

Dinamica de plataformas de agua profunda

Jose M. Roësset⁽¹⁾

Resumen

En 50 años la producción de hidrocarburos del fondo del mar ha progresado de unos 6 metros a más de un kilómetro de profundidad con plataformas superficiales y cerca de dos con sistemas de producción submarinos. Las plataformas que se han proyectado, fabricado e instalado en aguas profundas han ganado repetidamente el premio a la obra de ingeniería mas destacada del año concedido por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE). Al aumentar la profundidad de agua el periodo propio de las plataformas convencionales aumenta y se acerca al periodo predominante del oleaje. Para evitar grandes amplificaciones dinámicas que harían estas estructuras prohibitivas ha sido necesario buscar nuevas soluciones, mucho mas flexibles y con periodos propios mucho mas largos que los de las olas. La respuesta

dinámica de estas estructuras en régimen lineal y permanente es por lo tanto muy pequeña. Hay sin embargo efectos no lineales que se hacen relativamente importantes y que no pueden ignorarse en el proyecto.

En este artículo repasamos la historia de las plataformas marinas de perforación y producción de hidrocarburos, con énfasis especial en las soluciones para aguas profundas. Discutimos a continuación algunos de los efectos dinámicos no lineales que se presentan en estas estructuras y su importancia relativa.

Palabras clave: Plataformas de perforación y producción; aguas profundas; cuerpos flotantes; fuerzas hidrodinámicas; respuesta dinámica; efectos no lineales

⁽¹⁾ Prof. Ph.D. Associate Department Head for Graduate Studies and Research, Department of Civil Engineering, Texas A&M University. TAMUS 3136, CE/TTI Building Room 705 F, Texas A&M University, College Station, Texas 77843-3136, U.S.A. Tel 979-845-2493. Fax 979-845-6554. e-mail: jroeset@civilmail.tamu.edu

1. Introduccion

Las plataformas marinas costa afuera celebraron en 1997 su 50 aniversario. La producción de petróleo bajo el agua se había iniciado en los 1870 en Baku, en el mar Caspio, y en los 1880 en la costa de California cerca de Santa Barbara. A principios del siglo XX las torres de perforación que se erigían a lo largo de la costa de California se adentraron en las playas instalándose al extremo de muelles y diques. En los 1910 se inicio la producción de petróleo en el lago Maracaibo de Venezuela, en la decena de los 1920 en la bahía de Bibi-Eibar en el mar Caspio, y en los 1930 en las marismas de Luisiana. No fue sin embargo hasta 1947 cuando se construyo la primera plataforma en el Golfo de México, enteramente fuera de vista de la costa de Luisiana, en unos 6 metros de lámina de agua. El proyecto y construcción de las primeras plataformas durante los siguientes años se baso en las tecnologías en vigor para operaciones en tierra firme usando un alto grado de conservatismo para tomar en cuenta las incógnitas relacionadas con el nuevo medio y la falta de conocimientos. En 1955 se instalo una plataforma en 30 metros de agua, en 1965 en 75 metros, en 1970 en 110, y en 1976 en 260 (la plataforma Hondo que requirió su construcción y remolque en dos piezas que se soldaron internamente en su emplazamiento antes de la instalación). La plataforma Cognac

(construida en tres módulos) se instalo en 1978 en 300 metros de agua (1000 pies) y Bullwinkle en 1988 en más de 400 metros (construida entonces en una sola pieza, debido a la disponibilidad de barcasas de mayores dimensiones para su transporte). Tanto Cognac como Bullwinkle ganaron el premio del ASCE a la obra de ingeniería del año. Todas estas plataformas eran torres metálicas en celosía (“steel jacket platforms”), cimentadas con pilotes de gran longitud, contenidos inicialmente dentro de las patas tubulares, y en grupos circulares acoplados a estas patas (“skirt piles”) al aumentar sus dimensiones.

En los 1930 se descubrieron pequeños depósitos de gas en las costas de Holanda e Inglaterra pero fue solo en 1959, con el descubrimiento del yacimiento de gas de Groningen cuando se reconoció la existencia de importantes reservas de hidrocarburos en el mar del Norte. La actividad en esta región en relación con la prospección y producción de petróleo no empezó hasta los 70. Aunque inicialmente la tecnología usada se importo directamente del golfo de México, las condiciones ambientales del mar del Norte, mucho mas severas, la existencia de suelos mas firmes en el fondo, y la mayor familiaridad de los países europeos con la construcción de obras de hormigón, llevo al uso de plataformas de gravedad, con gran base y cimentaciones superficiales, como alternativa a las torres metálicas. La base de estas plataformas podía usarse para almacenamiento

del bruto. En 1984 Conoco completo la instalación en el mar del Norte de la plataforma Hutton, un nuevo concepto estructural que serviría de base en la década siguiente para las primeras plataformas en agua profunda (aunque Hutton estaba instalada en solo en unos 150 metros de calado).

