapsar estructuras importantes. De hecho, toda la zona se puede clasificar como una región de alta sismicidad como puede apreciarse en la gráfica a

continuación, que muestra la actividad sísmica de la región en los últimos 17 años²¹.

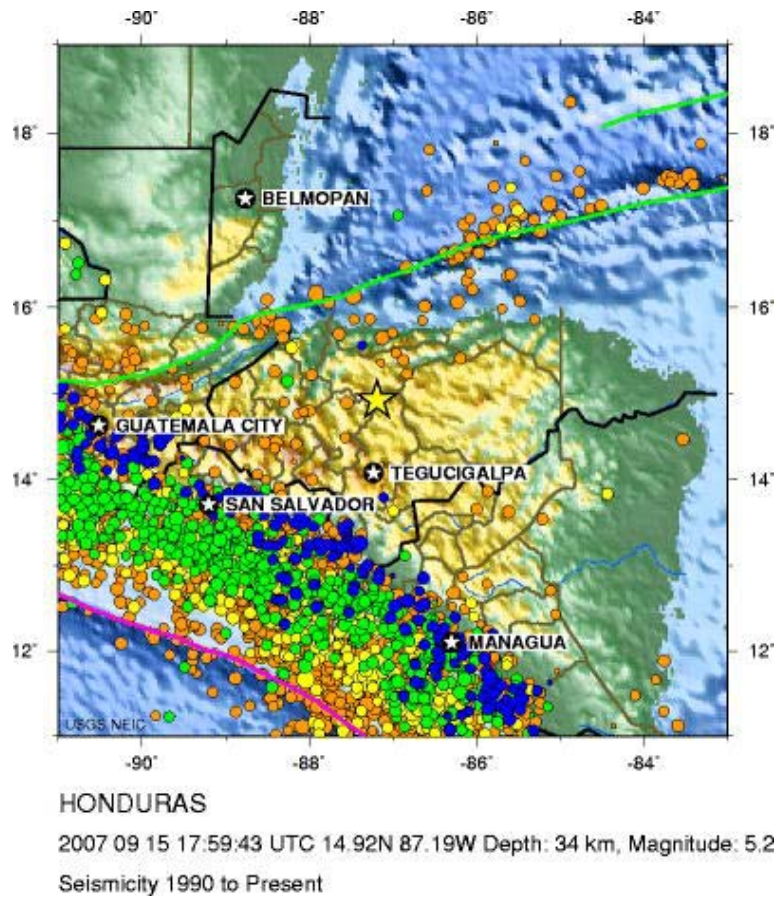


Figura 1.1: Actividad sísmica de la región²¹.

El desarrollo de un modelo que permita una mejor aproximación al problema, mejorará la calidad de los análisis de las estructuras que soporten un depósito de agua, especialmente cuando estos se encuentren localizados en zonas de alta sismicidad, lo que puede redundar en menor incertidumbre respecto de la respuesta de la estructura lo que a su vez representará menores costos de construcción, con lo que se justifica esta investigación.

Los análisis presentados en esta investigación, en los modelos teóricos, han sido realizados dentro del marco de los principios físicos de equilibrio de fuerzas estáticas y dinámicas que rigen el análisis de una estructura, acoplados a un modelo del movimiento del líquido contenido en un depósito soportado por una estructura, en términos de las fuerzas actuantes en la misma.

En todos los modelos desarrollados en esta investigación, se ha considerado que todos los materiales, incluyendo el agua, presentan características de ser homogéneos, continuos e isotrópicos y además el agua se ha considerado sin viscosidad.

En los capítulos siguientes se muestra la metodología de la investigación, los análisis de los resultados, los hallazgos teóricos y empíricos y finalmente las conclusiones.

CAPÍTULO II

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN LOS EFECTOS HIDRODINÁMICOS SOBRE LAS ESTRUCTURAS

Existen algunos estudios referentes al comportamiento hidrodinámico del agua almacenada en depósitos, de los cuales se presentan los más relevantes, algunos de las cuales han sido desarrollados tomando como plataforma trabajos anteriores, enriqueciendo las conclusiones y avanzando en el tema¹⁰.

Los primeros intentos en analizar las ondas de líquidos en contenedores oscilantes¹⁰ fueron hechos por Lamb (1879), Hough (1895), Honda y Mitsubishi (1913), Jefries (1924), Sen (1927), Goldsborough (1930), Westergaard (1933), Binnie (1941, 1955), K. W. Smith (1947, 1956), C. Smith (1948), Taylor (1950, 1954), Luskin y Lapin (1952), Schy (1952), Moiseev (1952, 1953, 1954, 1956), Senda y Nakagawa (1954), Nakagawa (1955, 1956), Birkhoff (1956), Narimanov (1956, 1957), Okhotdimdki (1956), Heinrich y Kaufman (1956), Sretanskii (1956, 1957), Hausner (1957), Krein y Moiseev (1957), y Shved (1959).

El problema del movimiento u oleaje de líquidos en contenedores estacionarios o en movimiento sigue siendo de una gran preocupación entre los ingenieros aeroespaciales, civiles,

nucleares, físicos, diseñadores de cisternas rodantes y barcos cisterna, así como de los matemáticos, ingenieros civiles y sismólogos que han estado estudiando los efectos del oleaje en presas grandes, tanques de aceites o combustibles y tanques de agua elevados sujetos a movimientos del suelo que los soporta.

De entre los autores antes listados, a continuación se presenta una breve descripción del avance obtenido¹⁰:

Lamb (1879), en su libro "Tratado sobre la teoría matemática del movimiento de fluidos" analiza los modos naturales de oscilación de fluidos sujetos a ciertos tipos de movimientos forzados, en condición de borde libre.

Westergaard (1933), determina las presiones en un muro vertical rígido, con movimiento periódico, en reservorios de longitud semi-infinita, tomando únicamente el efecto bidimensional y el nivel libre sin presiones.

Hoskin y Jacobsen (1934), verifican experimentalmente en un reservorio rectangular, los estudios planteados por Westergaard encontrando relaciones entre las respuestas en función de la relación largo-alto del reservorio.

Hinds, Creager y Justin (1945), estudiaron el efecto de pared inclinada y señalaron los criterios básicos para el diseño sísmico de presas.

Werner y Sundquist (1949), obtienen las ecuaciones de presiones y desplazamientos para distintos tipos de recipientes sujetos a un movimiento horizontal armónico.

Jacobsen (1949), estudia el movimiento horizontal de reservorios circulares con fluido incompresible, determinando las masas equivalentes que confirmó experimentalmente.

Jacobsen y Ayre (1951), dan un reporte de experimentos en reservorios circulares sujetos a movimientos armónicos amortiguados, estudiando el efecto de la cubierta de los reservorios.

Grankam y Rodríguez (1952), estudian tanques de combustible rectangulares para valuar el efecto en aviones encontrando expresiones de un sistema mecánico equivalente de masas y resortes que producen el mismo efecto dinámico.

Zangar (1953), estudia la incompresibilidad del fluido y señala la aplicación de redes de flujo para determinar las presiones.

Housner (1957), propone un método aproximado y sencillo del efecto hidrodinámico del fluido incompresible, en reservorios con una o doble simetría y movimiento horizontal en una de esas direcciones.

Napedvardze (1959), estudia el efecto del movimiento horizontal, vertical e inclinado para un reservorio de longitud infinita con fluido incompresible y muros inclinados.

Housner (1960), señala el criterio de cálculo por sismo en reservorios rectangulares y cilíndricos mediante un sistema mecánico equivalente de masas y resortes tomando solo el efecto del primer modo de oscilación libre del agua.

Housner (1963), da las consideraciones para reservorios elevados.

Bauer (1964), analizó las oscilaciones en la superficie libre en un cuarto de tanque y en un tanque con sección transversal anular encontrando en ambos casos, que la expresión para la frecuencia natural de la superficie libre es la misma pero con diferentes raíces que las de la función de Bessel.

Henrici, et al(1970), presentaron un extensivo tratamiento del oleaje de líquidos en un semi-espacio sobre un plano rígido que

contenía aberturas tanto circulares como del tipo o ranura faja infinita, obteniendo las condiciones frontera de las frecuencias naturales.

Troesch y Troesch (1972), discutieron algunos elementos de los valores propios del oleaje de los líquidos en un semi-espacio con énfasis en sus condiciones frontera.

Todos estos autores antes listados así como otros que han participado aportando en este tema, proporcionan una idea de lo que es el comportamiento de los líquidos contenidos en reservorios de diferentes formas, motivados por los efectos de daño observados en estructuras contenedoras de líquidos durante su desempeño ante sollicitaciones dinámicas, tales como las experimentadas durante el terremoto de Alaska en 1964 en donde siete tanques de una compañía petrolera colapsaron, uno de los cuales liberó 750,000 galones de combustible para aviones y durante el terremoto en Long Beach en 1933 en donde un inmenso tanque de almacenamiento de agua colapsó⁹.

2.1 Conclusiones parciales:

El problema del movimiento del agua u oleaje dentro de reservorios, ha sido motivo de preocupación entre la comunidad internacional de ingenieros civiles y de otras disciplinas

responsables del diseño y construcción de los mismos desde que se presentó la necesidad de contar con depósitos o reservorios para almacenar líquidos, y la pregunta fundamental que se plantea al respecto es relativa a entender la respuesta del líquido dentro del depósito y como esa respuesta afecta al depósito y dicho de otra forma, como puede ser posible modelar matemáticamente esa respuesta.

Ante la necesidad de conocer el comportamiento de los líquidos contenidos en un depósito, desde 1879 se están realizando intentos por establecer relaciones matemáticas que permitan calcular los efectos del oleaje naciendo con estos intentos, la teoría de la hidrodinámica¹⁰.

De entre los autores listados en este capítulo, George Housner (1957, 1960, 1963, 1967)¹⁰ presentó un sistema simplificado de análisis mediante un sistema mecánico equivalente (SME) que es la aproximación más usada por su simplicidad y porque sus resultados son muy acertados, razón por la que en los análisis de esta investigación, se comparan con los de este modelo.

La necesidad de mejorar las características de un modelo representativo de la estructura con el propósito de estudiar su respuesta y poder predecir su desempeño nace del hecho de estar

tratando un problema en el que concurren una serie de variables o un conjunto de elementos con un alto índice de impredecibilidad en virtud de que las estructuras están vinculadas al suelo y como consecuencia forman parte de un sistema, por definición caótico⁷.

Todo el sistema tectónico del planeta, es esencialmente caótico, responde a las leyes generales de la física clásica, pero es impredecible. Se conoce la razón del porque de los sismos, como un evento de liberación de la energía almacenada como producto del movimiento de las placas, pero no es posible predecir ni el movimiento de tales placas ni el mecanismo de almacenamiento de energía, además al recibir retroalimentación de sí mismo, como sistema, se incorporan elementos sinérgicos que pueden redundar en respuestas impredecibles o en efectos mariposa, es decir, un sismo en determinado punto, puede desencadenar movimientos en otro punto del planeta, con la consecuente respuesta aparentemente no relacionada²⁰.

Como consecuencia de lo anterior y en una necesidad de cubrir la seguridad de las personas usuarias de las estructuras, cada avance en el conocimiento del comportamiento de las estructuras es importante y entendiendo que el sistema es caótico, se ha hecho necesario el uso de sistemas estocásticos que permitan establecer períodos de retorno de los eventos destructores y con

ellos establecer un rango de confianza en una relación beneficio/costo intentando que para los eventos extremos, la estructura permita al menos, las personas puedan abandonar ilesas, el edificio¹⁹.

CAPÍTULO III

DEFINICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE LA RESPUESTA A LAS EXCITACIONES DINÁMICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE DEPÓSITOS DE ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS

Por razones de facilidad y requerimientos de recursos, se intenta en las primeras aproximaciones establecer el diseño de prototipo que permitirá hacer las mediciones y del cual será posible desarrollar un modelo matemático con las mínimas posibles variantes. Esto es, un modelo lo suficientemente sencillo para poder realizar experimentación teórica y que corresponda a un prototipo lo suficientemente sencillo para poder ser manipulado, construido y estudiado.

El modelo se trazó luego de analizar diferentes tipos de edificaciones, empezando con tanques elevados y edificios con tanques en su nivel más alto. De estos análisis se seleccionó, para efectos de este estudio, un edificio de 5 niveles, al que se le desarrolló un modelo geométrico de 2.15m de altura.

Sobre las opciones se aplicó un modelo de cargas hipotéticas a los soportes de la estructura representada, simulando con esto el movimiento del suelo. No fue posible aplicar como modelo de cargas, un sismo real, que se hubiera tomado de un acelerograma

de un sismo real, ya que no se contaba con el equipo necesario para poder aplicarlo físicamente y con el que, sin lugar a dudas, se obtendrían resultados enriquecedores, no obstante, teniendo el modelo calibrado para un modelo de cargas, se pueden, consecuentemente, establecer correlaciones entre los efectos hidrodinámicos y los correspondientes a tratar el agua como un sólido adherido a la estructura, es decir, sin oleaje en el tanque.

Todos los análisis se desarrollaron sobre hipótesis que aproximan a la estructura¹³, tales como que la misma es un medio continuo, homogéneo e isotrópico, los nudos del modelo son rígidos y los vínculos a tierra son infinitamente rígidos. Por otro lado, el agua se considera un material homogéneo, continuo e isotrópico y se trata como un fluido no viscoso, en donde durante el movimiento del fluido, los esfuerzos generados entre las partículas del mismo, son normales a su superficie de contacto y en consecuencia, en un punto dado del fluido, la presión en cualquier dirección será la misma. Se considera que las partículas se desplazan en un movimiento continuo, de manera que la velocidad relativa entre dos partículas adyacentes es pequeña y su distancia entre ellas permanece en el mismo orden durante todo el movimiento¹⁰.

El modelo de materiales seleccionado fue el acero calidad ASTM A-36, dado que su facilidad de manipulación en la etapa de construcción, permitía incluso hacer ajustes al prototipo, se logran estructuras más livianas y además su ductilidad es mucho mayor, permitiendo incursionar en análisis no-lineales en futuras investigaciones, sin llevarlo al colapso total¹⁹.

3.1 Metodología

De entre todos los modelos de opción, se seleccionó el que presentaba una respuesta con mayores amplitudes en términos de sus desplazamientos de manera que se permitiera ver la sensibilidad del mismo ante diferentes valores de las variables del modelo, escogiendo un edificio de 5 niveles del cual se muestra un esquema en la figura 2 y una fotografía del prototipo de la fotografía 3.1.

Puede observarse en el modelo geométrico presentado en la figura 3.1¹⁶, que el modelo presenta un tanque circular en su nivel más alto. El modelo se investigó para un tanque circular, aunque el prototipo se diseñó para poder intercambiar tanques de diferentes secciones, como se aprecia en la fotografía 3.1.

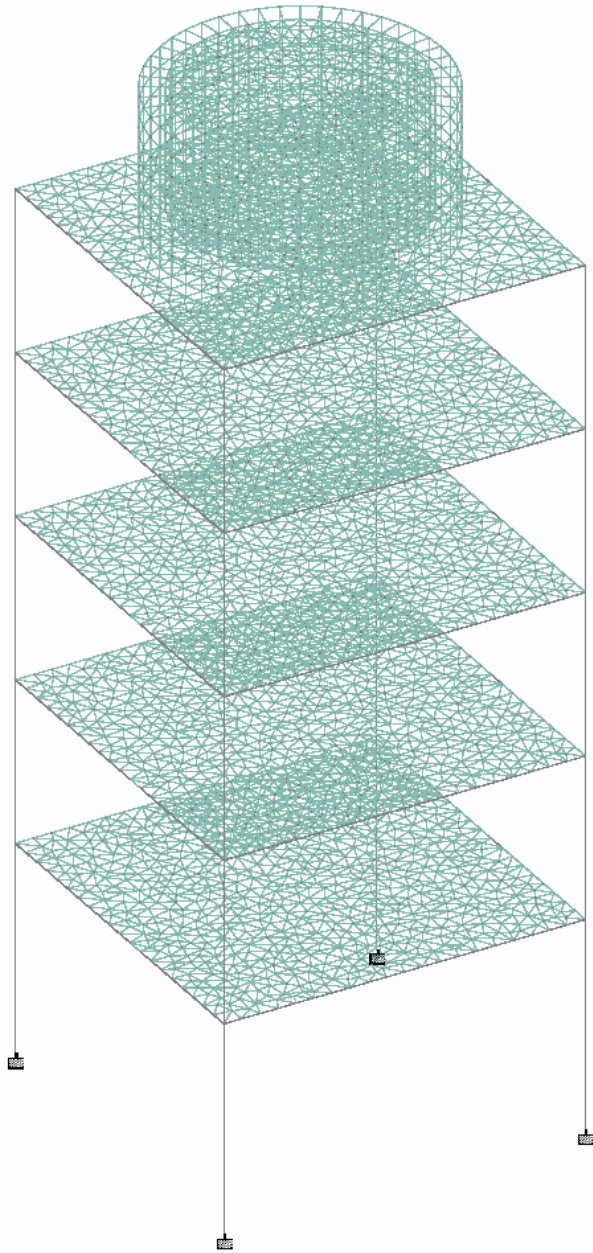


Figura 3.1: Modelo geométrico de edificio en investigación



Fotografía 3.1: Prototipo del modelo

En la fotografía 3.1, se aprecia un tanque cuadrado que es intercambiable con otro tanque de sección circular, es decir, cilíndrico, y de cuyo acercamiento es posible observar el tanque en la fotografía 3.2.



Fotografía 3.2: Tanque de sección circular

Al prototipo se le instaló un marco al que a su vez se le colocaron cuatro ruedas que se apoyan sobre dos carriles para poder aplicar movimiento horizontal en un sentido, el cual es aplicado mediante un motor con eje excéntrico que está acoplado a un moto-reductor. La excentricidad en el eje es posible controlarla por medio de diferentes posiciones de la biela de transmisión, que a su vez, será la que dará la amplitud del movimiento en la base del prototipo. En la fotografía 3.3 es

posible ver el montaje de los soportes de la estructura prototipo y del motor acoplado.



Fotografía 3.3: Base de la estructura prototipo

La experimentación física se realizó con diferentes relaciones de llenado de los tanques y en cada caso se tomaron lecturas de aceleración en cada uno de los niveles de la estructura prototipo, así como en el nivel de los soportes por medio de un acelerómetro¹⁷ adquirido para este efecto, del que se obtuvo además de la respuesta en cada nivel y para cada escenario investigado, el modelo de cargas con el acelerograma obtenido en los soportes de la estructura prototipo.



Fotografía 3.4: Acelerómetro¹⁷ instalado en la base del prototipo

En la fotografía 3.4 puede observarse el acelerómetro¹⁷ instalado en el marco de soporte de la estructura prototipo. Este acelerómetro se conecta a un ordenador portátil que tiene instalado una rutina diseñada para capturar la señal del acelerómetro y después poder manipularla en cualquier hoja electrónica.

Por otro lado, el modelo se ajustó a las dimensiones finalmente obtenidas de la estructura prototipo, utilizando en sus propiedades, las mismas secciones transversales de cada uno de sus miembros (vigas, columnas y placas) así como las propiedades de sus materiales (acero), y se le aplicó como modelo de cargas los acelerogramas obtenidos de las lecturas en la base del prototipo, con los que se realizó un análisis dinámico tiempo-historia¹³, auxiliándose de un programa de ordenador cuyo

algoritmo para este análisis es el método Wilson- Θ ^{16,17}, del que se obtuvo la respuesta en términos de aceleración, desplazamientos y velocidad, en cada nivel de la estructura.

Uno de los escenarios investigados fue el de los tanques vacíos y sirvió para poder calibrar el modelo y con el que se hicieron las primeras comparaciones.

Paralelamente se aplicaron las expresiones de un sistema mecánico equivalente (SME), que no es otra cosa que un modelo aproximado sencillo, para poder determinar la respuesta de la estructura y cuyos resultados sirvieron para poder planificar la campaña de ensayos posteriores¹⁰.

3.2 Consideraciones e hipótesis:

Las consideraciones que fueron tomadas en cuenta para hacer los análisis y desarrollar los modelos presentados en esta investigación, así como las hipótesis que se desean validar con los resultados son las siguientes:

3.2.1 Consideraciones: Se consideró tanto la estructura como el agua contenida en el depósito soportado por la estructura, como un medio continuo, homogéneo e isotrópico, así mismo, se supuso que las partículas del agua se desplazarán siguiendo un

movimiento continuo y consecuentemente, la velocidad relativa entre dos partículas adyacente es pequeña, de tal manera que su distancia entre ellas permanece en el mismo valor durante todo el movimiento.

El agua se consideró sin viscosidad, lo que implica que durante todo el movimiento, los esfuerzos generados entre las partículas del agua, son normales a su superficie de contacto y por tanto, se tiene que en un punto dado del fluido, la presión en cualquier dirección es la misma¹⁹.

Lo anterior pone en evidencia que los análisis matemáticos, así como los modelos representativos de la estructura, son una aproximación. Estas aproximaciones son usadas en toda estructura aún cuando se trate de casos reales de proyección o análisis ya que se ha demostrado que su error con respecto a mediciones reales en estructuras representadas, es aceptable y consecuentemente, es posible llegar a conclusiones válidas que permiten la toma correcta de decisiones¹⁹.

3.2.2 Hipótesis: Esta investigación pretende validar o reprobado las siguientes hipótesis:

- El movimiento del agua contenida en un depósito soportado por una estructura está fuera de fase con el movimiento de la estructura cuando esta es excitada en sus soportes.
- Es posible encontrar una dependencia en forma de expresión con coeficientes empíricamente determinados para caracterizar la respuesta de una estructura que soporta depósitos con líquidos y desarrollar un modelo que considere el comportamiento hidrodinámico del agua.

La razón que motivó a plantear estas hipótesis es que, observando el movimiento del líquido en un depósito cuyos soportes se encuentran en movimiento, es apreciable que el movimiento del agua no está en fase con el movimiento de los soportes o del depósito mismo, lo cual es lógico pensar en virtud de las diferentes características del agua con respecto a los materiales y la configuración del depósito o de la estructura que forma los soportes del depósito y que ese movimiento genera fuerzas sobre las paredes del depósito, diferentes a las que pueden ser calculadas si se considera el agua como un sólido integrado a la estructura y/o al depósito, dicho de otra forma, sin oleaje dentro del depósito.

Las dos hipótesis antes planteadas están relacionadas entre sí, ya que el movimiento fuera de fase implica un modo de vibración libre o forzada diferente al de la estructura o la del depósito y consecuentemente, una presencia de fuerzas diferentes a las fuerzas inerciales como si el movimiento estuviera en fase con la estructura. Por otro lado, este diferencial de movimiento, que también podemos clasificar en términos de fuerzas actuantes, que se pretende encontrar en forma relativa o absoluta, dentro del marco de las consideraciones antes apuntadas, para ser tomadas en cuenta en el diseño de las paredes del depósito y de los miembros de la estructura de soporte.

3.3 Teoría general de la hidrodinámica

Si a un líquido en reposo, contenido en un depósito, se le aplican movimientos, es evidente que para analizar los mismos es necesario utilizar tres coordenadas como se muestra en la figura 3.2a, sin embargo, es posible simplificar el problema si se considera que el movimiento se desarrolla en secciones paralelas entre sí y por facilidad en el análisis¹⁰, tomaremos como representativa una sección de espesor unitario en un análisis bidimensional, es decir, utilizando dos coordenadas como lo muestra la figura 3.2b.

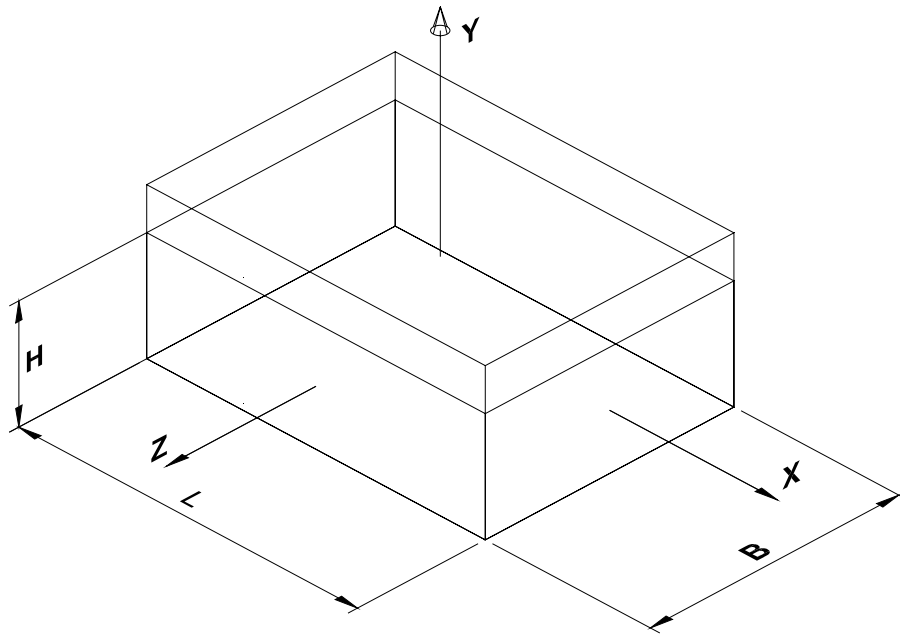


Figura 3.2a: Depósito rectangular tridimensional

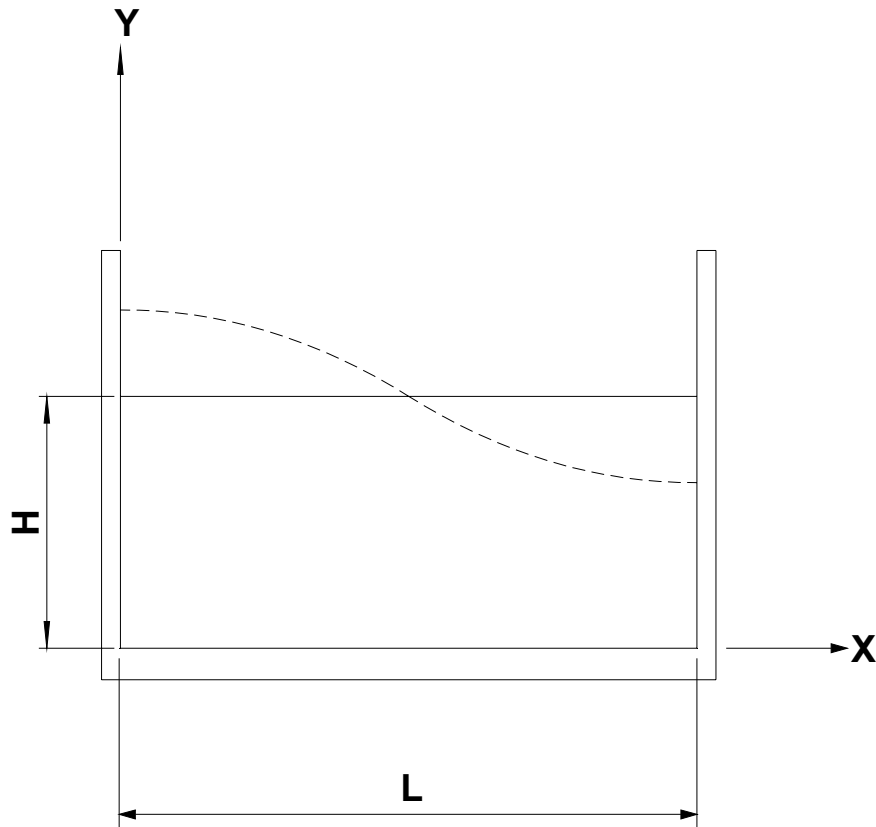


Figura 3.2b : Depósito rectangular bidimensional

Se considera para este análisis, que el depósito está formado por paredes rígidas y que todos sus componentes se moverán en forma uniforme sin presentar desplazamientos relativos. Dentro del marco del movimiento bidimensional, la perturbación que alteró el estado inicial del agua, provocará un movimiento que puede ser vertical, horizontal o inclinado dependiendo de las características del depósito, pero en el mismo plano del movimiento perturbador¹⁰.

Usando el depósito mostrado en la figura 3.2a, donde H es la altura del nivel libre del agua y L la longitud interna del depósito, siguiendo el sistema de coordenadas mostrado en la misma figura, se tiene que la ecuación de onda en función del potencial de velocidades está dada por la siguiente expresión¹⁰:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad \text{Ec. 3.01}$$

Que debe de cumplir con las siguientes condiciones frontera:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{x=0, L} = 0 \quad \text{Ec. 3.02}$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{y=0} = 0 \quad \text{Ec. 3.03}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{y=H} = 0 \quad \text{Ec. 3.04}$$

Expresando así las condiciones de las paredes rígidas y la presencia del oleaje por gravedad en la superficie libre del agua y donde:

ϕ Es la función del potencial de velocidades

t Es el tiempo

g Es la aceleración de la gravedad de la tierra

E_v Módulo de compresibilidad volumétrica del agua=210,920T/m³

a Es la velocidad del sonido en el agua=1.438m/seg = $\sqrt{E_v \frac{g}{\gamma_0}}$

γ_0 Es el peso volumétrico del agua = 1 Ton/m³

Si el líquido se mueve periódicamente, el movimiento en un instante dado puede expresarse por medio de:

$$-\omega^2 \bar{\tau}(t) = \frac{d^2 \bar{\tau}(t)}{dt^2} \quad \text{Ec. 3.05}$$

En donde $\omega = 2\pi / T$ es la frecuencia del movimiento en rad/seg y T es el período en segundos y el movimiento de las partículas es generado por ondas que se desplazan a lo largo del eje X y la amplitud de tales ondas es $\lambda = 2L / m$, de manera que la solución de la ecuación de onda está dada por:

$$\phi = x(x)Y(y)\bar{\tau}(t) \quad \text{Ec. 3.06}$$

Donde:

$$x(x) = M_1 \text{Cos}(m\pi X / L) \quad \text{Ec. 3.07}$$

$$Y(y) = \text{Cos}(K_n Y / H) \quad \text{Ec. 3.08}$$

$$\bar{\tau}(t) = \text{Sen}(\omega t) \quad \text{Ec. 3.09}$$

$M_1 = \text{Constante}$

$m = \text{modos de vibración} = 0, 1, 2, 3, \dots, n$

Por lo que se puede apreciar que si $m = 0$, el movimiento será solo vertical. Desarrollando la expresión de la ecuación 3.06, tenemos:

$$\sqrt{m^2 - \left(\frac{2L}{aT}\right)^2} \text{Tanh}\left(\pi \frac{H}{L} \sqrt{m^2 - \left(\frac{2L}{aT}\right)^2}\right) = \frac{4\pi L}{gT^2} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Que es válida siempre que $\beta < (Hm\pi / L)$ ó el valor equivalente $L/T < m$, donde:

$$\beta = \frac{2\pi H}{aT} = \frac{\omega H}{a} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Sí $\frac{2L}{aT} \leq 0.1$ se puede despreciar su valor por lo que tendremos la

expresión simplificada siguiente:

$$m \text{Tanh}(\pi m H / L) = \frac{4\pi L}{gT^2} \quad \text{Ec. 3.12}$$

En la gráfica 3.1 se puede apreciar que para $L/H < 1$ se cumple $T = 1.13\sqrt{L}$ que corresponde al caso de depósitos profundos donde la altura ya no interviene.