Las plataformas marinas tienen que calcularse, como toda otra estructura, bajo la acción de fuerzas de gravedad (la carga muerta o peso propio de la estructura y todas sus componentes así como cargas vivas) y fuerzas de viento (que pueden ser de particular importancia para las nuevas estructuras muy flexibles). Están sometidas además a la acción de fuerzas hidrodinámicas causadas por el oleaje y las corrientes, que son características propias y que les distinguen de otras construcciones. El calculo de la respuesta de la estructura a estas solicitaciones requiere el conocimiento de las velocidades y aceleraciones de las partículas de agua en contacto con los elementos estructurales, los conductores (“risers”) de perforación y producción, tuberías y cables acoplados, etc. El cálculo debería ser en principio dinámico y no lineal. Las torres metálicas que se instalaban inicialmente en aguas de poca profundidad se proyectaban sin embargo con cálculos estáticos. Sus periodos fundamentales eran del orden de 1 segundo mientras que los periodos predominantes de las olas variaban entre 8 y 14 segundos dependiendo de la parte del mundo donde fuera a instalarse la pla-

taforma. SE trataba por lo tanto de estructuras muy rígidas y los factores de amplificación dinámica eran muy cercanos a la unidad. Al aumentar la profundidad el periodo de estas estructuras aumenta también. El periodo fundamental de Cognac era del orden de 4 segundos incluyendo los efectos de interacción suelo-estructura debidos a la flexibilidad de la cimentación. La amplificación dinámica seria todavía de solo 1,2 para la ola máxima que controla los esfuerzos en las barras, pero mayor para olas más pequeñas que pueden afectar la fatiga. A finales de los 80 se definía aguas profundas como 1000 metros de lámina de agua. Una plataforma convencional con esta altura tendria un periodo fundamental muy cercano al de las olas y como consecuencia las amplificaciones dinámicas serian muy grandes (el amortiguamiento en estas estructuras es muy bajo). Era necesario por lo tanto recurrir a nuevas soluciones estructurales proyectando plataformas muy flexibles cuyo periodo propio fuera mucho mayor que el de las olas. En 1983 se instalo la plataforma Lena, una torre metálica de sección transversal relativamente pequeña atirantada con cables. Las alternativas más populares fueron el uso de cuerpos flotantes anclados a las cimentaciones en el fondo del mar mediante tirantes verticales en tensión o cables (atirantados o en catenaria). La primera de estas soluciones la constituyen las llamadas plataformas con patas en tensión o TLPs (“Tension

Leg Platforms”) como Hutton. Estas estructuras consisten en un cuerpo flotante de grandes dimensiones (típicamente unos 85 m. por 85 m. en planta) con 3 a 5 (normalmente 4) patas cilíndricas de sección circular con un diámetro del orden de 25 m. y una altura de 80 a 100 m. Las patas están unidas en su base por pontones de sección circular o rectangular y en su cabeza por la plataforma que soporta las distintas edificaciones, la torre de perforación, el helipuerto, etc. Tirantes tubulares, o tendones, unen la base de las patas a pilotes de gran longitud (en el golfo de México) que constituyen la cimentación. Las patas están rellenas de balasto inicialmente mientras se colocan los tendones. Al vaciarlas los tendones quedan en tensión. La estructura se comporta esencialmente como un péndulo invertido con 6 grados de libertad (tres translaciones y tres rotaciones). Los periodos fundamentales en vibración horizontal son del orden de 100 segundos mientras que los asociados con vibraciones verticales o rotaciones alrededor de ejes horizontales son de 2 a 5 segundos. La estructura es por lo tanto muy flexible en las direcciones horizontales pero rígida verticalmente o en rotación (la rotación esta controlada por las deformaciones axiales de los tendones). Joliet se instalo en el Golfo de México en 1989 en unos 530 m. de agua y Snorre en el mar del Norte en 1992 en unos 300 m. La primera plataforma en aguas verdaderamente profun-

das, de acuerdo con la definición de la época, fue Auger, completada en 1994 en el golfo de México en 870 m. de profundidad de agua. Siguieron rápidamente Mars en 1995 (900 m.) y Ram Powell en 1997 (1000 m.). Auger gano de nuevo el premio del ASCE a la obra de ingeniería mas destacada del año y marco un hito importante en la marcha hacia aguas profundas. Al completarse su instalación la definición se extendió inmediatamente a 2000 metros. Otro tipo de solución la constituyen las llamadas plataformas Spar, que consisten en un solo cilindro de gran calado (del orden de 200 m.) y con un diámetro de unos 30 a 40 metros anclado mediante cables. Las primeras plataformas de este tipo, Neptuno, Génesis y Diana se instalaron a finales de los 90 y principios del siglo XXI en el golfo de México y se han propuesto y proyectado un numero de variantes. En este caso la estructura es flexible en todas las direcciones con periodos fundamentales del orden de 300 segundos en vibración horizontal, 70 segundos en rotación y 30 segundos en vibración vertical. Una ultima solución con estructuras flotantes en la superficie la constituyen los FPSO (“Floating Production, Storage and Offloading Systems”) que son esencialmente barcos petroleros anclados con carácter permanente y modificados internamente para tener todo el equipo de perforación y producción además de la capacidad de almacenaje hasta que se transfiere el

crudo a otro carguero. Los Fosos se han usado extensamente en varias partes del mundo pero su uso estaba prohibido hasta muy recientemente en el golfo de México porque se consideraba que había entre otras cuestiones sin resolver en el caso de un huracán.