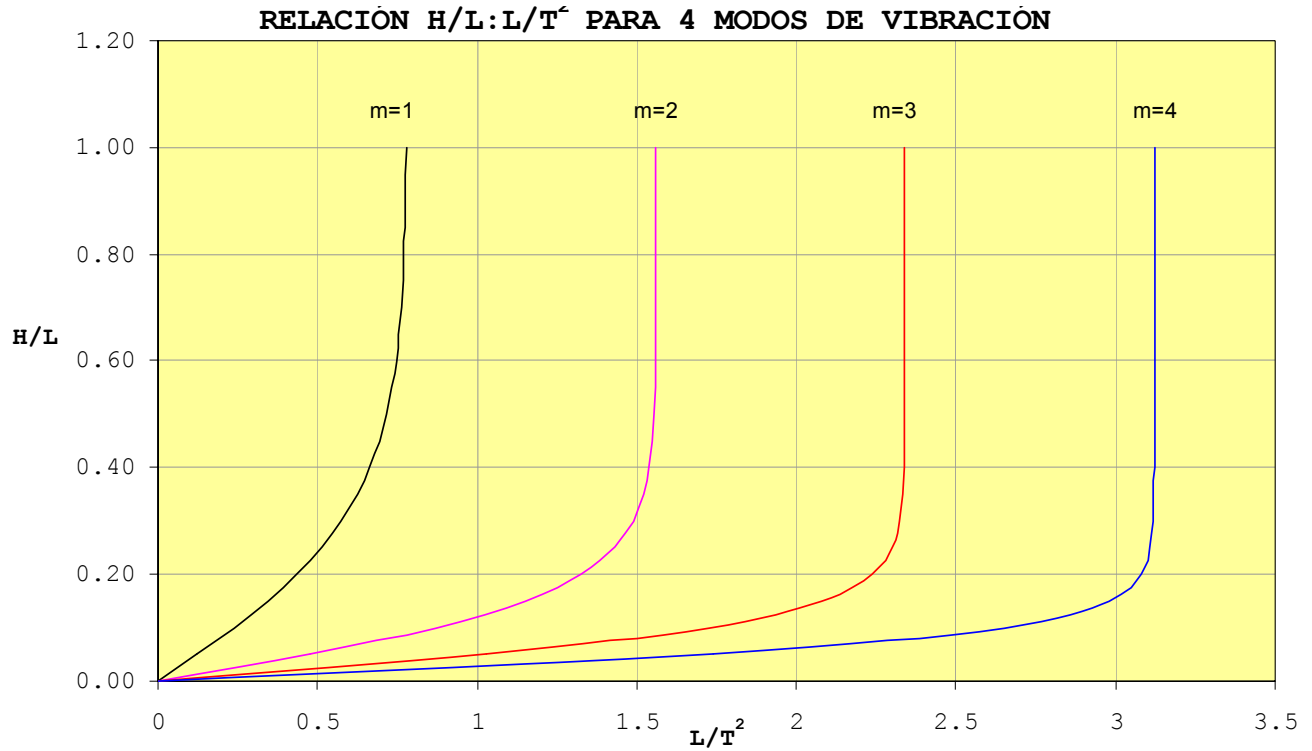


Gráfico 3.1: Modos de vibración del agua

Definiendo de esta forma el fenómeno de las oscilaciones en el nivel libre del agua. Si L tiende a ser infinita, la solución será mediante la ecuación 3.01 pero con las condiciones frontera siguientes:

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_{x=0} = -\frac{\partial\xi}{\partial t} = A_0\omega\text{Sen}(\omega t) \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{y=0} = -v = 0 \quad \text{Ec. 3.14}$$

$$\left(\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} + g\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{y=H} = 0 \quad \text{Ec. 3.15}$$

$$\left| \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right|_{x \rightarrow \infty} \leq A_0 \omega \quad \text{Ec. 3.16}$$

Donde:

$\xi = A_0 \cos(\omega t)$ Es el desplazamiento del muro en la dirección X

V Es la velocidad del fluido a lo largo del eje Y

Y teniendo en cuenta que la presión dinámica del líquido sobre la pared está dada por la expresión siguiente:

$$P = \frac{\gamma_0}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \text{Ec. 3.17}$$

Despreciando la influencia del oleaje, o sea, considerando el nivel libre sin presiones, se obtiene:

$$\frac{P}{\alpha \gamma_0 H} = -\cos(\omega t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{n+1}}{\mu_n \sqrt{\mu_n^2 - \beta^2}} \cos(\mu_n Y / H) \quad \text{Ec. 3.18}$$

Donde:

$$\mu_n = (2n - 1)\pi / 2$$

$$\beta = \omega H / a = (2\pi / a) \frac{H}{T}$$

α Es la máxima proporción de la aceleración de la gravedad en el movimiento perturbador

Si el líquido se considera incompresible, el término $\sqrt{\mu_n^2 - \beta^2}$ de la ecuación 3.18, se convierte en μ_n

3.3.1 Sistema mecánico equivalente (SME): Housner (1967)^{5,18}

presentó el modelo de un sistema mecánico equivalente del depósito mostrado en la figura 2.1b que se presenta en la figura 3.2 en el cual puede observarse una masa fija M_0 y una masa convectiva M_1 unida a las paredes del depósito por resortes a una distancia h_1 desde el fondo del depósito. Cuando un tanque como el mostrado en la figura 3.21b es excitado por movimiento de sus soportes debido a un sismo, las paredes del tanque se mueven hacia la izquierda y a la derecha y el líquido cerca de las paredes será acelerado hacia la izquierda y hacia la derecha con las paredes del tanque, pero el fluido que se encuentra cerca del centro del tanque no será acelerado, sino que tendrá la tendencia a oscilar con el período natural del oleaje del líquido contenido en el depósito.

Las presiones del fluido sobre las paredes del tanque reflejarán esas dos acciones antes apuntadas y una de las componentes de la presión variará en el tiempo directamente proporcional a la aceleración del suelo y la otra componente variará en el tiempo con el oleaje del fluido. Esta acción de las fuerzas dinámicas ejercidas por el fluido puede ser representada por una masa fija M_0 que se mueve con las paredes del tanque y un oscilador simple equivalente con masa m_1 que tiene el mismo período de vibración

que el correspondiente al primer modo de oscilación del líquido¹⁸.

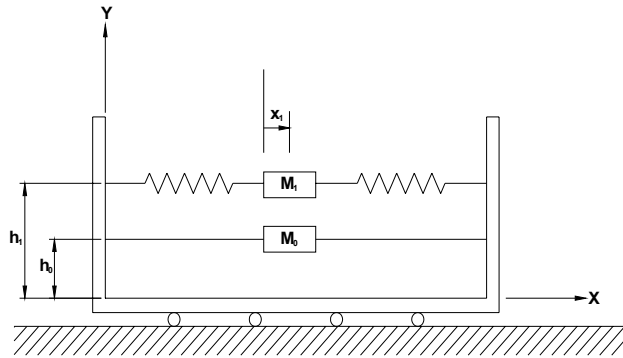


Figura 3.3: Modelo del sistema equivalente

Si el sistema equivalente mostrado en la figura 3.3, está sujeto a movimientos del suelo debido a sismos, las fuerzas horizontales ejercidas por M_0 y M_1 serán equivalentes a las fuerzas del fluido que serían ejercidas en las paredes del tanque. Los modos superiores de oscilación del tanque, son por lo general despreciados ya que no son fuertemente excitados, las propiedades del sistema dinámico equivalente fueron propuestas por Housner (1967) y pueden ser expresadas de la siguiente forma¹⁸:

$$M_0 = M \frac{\tanh\left(1.7 \frac{R}{h}\right)}{1.7 \left(\frac{R}{h}\right)} \quad \text{Ec. 3.19}$$

$$h_0 = \frac{3}{8} h \quad \text{Ec. 3.20}$$

$$M_1 = 0.6M \frac{\tanh\left(1.8 \frac{h}{R}\right)}{1.8\left(\frac{h}{R}\right)} \quad \text{Ec. 3.21}$$

$$h_1 = h \left(1 - \frac{\cosh\left(1.8 \frac{h}{R}\right) - 1}{\left(1.8 \frac{h}{R}\right) \operatorname{senoh}\left(1.8 \frac{h}{R}\right)} \right) \quad \text{Ec. 3.22}$$

$$T_1 = \frac{2\pi\sqrt{\frac{h}{g}}}{\sqrt{\left(1.8 \frac{h}{R}\right) \tanh\left(1.8 \frac{h}{R}\right)}} \quad \text{Ec. 3.23}$$

Donde

M es la masa total de agua

R es la distancia desde el centro del tanque a sus paredes

Aplicando las expresiones anteriores encontramos lo siguiente:

MASAS PARTICIPANTES EN TÉRMINOS DE LA MASA TOTAL

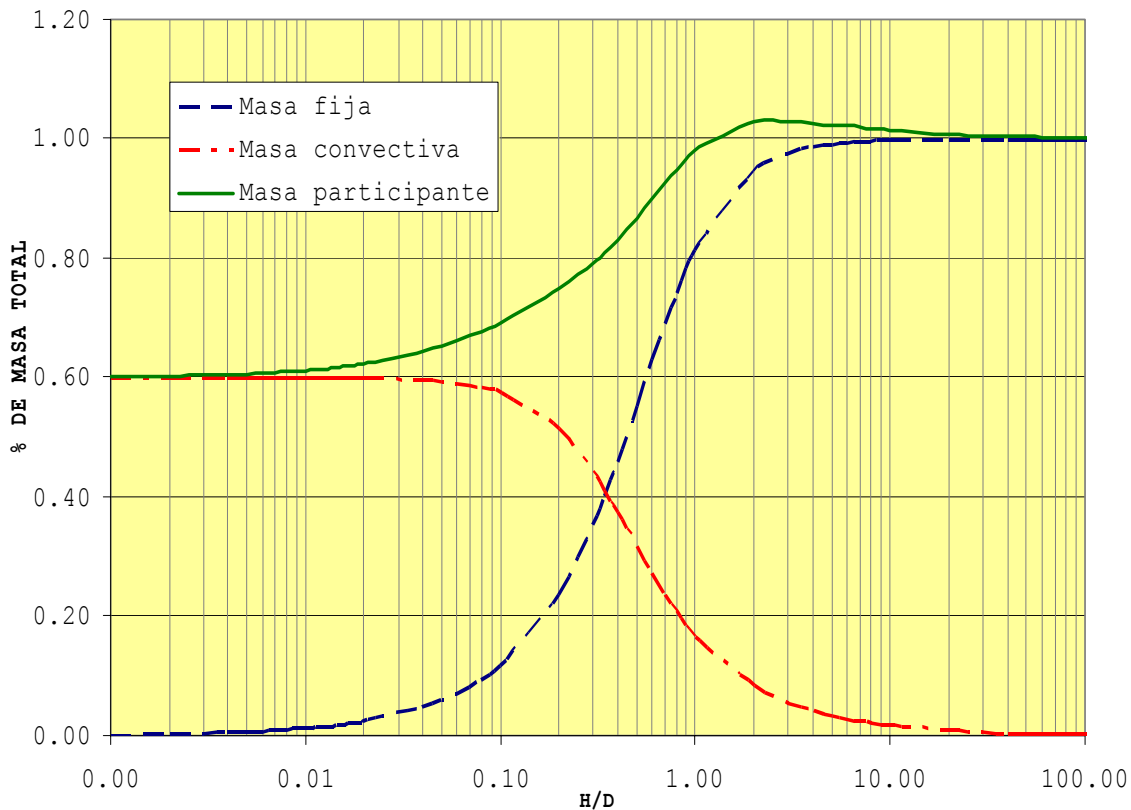


Gráfico 3.2: Masas participantes

PERÍODO DE LA MASA CONVECTIVA

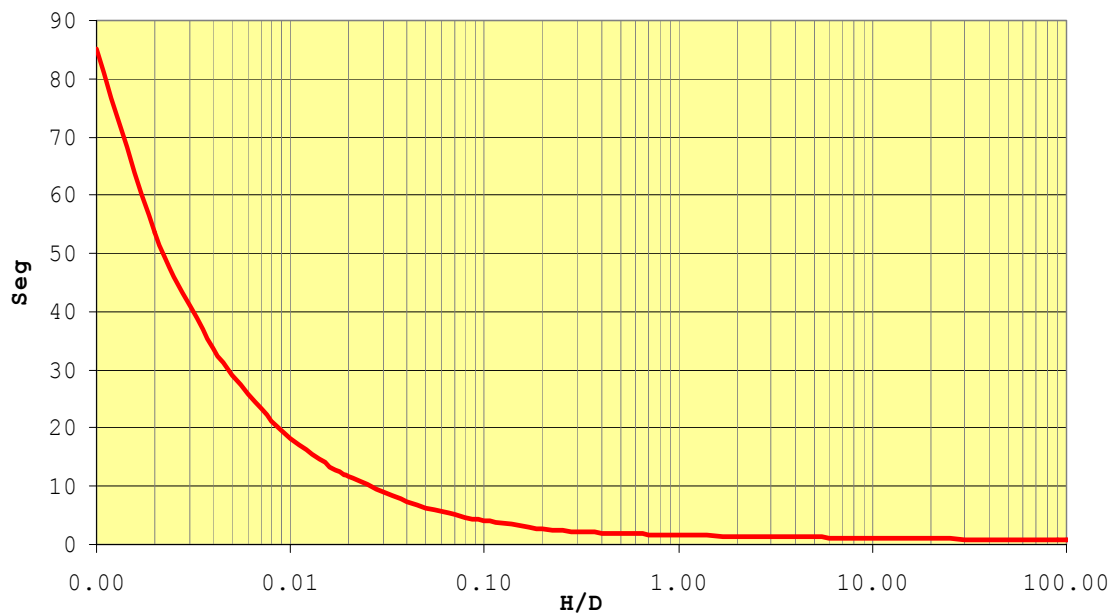


Gráfico 3.3: Período de la masa convectiva

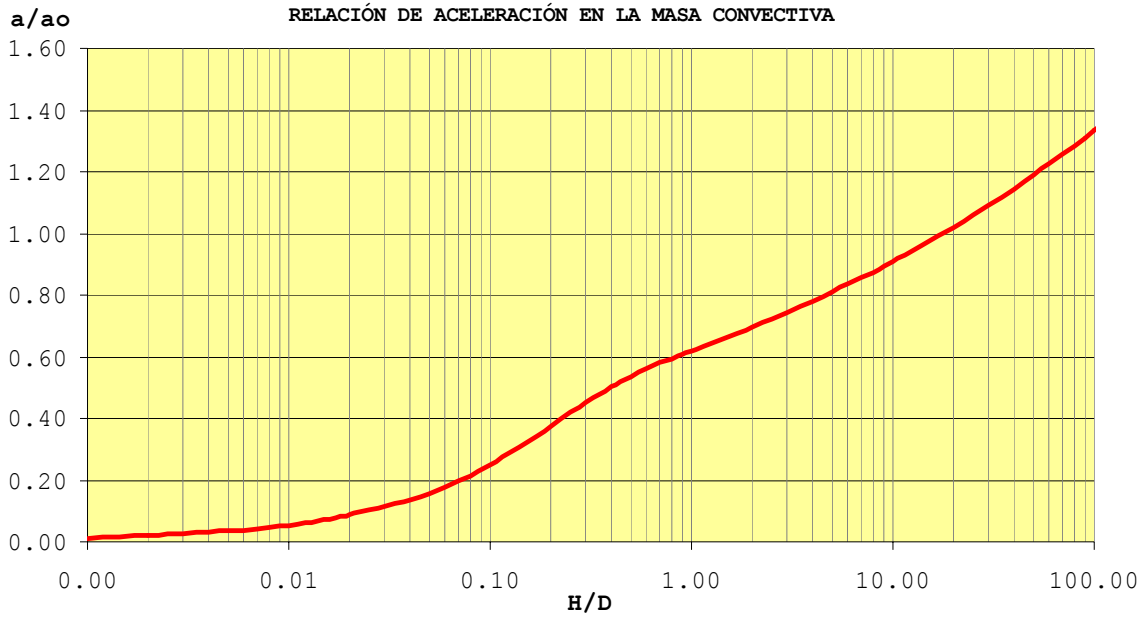


Gráfico 3.4: Relación de aceleraciones

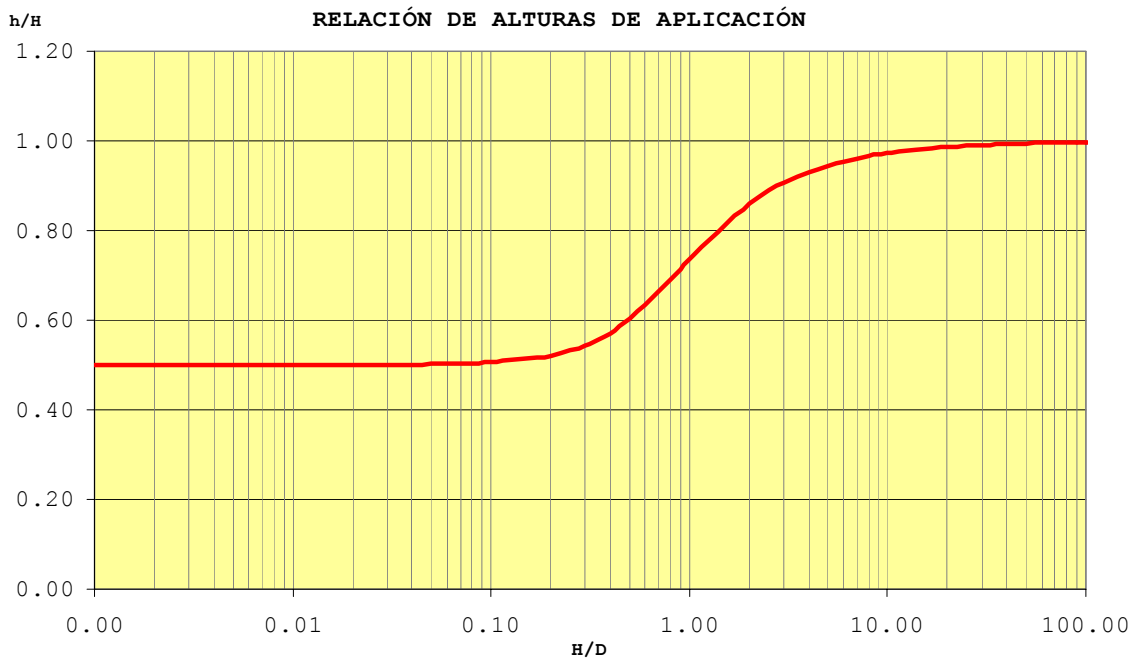


Gráfico 3.5: Relación de alturas de aplicación de masas

De las expresiones y los gráficos anteriores se puede llegar fácilmente a las siguientes conclusiones, respecto del sistema mecánico equivalente de Housner^{5,18}:

1. Para valores pequeños de h/D , la relación h_1/h tiende a 0.50, mientras que para valores grandes tiende a 0.375 que es el mismo valor de h_0/h .
2. La rigidez K_1 aumenta exponencialmente a medida que aumenta el diámetro del depósito.
3. El valor de la rigidez K_1 se mantiene casi constante para valores h/D mayores que 1.0
4. La rigidez K_1 es independiente de la intensidad del movimiento perturbador.
5. En todos los casos, la aceleración equivalente a_e tiende a cero a medida que h/D se aproxima a cero y tiende a ser igual a la aceleración del movimiento perturbador (en el suelo) a_0 para valores altos de h/D teniendo una diferencia mínima para valores de h/D mayores de 10
6. Para valores de h/D menores que 0.01, la participación de la masa m_0 y m_1 tienden al 60% de la masa total de los que la participación de m_0 es tendiente a 0%, mientras que para valores de h/D mayores que 1.0 tiende a ser el 100%, de los que la participación de m_1 tiende a ser 0%

7. Se encuentra que m_0 y m_1 tienen el mismo valor de 40.5% para relaciones de $h/D=0.35$
8. La masa participante, es decir, $m_0 + m_1$ es igual a 90% para valores de $H/D=0.60$ como se puede apreciar en la gráfica II.2, por lo que el sistema mecánico equivalente es válido, para efectos ingenieriles, para relaciones de H/D mayores o iguales que 0.60

El sistema mecánico equivalente propuesto por Housner(1967)^{5,18} es una aproximación a los efectos hidrodinámicos sobre la estructura contenedora, sistema cuyos resultados pueden ser comparados con las mediciones que sobre el prototipo se realicen para las mismas condiciones de excitación y masa tanto en el modelo como en el prototipo.

3.3.2 Conclusiones parciales: El SME propuesto por Housner¹⁸ es una aproximación al movimiento del agua en un depósito, que considera que el depósito o contenedor, tiene sus paredes rígidas y de cuyos resultados se han obtenido valores muy cercanos a los obtenidos por análisis más precisos utilizando las expresiones Ec.3.1 a 3.18, antes mostradas.

Por otro lado, como se puede apreciar en la gráfica 3.2, solo a partir de relaciones H/D mayores que 1.0, el total de la masa de

líquido participa en el análisis con lo que podemos concluir, que el resto de la masa (la no participante) para relaciones $H/D < 1.0$ tiene un movimiento interno, que disipa la energía que le imprime su movimiento.

Al tener menos masa en el análisis, la suma de la masa fija y la masa convectiva, es de esperar que las sollicitaciones a la estructura en presencia del oleaje del agua, sean menores que las que representaría una masa total fija (sin oleaje)¹⁸.

3.4 Justificación y viabilidad:

Con lo anterior se justifica la necesidad de esta investigación que será basada en elementos comparativos entre la experimentación y la modelación matemática, acoplando modelos simples de análisis hidrodinámico, de los que se establecerán coeficientes empíricos, por tener su origen en la experimentación.

La viabilidad técnica de esta investigación queda clara al hacer la revisión bibliográfica, donde es evidente el esfuerzo realizado por muchos científicos por establecer modelos matemáticos representativos de los efectos del oleaje en los reservorios de contención de líquidos y el marco teórico está claramente definido en la metodología antes expuesta.

CAPÍTULO IV

EXPECTATIVAS

El objetivo que se busca en esta investigación, es encontrar una correlación entre la respuesta de un edificio o una estructura que soporta un depósito de agua calculada mediante un modelo donde el agua se consideró como un sólido en la totalidad de su masa y la respuesta calculada por medio de un modelo donde una porción de la masa del agua se consideró como masa convectiva, acoplando en ambos modelos, el mismo modelo de cargas o excitaciones a la base de la estructura.

Se puede resumir el objetivo como estudiar los efectos hidrodinámicos en la respuesta de las estructuras que soportan depósitos de líquidos frente a excitaciones en su base, donde específicamente se busca encontrar una expresión con coeficientes empíricos, que aproximen la solución del problema de la determinación de fuerzas en la estructura por efecto del movimiento del líquido.

4.1 Resultados esperados y usuarios posibles:

Los resultados que se esperan de esta investigación es la demostración de los efectos hidrodinámicos en las estructuras de soporte de reservorios y una correlación que pueda ser utilizada

por los diseñadores, al menos como una aproximación al prediseño de las estructuras que puedan ser afectadas por este tipo de efectos.

4.2 Aporte y novedad científica:

Como producto de la investigación antes descrita, este documento presenta como aporte y novedad científica, una correlación entre las respuestas que se pueden obtener del análisis de un modelo considerando el agua contenida en un depósito soportado por la estructura, sin oleaje y la respuesta del mismo con oleaje.

CAPÍTULO V

EXPERIMENTACIÓN, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Calibración del modelo:

Se construyó un edificio de 5 pisos, como el que se muestra en la fotografía 1 al que se le aplicó una carga armónica a sus soportes con una amplitud de 65mm y una frecuencia de 78rpm y al edificio se le tomaron medidas de su respuesta en cada nivel.

El acelerograma¹⁷ que se obtuvo de las lecturas tomadas en la base del edificio prototipo con el tanque vacío, sirvió para utilizarlo como modelo de cargas al modelo general de la misma estructura. El acelerograma correspondiente para el edificio con el tanque de sección cilíndrica vacío es el mostrado en la gráfica 3.1.

Puede apreciarse en la gráfica 5.1 y 5.2 las imperfecciones del prototipo ya que el arranque es sumamente violento y cada vez que el motor que provoca la perturbación, llega a su máxima amplitud y consecuentemente cambia de sentido, se observa el cambio en ordenadas pico en el acelerograma, además de que también se puede observar que hay vibraciones durante cada ciclo de oscilación producto de oscilaciones remanentes por energía en proceso de

disipación. El acelerograma registró también aceleraciones en los tres ejes aunque el movimiento aplicado solo es en el eje X. Estos registros demuestran pequeñas excentricidades producto de la imprecisión del prototipo tanto en el edificio como en la instalación del motor.

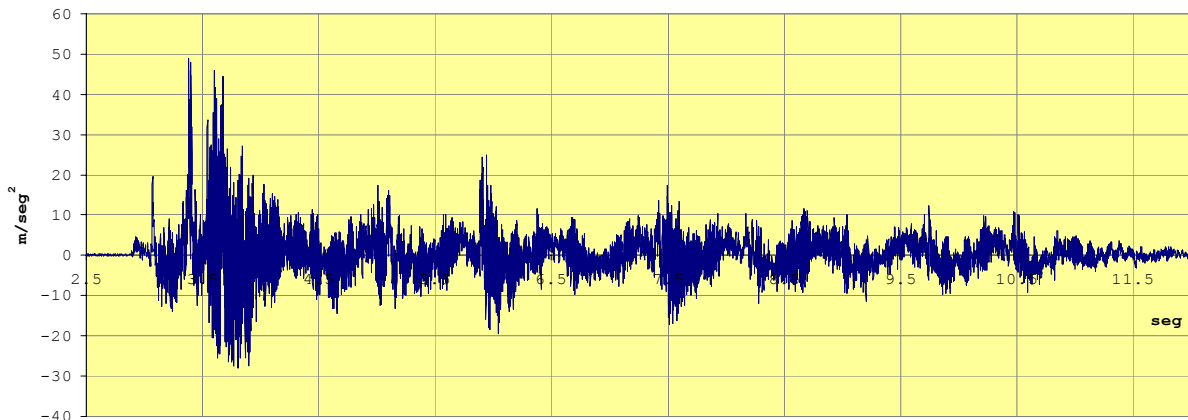
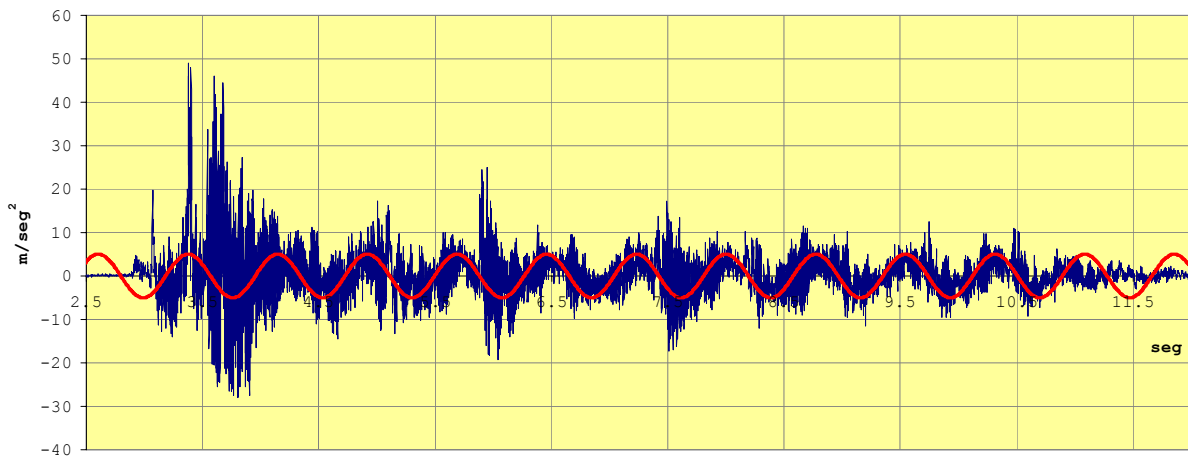


Gráfico 5.1: Serie de tiempo, aceleraciones en los soportes



Gráfica 5.2: Serie de tiempo. Aceleraciones suavizadas

Si entre los valores de cada par de registros se encuentra su valor medio y graficamos ese valor medio, encontramos que es

posible aproximar una gráfica suavizada y que es perfectamente posible poder definirla por una función armónica como se muestra en la gráfica 3.2 de donde se deduce por regresión trigonométrica que la función es:

$$a(t) = 3.328 \operatorname{Sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{\phi}\right) \quad \text{Ec. 5.01}$$

Donde:

$a(t)$ es la aceleración en función del tiempo en m/seg^2

t Es el tiempo en segundos

ω Es la frecuencia angular en radianes

ϕ Es la fase en veces la frecuencia angular.

Por simple relación física conocemos que:

$$V(t) = \int a(t)dt \quad \text{Ec. 5.02}$$

$$S(t) = \int V(t)dt \quad \text{Ec. 3.03}$$

Donde:

$V(t)$ es la velocidad en m/seg en función del tiempo t

$S(t)$ es el desplazamiento en m en función del tiempo t

Por tanto, La velocidad del movimiento de los soportes será:

$$V(t) = \int a(t)dt = \int 3.328 \operatorname{Sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{\phi}\right)dt$$

$$V(t) = \frac{-3.328}{\omega} \operatorname{Cos}\left(\omega t + \frac{2\pi}{\phi}\right) \quad \text{Ec.5.04}$$

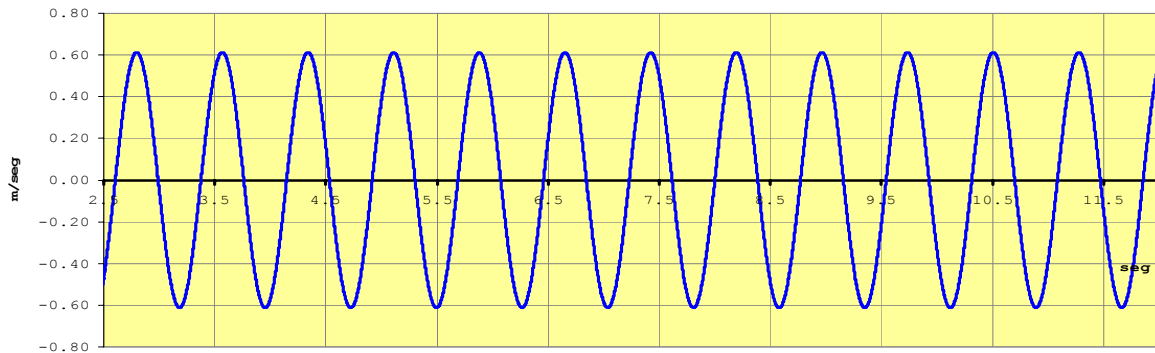
Que es graficado en la gráfica 5.3.

Y el desplazamiento de los mismos será:

$$s(t) = \int v(t) dt = \int \frac{3.328}{\omega} \text{Sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{\phi}\right) dt$$

$$s(t) = \frac{3.328}{\omega^2} \text{Sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{\phi}\right) = 0.048 \text{Sen}\left(8.257t + \frac{2\pi}{\phi}\right) \quad \text{Ec. 5.05}$$

Que puede ser apreciado en la gráfica 5.4



Gráfica 5.3: Serie de tiempo, Velocidad del movimiento v(t)



Gráfica 5.4: Serie de tiempo, Desplazamiento S(t)

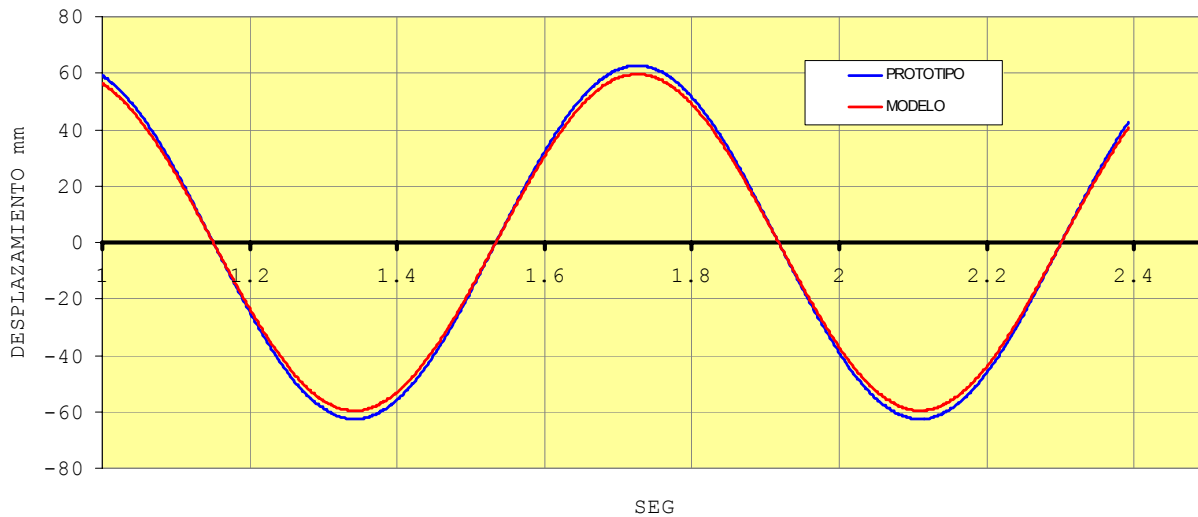
Nótese que la función de desplazamientos mostrada en la ecuación 5.05, encontrada por integración, es muy aproximada a los parámetros del motor ya que la amplitud encontrada es 48.81mm versus 48mm y la frecuencia angular es $8.2570t=78.78\text{rpm}$ versus

78rpm por lo que la aproximación encontrada es aceptable sin considerar el amortiguamiento en la etapa de vibraciones libres una vez que la excitación ha cesado.

Nótese también, tanto en la gráfica 5.1 y 5.2, que el motor fue detenido a los 10.5seg pero el prototipo siguió vibrando hasta disipar toda la energía y en ambas gráficas puede verse el decremento logarítmico de aceleración, aunque la función encontrada por regresión superpuesta en la gráfica 53.2 es de duración infinita, por lo que a partir del $t=10.5\text{seg}$ ya no coinciden en amplitud.

Aceptando las funciones anteriores como modelo de cargas, este fue aplicado al modelo general de la estructura del prototipo mostrado en la figura 3.1 y al que, como antes se explicó, del análisis dinámico tiempo-historia que se realizó, se le encontraron los desplazamientos en cada nivel para compararlos con las lecturas en los mismos puntos correspondientes del prototipo, a las que a su vez, se siguió el mismo procedimiento de filtrado de datos aplicado al modelo de cargas.

En la gráfica 5.5 se muestran en forma comparativa los desplazamientos del nivel 5 con el tanque vacío, entre las mediciones del prototipo y los resultados del modelo con la excitación equivalente antes descrita.



Gráfica 5.5: Comparación de desplazamientos en nivel 5

Al igual que con el nivel 5, se realizó las comparaciones con el resto de los niveles, las cuales se muestran en las gráficas 5.6 a 3.8. En todos los casos puede observarse que las diferencias son despreciables ya que andan por el orden de 1.10mm equivalentes a 1.69% del desplazamiento total, con lo que podemos llegar a la conclusión, que presenta un error de 1.69% en el nivel 5. En la gráfica 3.6 se muestra un comparativo entre las funciones encontradas para cada nivel pudiendo observarse como el desplazamiento aumenta a medida que aumenta el nivel. Los cálculos sobre el modelo arrojan, que la estructura presenta un

período fundamental de 0.1076seg, un 86.14% de la masa participa en la vibración del modelo de una masa total de 8.037Kg lo que representa un peso total de $W=78.82\text{Kgf}$ y reporta un cortante en la base de 23.69Kgf lo que es equivalente a $0.30W$. La función de carga usada es $a(t) = 3.328 \text{ Sen}(8.2507t + 3.47\pi)$.