Otra alternativa es la instalación del equipo de perforación y quizás incluso una producción parcial (separación de componentes) directamente en el fondo del mar con control remoto y bombeo de los productos por tuberías a plataformas existentes en aguas menos profundas. Las instalaciones Marlim de Petrobras en Brasil y Mensa de Shell en el golfo de México (en mas de 1500 metros de agua) son dos ejemplos de esta modalidad.

El progreso en la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas ha sido espectacular y no cabe duda que este tipo de estructuras han constituido recientemente el mayor desafío al ingenio y creatividad de los ingenieros estructurales. Este progreso ha sido posible gracias a la investigación que se ha llevado a cabo tanto en universidades como en los centros de investigación y desarrollo de las empresas de petróleo. Es de destacar en particular la labor pionera de Petrobras en Brasil y la Shell en los Estados Unidos. La investigación relacionada con el comportamiento de las estructuras y su respuesta a las cargas hidrodinámicas, acompañada de

estudios experimentales en tanques profundos de oleaje, ha resultado en nuevas formulaciones para resolver problemas de hidrodinámica no lineal (tanques virtuales para la simulación numérica de los ensayos de laboratorio o del comportamiento real en el mar). Ha sido complementada con una gran cantidad de estudios y desarrollo de metodologías para caracterizar las propiedades del subsuelo marino e identificar la presencia de hidratos, estudios del comportamiento de materiales nuevos (materiales compuestos con una base de resina epoxy y fibras de vidrio y/o carbono) en el ambiente marino, y desarrollo de nuevos equipos de perforación, bombeo y construcción, remolque e instalación de las plataformas.

2. Fuerzas hidrodinámicas

La acción hidrodinámica del oleaje y las corrientes sobre los elementos de una plataforma marina pueden calcularse usando dos formulaciones diferentes: la ecuación de Morison (Morison et al. 1950) con distintas variantes (Rainey 1989), o teoría de difracción lineal o de orden superior. La ecuación de Morison es de tipo empírico con coeficientes que son función de la forma del objeto sumergido, el numero de Reynolds y la rugosidad. Para un cilindro vertical la fuerza horizontal por unidad de longitud puede expresarse como

$$dF_x = [K_I a_x - K_m a_{xs} + K_D |u_r| u_r + K_m u_r \partial w / \partial z] dz \quad (1)$$

donde:

$$K_I = r C_I A,$$

$$K_D = r C_D R,$$

$$K_m = r C_m A,$$

ρ = densidad del agua,

C_I = coeficiente de inercia,

C_D = coeficiente viscoso,

$$C_m = C_I - 1,$$

A = area de la seccion,

R = radio = mitad del ancho de la proyeccion

a_x = aceleracion total horizontal del agua,

a_{xs} = aceleración de la estructura

u_r = velocidad relativa horizontal = velocidad horizontal - (agua estructura).

Los dos primeros términos representan efectos de inercia. El segundo suele pasarse al otro lado de la ecuación de equilibrio dinámico y constituye una masa añadida de agua. El término siguiente representa las fuerzas de rozamiento debidas a la viscosidad del agua. Es un término no lineal con el producto de la velocidad relativa por su valor absoluto. A menudo se lineariza. En ese caso si se pasa también al otro lado de la ecuación el termino con la velocidad de la estructura, este se puede considerar como un amortiguamiento equivalente (amortiguamiento hidrodinámico). Si no se lineariza pero se supone una variación armónica de las velocidades con una frecuencia ω y se desarrolla en serie habrá

términos en ω y armónicas superiores (3ω , 5ω , etc. y/o 2ω , 4ω , etc. según que haya o no corriente además de oleaje). El ultimo termino se debe a Rainey (Rainey 1989) y se denomina divergencia axial. Es también no lineal e incluye la velocidad relativa horizontal y el gradiente de la velocidad vertical. La solución del problema usando la ecuación de Morison se lleva a cabo en el dominio del tiempo, integrando paso a paso las ecuaciones.

La teoría de difracción se basa en una formulación analítica rigurosa suponiendo un fluido ideal sin viscosidad e incompresible en régimen irrotacional y la existencia, como consecuencia de un potencial de velocidades ϕ , o en este caso 3 potenciales:

$$\phi = \phi_I + \phi_D + \phi_R = \varepsilon(\phi_I^{(1)} + \phi_D^{(1)} + \phi_R^{(1)}) + \varepsilon^2(\phi_I^{(2)} + \phi_D^{(2)} + \phi_R^{(2)}) + \dots \quad (2)$$

donde el primer término representa el potencial de la onda incidente, el segundo el potencial de la onda difractada por un cuerpo fijo y el tercero el potencial de radiación debido al movimiento del cuerpo si no es fijo. En la forma mas sencilla la teoría es lineal lo que representa introducir una serie de aproximaciones. Los efectos no lineales se incorporan usando perturbación y expandiendo la solución en términos de componentes lineales, componentes de segundo orden, componentes de tercer orden, etc. Se habla entonces de teoría de difracción lineal, de segundo orden, de tercer orden etc. según los términos que se conserven. La solución con teoría de difracción suele llevarse a cabo en el dominio de

frecuencias convirtiendo luego a tiempo mediante la transformada de Fourier, pero recientemente se han publicado también soluciones de segundo orden directamente en el dominio del tiempo. Es de notar que la solución lineal requiere solo las funciones de transferencia normales, mientras que una solución de segundo orden requiere además funciones de transferencia cuadráticas (dependientes de dos frecuencias), la solución de tercer orden funciones de transferencia cúbicas (dependientes de tres frecuencias), etc. El calculo de las funciones de transferencia de orden superior se hace mas complejo y costoso al aumentar el orden.

La ecuación de Morison se considera adecuada para cuerpos delgados en los que el diámetro es de un quinto a un décimo de la longitud de onda de las olas, como máximo, y por lo tanto los efectos de difracción (que no se incluyen) son despreciables. Se ha usado normalmente para el calculo de las torres metálicas en aguas someras. La teoría de difracción tiene una base teórica mas sólida e incluye los efectos de difracción pero no los efectos asociados con la viscosidad. Se ha usado principalmente para el cálculo de las plataformas de gravedad del mar del Norte. La determinación de los potenciales de difracción y radiación para cuerpos de geometría arbitraria tiene que llevarse a cabo numéricamente, usando en general el método de elementos de contorno (BEM), que se denominaba en un tiempo método de paneles para esta

aplicación. Para geometrías sencillas como la de un cilindro vertical se pueden obtener analíticamente (MacCamy and Fuchs 1954) incluso con algunos de los términos cuadráticos (Anam 2000). Las plataformas de agua profunda (TLPs y Spars) se han calculado usando ambas teorías e introduciendo términos adicionales en cada una para incorporar, aunque sea de forma aproximada, algunos de los efectos que no incluyen. La teoría de difracción se considera mas apropiada para las TLP por poder incorporar la interacción entre las patas y los pontones a través del agua. Para las Spar con solo un cilindro las dos teorías parecerían en principio aplicables y proporcionan de hecho algunos resultados muy similares. Tienen sin embargo algunas diferencias notables al incluir efectos no lineales.

3. Efectos no lineales

Los términos no lineales en el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas y de la respuesta dinámica de la estructura a estas fuerzas resultan de:

1. el uso de la aceleración total del agua en la ecuación de Morison incluyendo no solo la derivada parcial de la velocidad con respecto al tiempo sino tambien la aceleración convectiva que es en efecto la derivada de la velocidad al cuadrado;
2. el uso de teorías de oleaje no lineales (por ejemplo las llamadas

olas de Stokes de segundo orden), incluyendo la aceleración temporal de los términos de segundo orden en la ecuación de Morison y el potencial de segundo orden en la teoría de difracción;

3. el cálculo de las fuerzas en la posición desplazada de la estructura en cada instante y no en la posición original (como cuerpo fijo). Este efecto es mas facil de reproducir exactamente en la ecuación de Morison mientras que con teoría de difracción solo se aproxima hasta términos de un cierto orden (en general segundo orden);
4. el cálculo de las fuerzas hasta la superficie libre del agua en contacto con la estructura (area mojada) en cada instante. En teoría de difracción esto se considera de nuevo aproximadamente. Con la ecuación de Morison si se usan olas lineales hay que introducir un método aproximado para calcular las velocidades y aceleraciones por encima (o debajo) de la superficie del agua en reposo;
5. el término correspondiente a las fuerzas de fricción en la ecuación de Morison.

Las consecuencias de los términos no lineales se pueden visualizar mejor considerando que para una ola monocromática (con una sola frecuencia) un término $\cos(\omega_1 - \omega_2)t$ de la forma

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t \quad (3)$$

y

$$\cos^2 \omega t = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \quad (4)$$

dan lugar a un término constante y otro con frecuencia doble de la original. Del mismo modo considerando dos olas con frecuencias ω_1 y ω_2

$$\begin{aligned} & (a_1 \sin \omega_1 t + a_2 \sin \omega_2 t)^2 = \\ & = \frac{1}{2} (a_1^2 + a_2^2) - \frac{1}{2} (a_1^2 \cos 2\omega_1 t + \\ & + a_2^2 \cos 2\omega_2 t) + a_1 a_2 (\cos (\omega_1 - \\ & - \omega_2)t - \cos (\omega_1 + \omega_2)t) \end{aligned} \quad (5)$$