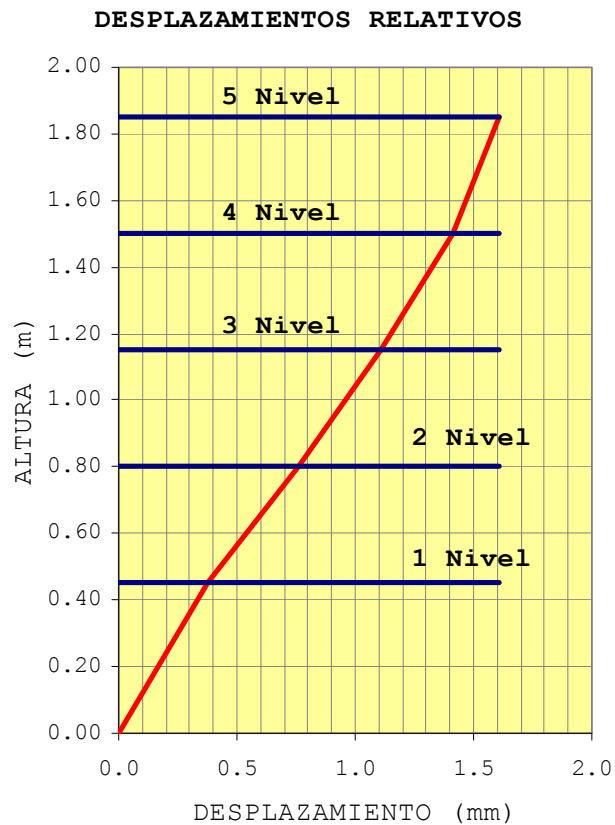


Gráfico 5.6: Desplazamientos relativos a la base

5.2 Experimentación y resultados:

Teniendo el modelo calibrado con el prototipo, se tomaron lecturas en el último, con el tanque lleno a diferentes alturas y se compararon los resultados con el agua considerada como un sólido integrado a la estructura a los mismos niveles de llenado.

Las diferencias encontradas representan el efecto hidrodinámico y es mostrada en la curva correspondiente de la gráfica 5.7 donde también se muestra la respuesta en términos de desplazamiento, tanto del modelo como del prototipo.

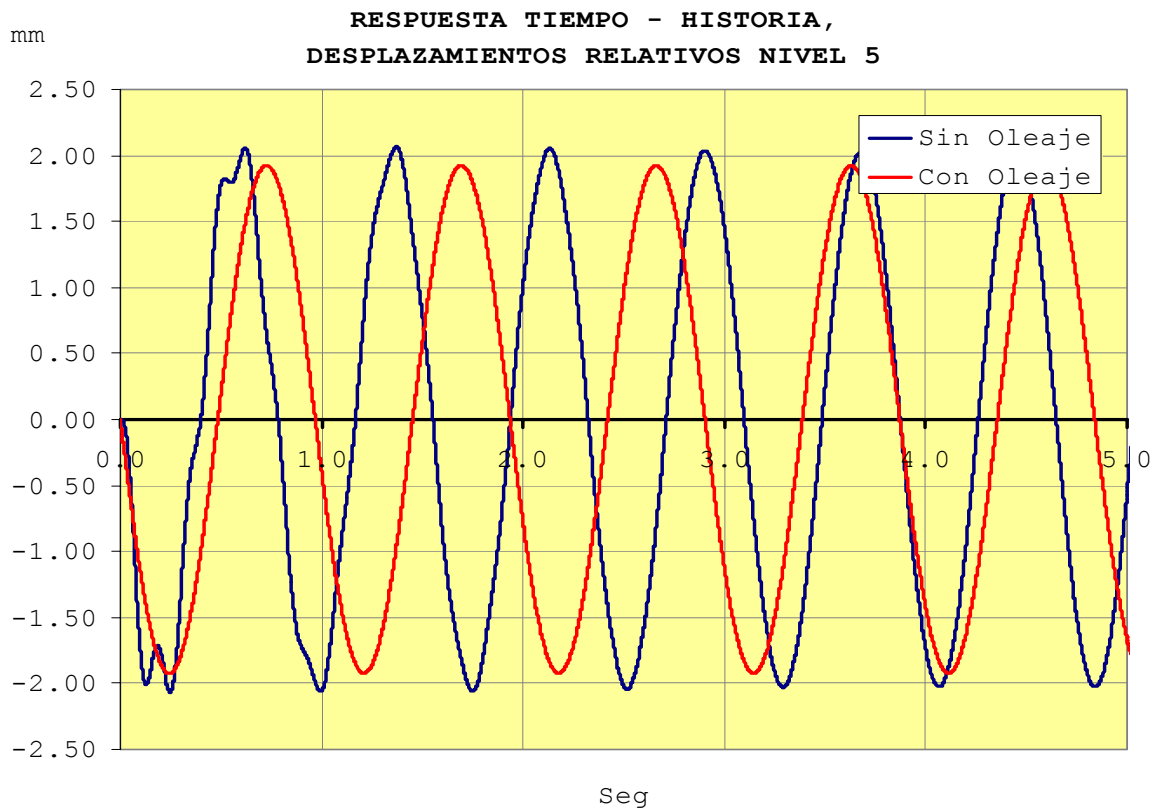
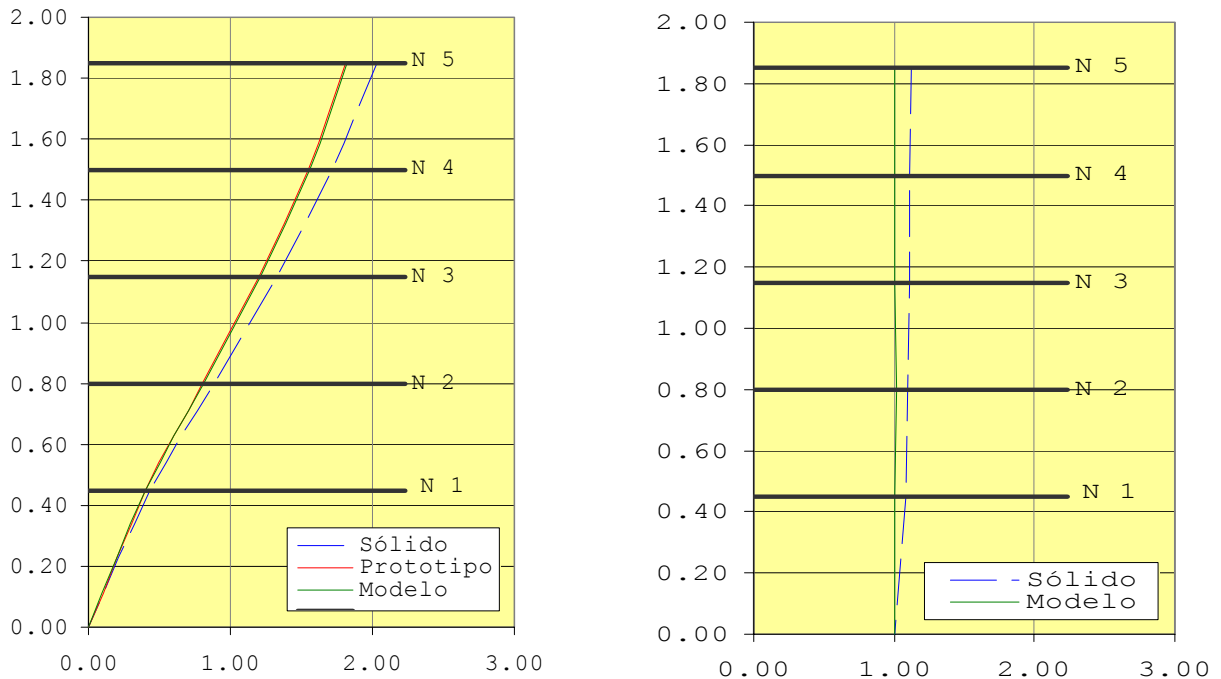


Gráfico 5.7: Comparación de desplazamientos en nivel 5

La diferencia en desplazamientos encontrada entre el modelo con el agua considerada como un sólido integrada a la estructura y el prototipo, ambos con los tanques llenos hasta la altura de 0.15m, medido en el nivel 5, es de 0.22mm lo que es equivalente 2.47% con respecto al mayor desplazamiento máximo. Los cálculos efectuados sobre el modelo arrojan que el mismo tiene un período

fundamental de vibración de 0.1499seg y un peso total, incluyendo el agua, de $W=121.24\text{Kg}$, 89.73% de la masa total participa en la oscilación y resulta un cortante en la base de 36.06Kgf equivalentes a 0.297W.



Desplazamientos relativos

Veces respecto del prototipo

Gráfico 5.8: Comparación entre desplazamientos

En la gráfica 5.8 se muestran los desplazamientos relativos a los soportes de la estructura, entre los resultantes del modelo considerando el agua como un sólido integrado a la estructura y los encontrados con medición en el prototipo. Así mismo, se muestra la diferencia en veces el desplazamiento encontrado en el modelo tanto con oleaje como sin oleaje con respecto al

desplazamiento medido en el prototipo. Nótese la pequeña diferencia entre la respuesta del modelo que considera el oleaje y la del prototipo.

Si aplicamos las expresiones de Housner (1967)^{5,18} mostradas en las ecuaciones 3.19 a 3.23^{5,18}, y a este sistema mecánico equivalente le aplicamos la carga en términos de aceleración al nivel 5 que es el nivel de apoyo del tanque, podemos encontrar las fuerzas sobre las paredes del tanque y el movimiento de una partícula cercana a las paredes del tanque.

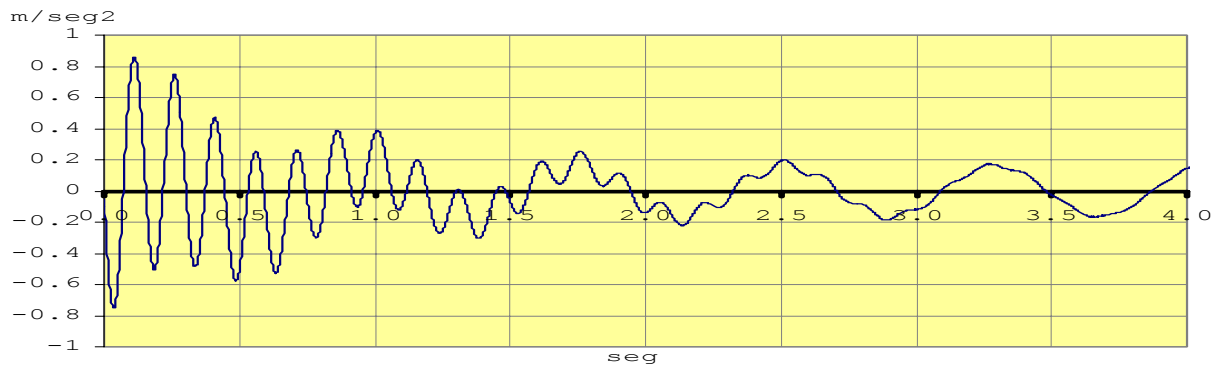


Gráfico 5.9: Aceleración en el nivel 5

La carga en términos de aceleración aplicada al sistema mecánico equivalente, fue extraída de la respuesta del modelo considerando el agua como un sólido integrado a la estructura y es mostrada en la gráfica 5.9.

En el gráfico 5.10 encontramos la fuerza ejercida por el agua en las paredes del depósito, de acuerdo al sistema mecánico equivalente y en la gráfica 5.11, el movimiento de una partícula de agua muy cercana a las paredes del tanque, donde el valor cero representa la posición de reposo.

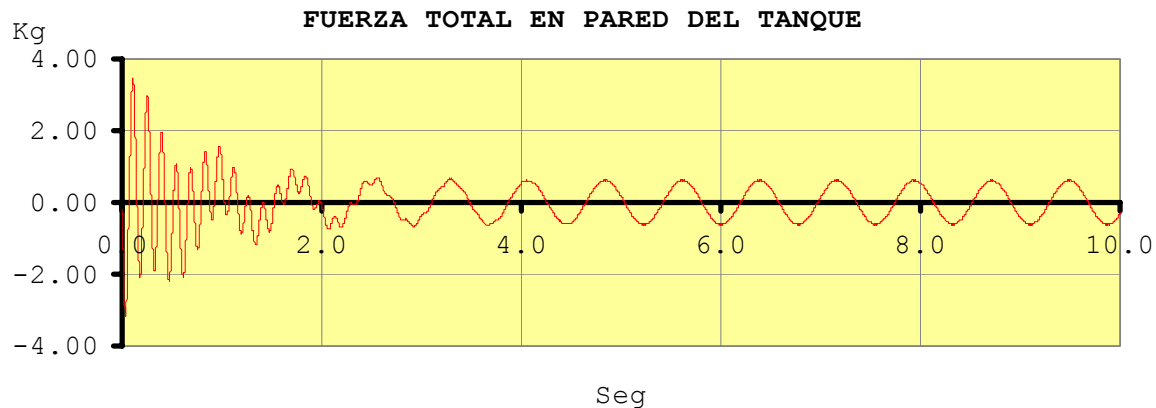


Gráfico 5.10: Fuerza ejercida sobre la pared del tanque

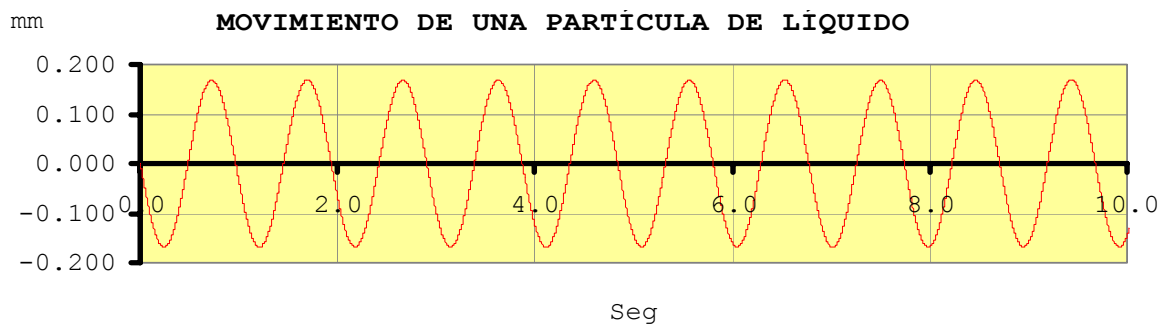


Gráfico 5.11: Movimiento de una partícula de agua

La aplicación del sistema mecánico equivalente de Housner (1967)^{5,18}, fue realizada por medio de una hoja electrónica que se muestra en el anexo y que para su aplicación se usó el espectro mostrado en la gráfica 5.12 el cual fue obtenido del Código hondureño de Construcción (CHOC-2006)⁸.

De la aplicación del sistema mecánico equivalente⁵, fue posible graficar una serie de tiempo con la respuesta del mismo a la que se le superpuso la respuesta del modelo con el agua considerada como un sólido integrado a la estructura y que muestra en la gráfica 5.13.

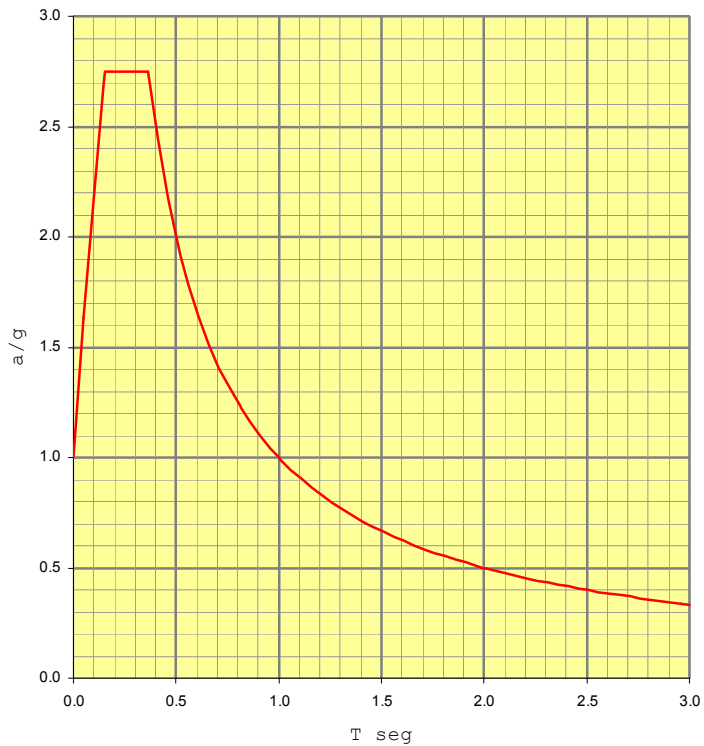
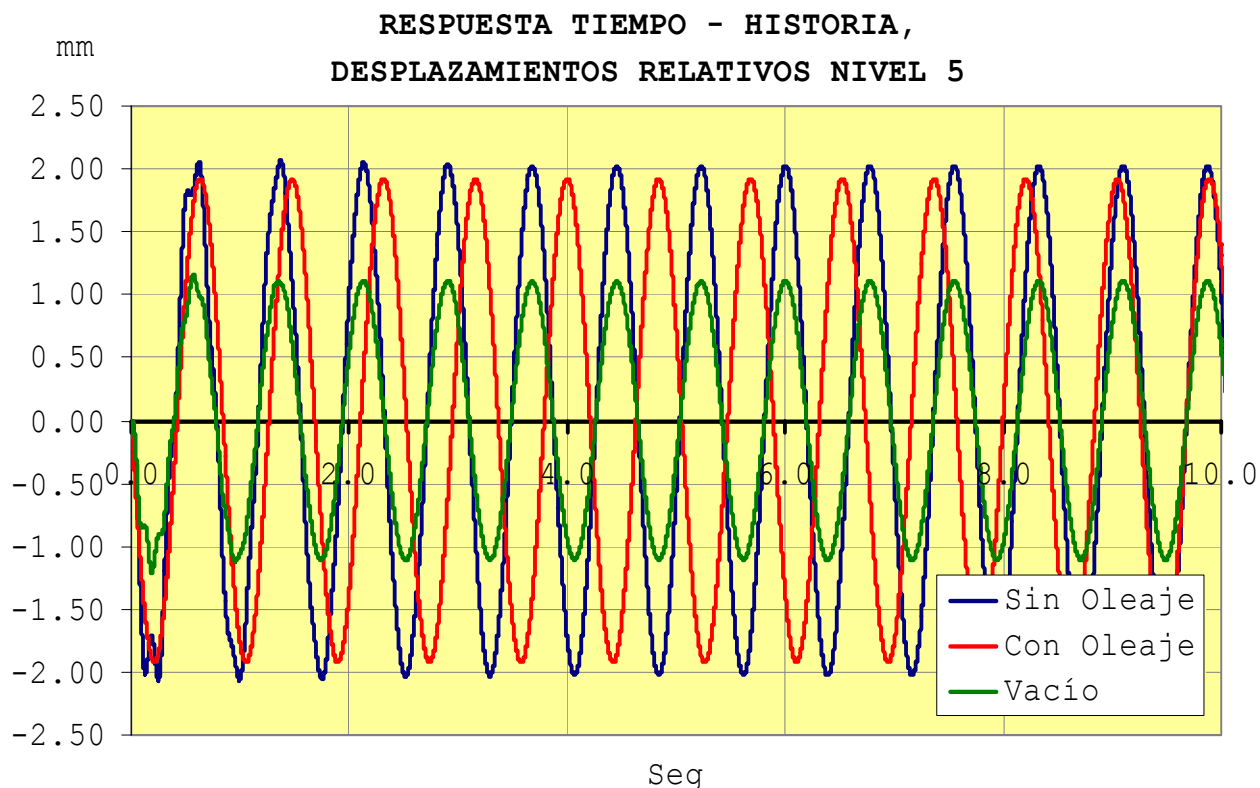


Gráfico 5.12: Espectro elástico de aceleraciones⁸



Gráfica 5.13: Respuestas comparativas en serie de tiempo

En la gráfica 5.13, la curva correspondiente al movimiento con oleaje es la curva calculada en el modelo al que se le aplicó las serie de aceleraciones mostrada en la gráfica 5.9 aplicada al nivel 5 del modelo y la curva correspondiente al movimiento sin oleaje es la calculada en el modelo con el agua considerada como un sólido integrado a la estructura. Ambas curvas corresponden a los desplazamientos en el nivel 5 de la estructura en investigación con el tanque lleno a $h=15\text{cm}$ ($h/D=0.25$). Se observa que en la curva con oleaje, la cual corresponde a la respuesta con el modelo de Housner^{5,18}, tiene una ordenada menor con

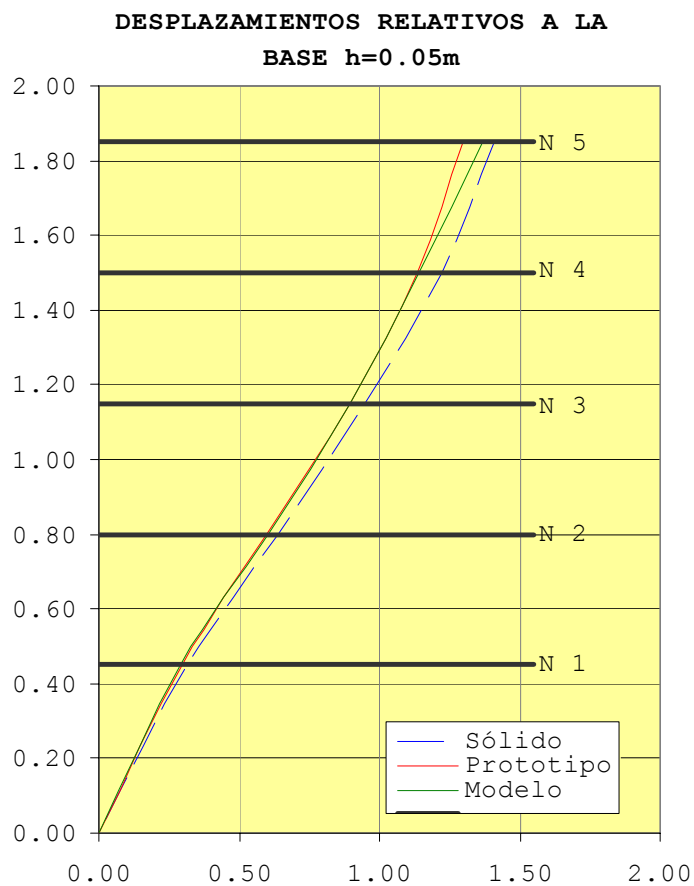
respecto a la curva correspondiente a la respuesta sin oleaje y una ordenada mayor con respecto a la curva con el tanque vacío. La curva correspondiente a la respuesta con oleaje no presenta variaciones por efecto del desfase debido a que el modelo matemático con que se analizó no permite la vibración de un cuerpo dentro de otro, de manera que esta curva representa el efecto en que el agua entra en fase con la estructura, no obstante, conociendo el período de vibración del agua, esta curva se construyó con ese período, por lo que se muestra el desfase pero no su efecto amortiguador.

Los resultados encontrados en la estructura con el modelo de cargas considerando el agua como un sólido integrado a la estructura y el sistema mecánico equivalente aplicado al modelo, son mostrados comparativamente en la tabla 5.1.

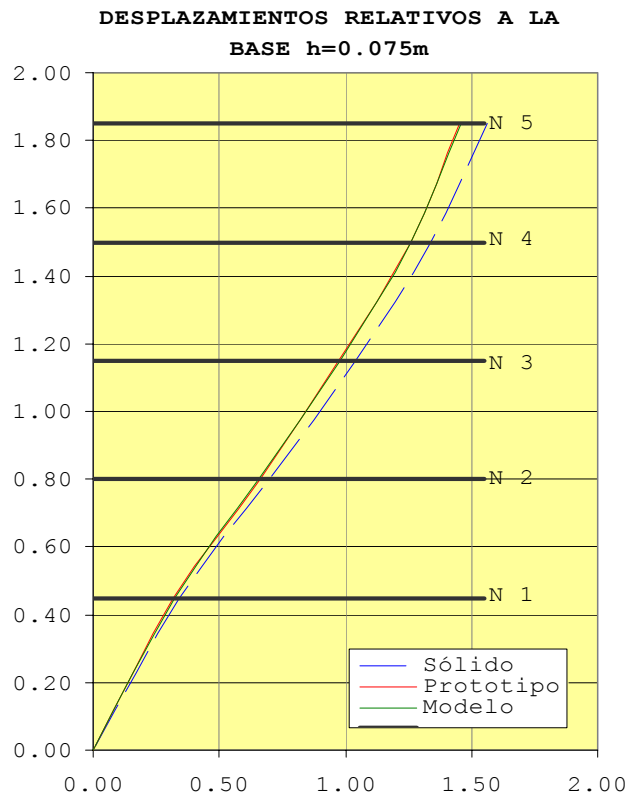
Las mismas operaciones antes mostradas para el tanque lleno hasta la altura de 0.15m medida desde el fondo del depósito, se realizó para las alturas 0.05m, 0.075m, y 0.10m y el perfil de los resultados es mostrado en las gráficas a continuación.

RESULTADOS	SIN OLEAJE	SME	VACÍO
PERÍODO T (seg)	0.1499	0.1446	0.1076
CORTANTE EN LA BASE V (Kgf)	36.06	34.65	23.69
PESO TOTAL W (Kgf)	121.24	111.66	78.82
V/W	0.297	0.286	0.300
MASA PARTICIPANTE	89.73%	90.92%	86.14%

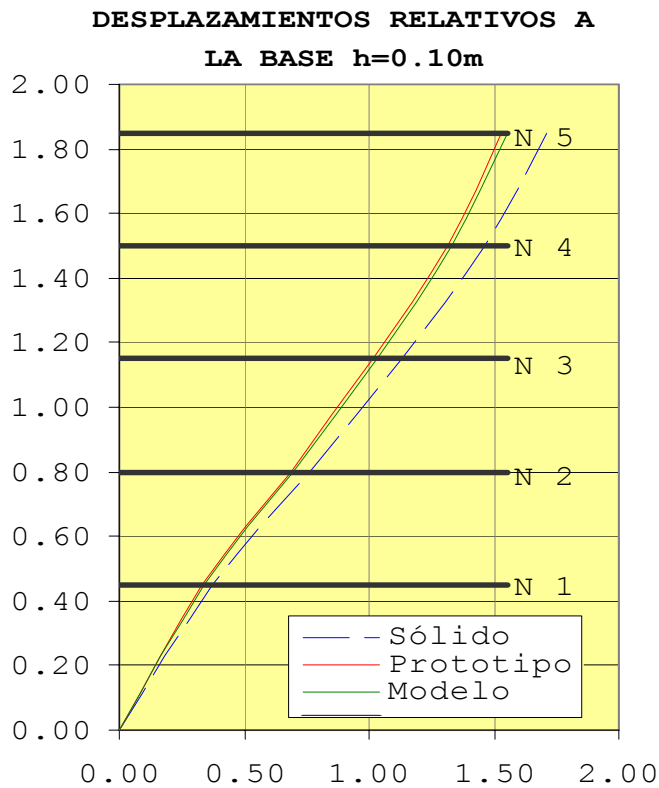
Tabla 5.1: Resultados comparativos para h=0.15m



Gráfica 5.14: Desplazamientos comparativos (mm)



Gráfica 5.15: Desplazamientos comparativos (mm)



Gráfica 5.16: Desplazamientos comparativos (mm)

En las gráficas de la 5.14 a la 5.16, así como en la 5.8, puede verse comparativamente para cada nivel de llenado de los tanques la respuesta en términos de desplazamiento entre el agua considerada como un sólido y el efecto del oleaje. Todos estos valores son mostrados en la tabla 5.2 a continuación:

VALORES ABSOLUTOS (mm)								
NIVEL	h=5cm		h=7.5cm		h=10cm		h=15cm	
	SIN OLAS	SME	SIN OLAS	SME	SIN OLAS	SME	SIN OLAS	SME
5	1.410	1.310	1.560	1.460	1.710	1.550	2.030	1.182
4	1.220	1.140	1.340	1.260	1.460	1.330	1.720	1.560
3	0.950	0.892	1.040	0.980	1.130	1.030	1.330	1.210
2	0.640	0.603	0.698	0.659	0.757	0.693	0.884	0.814
1	0.312	0.294	0.340	0.321	0.368	0.337	0.428	0.396
BASE (m/seg ²) a(t)=	3.1 Seno(8.187t)		3.15 Seno(8.187t)		3.1 Seno(8.036t)		3.1 Seno(8.112t)	
W (Kgf)=	92.96	88.462	100.03	93.99	107.09	99.74	121.24	111.66
h/D =	0.0833		0.1258		0.1667		0.2500	
(m ₀ +m ₁)/m _T	0.6800		0.7064		0.7296		0.7710	
m _p =	87.07%	86.68%	87.491%	86.94%	88.06%	87.16%	89.73%	90.92%
V (Kgf)=	28.55	27.07	30.62	29.33	32.80	30.52	36.06	34.65
V/W =	0.307	0.291	0.306	0.293	0.306	0.285	0.297	0.286
T (Seg)=	0.1234	0.1182	0.1302	0.1243	0.1368	0.1309	0.1499	0.1446
T ₁ (Seg)=		1.52		1.26		1.12		0.97

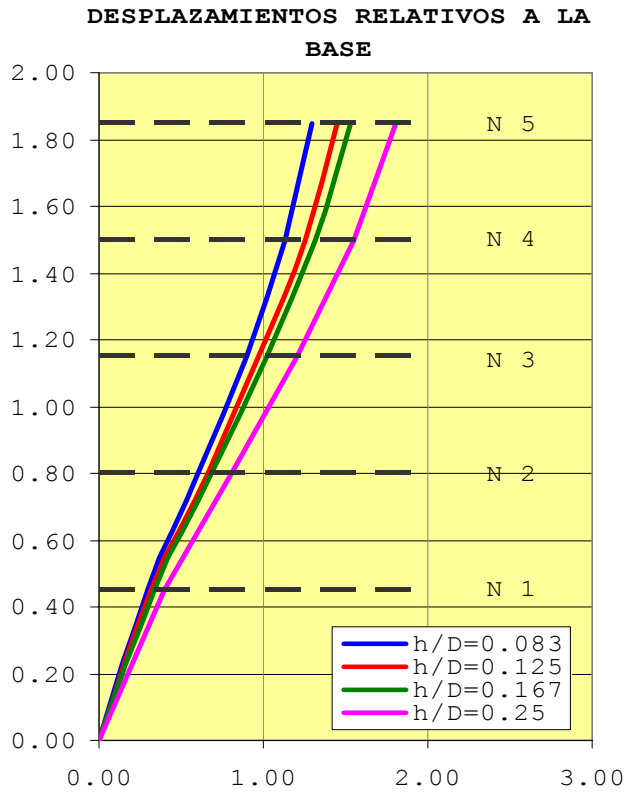
Tabla 5.2: Valores absolutos comparativos SME Vs sólido

En la tabla 5.3, se muestran comparativamente las respuestas del SME y el tanque vacío.

VALORES ABSOLUTOS (mm)								
NIVEL	h=5cm		h=7.5cm		h=10cm		h=15cm	
	VACÍO	SME	VACÍO	SME	VACÍO	SME	VACÍO	SME
5	1.110	1.310	1.13	1.460	1.110	1.550	1.110	1.182
4	0.971	1.140	0.989	1.260	0.971	1.330	0.971	1.560
3	0.771	0.892	0.785	0.980	0.770	1.030	0.770	1.210
2	0.525	0.603	0.535	0.659	0.525	0.693	0.525	0.814
1	0.258	0.294	0.263	0.321	0.258	0.337	0.258	0.396
BASE (m/seg ²) a(t)=	3.1 Seno(8.187t)		3.15 Seno(8.187t)		3.1 Seno(8.036t)		3.1 Seno(8.112t)	
W (Kgf)=	78.82	88.462	78.82	93.99	78.82	99.74	78.82	111.66
h/D =	0.0833		0.1258		0.1667		0.2500	
(m ₀ +m ₁)/m _T	0.6800		0.7064		0.7296		0.7710	
m _p =	86.14%	86.68%	86.14%	86.94%	86.14%	87.16%	86.14%	90.92%
V (Kgf)=	23.72	27.07	24.17	29.33	23.65	30.52	23.69	34.65
V/W =	0.300	0.291	0.307	0.293	0.300	0.285	0.300	0.286
T (Seg)=	0.1075	0.1182	0.1072	0.1243	0.1072	0.1309	0.1076	0.1446
T ₁ (Seg)=		1.52		1.26		1.12		0.97

Tabla 5.3: Valores absolutos comparativos SME Vs vacío

La gráfica 5.18 muestra en términos relativos los desplazamientos de cada nivel del edificio para diferentes relaciones de llenado. Nótese que para $h/D=0.25$, la curva se separa del resto de las curvas. Se observa en la gráfica 3.19, para todas las relaciones H/D la respuesta del modelo sin oleaje es entre 1.05 y 1.12 veces la respuesta medida en el prototipo.