aparecen términos constantes, términos con frecuencias dobles de las originales y términos con la diferencia y la suma de las dos frecuencias. Si las frecuencias originales de las olas son muy diferentes de la frecuencia natural de la estructura su amplificación dinámica será muy pequeña (del orden de la unidad si son menores y menos si son mayores). Sin embargo si la suma o la diferencia de las frecuencias son cercanas a la frecuencia natural el término correspondiente se verá grandemente amplificado. Una plataforma estará sometida a tormentas con olas que incluyen la suma de muchas componentes de distintas frecuencias. Los términos cuadráticos darán lugar a componentes resultantes de la suma o diferencia de las frecuencias de dos olas que coincidirán con las frecuencias naturales de la estructura. Para el caso de las plataformas TLP la diferencia entre frecuencias de dos olas afecta a la frecuencia natural en vibración horizontal mientras que la suma de frecuencias

puede afectar las vibraciones verticales. Para las plataformas Spar los términos con diferencia de frecuencias son los que pueden ser importantes y tener grandes amplificaciones si coinciden con las frecuencias naturales.

Del mismo modo si hay términos cúbicos y se considera una combinación de tres o mas olas (con frecuencias ω_p , ω_j , ω_k) se puede ver que aparecerán términos con frecuencias $2\omega_p$, $2\omega_i - \omega_j$, $\omega_i + \omega_j - \omega_k$ y demás variaciones. De nuevo si estas combinaciones coinciden con una de las frecuencias naturales el término correspondiente tendrá una importante amplificación dinámica.

La existencia de estos efectos no lineales y su posible importancia se visualizan mejor obteniendo la transformada de Fourier de la respuesta de la estructura. La figura 1 muestra por ejemplo el espectro de Fourier (amplitudes) de la respuesta de una plataforma Spar a una tormenta caracterizada por un espectro JONSWAP. Las amplitudes de las olas están en el campo de frecuencias entre 0,3 y 0,8 radianes por segundo (0,05 y 0,13 Hz, o periodos entre 7 y 20 segundos) con un máximo a 0,4 rad/seg (0,07 Hz, o un periodo de 14 segundos). Se puede ver claramente que la respuesta tiene componentes en este mismo rango de frecuencias y que son muy semejantes para la solución obtenida usando la ecuación de Morison y la de teoría de difracción. Estas componentes representan la respuesta lineal.

Hay además otros dos picos importantes: uno a la frecuencia natural horizontal (del orden de 0.02 rad/seg correspondiente a un periodo de 330 segundos), el segundo a la frecuencia natural en rotación (aproximadamente 0.095 rad/seg correspondiente a un periodo del orden de 66 segundos). Estos dos picos representan la respuesta no lineal. Puede observarse que las amplitudes de estos picos obtenidas con la ecuación de Morison son 3,074 y 3,217 m. respectivamente, mientras que la teoría de difracción predice valores de 3,905 y 1,852 m., un 30 % mayor a la frecuencia horizontal y un 45 % menor a la de rotación. La combinación de todas estas componentes produce amplitudes máximas de los desplazamientos similares para los dos enfoques pero su contenido de frecuencias es diferente.

4. Importancia relativa de efectos no lineales

Como se mencionó antes en el caso de una plataforma TLP los terminos con sumas de frecuencias pueden afectar la respuesta vertical mientras que aquellos con diferencias de frecuencias son importantes para el cálculo de las vibraciones horizontales. Los primeros pueden dar lugar a vibraciones verticales con gran amplitud en régimen permanente (fenómeno conocido como “springing”) o de carácter transitorio al paso de una ola no lineal de mayor altura que las anteriores (fenómeno conocido como

“ringing”). Estos dos aspectos han sido objeto de gran cantidad de estudios y particularmente el ultimo, observado inicialmente en un experimento en tanque profundo de oleaje. Estos estudios parecen indicar que para reproducir numéricamente el efecto de “ringing” es necesario tomar en cuenta no linealidades de orden mayor que 2.

Mekha (1994) condujo una serie de estudios de TLPs para identificar la importancia relativa de los distintos términos no lineales. En base a estos estudios Mekha concluyó que:

1. en la dirección horizontal la aceleración convectiva no parece tener gran efecto;
2. el efecto de calcular las fuerzas en cada instante hasta la superficie libre del agua es importante cuando se usan extrapolaciones (constante, lineal, o hiperbólica) para calcular las velocidades y aceleraciones del agua o cuando se usan olas de segundo orden (o mayor) y se calculan las velocida-

des y aceleraciones consistentemente. Es despreciable cuando se usan otras aproximaciones como el método de Wheeler (1969);

3. el calculo de las fuerzas en la posición desplazada de la estructura en cada instante afecta de forma importante el valor medio del desplazamiento (el llamado “static offset”) pero el espaciamiento entre las columnas juega también un papel importante. Tomar en cuenta la posición deformada afecta también los esfuerzos en los tendones dando lugar a términos de segundo orden con frecuencias altas (suma de frecuencias);
4. las vibraciones horizontales estan controladas fundamentalmente por los efectos de inercia. Las fuerzas de rozamiento debidas a la viscosidad representan un 10 a 15% en esta dirección pero su importancia aumenta en la dirección vertical (donde pueden

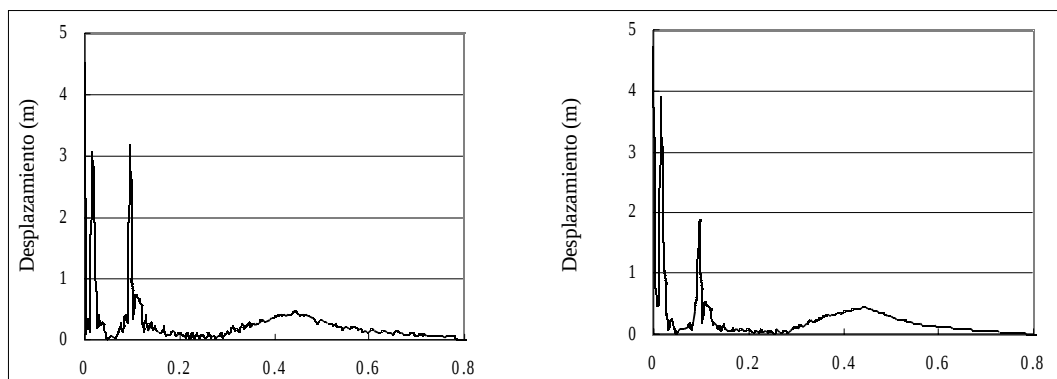


Figura 1: Respuesta horizontal a ola con espectro JONSWAP Ecuacion de Morison y Teoria de Difraccion.

llegar a ser un 20 a un 30% de la respuesta);

5. los pontones contribuyen a la estabilidad de la estructura y son de particular importancia en la vibración vertical y en el cálculo de los esfuerzos en los tendones.

Anam (2000) condujo una serie exhaustiva de estudios con plataformas tipo Spar comparando los resultados obtenidos con una formulación tipo Morison (añadiendo términos de teoría de difracción), con la misma formulación pero limitada a términos de segundo orden y con teoría de difracción de segundo orden. La figura 1 presenta algunos re-

sultados bajo la acción de una tormenta (ola irregular) con espectro JONSWAP. Las figuras 2 a 5 muestran el espectro de amplitudes de Fourier del desplazamiento horizontal de la plataforma bajo la acción de dos olas con frecuencias de 0,44 y 5,69 rad/seg (periodos de 12 y 14,3 segundos), usando la ecuación de Morison y teoría de difracción e incluyendo por separado los distintos efectos no lineales (geometría desplazada, aceleración convectiva, cálculo hasta la superficie libre del agua, y aceleración temporal de segundo orden). La diferencia entre las frecuencias de las dos olas es cercana a la frecuencia natural de rotación pero no idéntica. Puede verse en estas figuras que hay dos picos a las

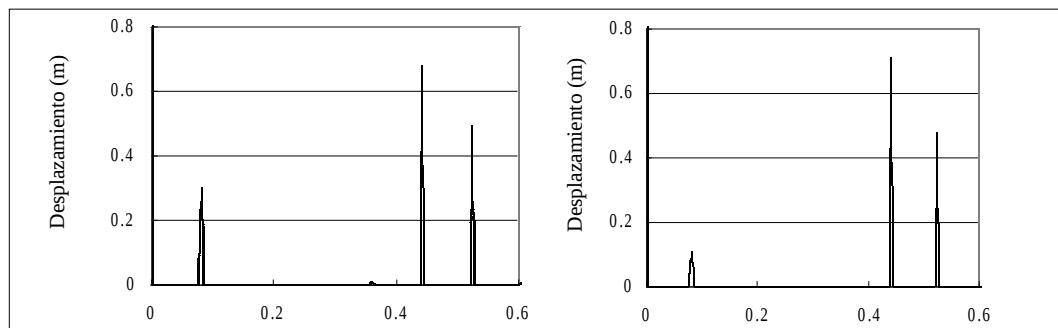


Figura 2: Efecto del calculo en la posicion desplazada. Ecuacion de Morison y Teoria de Difraccion. Ola Bicromatica.

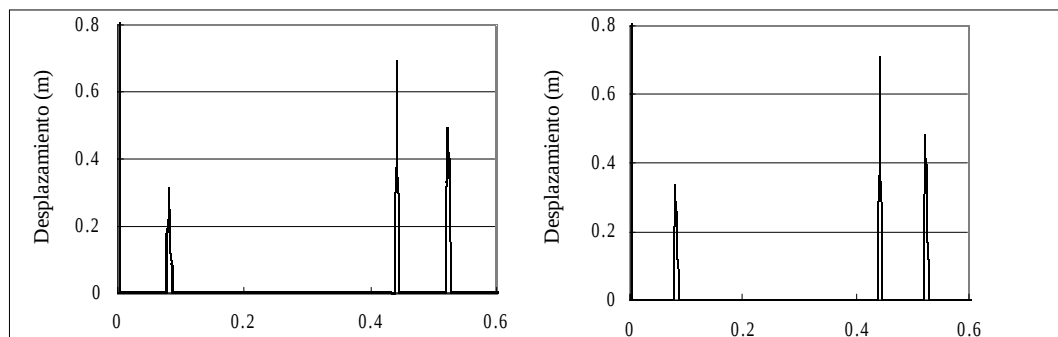


Figura 3: Efecto de la aceleracion convectiva. Ola Bicromatica.