Gráfica 5.18: Desplazamientos relativos comparativos (mm)

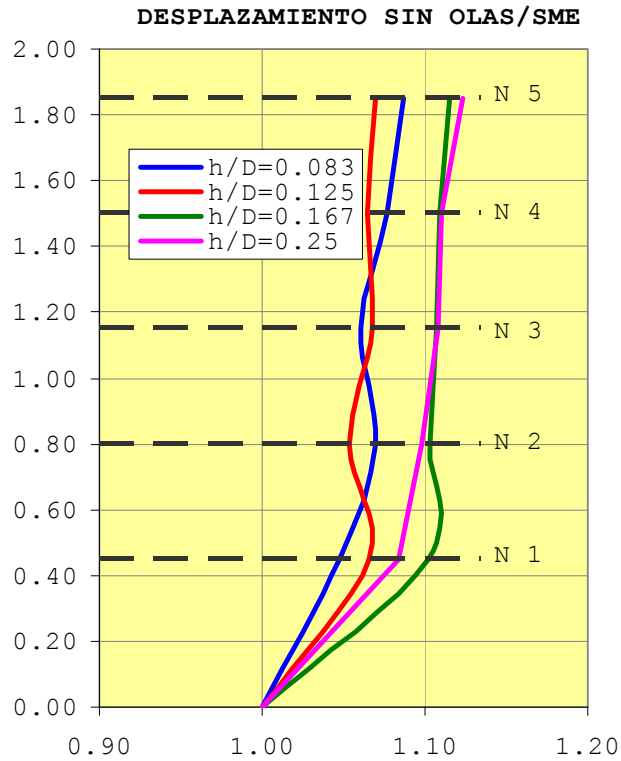
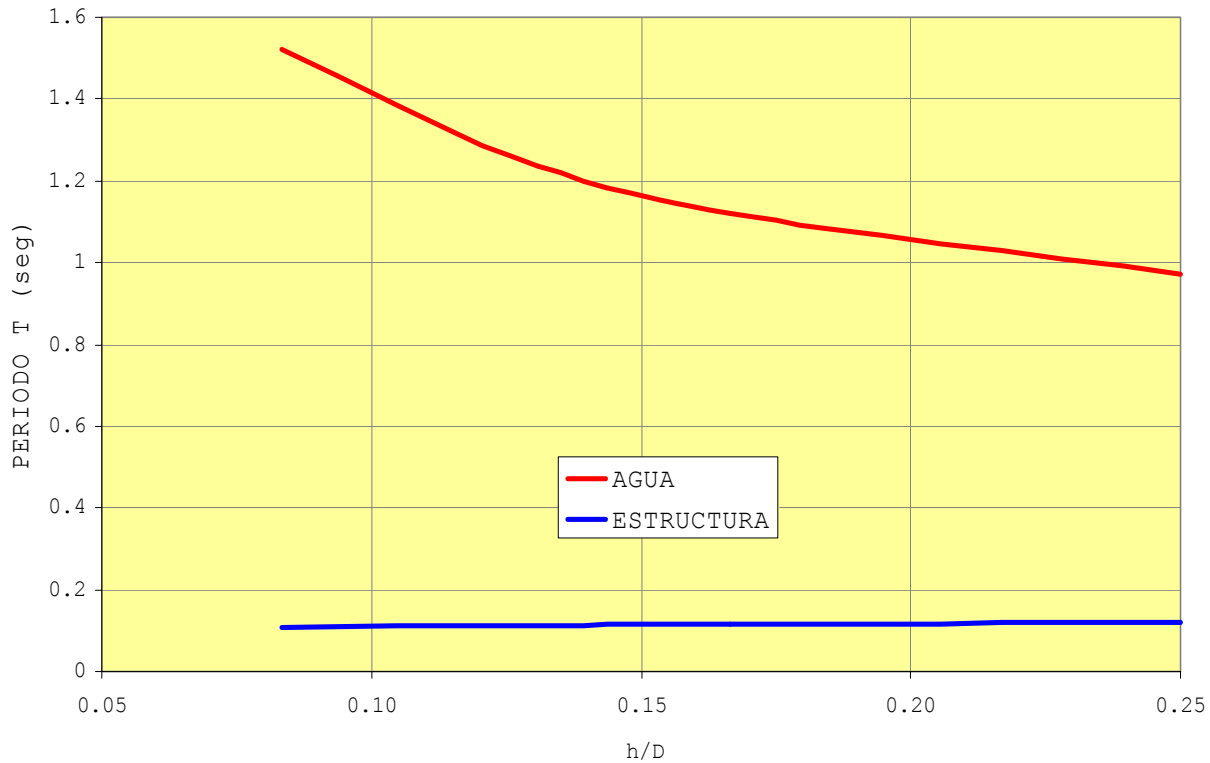


Gráfico 5.19: Relación entre respuestas (mm)

Los períodos de vibración del agua comparados con los de la estructura son mostrados en la gráfica 3.20 donde es apreciable la diferencia, además puede observarse la tendencia, donde para relaciones mayores de h/D el período va en descenso.

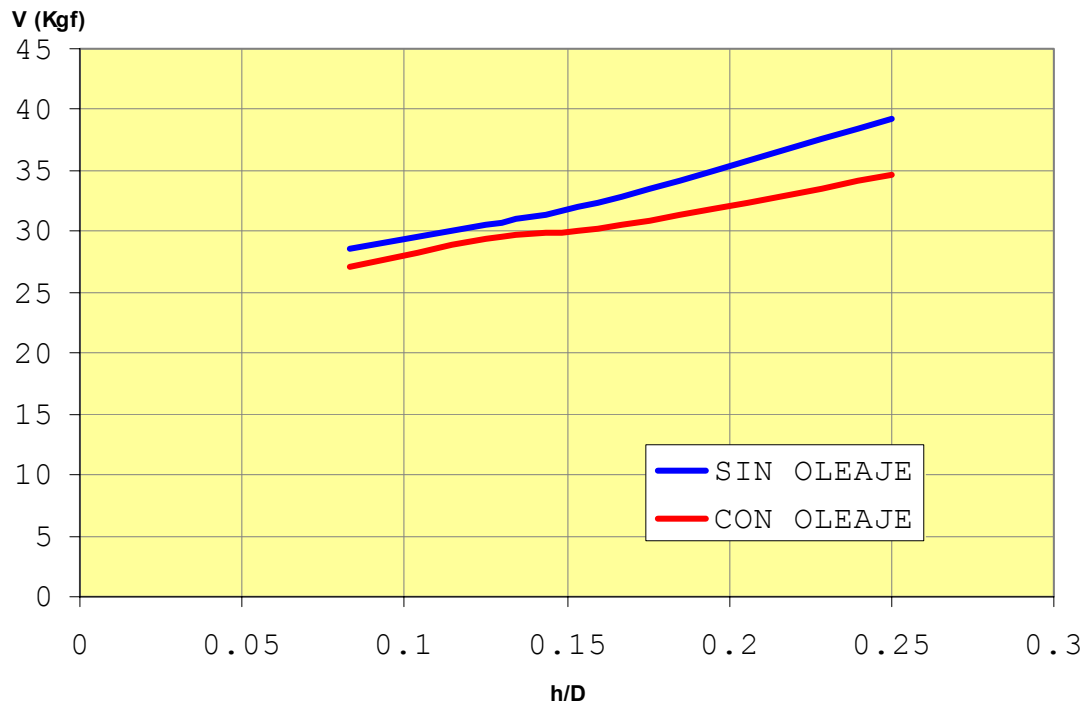


Gráfica 5.20: Períodos de vibración en función de h/D

Al tener más masa de agua sobre el edificio, el período tiende a subir en la estructura, como es de esperar, por efecto de menor frecuencia.

En la gráfica 5.21 se muestran las cortantes en la base comparativas entre los valores medidos en el prototipo y los

valores obtenidos del modelo sin oleaje para el espectro de valores de h/D mostrado o experimentado.



Gráfica 5.21: Cortantes en la base comparativos

Son notorias las cortantes menores cuando se toma en cuenta el oleaje o dicho de otra forma, el efecto hidrodinámico sobre la estructura². Nótese que cuando que la relación de llenado tiende a cero, las curvas encontrarán convergencia, lo que es de esperar en virtud de que cuando $h/D=0$, las dos estructuras serán iguales.

5.3 Análisis de los resultados:

El modelo fue calibrado con un error de 0.048% y consecuentemente los resultados que se obtienen del mismo son aceptables,

encontrando que se valida la segunda hipótesis al quedar evidenciado el efecto hidrodinámico sobre la estructura comparada con los efectos del agua considerada como un sólido integrada a la misma. La tabla 5.1 muestra en términos de cortante en la base la diferencia de aproximadamente entre 1.04 y 1.06 veces mayor la segunda con respecto a la primera, sin embargo los períodos de oscilación de la estructura solo difieren en 1.04 veces siendo mayor el modelo con el agua considerada como sólido por presentar más masa (un peso total de 121.24Kgf) igual a entre 1.05 a 1.09 veces mayor que el del modelo con el sistema mecánico equivalente de 88.462Kgf a 111.66Kgf, lo que también representa más rigidez en el modelo con el sistema mecánico equivalente.

En la gráfica 5.13 puede observarse que la vibración de la estructura en términos de desplazamiento, considerando el agua como un sólido integrado a la estructura, se encuentra fuera de fase con respecto al modelo con el sistema mecánico equivalente en ciertas porciones de la serie, con lo que se valida la primera hipótesis.

De los resultados obtenidos en toda la experimentación expuesta en el capítulo V, se puede concluir que el modelo propuesto por Housner (1967)^{5,18} es correcto y representa adecuadamente el efecto hidrodinámico sobre la estructura, de manera que el

procedimiento presentado para poder acoplar ambos modelos es aceptable al compararlo con las mediciones efectuadas sobre el prototipo.

Puede también observarse en la gráfica 5.13 donde se muestra una serie de tiempo con la comparación entre las respuestas relativas a la base, en términos de desplazamientos, obtenidas con el prototipo, el sistema mecánico equivalente y el agua modelada como un sólido y el edificio con el tanque vacío. Es el efecto de amortiguamiento o disipación de energía que presenta el caso de la estructura considerando oleaje con respecto a la misma donde no se considera, así mismo puede observarse la diferencia entre las respuestas de la estructura con oleaje y con el tanque vacío.

De la gráfica 5.19 es posible obtener la correlación entre las mediciones de la respuesta en términos de desplazamientos, realizadas en el prototipo y las mismas obtenidas en la modelación usando el sistema mecánico equivalente de Housner^{5,18}, las cuales, usando regresión polinomial plana⁶, para una correlación $r=98.79\%$, se tiene:

Para valores de $H/D < 0.60$

$$\Gamma = -\frac{2}{3}\left(\frac{H}{D}\right)^2 + \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{H}{D}\right) + 1 \quad \text{Ec 5.06}$$

Para valores de $0.6 < H/D < 100$

$$\Gamma = 1.1636 \left[\frac{H}{D} \right]^{-0.03395} \quad \text{Ec. 5.07}$$

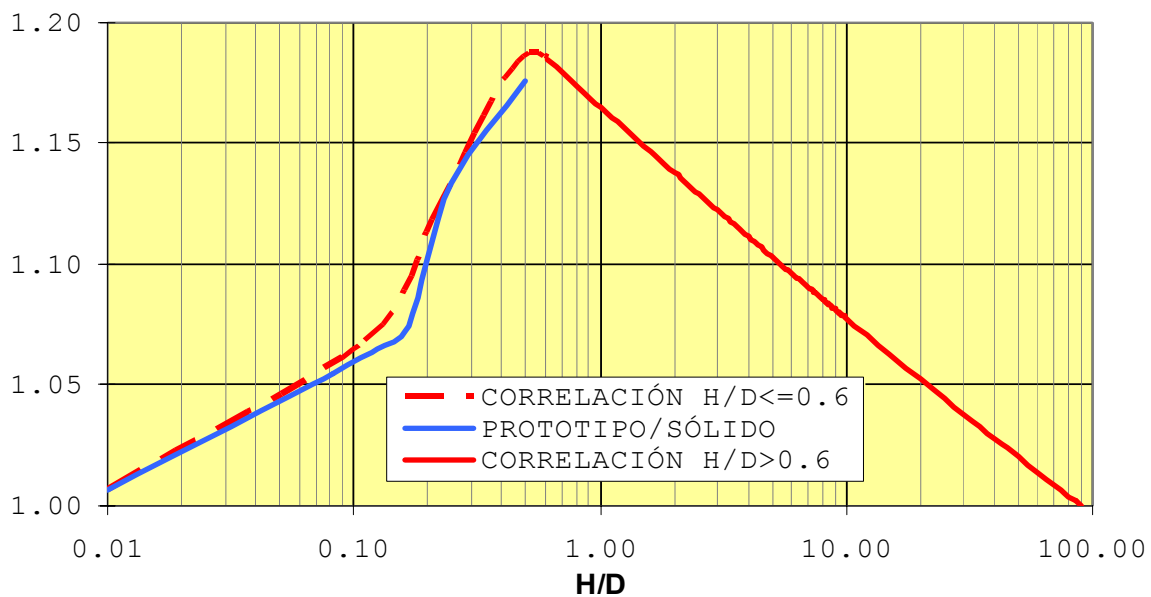
Donde:

Γ Es el factor empírico de ajuste

H Es la altura del agua en el depósito

D es el diámetro del depósito

En las expresiones 5.06 y 5.07 se obtiene un factor o coeficiente empírico que correlaciona los valores de la respuesta con los efectos hidrodinámicos con los valores de la respuesta considerando el agua como un sólido integrado a la estructura. Estas funciones empíricas son graficadas en forma continua en la gráfica 5.22.

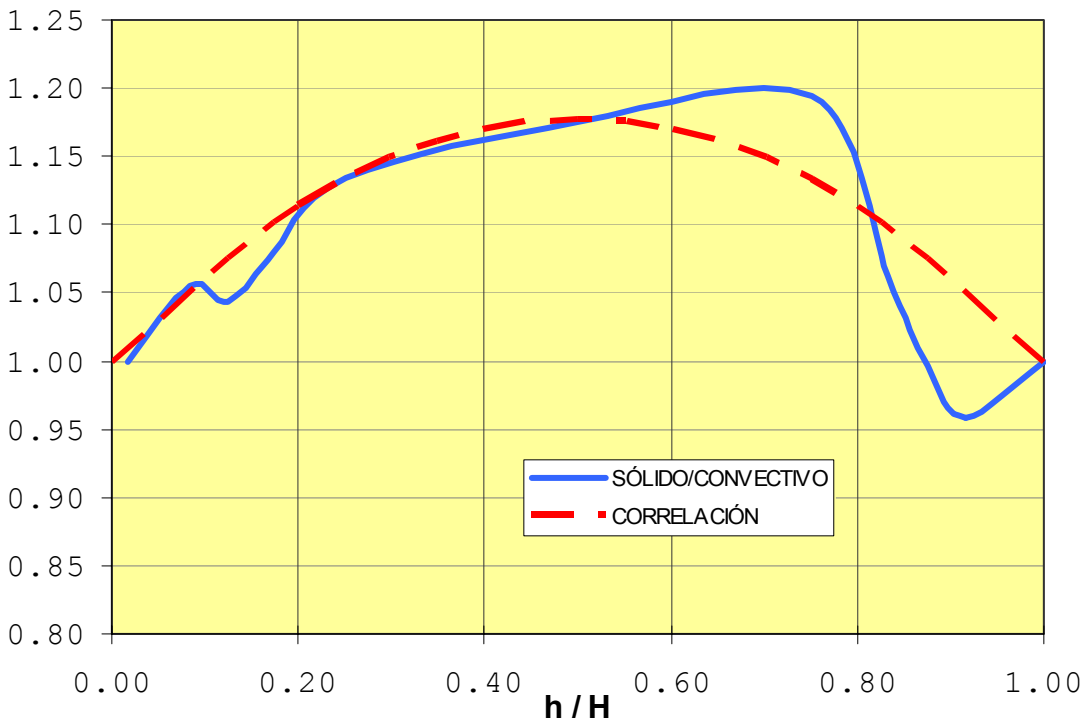


Gráfica 5.22: Factor de correlación

Por otro lado, se modeló con los criterios descritos en este documento, depósitos con techo, de manera que cuando los mismos tengan su nivel de llenado al 100%, al no tener el agua una superficie libre, no habrá efecto de oleaje, y de los resultados se ha trazado una correlación en función del nivel de llenado, la cual puede ser observada en la gráfica 5.23, donde la respuesta de la estructura es 1.0 para valores de $h/H = 0$ y $h/H = 1$. La correlación encontrada es:

$$Z = -\frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{h}{H}\right)^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{h}{H}\right) + 1 \quad \text{Ec.5.08}$$

Donde Z es el factor de correlación, h es el nivel de llenado y H es la altura total del depósito.



Gráfica 5.23: Correlación de la respuesta en términos h/H

La correlación mostrada en la gráfica 5.23 tiene un valor de $r=0.966$. Esta correlación mostrada es independiente de la correlación encontrada para H/D en la que en todos los casos, el agua tiene su superficie libre. El experimento teórico para relaciones h/H fue realizado para tanques cuyo diámetro es igual a su altura, por lo que para este caso en particular, $h/H=h/D$ donde D es el diámetro del depósito.

5.4 Comparación de respuestas con las de la norma CHOC-2008

Con el ánimo de validar los resultados encontrados y contrastarlos con los que se obtendrían al aplicar la normativa del Código Hondureño de la Construcción (CHOC-2008)⁸, se han calculado las cortantes en la base a partir de la misma información del modelo y prototipo usados en la investigación.

Tanto para el edificio con el tanque vacío como para el edificio con los mismos llenados usados en la investigación, para los diferentes niveles de aceleración medidos en el prototipo, encontrando lo mostrado en la tabla 5.4, donde se puede apreciar que el factor R , que representa el factor de reducción por ductilidad, se encontró por experimentación en un valor de 5.82 el cual se compara perfectamente con el valor sugerido por el CHOC de 6.0, con lo que queda validado el procedimiento requerido por el CHOC⁸ como correcto.

CONDICIÓN:	VACÍO	h=0.05m	h=0.075m	h=0.10m	h=0.15m
Z =	3.1000	3.1500	3.1000	3.1000	3.1000
T =	0.1076	0.1182	0.1243	0.1309	0.1446
C =	5.5255	5.1900	5.0188	4.8486	4.5373
W =	78.8200	88.4600	93.9900	99.7400	111.6600
V =	23.7200	27.0700	29.3300	30.5200	34.6500
V/W =	0.3000	0.2910	0.2930	0.2850	0.2860
C/CVACÍO =		1.0985	1.1552	1.2165	1.3439
W/WVACÍO =		1.1223	1.1925	1.2654	1.4166
Z/ZVACÍO =		1.0161	1.0000	1.0000	1.0000
V/VVACÍO =		1.1162	1.1552	1.2165	1.3439
V =		26.4770	27.4014	28.8564	31.8765
V/WR =	1.7466	1.6670	1.5864	1.5326	1.4342
R =	5.8220	5.7286	5.4144	5.3777	5.0148

Tabla 5.4: Análisis comparativo entre las cortantes obtenidas y las cortantes determinadas por las expresiones del CHOC-2008⁸

5.5 *Discusión:*

La experimentación física realizada en esta investigación representa una aproximación empírica del efecto hidrodinámico de un líquido contenido en un depósito instalado sobre una estructura, donde de acuerdo con lo que se puede observar en las mediciones hechas sobre el prototipo, es claro que el mismo presenta imprecisiones que están afectando los resultados, aunque después de haber filtrado las señales y como consecuencia de esto, eliminado mucho del ruido en las mismas, los resultados finales se han acercado con un error mínimo (1.69%) a los obtenidos en la modelación con iguales condiciones que las del prototipo.

La confirmación de la aplicabilidad del modelo representado por el sistema mecánico equivalente propuesto por Housner(1967)^{5,18}, representa la posibilidad de poder, en forma sencilla, modelar las estructuras que soporten depósitos de líquidos, considerando el efecto hidrodinámico, que como se observó en los resultados y su análisis, son importantes en cuanto a las diferencias identificadas entre el modelo que considera el líquido como un sólido integrado a la estructura y el modelo acoplado al sistema mecánico equivalente.

Es importante hacer notar, que se encontraron diferencias entre las respuestas medidas en el prototipo y las encontradas con el modelo del sistema mecánico equivalente de Housner¹⁸ que se pueden identificar en el orden de 0.041mm equivalentes a un 0.645% de diferencia para el caso de la relación $H/D=0.25$.

Así mismo, es posible observar en la gráfica 5.13 que la diferencia entre las respuestas en términos de desplazamientos medidas en el prototipo son 0.222mm menores que las encontradas en el modelo considerando el agua como un sólido integrado a la estructura, lo que equivale a una diferencia de 12.28%.

Por otro lado el acoplamiento del modelo de Housner no se realizó para que dentro del modelo la masa convectiva de agua vibrara en su propio período lo que dio como resultado el escenario de estar vibrando en fase tanto el edificio como la masa convectiva no pudiendo con este análisis, identificar el efecto de disipación de energía que puede representar el desfase.

Respecto es la veracidad de los datos obtenidos en la experimentación a la luz de las imperfecciones del prototipo tales como los vínculos a tierra del marco de base sobre el cual corre la estructura excitada, el alineamiento del acelerómetro con respecto a la dirección del movimiento, los saltos pico

observados de los registros de aceleraciones en los instantes de cambio de sentido del motor y la pérdida de masa de agua por efecto del oleaje en el proceso de medición o toma de lecturas en el prototipo.

Estas imperfecciones tienen que estar afectando los resultados, no obstante, las correlaciones obtenidas con las expresiones 5.06 y 5.07 presentan valores del 1.34% en diferencia entre los valores calculados con el modelo del sistema mecánico equivalente y los obtenidos con el prototipo, pero si dejan en evidencia el efecto hidrodinámico sobre la estructura como un efecto de amortiguación o dicho de otra forma, un efecto de disipación de energía.

Nótese en la gráfica 5.23, que para valores de H/D mayores que 100, el factor de correlación es 1.0 ya que la masa convectiva es muy pequeña, lo que también se asocia con el gráfico 3.2, donde se puede apreciar que la masa convectiva es tendiente a cero y la masa fija es prácticamente la masa total, siendo en consecuencia, despreciable el efecto del oleaje dentro del depósito.

Con la intención de tener el panorama del efecto del oleaje en un depósito, cuando este tiene techo, se analizó para diferentes relaciones de llenado h/H donde cuando $h=H$ o bien $h/H=1.0$, la

superficie del agua no está libre por estar en contacto con el techo y consecuentemente no habrá oleaje, obteniendo con esto la misma respuesta que considerar el agua como un sólido integrado a la estructura. Este efecto es posible observarlo en la gráfica 3.23 donde para la relación $h/H=0$ y $h/H=1.0$, la relación del efecto del agua como un sólido/efecto del oleaje es 1.0.

Como conclusión podemos decir, que el oleaje tiene un efecto amortiguador dentro de los depósitos de contención de líquido.

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES

1. Todos los análisis realizados en esta investigación se encuentran dentro de la etapa elástica y consecuentemente existe una linealidad en las relaciones esfuerzo-deformación.
2. El prototipo que sirvió para la experimentación física y con el que se calibró el modelo y se obtuvieron con alto nivel de confianza los resultados, presenta imprecisiones que fueron suavizadas al efectuar un filtrado de las señales en cada una de las mediciones realizadas.
3. Queda demostrado que el modelo propuesto por Housner(1967)^{5,18}, de un sistema mecánico equivalente representa una buena aproximación el efecto hidrodinámico.
4. Se encontraron diferencias entre las mediciones de los desplazamientos en el prototipo y los mismos en el modelo acoplado al sistema mecánico equivalente de Housner¹⁸ de solo 1.34%.

5. La hipótesis planteada respecto del movimiento fuera de fase entre el movimiento del agua en el depósito y el movimiento de la estructura, se valida y es evidenciada en la gráfica 5.13.
6. La hipótesis planteada respecto de menores fuerzas inerciales como sollicitación a la estructura y como producto de los efectos hidrodinámicos (amortiguamiento) en relación a las mismas como producto de la consideración del agua como un sólido integrado a la estructura, queda validada y se evidencia en la gráfica 5.7 y 5.8 donde es posible observar las diferencias.
7. Siendo validadas ambas hipótesis, objeto de esta investigación, es concluyente la necesidad de tomar en consideración los efectos hidrodinámicos en el análisis de estructuras que soporten depósitos con líquido, especialmente en zonas con alto riesgo sísmico.
8. Se desarrollaron funciones de correlación entre las respuestas en términos de los desplazamientos, obtenidas de las lecturas realizadas en el prototipo a las obtenidas del modelo considerando el agua como un sólido adherido a la estructura cuya correlación $r=0.9879$. Mientras los análisis

se encuentren dentro de la etapa elástica de la estructura, será válido aplicar los mismos factores de correlación a las cortantes y cualquier otra sollicitación en la estructura o bien a los resultados obtenidos en términos de cualquier variable del modelo analizado sin considerar el oleaje.

9. El análisis fundamental de la investigación se refirió a las diferencias entre los modelos considerando el líquido dentro del tanque como un sólido y a considerarlo como tal y con la posibilidad de oleaje encontrando que en los modelos en los que se consideró el agua como tal, que comparan muy bien con las mediciones experimentales las diferencias con respecto a los resultados considerando el agua como un sólido son alrededor de un 10% menores las primeras con respecto a las últimas, siendo esta diferencia de poco significado desde el punto de vista práctico de ingeniería,

Lo anterior no representa gran ganancia y de hecho, la ganancia en respuesta es menor que el efecto por la masa de agua fija, no obstante, si no se puede evitar la existencia de un depósito, considerar parte de la masa de agua como masa colectiva siempre generará una ganancia en respuesta del edificio.

10. Se realizó un análisis comparativo entre las cortantes obtenidas, utilizando las mismas aceleraciones medidas en el prototipo, por el Código Hondureño de la Construcción (CHOC-2008) y las cortantes encontradas en la medición del prototipo que se ajustan muy cerca de las encontradas por los diferentes modelos, encontrando que los valores entre las expresiones del CHOC-2008⁸ y las mediciones son muy cercanas y consecuentemente son válidos los parámetros que sugiere utilizar en el análisis de la estructura para excitaciones pseudo estáticas.

11. Recomendación: En virtud de los resultados encontrados, queda claro que el efecto del oleaje en los depósitos de agua representa un efecto de amortiguamiento, que no será posible si el agua contenida en el depósito no tiene su superficie libre, de manera que se recomienda dejar un espacio libre entre el nivel de máximo llenado del depósito y el techo del mismo igual o mayor que d , que de acuerdo con el SME de Housner^{5,18}, es:

$$d = \frac{0.6A}{\left(\frac{g}{R}\right)\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 - \left(\frac{5A}{6g}\right)\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2}$$

Donde:

T es el período de la masa convectiva

A es la máxima amplitud horizontal de movimiento del piso del tanque

g es la aceleración de la gravedad = 9.807 m/seg^2

10. Futuras investigaciones respecto de este tema, se centrarán en desarrollar un algoritmo que permita analizar la estructura con la masa convectiva del agua vibrando con su propio período diferente al de la estructura y lograr con esto identificar el efecto total de disipación de energía cuando esta masa convectiva se encuentre vibrando fuera de fase con respecto al edificio que soporta el depósito. Teniendo claro el efecto amortiguador del oleaje, la tarea debe centrarse en disminuir el efecto cuando el agua entra en fase con el edificio, posiblemente con mamparas instaladas dentro del depósito que contribuyan a un mejor desempeño de la estructura frente a excitaciones sísmicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. P. Marsh, M. Prakash, S. E. Semercigil (2007) **Experimental Findings and Numerical Predictions of Shallow Depth Sloshing Absorber Behavior**
16th Australian Fluid Mechanics Conference, Gold Coast, Australia
2. Biswal, K.; Bhattacharyya, S.; Sinha, P.(2003) **Dynamic Characteristics of Liquid Filled Rectangular Tanks with Baffles.**
Vol. 84, IE Journal, U.S.A.
3. Breukelman, B.; Haskett, T.(2005) **Good Vibrations**
Civil Engineering Magazine, ASCE, Virginia, U.S.A.
4. Byeong Moo Jin, Se Jin Jeon, Seong Woon Kim, Young Jin Kim, Chul Hun Chung (2004) **Earthquake Response Analysis of LNG Storage Tank by Axisymmetrical Finite Element Model and Comparison to Results of the Simple Model.**
13TH World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.

5. Castillo, L.(2006) **Estudio de la Teoría de Housner sobre Contenedores de Fluidos Sometidos a Sismos.**
Nota técnica, Tegucigalpa, Honduras.
6. Chapra, S. y Canale, R.(2003) **Métodos Numéricos para Ingenieros**
4ta edición, McGraw-Hill Interamericana, México, D.F., México.
7. Colmenero, Ricardo (2005) **Pi, (Fe en el caos)**
No.29, El Rincón de la ciencia, En línea
<http://pagina.de/rinconciencia>
8. Comité Técnico (2008) **Código Hondureño de la Construcción (CHOC-2008)**
Colegio de Ingenieros Civiles de Honduras, Tegucigalpa, Honduras.
9. Frandsen, J. (2003) **Sloshing Motions in Excited Tanks.**
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Lousiana State University, Baton Rouge, Lousiana, U.S.A.
10. Ibrahim, R.(2005) **Liquid Sloshing Dynamics**
Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

11. Jong-Vheng Wu (2005) **Experimental Calibration and Head Loss Prediction of Tuned Liquid Column Damper**
Vol. 8, No 4, Tamkang Journal of Science and Engineering,
Tamsui, Taiwan
12. Mitra, S.; Sinhamahapatra, K.P. (2005) **Coupled Slosh Dynamics of Liquid Containers using Pressure Based FEM.**
Departamento de Ingeniería del Aeroespacio, Khapagdur,
India.
13. Mario Paz, William Leigh (2004). **Structural Dynamics**
5^a edición. Kluwer Academic Publishers Group. Norwell, Massachusetts, U. S. A
14. Papaspyrou, S.; Valougeorgis, D.; Karamanos, S. (2004)
Sloshing Effects in Half-Full Horizontal Cylindrical Vessels Under Longitudinal Excitation.
Vol. 71, Journal of Applied Mechanics, U.S.A.
15. Rezaei, H.; Ketabdari, M. (2007) **Numerical Modelling of Sloshing with VOF Method**
12th International Conference on fluidization, Vancouver,
Canada.

16. Research Engineers, International (2007) **STAAD.Pro**
Bentley Solutions Center, Exton, Pa. U.S.A.
17. SUMMIT INSTRUMENTS (2005) **Acelerómetro y programa de ordenador para lectura**
Versión 2.08, Akron, Ohio, U.S.A.
18. Torre J. (2007) **Hidrodinámica en los depósitos de líquidos**
Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural, UNITEC,
Tegucigalpa, Honduras
19. Torre J. (2006) **Procedimiento de análisis no lineal de estructuras**
37 edición, El Constructor, San Pedro Sula, Honduras
20. Torre J. (2006) **Geomecánica y cimentaciones: Plasticidad, modelos y cálculos**
Documento de asignatura, AtlAntic Internacional University,
Florida, USA.
21. U.S. Geological Survey (2007) **Earthquake Hazards Program (En línea)**
Reston, Virginia, U.S.A., (disponible en sitio web
<http://earthquake.usgs.gov>).

22. Ye Lieping, Lu Xinzheng, Qu Zhe, Hou Jianqun (2008)

Distributed TLDs in RC Floors and their vibration reduction efficiency

Vol. 7, No 1, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Academic Journal Electronic Publishing House, China.

23. Young-Kyu Ju (2004) **Structural Behavior of Water Sloshing**

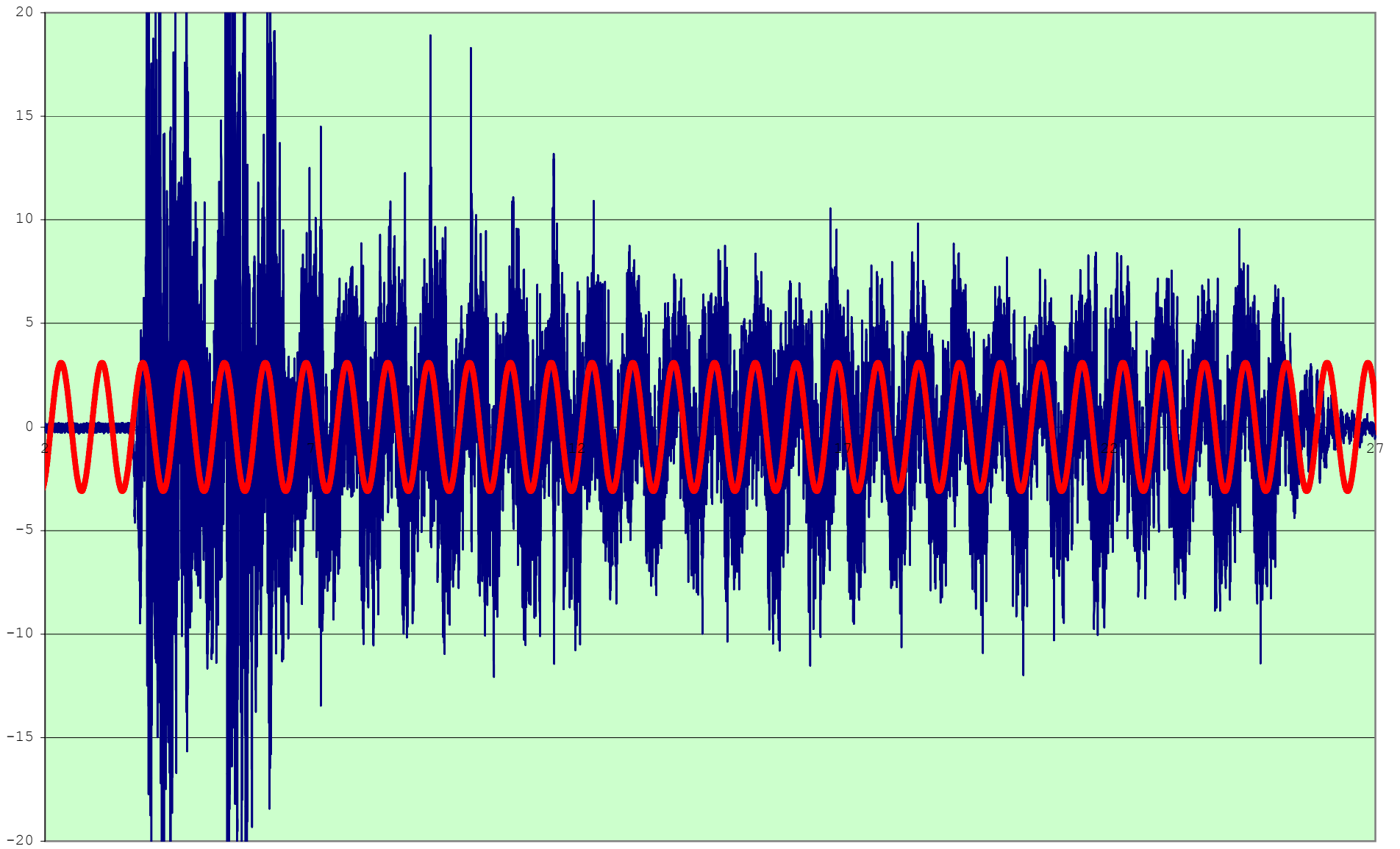
damper with Embossments Subject to Random Excitation

Vol. 31, Can. J. Civ. Eng., Canada.

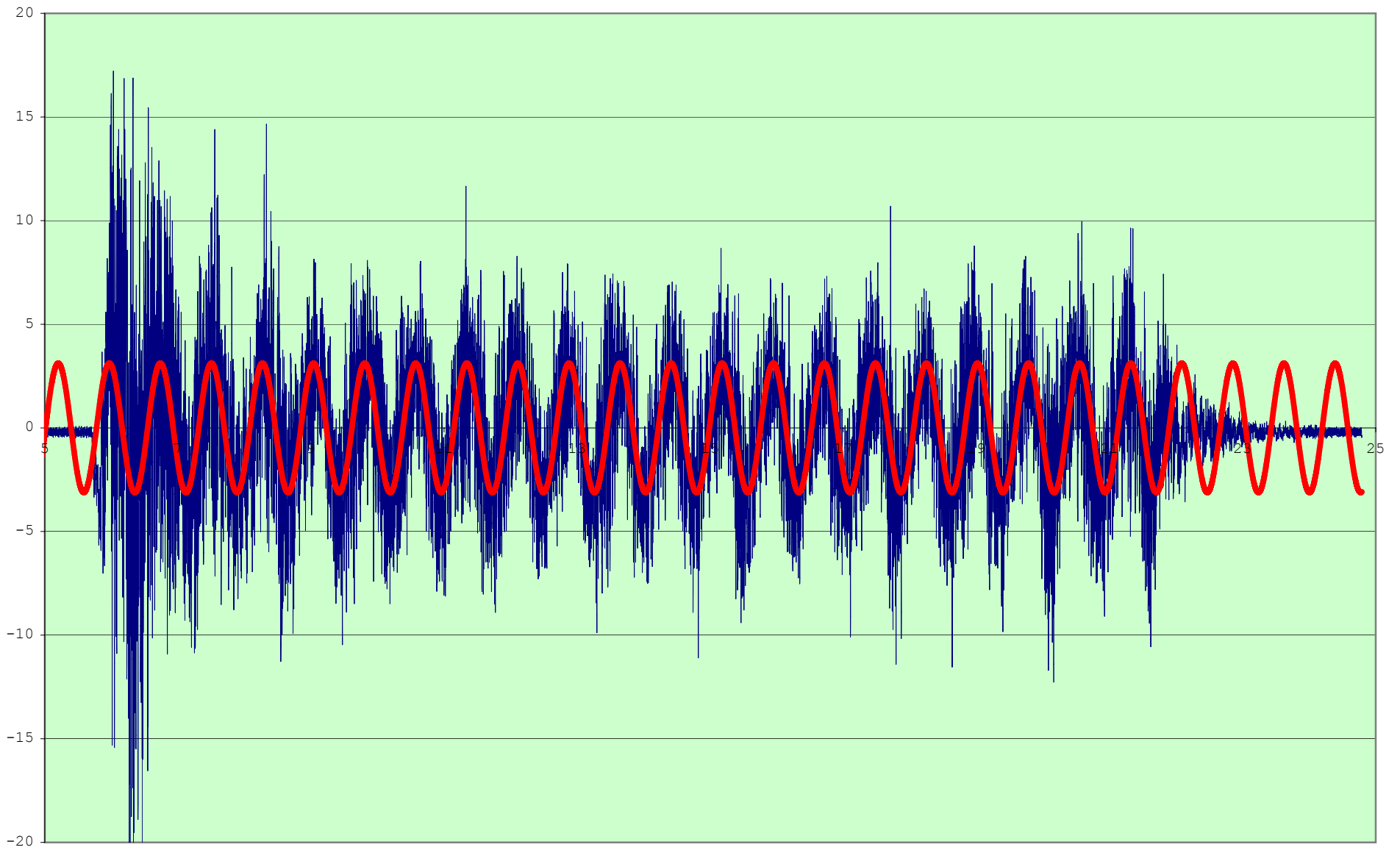
ANEXOS

(Acelerógramas y cálculos de la experimentación)

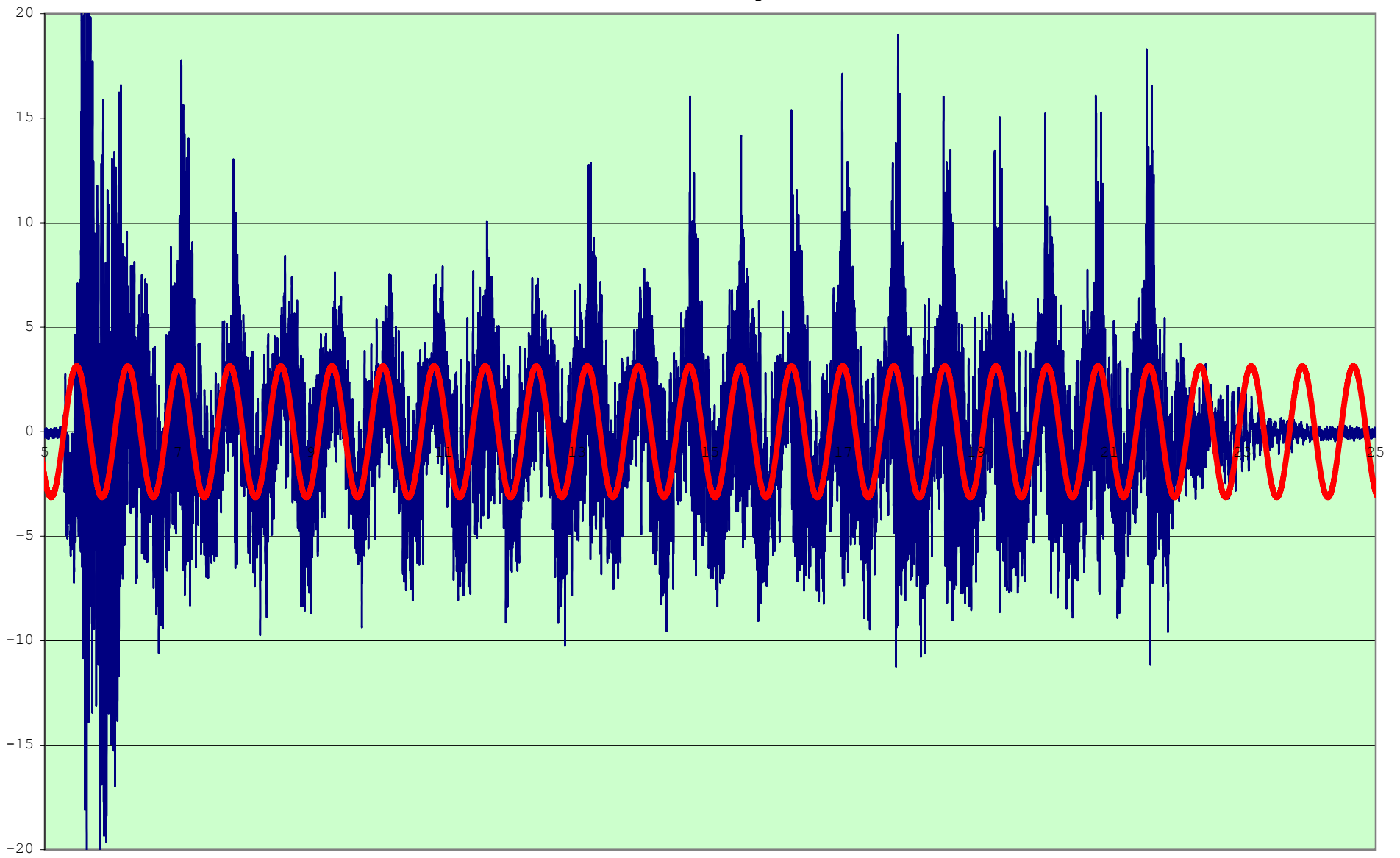
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES EN LA BASE (m/seg²) h=5cm a(t)=3.8SEN(8.18171t)



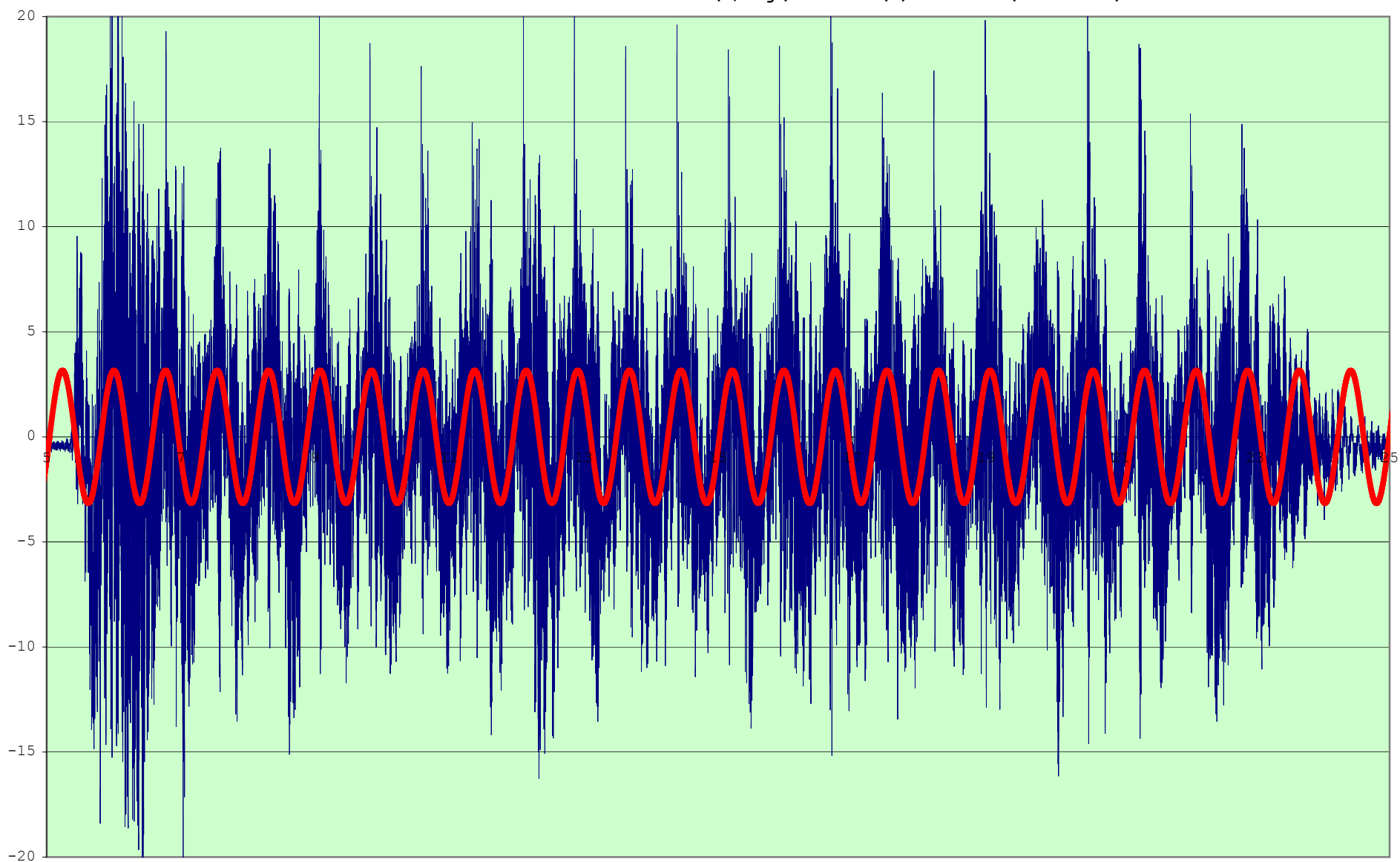
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 1 (m/seg²) h=5cm a(t)=3.12 SEN(8.18717t)



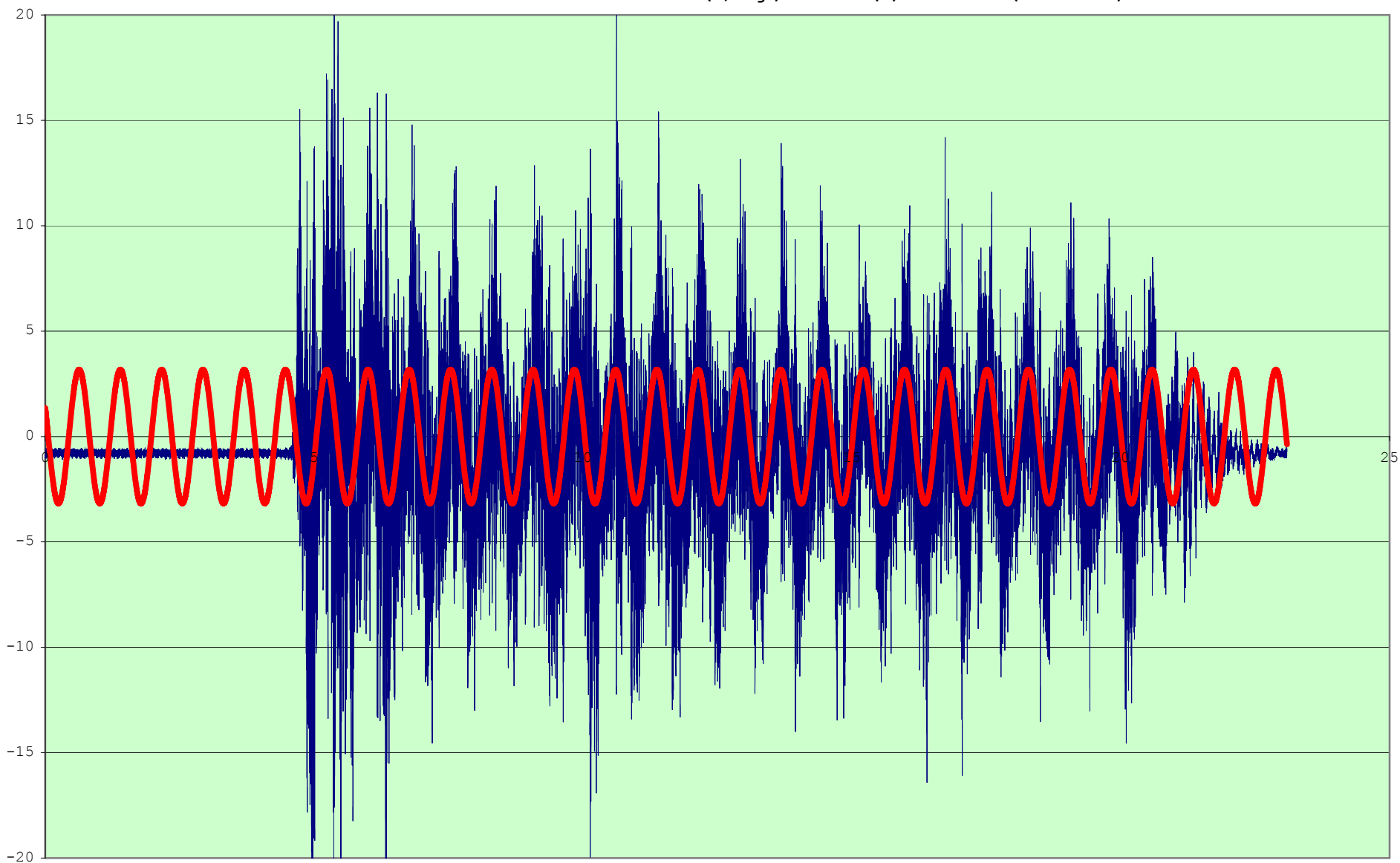
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 2 (m/seg²) h=5cm a(t)=3.14 SEN(8.187171t)



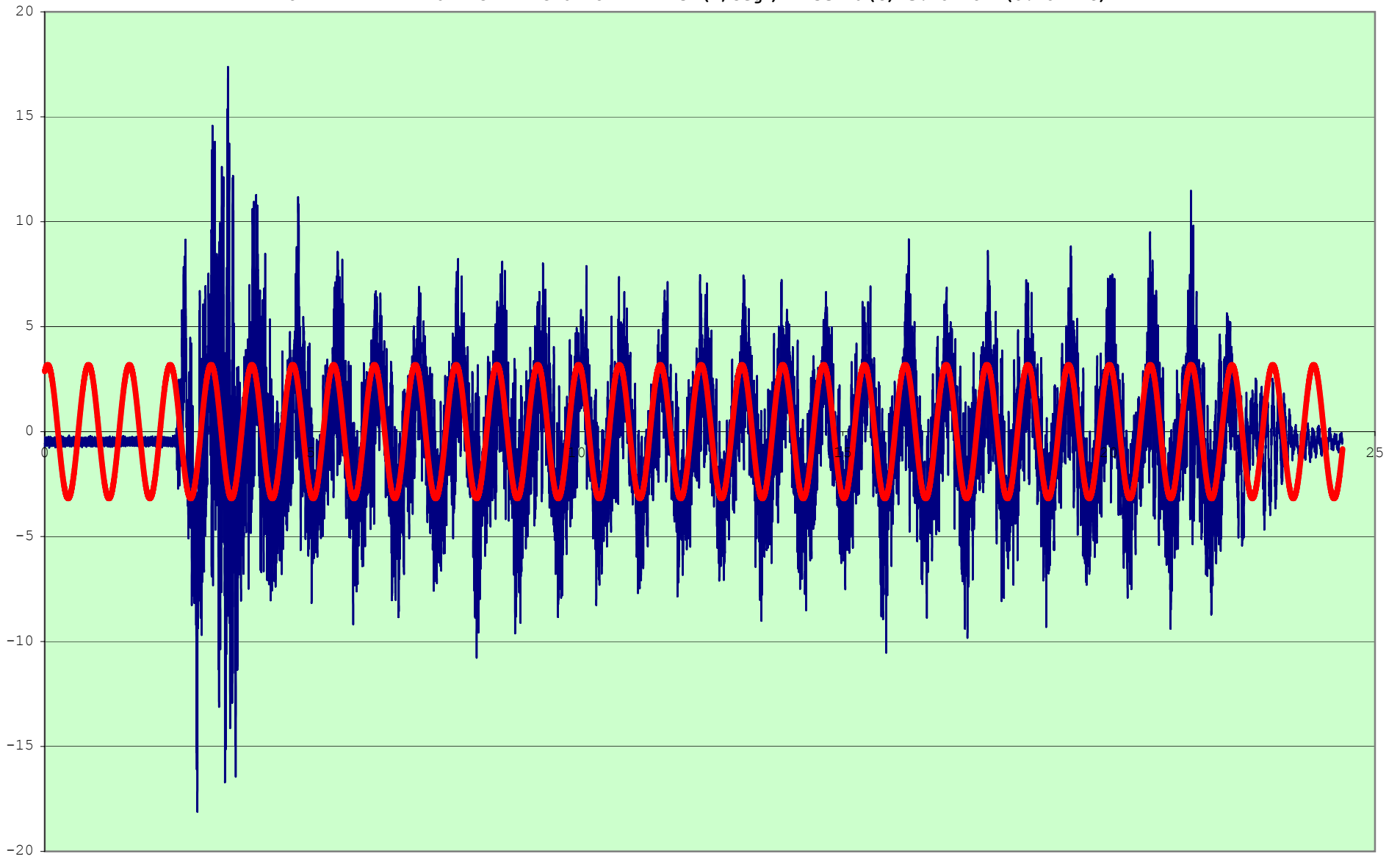
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 3 (m/seg²) h=5cm a(t)=3.16 SEN(8.187171t)



SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 4 (m/seg²) h=5cm a(t)=3.176 SEN(8.187171t)



SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 5 (m/seg²) h=5cm a(t)=3.187 SEN(8.18717t)



ANÁLISIS DE FUERZAS Y MOVIMIENTO DEL OLEAJE EN DEPÓSITOS CILÍNDRICOS DE LÍQUIDOS

DATOS DEL TANQUE

D = 0.60 m = 1.97 ft
 R = 0.30 m = 0.98 ft
 h = 0.05 m = 0.16 ft
 ho = 0.02 m = 0.06 ft
 h1 = 0.03 m = 0.08 ft

CONDICIONES AMBIENTALES

g = 9.81 m/seg² = 32.18 ft/seg²
 Tipo de suelo : Roca
 Ta = 0.16 seg
 Tb = 0.36 seg
 S = 1.00

CONTENIDO DEL TANQUE

γ = 1,000.00 Kg/m³ = 62.43 Lib/ft³ AGUA
 T1 = 1.52 seg

CONSTANTES DEL MODELO

M = 1.44 Kg seg²/m = 0.97 Lib seg²/m
 M0 = 0.14 Kg seg²/m = 0.09 Lib seg²/m
 M1 = 0.84 Kg seg²/m = -1.94 Lib seg²/m
 f = 0.66 cps
 ω = 4.14 rad/seg
 Sa = 0.56 m/seg² = 1.84 ft/seg²
 z = 0.33 m/seg² = 1.09 ft/seg²
 Δt = 0.0014 seg
 Amplitud = 0.0014 m = 0.00 ft # de nudos = 48

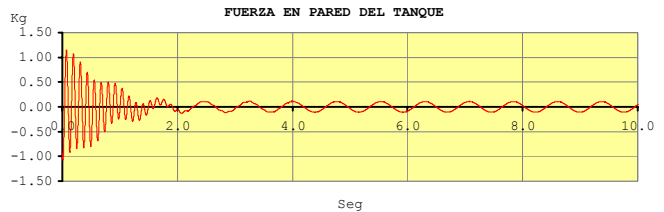
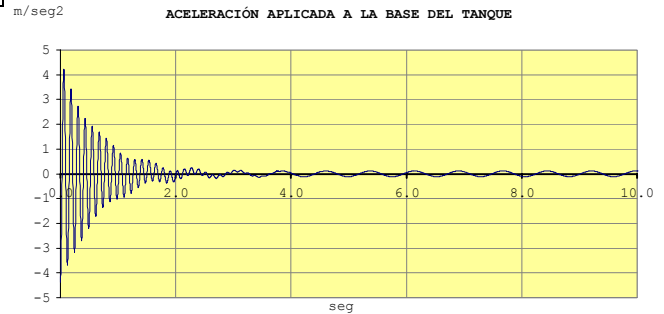
W0 = 0.040835321 Kg/Nudo
 W1 = 0.008215419 Kg/Nudo
 Función Fx(t) = 0.008215419.Seno(ωt)
 f0 = 1.30 cps
 ω0 = 8.1872 rad/seg

Z = 0.3320 m/seg²
 A1 = 57.1693 mm

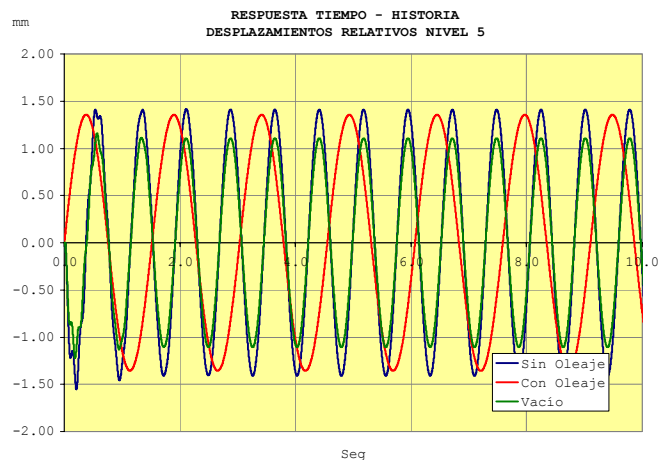
Fuerza lateral máxima = 0.668 Kg = 1.47 Libras
 Momento volc. al pie del tanque = 0.009 Kg-m = 0.06 Lb-ft

RESPUESTA TIEMPO - HISTORIA

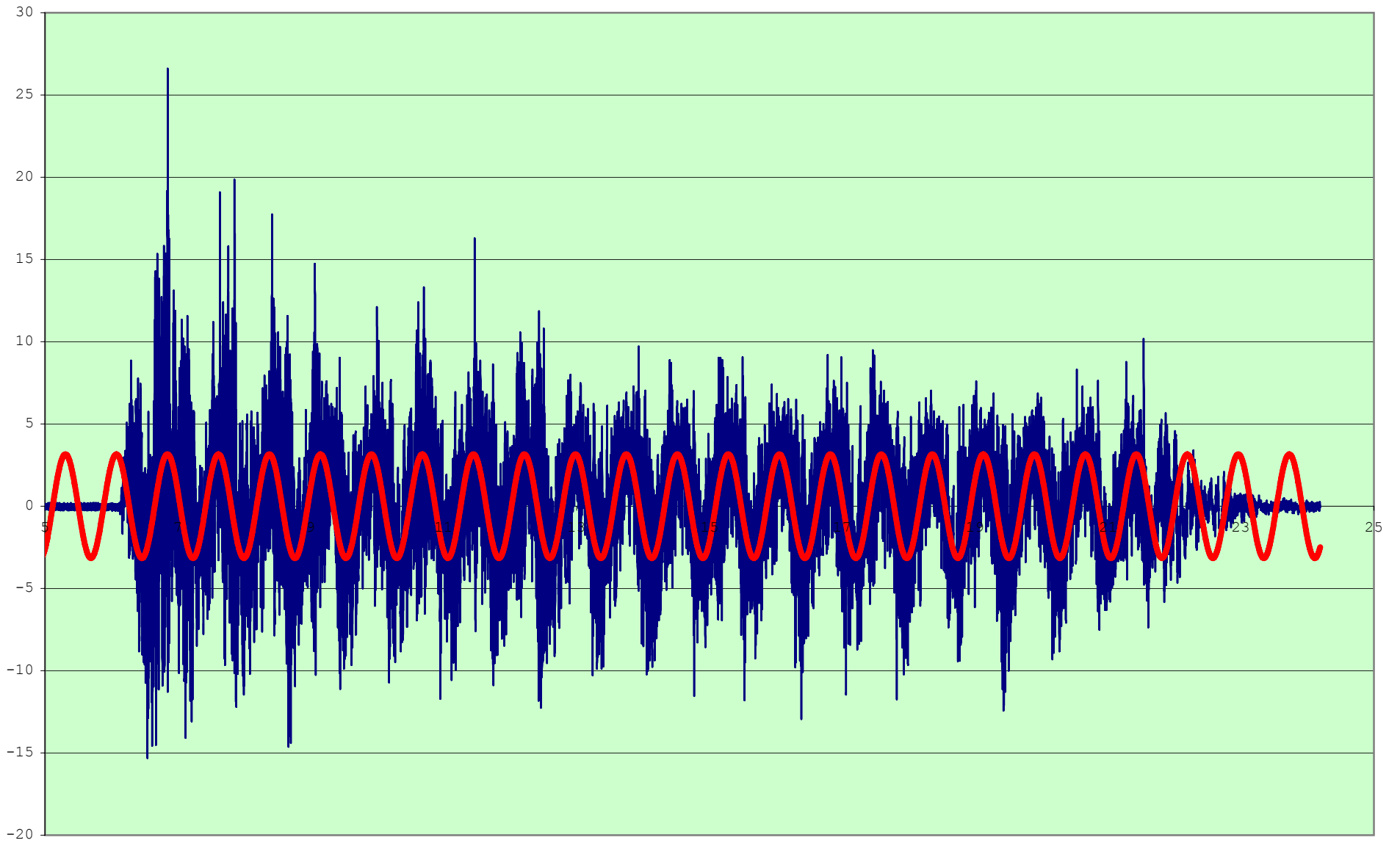
t	Z	Sa	Fx (Kg)	Mv (Kg m)	A(z) mm	d (mm)
0.00000	-0.0464	0.00	-0.0011	0.00	0.0000000	0.00
0.00139	-0.0841	0.00	-0.0021	0.00	0.0078000	0.00
0.00278	-0.1237	0.00	-0.0031	0.00	0.0155998	0.00
0.00417	-0.1631	0.00	-0.0040	0.00	0.0233991	0.00
0.00556	-0.2017	-0.01	-0.0050	0.00	0.0311976	0.00
0.00694	-0.2390	-0.01	-0.0059	0.00	0.0389895	0.00
0.00833	-0.2749	-0.01	-0.0068	0.00	0.0467856	0.01
0.00972	-0.3090	-0.02	-0.0076	0.00	0.0545803	0.01
0.01111	-0.3411	-0.02	-0.0084	0.00	0.0623731	0.01
0.01250	-0.3713	-0.02	-0.0092	0.00	0.0701639	0.01
0.01389	-0.3993	-0.03	-0.0099	0.00	0.0779523	0.01
0.01528	-0.4250	-0.03	-0.0105	0.00	0.0857382	0.02
0.01667	-0.4483	-0.04	-0.0111	0.00	0.0935212	0.02
0.01806	-0.4691	-0.05	-0.0116	0.00	0.1013011	0.02
0.01944	-0.4869	-0.05	-0.0120	0.00	0.1090721	0.03
0.02083	-0.5017	-0.06	-0.0124	0.00	0.1168451	0.03
0.02222	-0.5138	-0.06	-0.0127	0.00	0.1246142	0.04
0.02361	-0.5230	-0.07	-0.0129	0.00	0.1323792	0.04
0.02500	-0.5293	-0.07	-0.0131	0.00	0.1401398	0.05
0.02639	-0.5328	-0.08	-0.0132	0.00	0.1478958	0.05
0.02778	-0.5333	-0.08	-0.0132	0.00	0.1556469	0.06
0.02917	-0.5305	-0.08	-0.0131	0.00	0.1633929	0.06
0.03056	-0.5246	-0.09	-0.0130	0.00	0.1711334	0.07
0.03194	-0.5157	-0.09	-0.0128	0.00	0.1788627	0.08
0.03333	-0.5040	-0.09	-0.0125	0.00	0.1865917	0.08
0.03472	-0.4897	-0.09	-0.0121	0.00	0.1943145	0.09
0.03611	-0.4727	-0.09	-0.0117	0.00	0.2020309	0.10
0.03750	-0.4533	-0.09	-0.0112	0.00	0.2097406	0.10
0.03889	-0.4315	-0.09	-0.0107	0.00	0.2174433	0.11
0.04028	-0.4063	-0.09	-0.0101	0.00	0.2251389	0.12
0.04167	-0.3791	-0.08	-0.0094	0.00	0.2328270	0.13
0.04306	-0.3499	-0.08	-0.0087	0.00	0.2405074	0.14
0.04444	-0.3189	-0.07	-0.0079	0.00	0.2481744	0.15
0.04583	-0.2863	-0.07	-0.0071	0.00	0.2558386	0.16
0.04722	-0.2523	-0.06	-0.0062	0.00	0.2634944	0.17
0.04861	-0.2171	-0.06	-0.0054	0.00	0.2711415	0.18
0.05000	-0.1798	-0.05	-0.0044	0.00	0.2787797	0.19
0.05139	-0.1415	-0.04	-0.0035	0.00	0.2864086	0.20
0.05278	-0.1025	-0.03	-0.0025	0.00	0.2940280	0.21
0.05417	-0.0630	-0.02	-0.0016	0.00	0.3016377	0.22
0.05556	-0.0235	-0.01	-0.0006	0.00	0.3092374	0.23
0.05694	0.0161	0.00	0.0004	0.00	0.3168215	0.24
0.05833	0.0554	0.02	0.0014	0.00	0.3244005	0.25
0.05972	0.0951	0.03	0.0024	0.00	0.3319688	0.26
0.06111	0.1346	0.04	0.0033	0.00	0.3395262	0.27
0.06250	0.1734	0.06	0.0043	0.00	0.3470723	0.29
0.06389	0.2111	0.07	0.0052	0.00	0.3546069	0.30
0.06528	0.2475	0.08	0.0061	0.00	0.3621298	0.31
0.06667	0.2825	0.10	0.0070	0.00	0.3696407	0.33
0.06806	0.3157	0.11	0.0078	0.00	0.3771394	0.34
0.06944	0.3477	0.12	0.0086	0.00	0.3846202	0.35
0.07083	0.3786	0.14	0.0094	0.00	0.3920937	0.37
0.07222	0.4076	0.15	0.0101	0.00	0.3995543	0.38
0.07361	0.4342	0.16	0.0107	0.00	0.4070016	0.39
0.07500	0.4584	0.17	0.0113	0.00	0.4144355	0.41
0.07639	0.4801	0.19	0.0119	0.00	0.4218556	0.42
0.07778	0.4990	0.20	0.0123	0.00	0.4292618	0.44
0.07917	0.5151	0.20	0.0127	0.00	0.4366539	0.45
0.08056	0.5303	0.21	0.0131	0.00	0.4440314	0.47
0.08194	0.5426	0.22	0.0134	0.00	0.4513890	0.49
0.08333	0.5521	0.23	0.0137	0.00	0.4587370	0.50
0.08472	0.5584	0.24	0.0138	0.00	0.4660698	0.52
0.08611	0.5618	0.24	0.0139	0.00	0.4733872	0.53
0.08750	0.5621	0.24	0.0139	0.00	0.4806889	0.55
0.08889	0.5593	0.25	0.0138	0.00	0.4879748	0.57
0.09028	0.5551	0.25	0.0137	0.00	0.4952445	0.58
0.09167	0.5484	0.25	0.0136	0.00	0.5024978	0.60
0.09306	0.5390	0.25	0.0133	0.00	0.5097345	0.62
0.09444	0.5267	0.24	0.0130	0.00	0.5169491	0.64
0.09583	0.5115	0.24	0.0127	0.00	0.5241519	0.65
0.09722	0.4937	0.23	0.0122	0.00	0.5313373	0.67
0.09861	0.4733	0.23	0.0117	0.00	0.5385052	0.69
0.10000	0.4517	0.22	0.0112	0.00	0.5456552	0.71
0.10139	0.4286	0.21	0.0106	0.00	0.5527872	0.73
0.10278	0.4036	0.20	0.0100	0.00	0.5599010	0.75
0.10417	0.3766	0.19	0.0093	0.00	0.5669962	0.77
0.10556	0.3476	0.17	0.0086	0.00	0.5740726	0.78
0.10694	0.3169	0.16	0.0078	0.00	0.5811250	0.80
0.10833	0.2846	0.15	0.0070	0.00	0.5881633	0.82
0.10972	0.2518	0.13	0.0062	0.00	0.5951821	0.84
0.11111	0.2190	0.11	0.0054	0.00	0.6021812	0.86
0.11250	0.1856	0.10	0.0046	0.00	0.6091604	0.88
0.11389	0.1515	0.08	0.0037	0.00	0.6161195	0.90