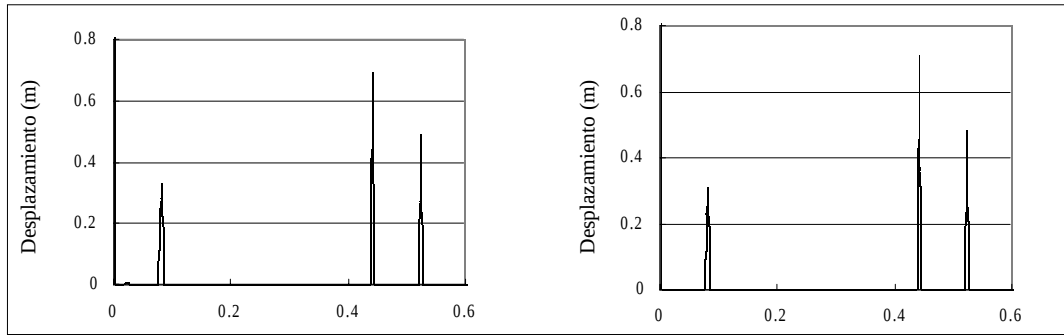


Figura 4: Efecto del calculo hasta la superficie libre del agua instantanea. Ola Bicromatica.

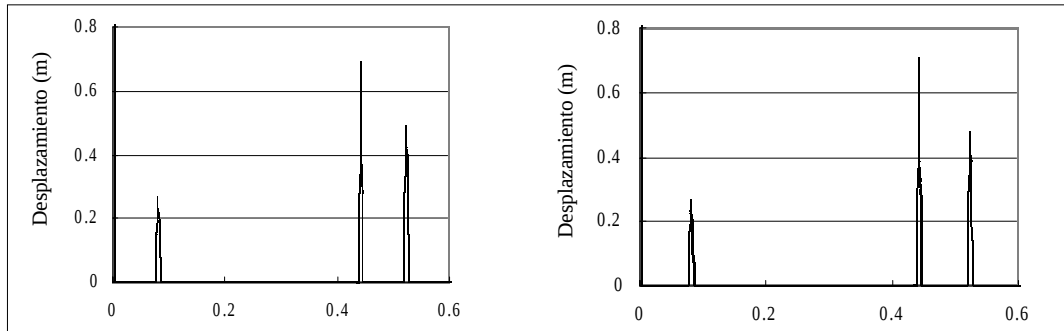


Figura 5: Efecto de la aceleracion temporal de segundoorden. Ola Bicromatica.

frecuencias de las olas que tienen amplitudes muy similares con las dos formulaciones. Representan la respuesta lineal. El tercer pico (el primero en las figuras), a la diferencia de las dos frecuencias, corresponde a los efectos no lineales. Puede verse que excepto por el efecto de la geometría desplazada las amplitudes del pico a la diferencia de las frecuencias calculadas por las dos formulaciones son muy similares.

Cabe notar también que estas amplitudes son del mismo orden para cada uno de los efectos cuando se usa la ecuación de Morison pero la correspondiente al calculo de las fuerzas en la posición deformada es mucho menor con teoría de

difracción. Es interesante mirar no solo a las amplitudes de estas componentes pero también a sus fases. Usando variables complejas si llamamos A a la amplitud y ϕ al ángulo de fase de la componente la parte real es $A \cos \phi$ y la parte imaginaria $A \sin \phi$. Las tablas 1 y 2 muestran las partes real e imaginaria de las componentes del desplazamiento horizontal y la rotación a la diferencia de frecuencias, consecuencia de cada uno de los efectos no lineales, usando las dos formulaciones. Puede verse que el efecto de la aceleración convectiva es del mismo orden que los otros para la solución de Morison pero de signo contrario y tiende a cancelar por ello uno de

los otros efectos. Si el cálculo se llevara a cabo tomando en cuenta solo los dos primeros efectos el resultado seria muy parecido al obtenido con la solución lineal. Al incluir los tres primeros efectos el resultado es semejante al que se obtendría incluyendo solo el primer efecto. Es de notar también que con esta solución la relación de la parte real a la parte imaginaria es prácticamente la misma para todos los efectos (el ángulo de fase es similar para todos). Usando en

cambio teoría de difracción esto ya no es cierto y los ángulos de fase son muy diferentes para los distintos efectos. Como consecuencia la combinación de todos los efectos produce resultados finales muy diferentes para las dos formulaciones. La amplitud del primer pico al incorporar todos los efectos es 0,590 m en dirección horizontal y 1,05 grados con Morison y solo 0,388 m. y 0,704 grds respectivamente con teoría de difracción.