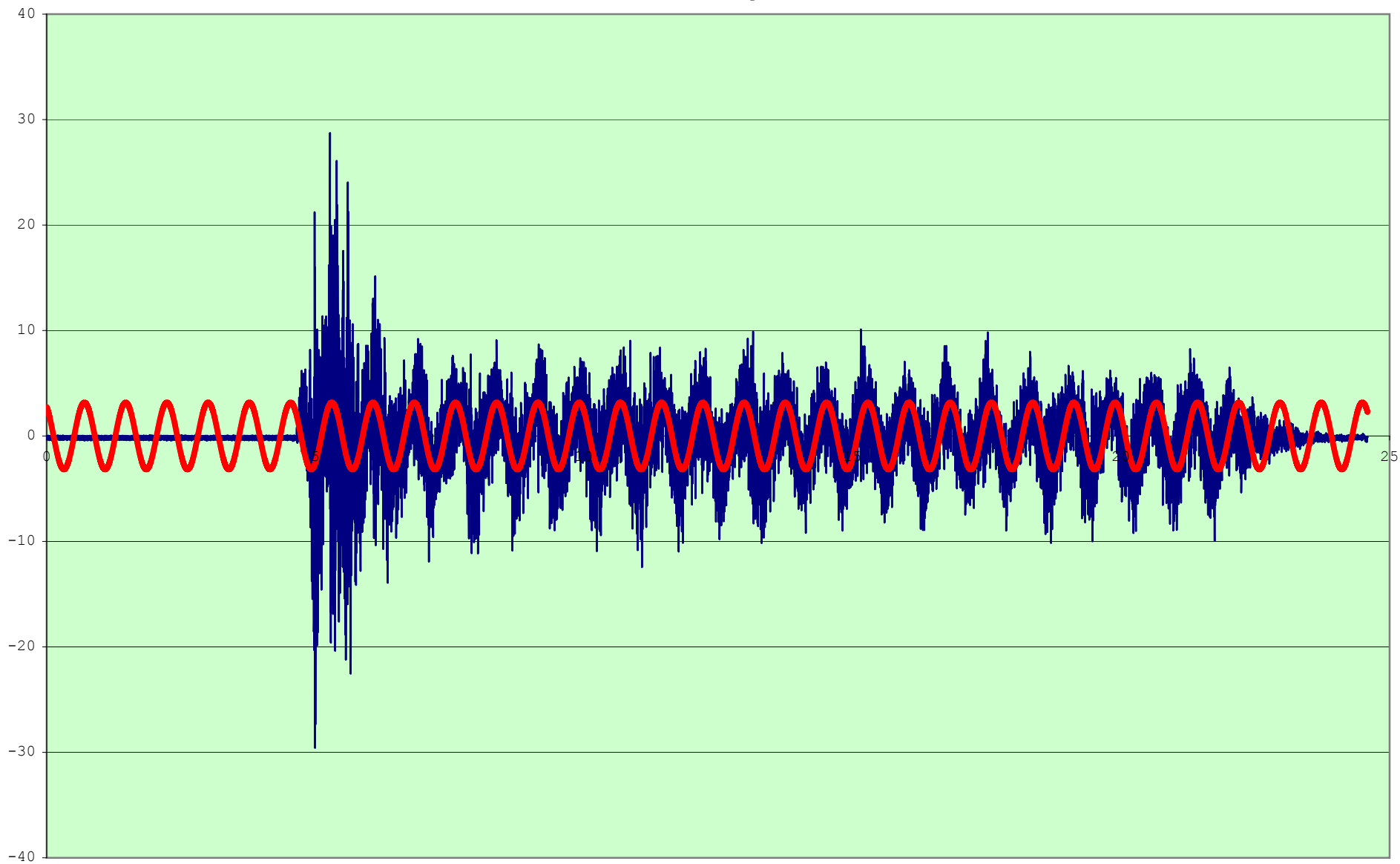
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO SIN OLEAJE = 1.5518 mm
 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO CON OLEAJE = 1.3564 mm



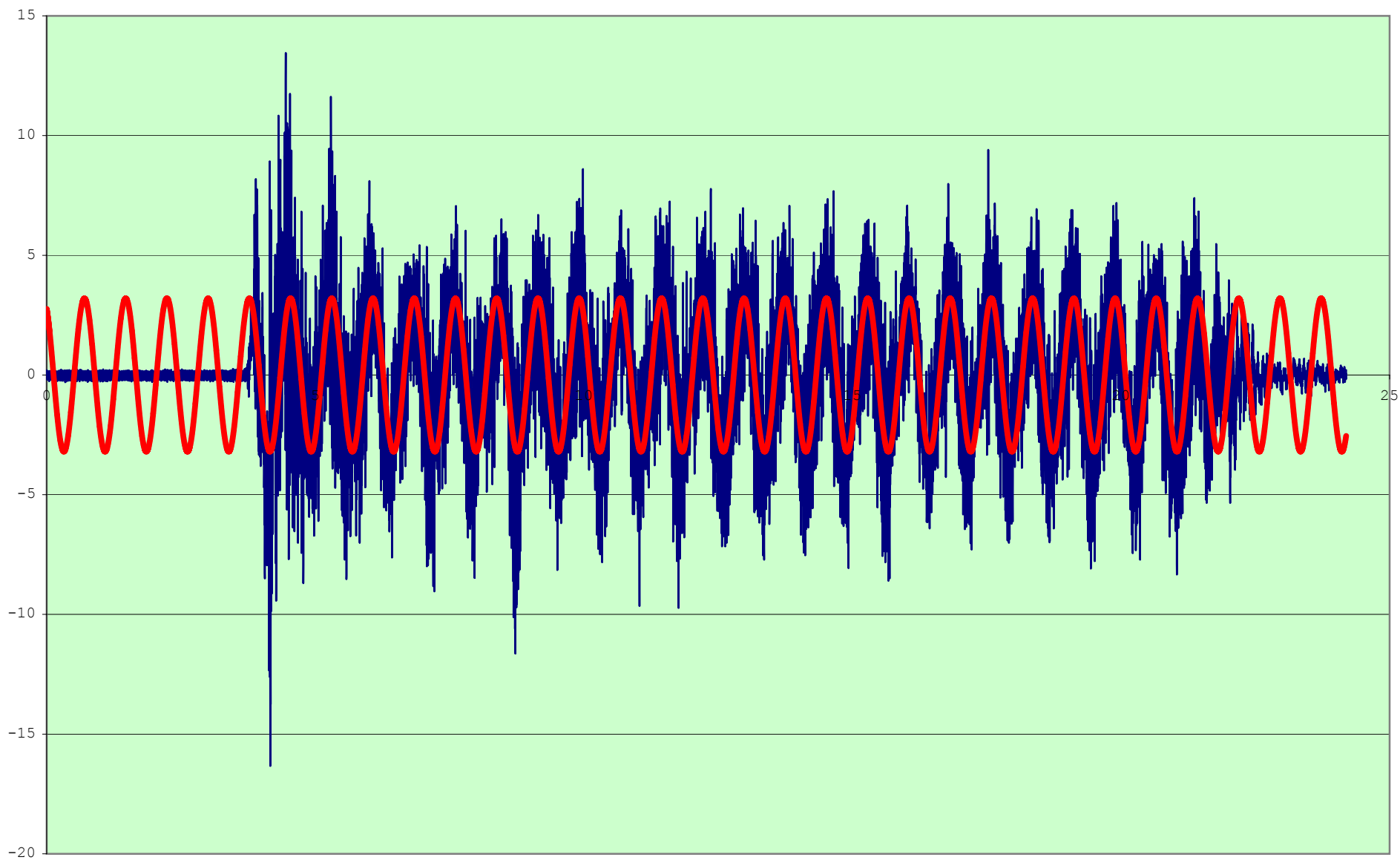
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES EN LA BASE (m/seg²) h=7.5cm a(t)=3.157 SEN(8.187171t)



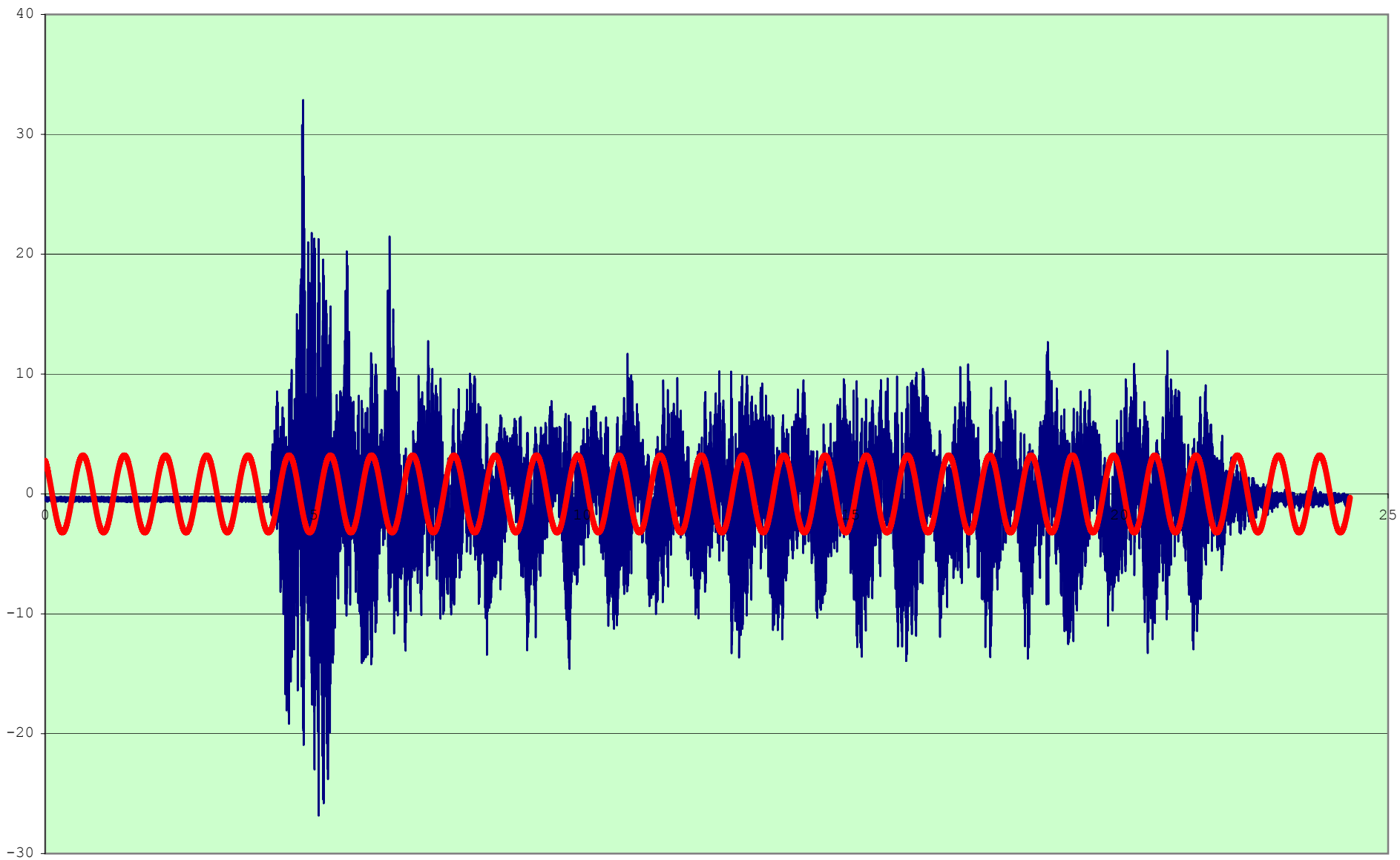
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 1 (m/seg²) h=7.5cm a(t)=3.179 SEN(8.187171t)



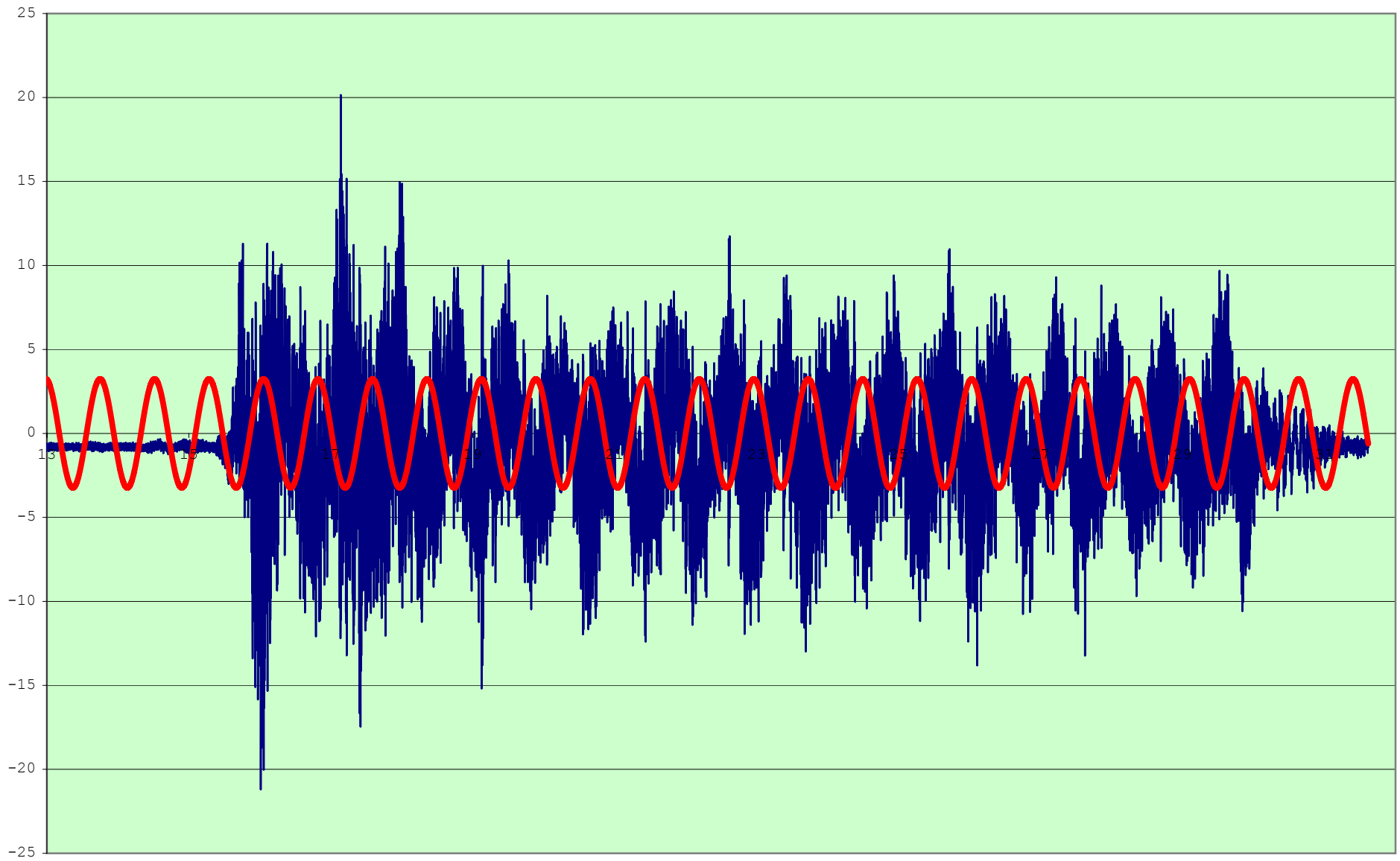
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 2 (m/seg²) h=7.5cm a(t)=3.202 SEN(8.157647t)



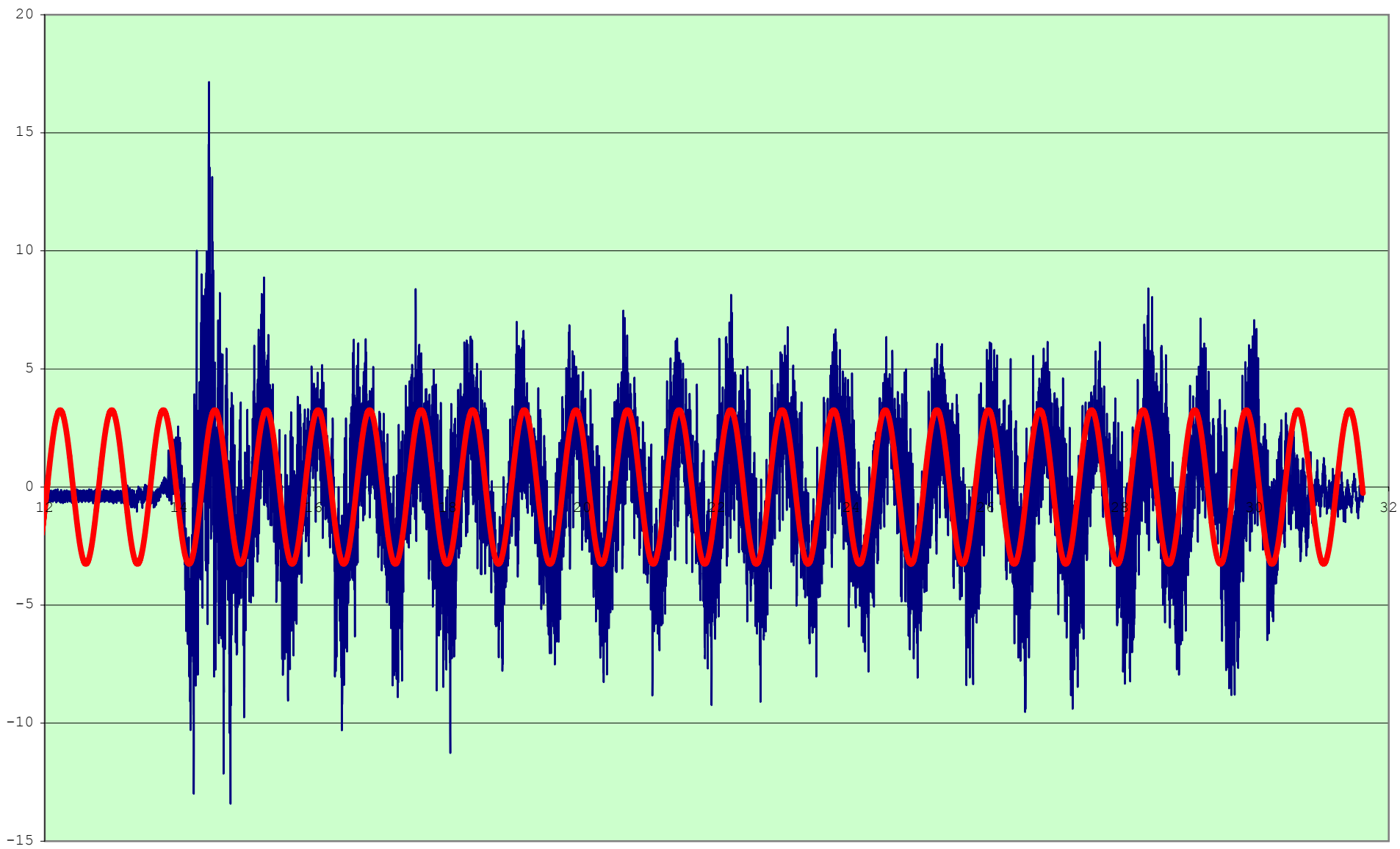
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 3 (m/seg²) h=7.5cm a(t)=3.223 SEN(8.187171t)



SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 4 (m/seg²) h=7.5cm a(t)=3.242 SEN(8.187171t)



SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 5 (m/seg²) h=7.5cm a(t)=3.255 SEN(8.187171t)



ANÁLISIS DE FUERZAS Y MOVIMIENTO DEL OLEAJE EN DEPÓSITOS CILÍNDRICOS DE LÍQUIDOS

DATOS DEL TANQUE

D = 0.60 m = 1.97 ft
 R = 0.30 m = 0.98 ft
 h = 0.075 m = 0.25 ft
 ho = 0.03 m = 0.09 ft
 h1 = 0.04 m = 0.13 ft

CONDICIONES AMBIENTALES

g = 9.81 m/seg² = 32.18 ft/seg²
 Tipo de suelo :
 Ta = 0.16 seg
 Tb = 0.36 seg
 S = 1.00

CONTENIDO DEL TANQUE

γ = 1,000.00 Kg/m³ 62.43 Lib/ft³ AGUA
 T1 = 1.26 seg

CONSTANTES DEL MODELO

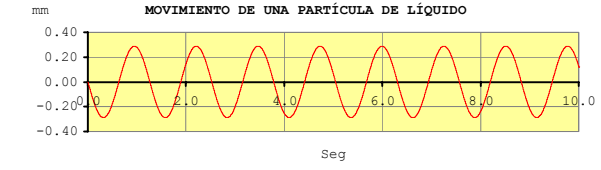
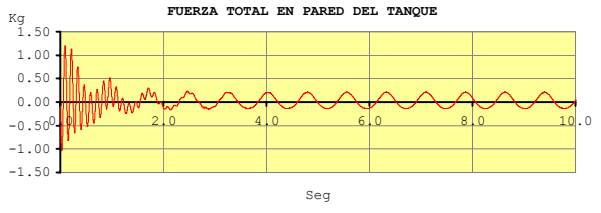
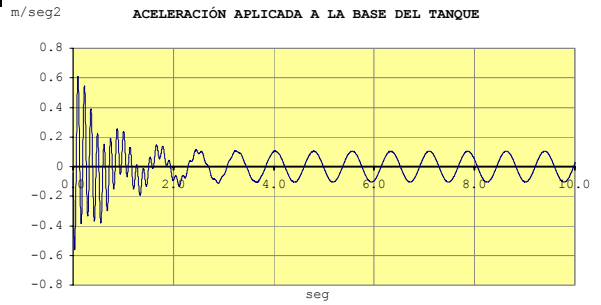
M = 2.16 Kg seg²/m 1.45 Lib seg²/m
 M0 = 0.32 Kg seg²/m 0.21 Lib seg²/m
 M1 = 1.22 Kg seg²/m -1.94 Lib seg²/m
 f = 0.79 cps
 ω = 4.98 rad/seg
 Sa = 0.61 m/seg² = 2.00 ft/seg²
 z = 0.43 m/seg² = 1.40 ft/seg²
 Δt = 0.0014 seg
 Amplitud = 0.0015 m = 0.00 ft # de nudos = 48

W0 = 0.064968437 Kg/Nudo
 W1 = 0.015463018 Kg/Nudo
 Función Fx(t) = 0.015463018 Seno(ωt)
 f0 = 1.30 cps
 ω0 = 8.1872 rad/seg

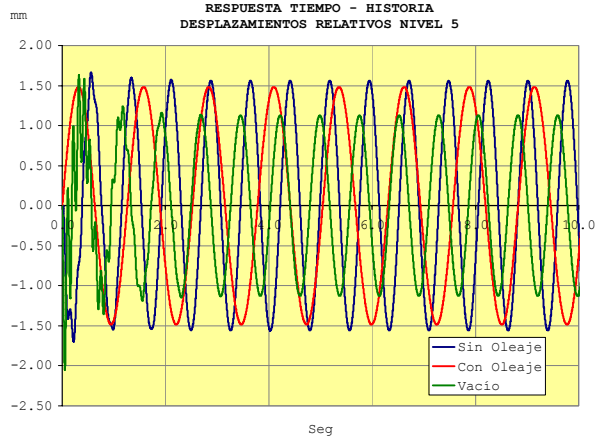
Fuerza lateral máxima = 1.199 Kg = 2.64 Libras
 Momento volc. al pie del tanque = 0.025 Kg-m = 0.18 Lb-ft

RESPUESTA TIEMPO - HISTORIA

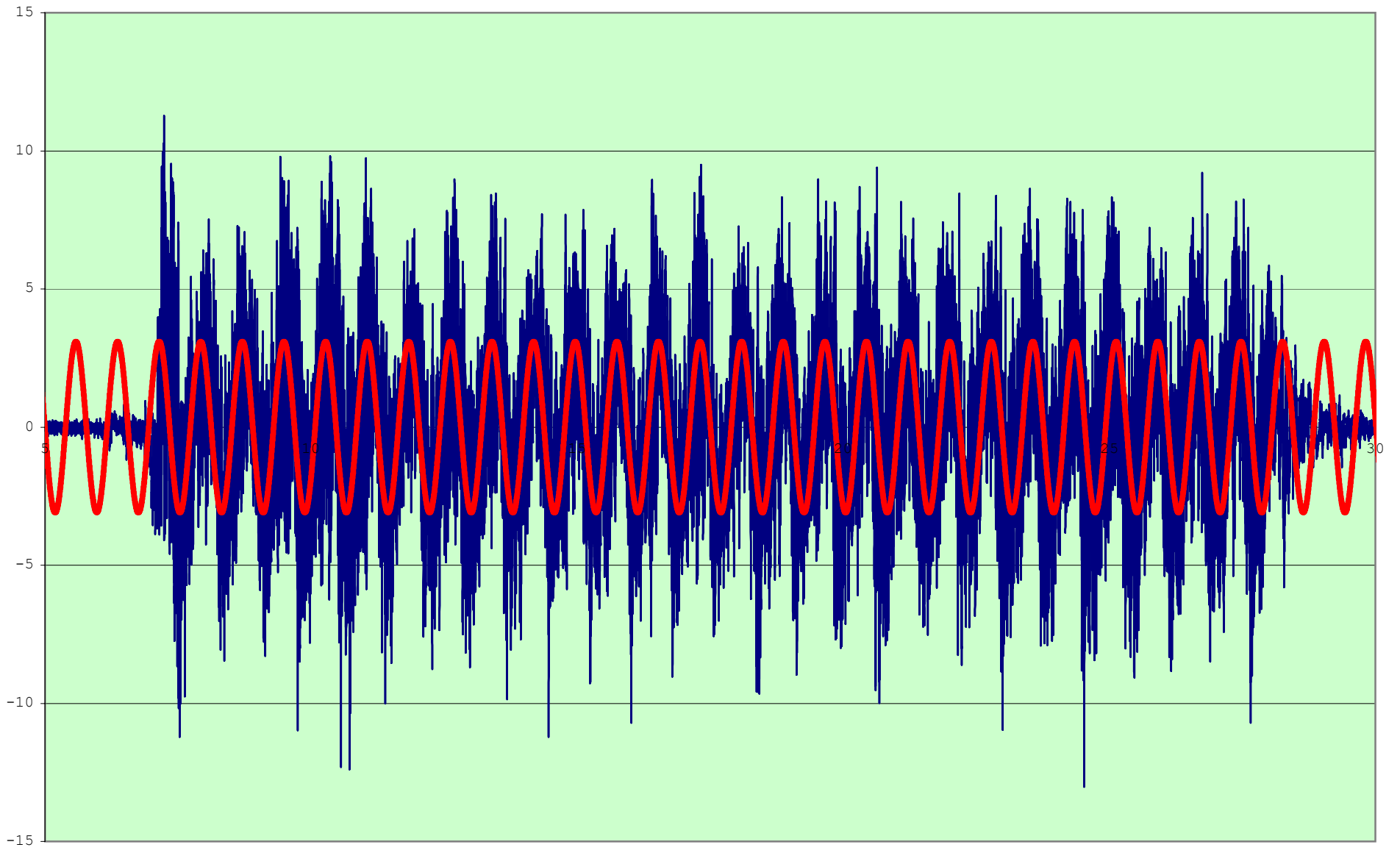
t	Z	Sa	Fx (Kg)	Mv (Kg m)	A(x) mm	d (mm)
0.00000	-0.0473	0.00	-0.0017	0.01	0.0000000	0.0000
0.00139	-0.0858	0.00	-0.0031	0.01	0.0102723	0.0048
0.00278	-0.1262	0.00	-0.0045	0.01	0.0205441	0.0097
0.00417	-0.1665	0.00	-0.0060	0.01	0.0308149	0.0148
0.00556	-0.2061	-0.01	-0.0074	0.01	0.0410842	0.0200
0.00694	-0.2445	-0.01	-0.0088	0.01	0.0513441	0.0255
0.00833	-0.2816	-0.02	-0.0101	0.01	0.0616090	0.0311
0.00972	-0.3169	-0.02	-0.0114	0.01	0.0718710	0.0370
0.01111	-0.3505	-0.03	-0.0126	0.01	0.0821295	0.0431
0.01250	-0.3822	-0.03	-0.0137	0.01	0.0923841	0.0494
0.01389	-0.4119	-0.04	-0.0148	0.01	0.1026342	0.0560
0.01528	-0.4394	-0.04	-0.0157	0.01	0.1128795	0.0628
0.01667	-0.4647	-0.05	-0.0167	0.01	0.1231193	0.0699
0.01806	-0.4876	-0.06	-0.0175	0.01	0.1333532	0.0773
0.01944	-0.5076	-0.06	-0.0182	0.01	0.1435734	0.0850
0.02083	-0.5250	-0.07	-0.0188	0.01	0.1537941	0.0930
0.02222	-0.5396	-0.08	-0.0193	0.01	0.1640074	0.1014
0.02361	-0.5515	-0.08	-0.0198	0.01	0.1742128	0.1101
0.02500	-0.5606	-0.09	-0.0201	0.01	0.1844099	0.1193
0.02639	-0.5669	-0.10	-0.0203	0.01	0.1945982	0.1288
0.02778	-0.5704	-0.10	-0.0204	0.01	0.2047771	0.1389
0.02917	-0.5708	-0.11	-0.0205	0.01	0.2149463	0.1494
0.03056	-0.5680	-0.11	-0.0204	0.01	0.2251051	0.1604
0.03194	-0.5623	-0.12	-0.0202	0.01	0.2352459	0.1720
0.03333	-0.5538	-0.12	-0.0198	0.01	0.2453827	0.1842
0.03472	-0.5427	-0.12	-0.0194	0.01	0.2555077	0.1971
0.03611	-0.5289	-0.12	-0.0190	0.01	0.2656206	0.2107
0.03750	-0.5126	-0.12	-0.0184	0.01	0.2757207	0.2250
0.03889	-0.4939	-0.12	-0.0177	0.01	0.2858075	0.2402
0.04028	-0.4717	-0.12	-0.0169	0.01	0.2958807	0.2563
0.04167	-0.4472	-0.12	-0.0160	0.01	0.3059398	0.2734
0.04306	-0.4207	-0.12	-0.0151	0.01	0.3159841	0.2916
0.04444	-0.3922	-0.11	-0.0141	0.01	0.3260062	0.3109
0.04583	-0.3619	-0.11	-0.0130	0.01	0.3360198	0.3316
0.04722	-0.3299	-0.10	-0.0118	0.01	0.3460173	0.3538
0.04861	-0.2964	-0.09	-0.0106	0.01	0.3559983	0.3775
0.05000	-0.2606	-0.08	-0.0093	0.01	0.3659622	0.4030
0.05139	-0.2234	-0.07	-0.0080	0.01	0.3759086	0.4306
0.05278	-0.1852	-0.06	-0.0066	0.01	0.3858370	0.4604
0.05417	-0.1462	-0.05	-0.0052	0.01	0.3957469	0.4927
0.05556	-0.1067	-0.04	-0.0038	0.01	0.4056379	0.5278
0.05694	-0.0668	-0.02	-0.0024	0.01	0.4155023	0.5662
0.05833	-0.0267	-0.01	-0.0010	0.01	0.4253539	0.6084
0.05972	0.0143	0.01	0.0005	0.01	0.4351852	0.6548
0.06111	0.0555	0.02	0.0020	0.01	0.4449956	0.7062
0.06250	0.0965	0.04	0.0035	0.01	0.4547847	0.7634
0.06389	0.1368	0.05	0.0049	0.01	0.4645520	0.8275
0.06528	0.1763	0.07	0.0063	0.01	0.4742971	0.8998
0.06667	0.2148	0.09	0.0077	0.01	0.4840195	0.9819
0.06806	0.2521	0.11	0.0090	0.01	0.4937186	1.0760
0.06944	0.2887	0.12	0.0103	0.01	0.5033872	1.1849
0.07083	0.3246	0.14	0.0116	0.01	0.5130386	1.3124
0.07222	0.3590	0.16	0.0129	0.01	0.5226655	1.4638
0.07361	0.3915	0.18	0.0140	0.01	0.5322673	1.6463
0.07500	0.4221	0.19	0.0151	0.01	0.5418437	1.8708
0.07639	0.4504	0.21	0.0161	0.01	0.5513941	2.1534
0.07778	0.4764	0.22	0.0171	0.01	0.5609180	2.5202
0.07917	0.4999	0.24	0.0179	0.01	0.5704151	3.0152
0.08056	0.5229	0.25	0.0187	0.01	0.5798849	3.7199
0.08194	0.5433	0.27	0.0195	0.01	0.5893202	4.8023
0.08333	0.5610	0.28	0.0201	0.01	0.5987340	6.6809
0.08472	0.5759	0.29	0.0206	0.01	0.6081191	10.7399
0.08611	0.5879	0.30	0.0211	0.01	0.6174751	26.0229
0.08750	0.5970	0.31	0.0214	0.01	0.6268015	-69.1693
0.08889	0.6031	0.32	0.0216	0.01	0.6360979	-15.2371
0.09028	0.6079	0.32	0.0218	0.01	0.6453639	-8.6831
0.09167	0.6102	0.33	0.0219	0.01	0.6545989	-6.1296
0.09306	0.6096	0.33	0.0218	0.01	0.6638026	-4.7704
0.09444	0.6061	0.34	0.0217	0.01	0.6729679	-3.9269
0.09583	0.5997	0.34	0.0215	0.01	0.6821075	-3.3517
0.09722	0.5903	0.33	0.0212	0.01	0.6912146	-2.9348
0.09861	0.5781	0.33	0.0207	0.01	0.7002885	-2.6186
0.10000	0.5644	0.33	0.0202	0.01	0.7093288	-2.3706
0.10139	0.5488	0.32	0.0197	0.02	0.7183352	-2.1710
0.10278	0.5310	0.31	0.0190	0.02	0.7273072	-2.0068
0.10417	0.5106	0.30	0.0183	0.02	0.7362443	-1.8694
0.10556	0.4879	0.29	0.0175	0.02	0.7451462	-1.7527
0.10694	0.4629	0.28	0.0166	0.02	0.7540060	-1.6525
0.10833	0.4357	0.27	0.0156	0.02	0.7628361	-1.5653
0.10972	0.4073	0.25	0.0146	0.02	0.7716297	-1.4889
0.11111	0.3784	0.24	0.0136	0.02	0.7803863	-1.4214
0.11250	0.3482	0.22	0.0125	0.02	0.7891055	-1.3612
0.11389	0.3165	0.20	0.0113	0.02	0.7977870	-1.3074
0.11528	0.2835	0.18	0.0102	0.02	0.8064302	-1.2589



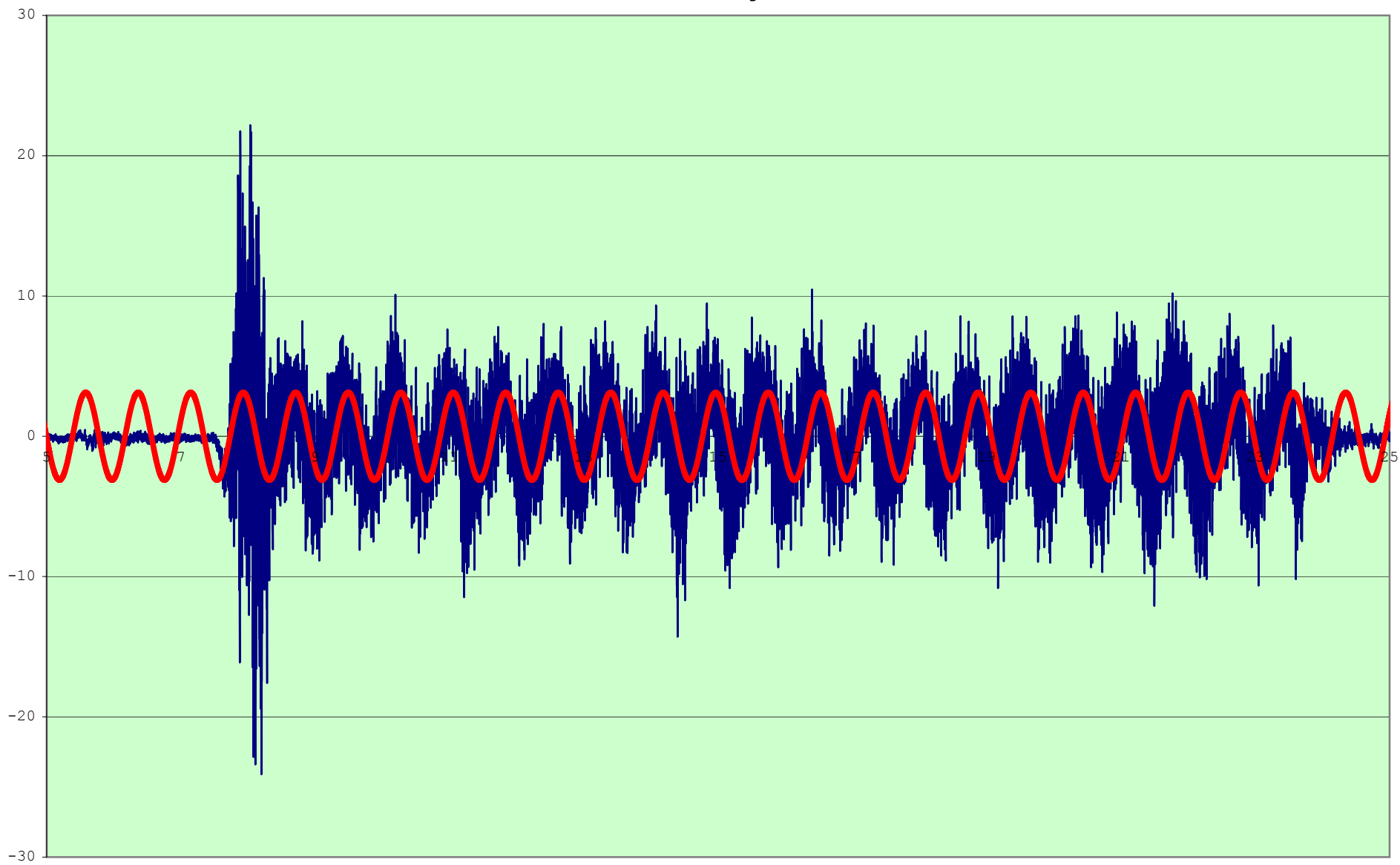
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO SIN OLEAJE = 1.6973 mm
 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO CON OLEAJE = 1.6010 mm



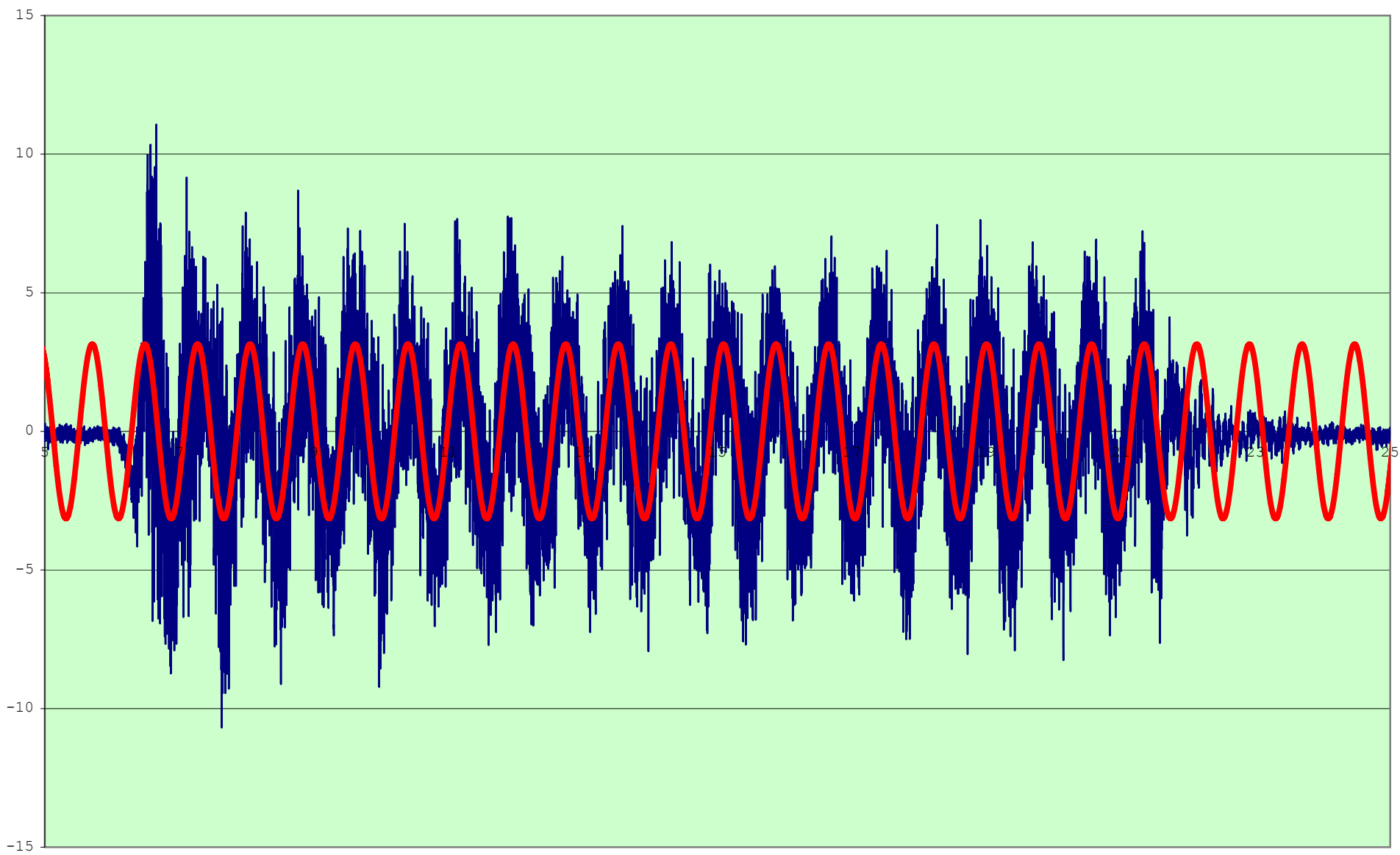
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES EN LA BASE (m/seg²) h=10cm a(t)=3.1 SEN(8.036134t)



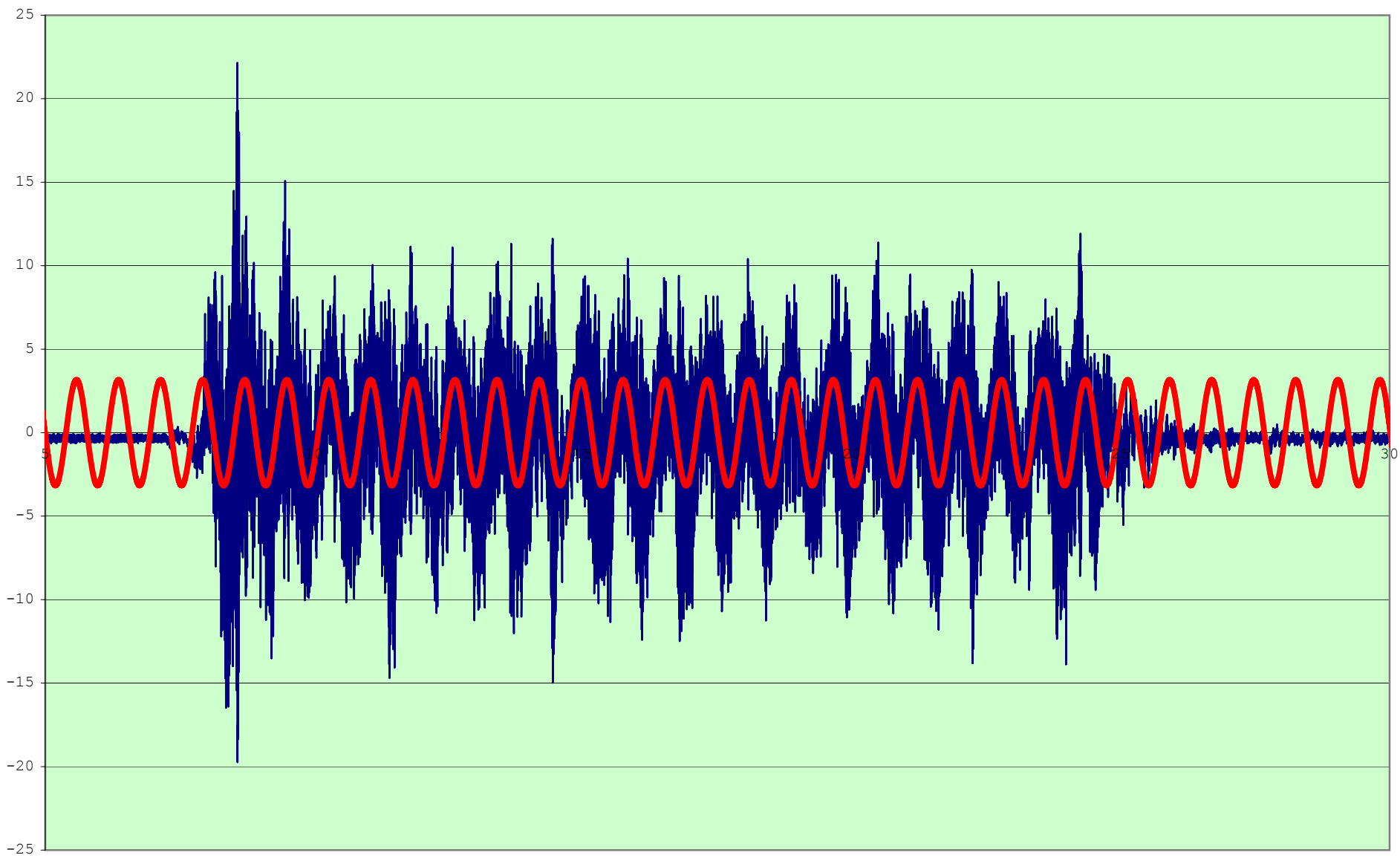
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 1 (m/seg²) h=10cm a(t)=3.122 SEN(8.036134t)



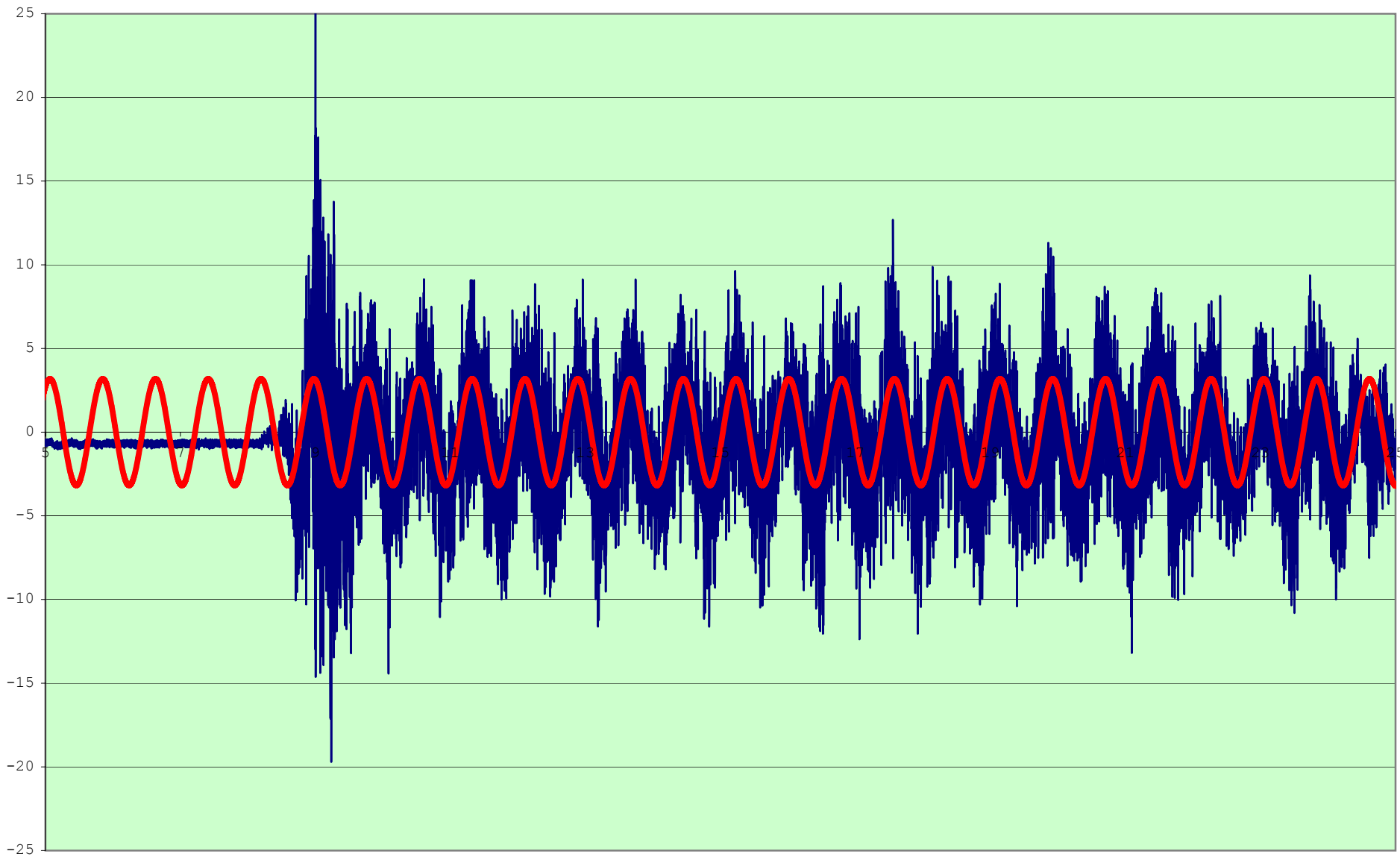
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 2 (m/seg²) h=10cm a(t)=3.144 SEN(8.036134t)



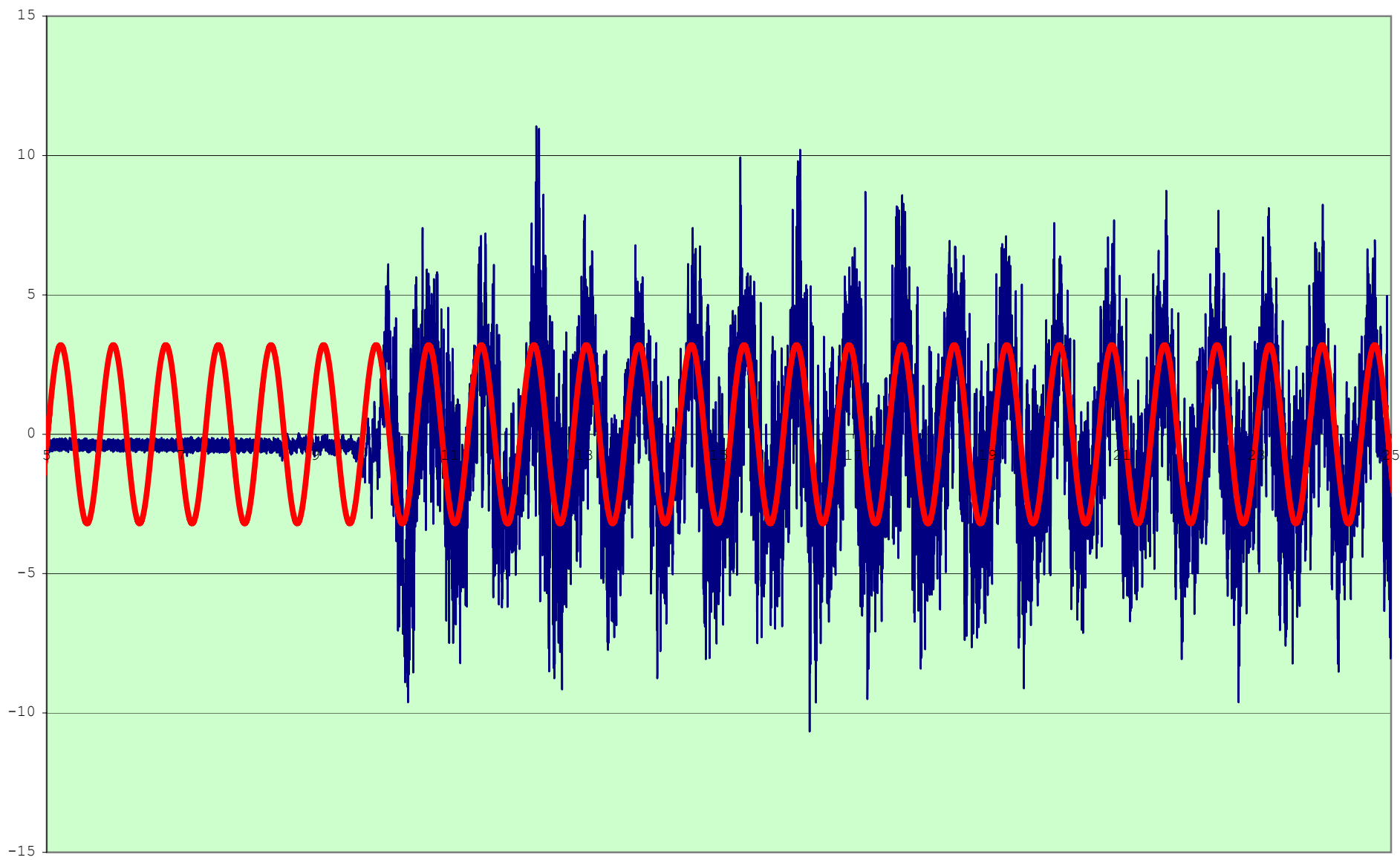
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 3 (m/seg²) h=10cm a(t)=3.166 SEN(8.036134t)



SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 4 (m/seg²) h=10cm a(t)=3.185 SENO(8.036134t)



SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 5 (m/seg²) h=10cm a(t)=3.199 SEN(8.0306134t)



ANÁLISIS DE FUERZAS Y MOVIMIENTO DEL OLEAJE EN DEPÓSITOS CILÍNDRICOS DE LÍQUIDOS

DATOS DEL TANQUE

D =	0.60 m =	1.97 ft
R =	0.30 m =	0.98 ft
h =	0.10 m =	0.33 ft
ho =	0.04 m =	0.12 ft
h ₁ =	0.05 m =	0.17 ft

CONDICIONES AMBIENTALES

g =	9.81 m/seg ² =	32.18 ft/seg ²
Tipo de suelo :	Roca	
Ta =	0.16 seg	
Tb =	0.36 seg	
S =	1.00	

CONTENIDO DEL TANQUE

γ =	1,000.00 Kg/m ³	62.43 Lib/ft ³	AGUA
T ₁ =	1.12 seg		

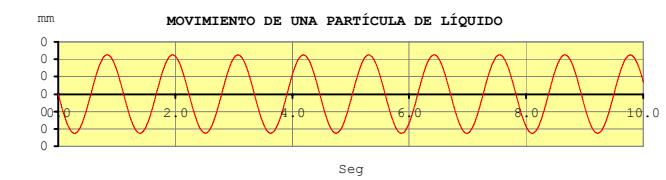
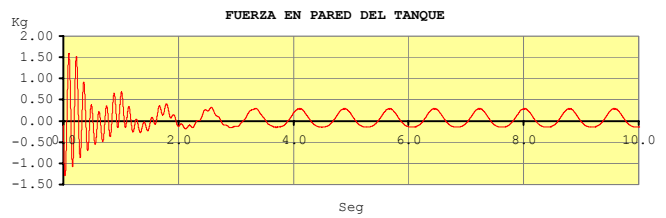
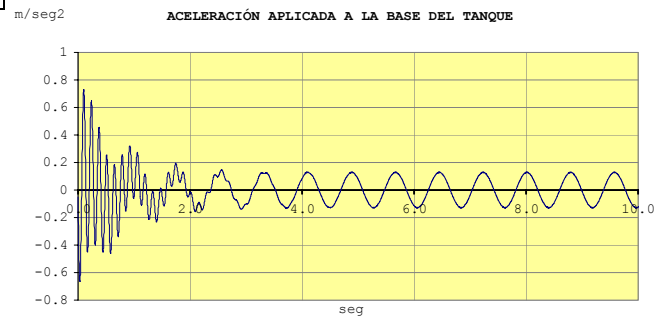
CONSTANTES DEL MODELO

M =	2.88 Kg seg ² /m	1.94 Lib seg ² /m	W ₀ =	0.115491144 Kg/Nudo
M ₀ =	0.57 Kg seg ² /m	0.38 Lib seg ² /m	W ₁ =	0.019015124 Kg/Nudo
M ₁ =	1.55 Kg seg ² /m	-1.94 Lib seg ² /m	Función Fx(t) =	0.019015124 Seno(wt)
f =	0.89 cps		f ₀ =	1.28 cps
ω =	5.62 rad/seg		ω ₀ =	8.0361 rad/seg
Sa =	0.59 m/seg ²	1.93 ft/seg ²		
z =	0.46 m/seg ²	1.50 ft/seg ²		
Δt =	0.0014 seg			
Amplitud =	0.0016 m =	0.01 ft	# de nudos =	48

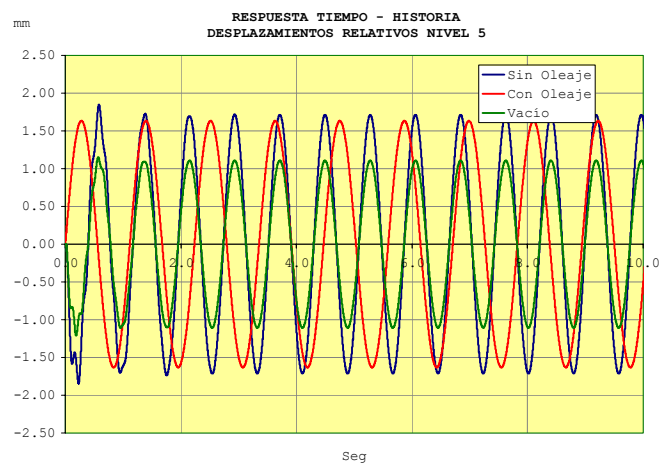
Fuerza lateral máxima =	1.291 Kg =	2.85 Libras
Momento volc. al pie del tanque =	0.049 Kg-m =	0.35 Lb-ft

RESPUESTA TIEMPO - HISTORIA

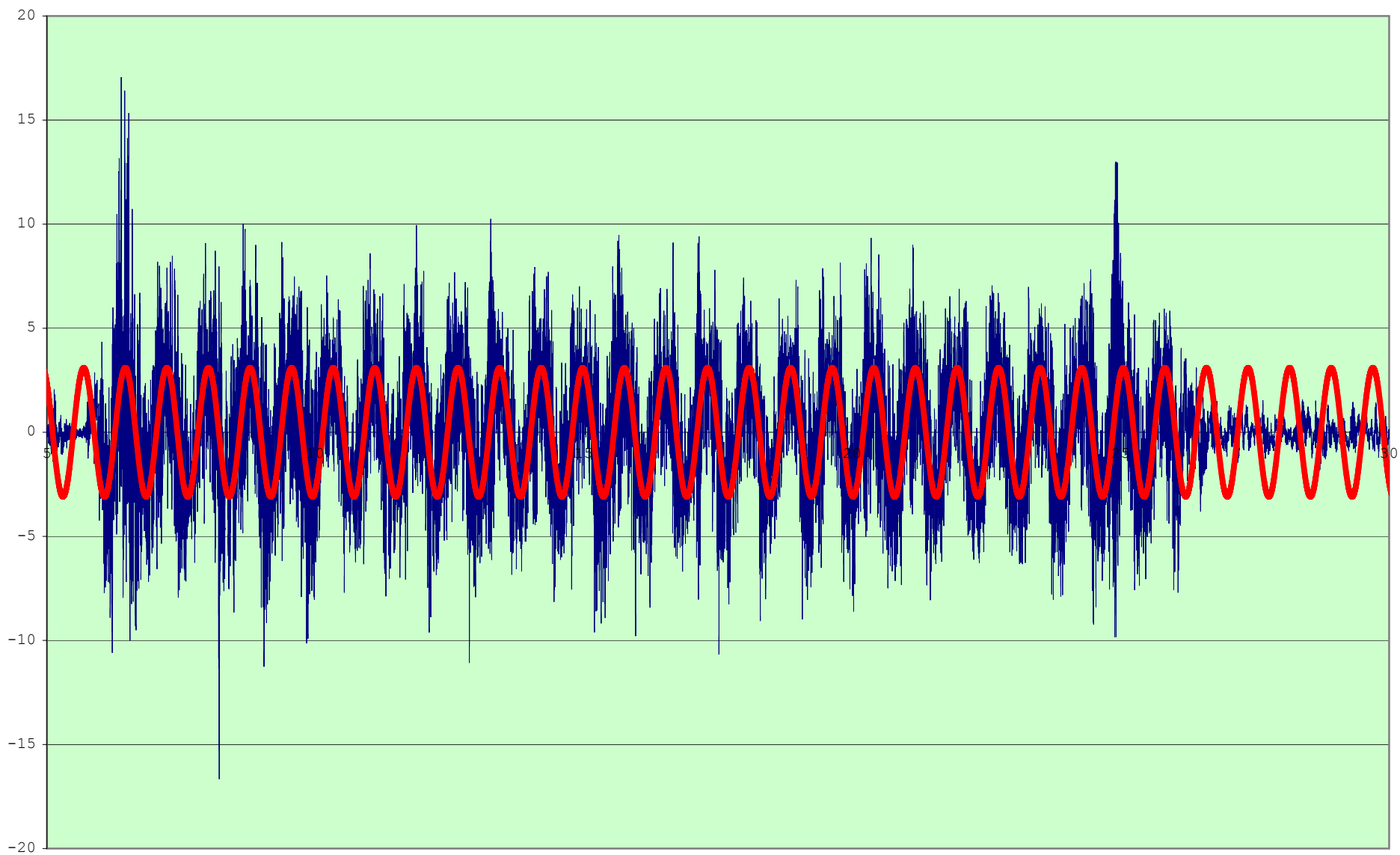
t	Z	Sa	Fx (Kg)	Mv (Kg m)	A (x) mm	d (mm)
0.00000	-0.0431	0.00	-0.0020	0.01	0.0000000	0.0000
0.00139	-0.0784	0.00	-0.0036	0.01	0.0127432	0.0076
0.00278	-0.1153	0.00	-0.0053	0.01	0.0254857	0.0158
0.00417	-0.1523	0.00	-0.0069	0.01	0.0382266	0.0246
0.00556	-0.1886	-0.01	-0.0086	0.01	0.0509652	0.0341
0.00694	-0.2240	-0.01	-0.0102	0.01	0.0636915	0.0443
0.00833	-0.2583	-0.02	-0.0118	0.01	0.0764231	0.0553
0.00972	-0.2911	-0.02	-0.0133	0.01	0.0891501	0.0673
0.01111	-0.3224	-0.03	-0.0147	0.01	0.1018716	0.0803
0.01250	-0.3522	-0.03	-0.0161	0.02	0.1145869	0.0946
0.01389	-0.3802	-0.04	-0.0173	0.02	0.1272952	0.1103
0.01528	-0.4065	-0.04	-0.0185	0.02	0.1399957	0.1276
0.01667	-0.4309	-0.05	-0.0197	0.02	0.1526877	0.1467
0.01806	-0.4533	-0.06	-0.0207	0.02	0.1653704	0.1681
0.01944	-0.4731	-0.07	-0.0216	0.02	0.1780339	0.1920
0.02083	-0.4907	-0.07	-0.0224	0.02	0.1906957	0.2190
0.02222	-0.5060	-0.08	-0.0231	0.02	0.2033458	0.2498
0.02361	-0.5190	-0.09	-0.0237	0.02	0.2159836	0.2851
0.02500	-0.5297	-0.09	-0.0242	0.02	0.2286081	0.3261
0.02639	-0.5380	-0.10	-0.0245	0.02	0.2412188	0.3742
0.02778	-0.5438	-0.11	-0.0248	0.02	0.2538147	0.4315
0.02917	-0.5466	-0.11	-0.0249	0.02	0.2663952	0.5009
0.03056	-0.5469	-0.12	-0.0249	0.02	0.2789594	0.5865
0.03194	-0.5447	-0.12	-0.0248	0.02	0.2914976	0.6948
0.03333	-0.5401	-0.13	-0.0246	0.02	0.3040270	0.8365
0.03472	-0.5331	-0.13	-0.0243	0.02	0.3165379	1.0295
0.03611	-0.5238	-0.13	-0.0239	0.02	0.3290296	1.3080
0.03750	-0.5122	-0.14	-0.0234	0.02	0.3415011	1.7447
0.03889	-0.4975	-0.14	-0.0227	0.02	0.3539518	2.5279
0.04028	-0.4806	-0.14	-0.0219	0.02	0.3663810	4.3414
0.04167	-0.4616	-0.14	-0.0211	0.02	0.3787878	13.1224
0.04306	-0.4406	-0.13	-0.0201	0.02	0.3911715	-14.7298
0.04444	-0.4178	-0.13	-0.0191	0.02	0.4035225	-4.9311
0.04583	-0.3932	-0.13	-0.0179	0.02	0.4158578	-3.0346
0.04722	-0.3669	-0.12	-0.0167	0.02	0.4281677	-2.2285
0.04861	-0.3381	-0.12	-0.0154	0.02	0.4404516	-1.7824
0.05000	-0.3078	-0.11	-0.0140	0.02	0.4527085	-1.4992
0.05139	-0.2762	-0.10	-0.0126	0.02	0.4649379	-1.3035
0.05278	-0.2435	-0.09	-0.0111	0.02	0.4771390	-1.1601
0.05417	-0.2098	-0.08	-0.0096	0.02	0.4893109	-1.0505
0.05556	-0.1754	-0.07	-0.0080	0.02	0.5014530	-0.9641
0.05694	-0.1403	-0.06	-0.0064	0.02	0.5135558	-0.8943
0.05833	-0.1035	-0.04	-0.0047	0.02	0.5256361	-0.8365
0.05972	-0.0663	-0.03	-0.0030	0.02	0.5376843	-0.7881
0.06111	-0.0289	-0.01	-0.0013	0.02	0.5496997	-0.7468
0.06250	0.0085	0.00	0.0004	0.03	0.5616816	-0.7113
0.06389	0.0457	0.02	0.0021	0.03	0.5736292	-0.6804
0.06528	0.0826	0.04	0.0038	0.03	0.5855419	-0.6532
0.06667	0.1189	0.05	0.0054	0.03	0.5974189	-0.6291
0.06806	0.1559	0.07	0.0071	0.03	0.6092595	-0.6077
0.06944	0.1922	0.09	0.0088	0.03	0.6210544	-0.5885
0.07083	0.2276	0.11	0.0104	0.03	0.6328200	-0.5711
0.07222	0.2619	0.13	0.0119	0.03	0.6445470	-0.5554
0.07361	0.2949	0.15	0.0135	0.03	0.6562347	-0.5411
0.07500	0.3264	0.17	0.0149	0.03	0.6678824	-0.5280
0.07639	0.3564	0.18	0.0163	0.03	0.6794893	-0.5160
0.07778	0.3860	0.20	0.0176	0.03	0.6910549	-0.5049
0.07917	0.4141	0.22	0.0189	0.03	0.7025783	-0.4947
0.08056	0.4403	0.24	0.0201	0.03	0.7140589	-0.4852
0.08194	0.4645	0.25	0.0212	0.03	0.7254877	-0.4764
0.08333	0.4865	0.27	0.0222	0.03	0.7368805	-0.4682
0.08472	0.5063	0.29	0.0231	0.03	0.7482284	-0.4606
0.08611	0.5238	0.30	0.0239	0.03	0.7595307	-0.4534
0.08750	0.5403	0.31	0.0246	0.03	0.7707867	-0.4467
0.08889	0.5547	0.33	0.0253	0.03	0.7819957	-0.4404
0.09028	0.5667	0.34	0.0259	0.03	0.7931570	-0.4345
0.09167	0.5762	0.35	0.0263	0.03	0.8042700	-0.4289
0.09306	0.5830	0.35	0.0266	0.03	0.8153339	-0.4236
0.09444	0.5873	0.36	0.0268	0.03	0.8263402	-0.4186
0.09583	0.5889	0.37	0.0269	0.03	0.8373041	-0.4139
0.09722	0.5895	0.37	0.0269	0.03	0.8482219	-0.4094
0.09861	0.5878	0.37	0.0268	0.03	0.8590780	-0.4051
0.10000	0.5837	0.38	0.0266	0.03	0.8698868	-0.4011
0.10139	0.5770	0.38	0.0263	0.03	0.8806424	-0.3972
0.10278	0.5678	0.37	0.0259	0.03	0.8913445	-0.3935
0.10417	0.5561	0.37	0.0254	0.03	0.9019921	-0.3900
0.10556	0.5420	0.36	0.0247	0.03	0.9125848	-0.3867
0.10694	0.5272	0.36	0.0241	0.03	0.9231142	-0.3835
0.10833	0.5106	0.35	0.0233	0.03	0.9335950	-0.3804
0.10972	0.4919	0.34	0.0224	0.03	0.9440189	-0.3775
0.11111	0.4711	0.33	0.0215	0.03	0.9543852	-0.3747
0.11250	0.4483	0.32	0.0205	0.03	0.9646933	-0.3720
0.11389	0.4237	0.30	0.0193	0.03	0.9749426	-0.3694



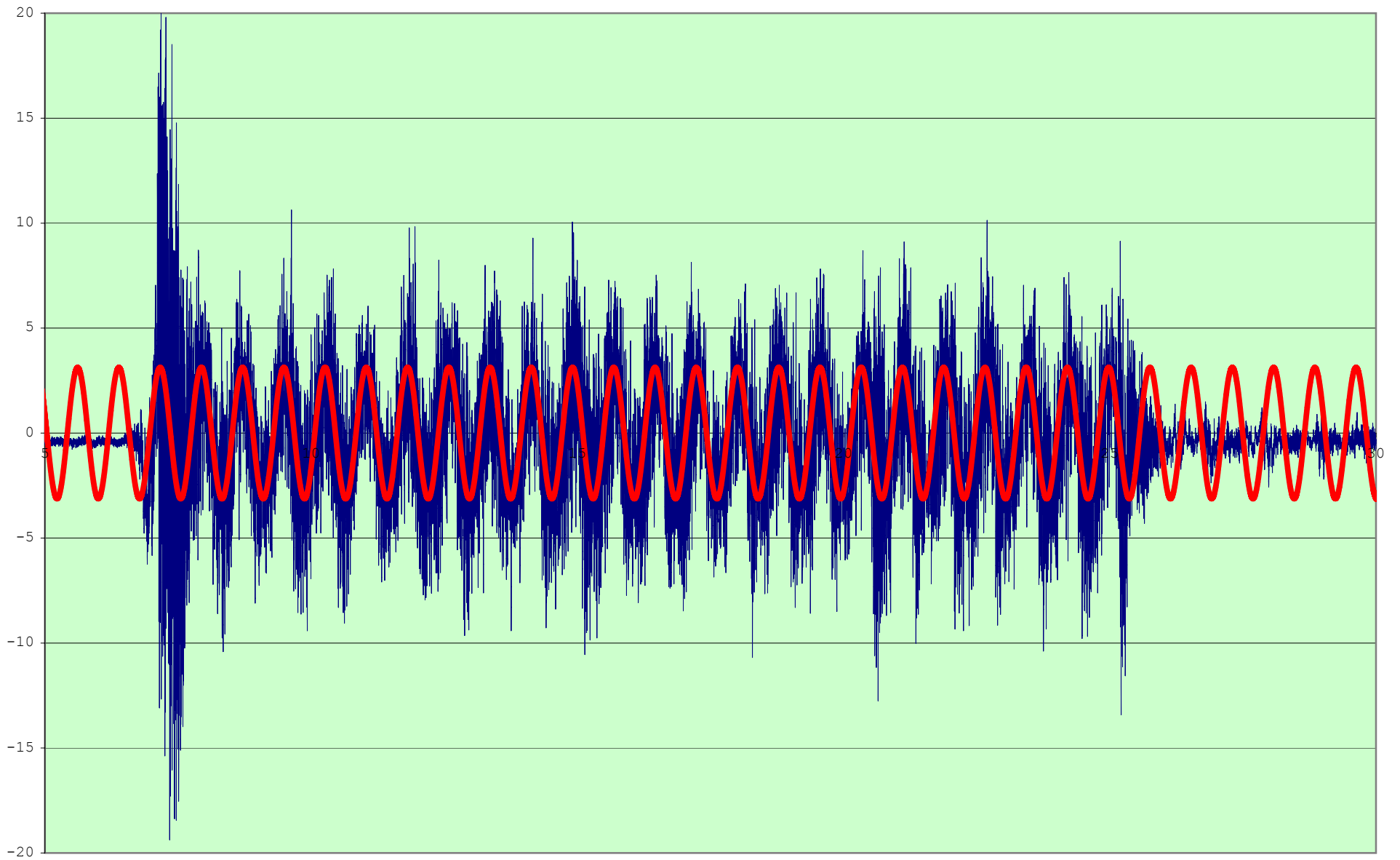
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO SIN OLEAJE = 1.8465 mm
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO CON OLEAJE = 1.6937 mm



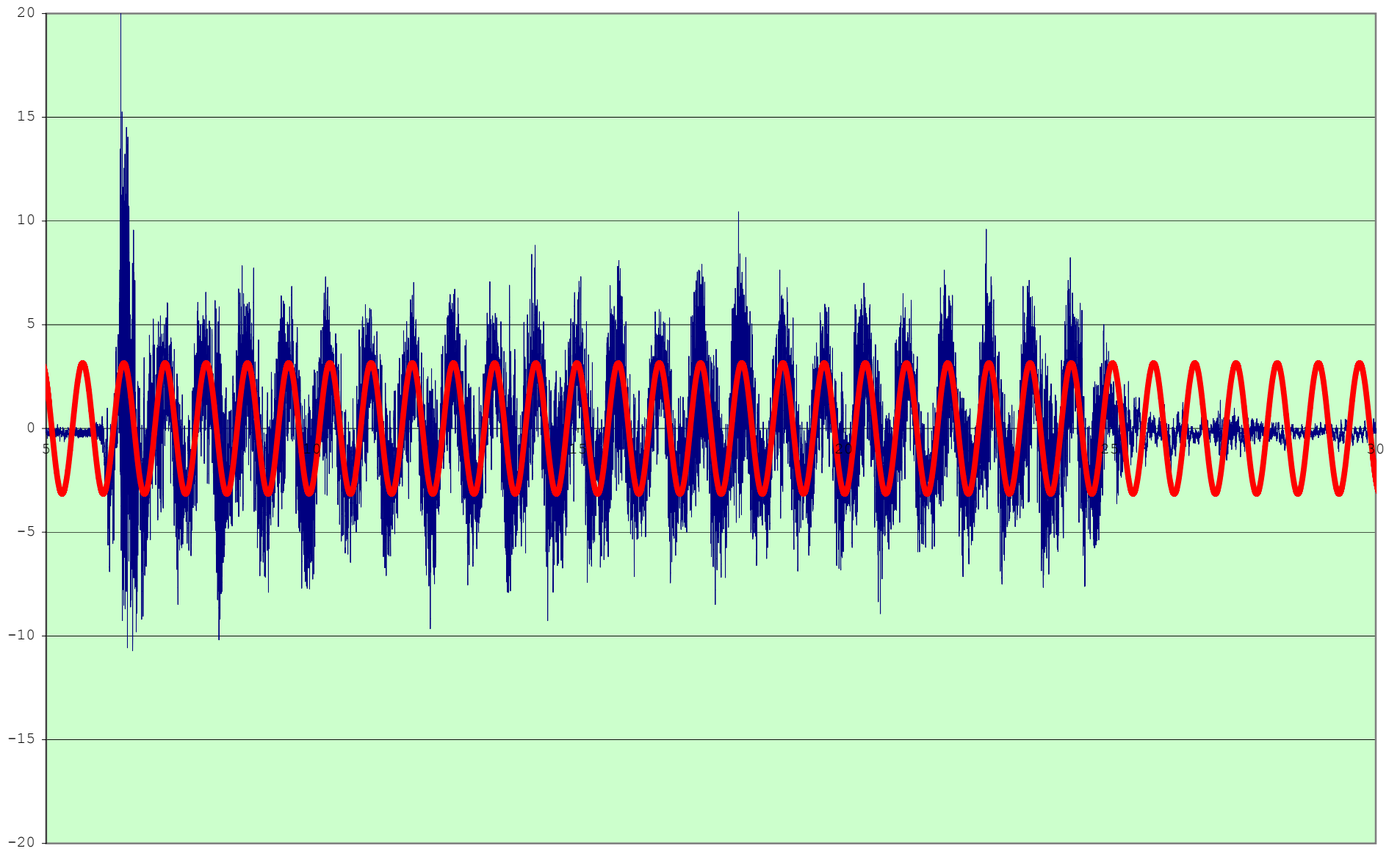
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES EN LA BASE (m/seg²) h=15cm a(t)=3.1 SEN(8.112094t)



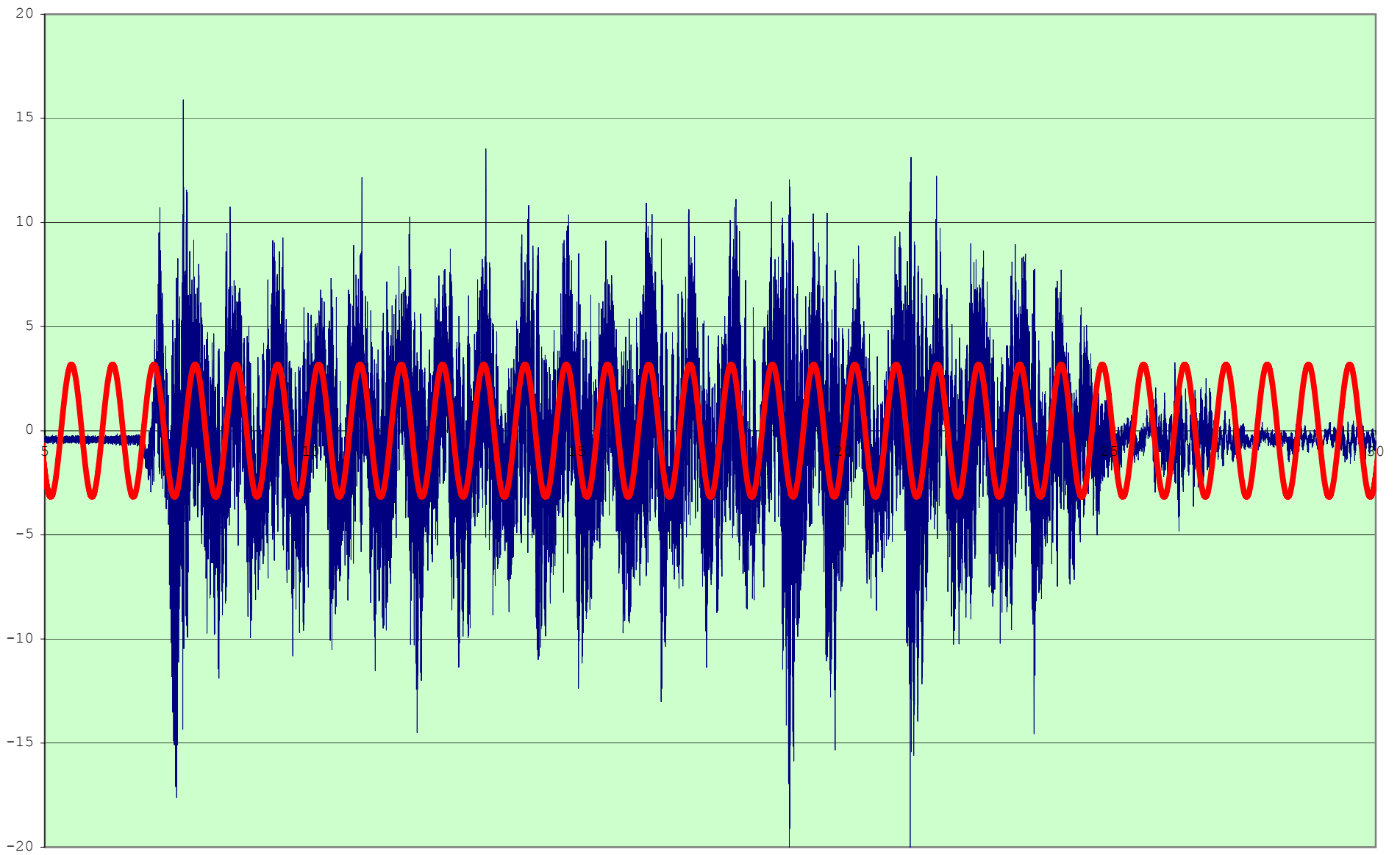
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES EN NIVEL 1 (m/seg2) h=15cm a(t)= 3.126 SEN(8.1120937t)



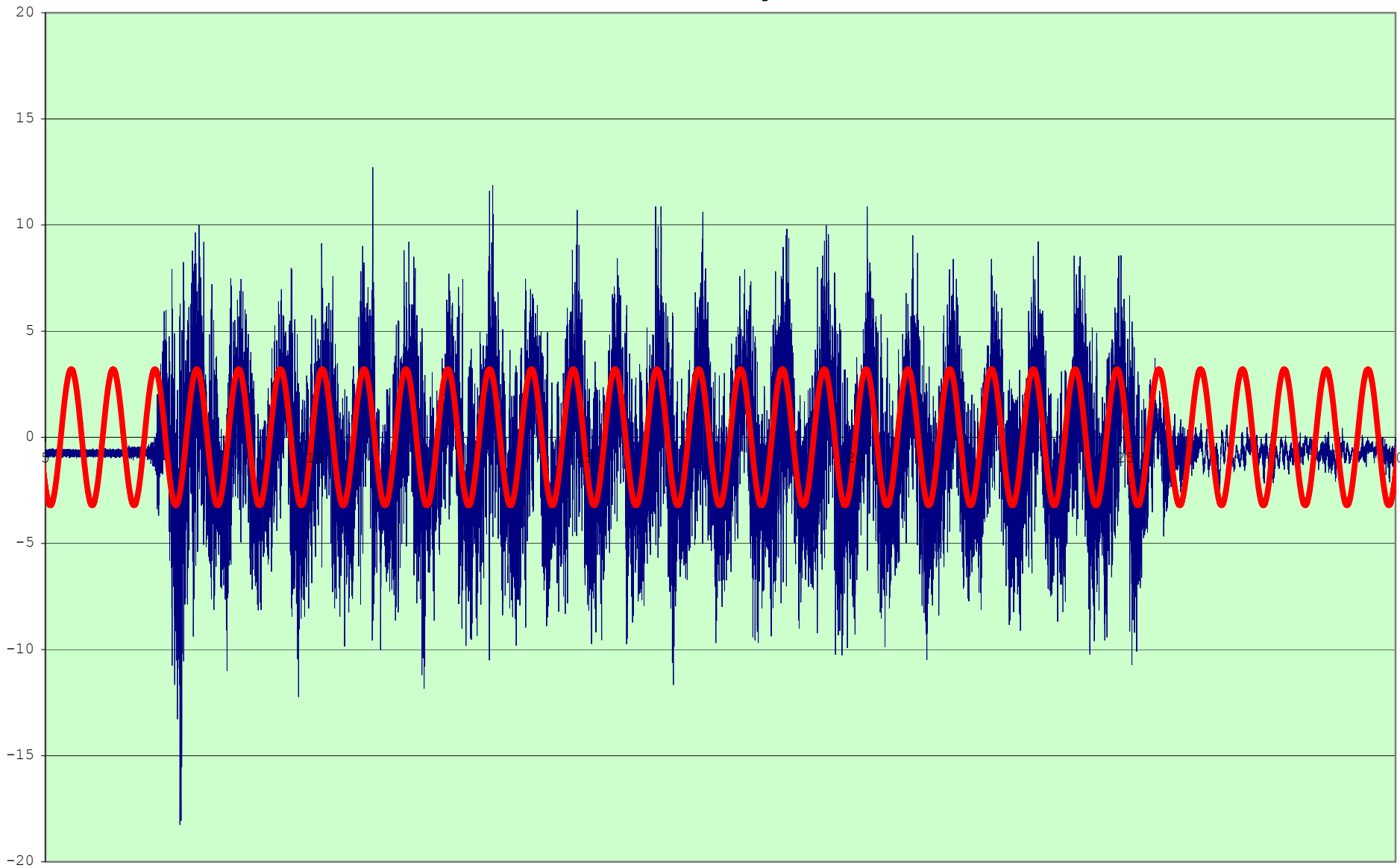
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 2 (m/seg²) h=15cm a(t)=3.153 SENO(8.112094t)



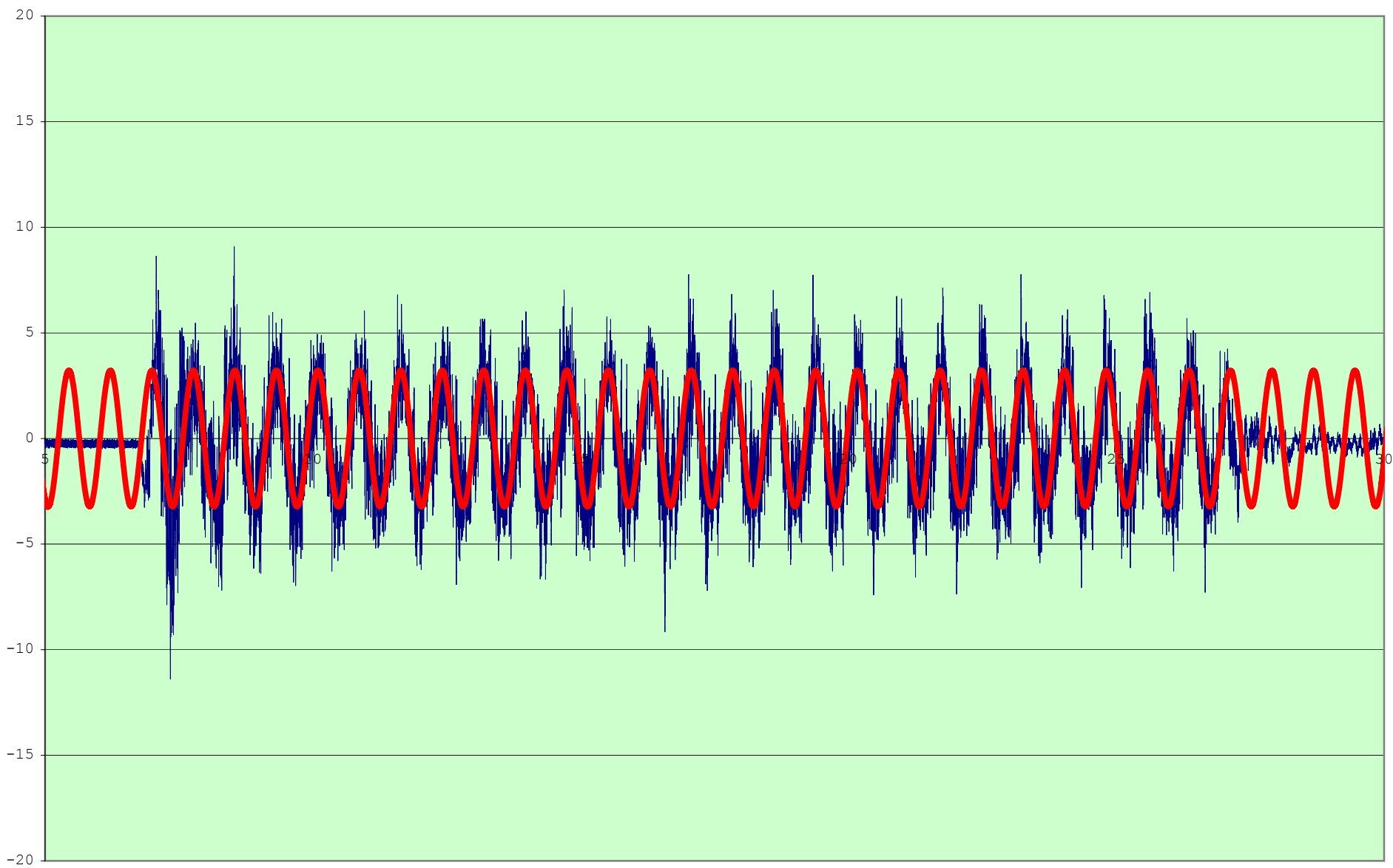
SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 3 (m/seg²) h=15cm a(t)=3.179 SENO(8.112094t)



SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 4 (m/seg²) h=15cm a(t)=3.202 SEN(8.112094t)



SERIE DE TIEMPO: ACELERACIONES NIVEL 5 (m/seg²) h=15cm a (t)=3.219 SEN(8.112094t)



ANÁLISIS DE FUERZAS Y MOVIMIENTO DEL OLEAJE EN DEPÓSITOS CILÍNDRICOS DE LÍQUIDOS

DATOS DEL TANQUE

D = 0.60 m = 1.97 ft
 R = 0.30 m = 0.98 ft
 h = 0.15 m = 0.49 ft
 ho = 0.06 m = 0.18 ft
 h1 = 0.08 m = 0.26 ft

CONDICIONES AMBIENTALES

g = 9.81 m/seg² = 32.18 ft/seg²
 Tipo de suelo : Roca
 Ta = 0.16 seg
 Tb = 0.36 seg
 S = 1.00

CONTENIDO DEL TANQUE

γ = 1,000.00 Kg/m³ = 62.43 Lib/ft³ AGUA
 T1 = 0.97 seg

CONSTANTES DEL MODELO

M = 4.32 Kg seg²/m = 2.91 Lib seg²/m
 M0 = 1.27 Kg seg²/m = 0.85 Lib seg²/m
 M1 = 2.07 Kg seg²/m = -1.94 Lib seg²/m
 f = 1.0333 cps
 ω = 6.49 rad/seg
 Sa = 0.80 m/seg² = 2.63 ft/seg²
 z = 0.64 m/seg² = 2.10 ft/seg²
 Δt = 0.0014 seg
 Amplitud = 1.9230 m = 6.31 ft # de nudos = 48

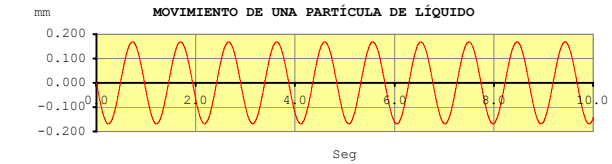
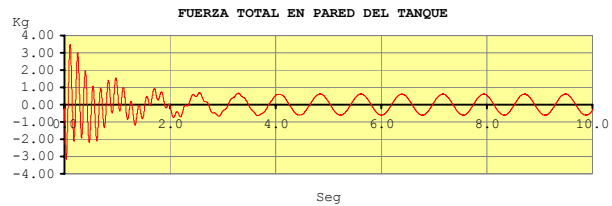
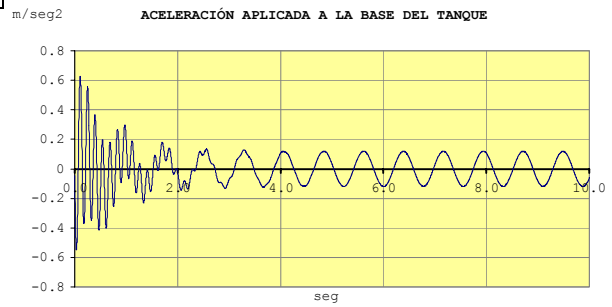
W0 = 0.366700136 Kg/Nudo
 W1 = 0.048767977 Kg/Nudo
 Función Fx(t) = 0.048767977 Seno(ωt)
 f0 = 1.29 cps
 ω0 = 8.1121 rad/seg

Sa = 0.8015 m/seg²
 A1 = 66.8138 mm

Fuerza lateral máxima =	3.463 Kg =	7.64 Libras
Momento volc. al pie del tanque =	0.162 Kg-m =	1.18 Lb-ft

RESPUESTA TIEMPO - HISTORIA

t	z	Sa	Fx (Kg)	Mv (Kg m)	A(x) mm	d (mm)
0.00000	-0.0347	0.00	-0.0021	0.06	0.0000000	0.0000
0.00139	-0.0635	0.00	-0.0039	0.06	0.0173411	0.0146
0.00278	-0.0947	0.00	-0.0058	0.06	0.0346807	0.0319
0.00417	-0.1269	0.00	-0.0077	0.06	0.0520175	0.0530
0.00556	-0.1601	-0.01	-0.0097	0.06	0.0693501	0.0789
0.00694	-0.1941	-0.01	-0.0118	0.06	0.0866646	0.1118
0.00833	-0.2290	-0.02	-0.0139	0.06	0.1039846	0.1547
0.00972	-0.2647	-0.02	-0.0161	0.06	0.1212960	0.2133
0.01111	-0.3011	-0.03	-0.0183	0.06	0.1385976	0.2978
0.01250	-0.3381	-0.04	-0.0206	0.07	0.1558879	0.4305
0.01389	-0.3756	-0.04	-0.0229	0.07	0.1731656	0.6686
0.01528	-0.4132	-0.05	-0.0251	0.07	0.1904292	1.2211
0.01667	-0.4507	-0.06	-0.0274	0.07	0.2076773	3.9186
0.01806	-0.4877	-0.07	-0.0297	0.07	0.2249085	-4.5111
0.01944	-0.5236	-0.08	-0.0319	0.07	0.2421090	-1.5873
0.02083	-0.5580	-0.10	-0.0340	0.07	0.2593022	-1.0162
0.02222	-0.5906	-0.11	-0.0359	0.07	0.2764744	-0.7730
0.02361	-0.6211	-0.12	-0.0378	0.07	0.2936240	-0.6383
0.02500	-0.6489	-0.14	-0.0395	0.07	0.3107498	-0.5527
0.02639	-0.6737	-0.15	-0.0410	0.08	0.3278503	-0.4935
0.02778	-0.6952	-0.16	-0.0423	0.08	0.3449242	-0.4501
0.02917	-0.7129	-0.17	-0.0434	0.08	0.3619700	-0.4170
0.03056	-0.7260	-0.18	-0.0442	0.08	0.3789864	-0.3909
0.03194	-0.7349	-0.19	-0.0447	0.08	0.3959597	-0.3697
0.03333	-0.7395	-0.20	-0.0450	0.08	0.4129131	-0.3523
0.03472	-0.7396	-0.21	-0.0450	0.08	0.4298329	-0.3376
0.03611	-0.7353	-0.22	-0.0447	0.08	0.4467178	-0.3252
0.03750	-0.7266	-0.22	-0.0442	0.08	0.4635663	-0.3144
0.03889	-0.7137	-0.23	-0.0434	0.08	0.4803772	-0.3050
0.04028	-0.6960	-0.23	-0.0424	0.08	0.4971489	-0.2968
0.04167	-0.6745	-0.23	-0.0410	0.09	0.5138803	-0.2895
0.04306	-0.6493	-0.23	-0.0395	0.09	0.5305698	-0.2831
0.04444	-0.6211	-0.23	-0.0378	0.09	0.5472043	-0.2772
0.04583	-0.5900	-0.22	-0.0359	0.09	0.5638062	-0.2720
0.04722	-0.5566	-0.21	-0.0339	0.09	0.5803623	-0.2672
0.04861	-0.5213	-0.21	-0.0317	0.09	0.5968712	-0.2629
0.05000	-0.4840	-0.20	-0.0294	0.09	0.6133316	-0.2590
0.05139	-0.4452	-0.19	-0.0271	0.09	0.6297421	-0.2553
0.05278	-0.4056	-0.17	-0.0247	0.09	0.6461014	-0.2520
0.05417	-0.3657	-0.16	-0.0222	0.09	0.6624081	-0.2489
0.05556	-0.3258	-0.15	-0.0198	0.09	0.6786610	-0.2460
0.05694	-0.2862	-0.13	-0.0174	0.10	0.6948471	-0.2434
0.05833	-0.2471	-0.12	-0.0150	0.10	0.7109883	-0.2409
0.05972	-0.2088	-0.10	-0.0127	0.10	0.7270717	-0.2386
0.06111	-0.1702	-0.08	-0.0104	0.10	0.7430960	-0.2364
0.06250	-0.1325	-0.07	-0.0081	0.10	0.7590599	-0.2344
0.06389	-0.0959	-0.05	-0.0058	0.10	0.7749620	-0.2325
0.06528	-0.0602	-0.03	-0.0037	0.10	0.7908011	-0.2307
0.06667	-0.0255	-0.01	-0.0016	0.10	0.8065760	-0.2290
0.06806	0.0084	0.00	0.0005	0.10	0.8222852	-0.2274
0.06944	0.0415	0.02	0.0025	0.10	0.8379163	-0.2259
0.07083	0.0750	0.04	0.0046	0.10	0.8534906	-0.2245
0.07222	0.1084	0.06	0.0066	0.10	0.8689955	-0.2231
0.07361	0.1415	0.08	0.0086	0.11	0.8844297	-0.2218
0.07500	0.1744	0.10	0.0106	0.11	0.8997920	-0.2206
0.07639	0.2074	0.12	0.0126	0.11	0.9150811	-0.2195
0.07778	0.2404	0.15	0.0146	0.11	0.9302958	-0.2184
0.07917	0.2735	0.17	0.0166	0.11	0.9454349	-0.2173
0.08056	0.3076	0.19	0.0187	0.11	0.9604970	-0.2163
0.08194	0.3424	0.22	0.0208	0.11	0.9754704	-0.2153
0.08333	0.3774	0.24	0.0230	0.11	0.9903572	-0.2144
0.08472	0.4126	0.27	0.0251	0.11	1.0051594	-0.2135
0.08611	0.4476	0.30	0.0272	0.11	1.0199240	-0.2127
0.08750	0.4823	0.32	0.0293	0.11	1.0346016	-0.2119
0.08889	0.5164	0.35	0.0314	0.11	1.0491770	-0.2111
0.09028	0.5497	0.38	0.0334	0.12	1.0636672	-0.2104
0.09167	0.5836	0.41	0.0355	0.12	1.0780708	-0.2096
0.09306	0.6161	0.44	0.0375	0.12	1.0923868	-0.2090
0.09444	0.6469	0.46	0.0394	0.12	1.1066038	-0.2083
0.09583	0.6755	0.49	0.0411	0.12	1.1207410	-0.2077
0.09722	0.7017	0.51	0.0427	0.12	1.1347871	-0.2070
0.09861	0.7252	0.54	0.0441	0.12	1.1487409	-0.2064
0.10000	0.7456	0.56	0.0454	0.12	1.1626013	-0.2059
0.10139	0.7639	0.58	0.0465	0.12	1.1763672	-0.2053
0.10278	0.7791	0.60	0.0474	0.12	1.1900374	-0.2048
0.10417	0.7905	0.61	0.0481	0.12	1.2036109	-0.2043
0.10556	0.7980	0.62	0.0486	0.12	1.2170864	-0.2038
0.10694	0.8015	0.63	0.0488	0.12	1.2304534	-0.2033
0.10833	0.8009	0.64	0.0487	0.13	1.2437300	-0.2028
0.10972	0.7961	0.64	0.0484	0.13	1.2569055	-0.2024
0.11111	0.7883	0.64	0.0480	0.13	1.2699788	-0.2020
0.11250	0.7773	0.64	0.0473	0.13	1.2829488	-0.2015
0.11389	0.7628	0.63	0.0464	0.13	1.2958144	-0.2011
0.11528	0.7448	0.62	0.0453	0.13	1.3085747	-0.2008



DESPLAZAMIENTO MÁXIMO SIN OLEAJE = 2.0675 mm
 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO CON OLEAJE = 1.9230 mm