Tabla 1: Efectos no lineales (Ecuación de Morison).

Efecto	Re-Hor (m)	Im-Hor (m)	Re-Rot (grados)	Im-Rot(grados)
Geom.	0.139	0.275	-0.282	-0.608
Acel. Conv.	-0.155	-0.277	0.310	0.598
Sup. libre	0.154	0.291	-0.373	-0.757
Acel. Temp2	0.137	0.233	-0.098	-0.182
Total	0.275	0.522	-0.443	-0.949

Tabla 2: Efectos no lineales (Difracción).

Efecto	Re-Hor (m)	Im-Hor(m)	Re-Rot (grados)	Im-Rot(grds)
Geom.	0.102	0.041	-0.198	-0.107
Acel. Conv..	-0.298	-0.156	0.684	0.310
Sup. libre	0.116	0.289	-0.282	-0.746
Acel. Temp2	0.180	0.201	-0.133	-0.158
Total	0.100	0.375	0.071	-0.701

5. Conclusiones

Las plataformas flotantes de aguas profundas tienen periodos propios mucho mas largos que los periodos predominantes del oleaje en todos los casos en la dirección horizontal y en la dirección vertical (y para rotación) cuando no están ancladas con tirantes verticales en tensión. Como consecuencia se trata de estructuras muy flexibles y la amplificación dinámica de las fuerzas de oleaje es mucho menor que la unidad en el campo lineal. Hay sin embargo efectos no lineales que dan lugar a componentes a diferencias y sumas de frecuencias que pueden tener importantes amplificaciones y que deberían tomarse en cuenta al calcular la respuesta dinámica, Los efectos de calcular las fuerzas hidrodinámicas en la posición desplazada de la estructura, de integrar hasta la superficie libre del agua tomando en cuenta el paso de la ola, de incluir la aceleración convectiva y la aceleración temporal de los términos de orden superior con olas no lineales pueden ser todos de orden similar y algunos de signo contrario por lo que hay que evitar incluir unos y despreciar otros. Los estudios llevados a cabo indican también que aun cuando la ecuación de Morison y la teoría de difracción producen resultados casi idénticos para cuerpos delgados en el régimen lineal esto ya no es cierto para los efectos no lineales.

Referencias

- Anam, I. (2000). *Evaluation of the dynamic response of Spar platforms*. Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, TX.
- MacCamy, R. C. and Fuchs, R. A. (1954). Wave forces on piles: a diffraction theory. *Tech. Memo.* 69, Beach Erosion Board.
- Mekha, B. B. (1994). *Nonlinear dynamic responses of tension leg platforms*. Report B5875, Offshore Technology Research Center.
- Morison, J. R.; O'Brien, M. P.; Johnson, J. W. and Shaaf, S. A. (1950). The force exerted by surface waves on piles. *Pet. Trans.*, v. 189, p. 149-157.
- Rainey, R. C. T. (1989). A new equation for calculating wave loads on offshore structures. *J. Fluid Mech.*, v. 204, p. 295-324.
- Wheeler, J. D. (1969). Method for calculating forces produced by irregular waves. *Proceedings of the First Offshore Technology Conference*, Houston, Texas OTC 1006.

Dynamics of deepwater offshore platforms

Abstract

In just 50 years, the offshore industry has been able to extend the production of oil from some 6m. of water to over 1000 m. with surface piercing structures and over 1500 m. with subsea completion systems.. In this process, the industry has designed, fabricated, and installed platforms which have defied the imagination of structural engineers and which have gained repeatedly the award for civil engineering accomplishment of the year. The purpose of this paper is to review briefly the historical evolution of offshore oil production, with special emphasis on the recent march towards very deep waters, and to discuss some of the nonlinear dynamic effects in the response of these structures.

Keywords: Deepwater drilling and production platforms; deep water; floating platforms; hydrodynamic forces; dynamics; nonlinear effects.

1. Historical background

The first steel platform out of sight of land was erected in 1947 in some 6 m. of water off the Louisiana coast. The water depths at which platforms were installed increased steadily, and at a fast pace. By 1955, a platform had been installed in some 30 m.. of water. The water depth increased to 260 m. ft. in 1976 (the Hondo platform), 300 m.. in 1978 (the Cognac platform) and 430 m. ft. in 1988 (the Bullwinkle platform). All of these offshore platforms were steel jacket structures. In 1959, with the discovery of the Groningen gas field, the existence of important hydrocarbon deposits in the North Sea was clearly recognized and in the 1970's the production of petroleum proceeded in earnest. The much harsher environmental conditions of the North Sea, the existence of stiffer soils in the sea bottom, and the increased familiarity of European countries with concrete construction led to the use of concrete gravity structures as an alternative (or complement) to the conventional steel jackets. In 1984 Conoco completed the Hutton platform, a tension leg platform (TLP). Although Hutton was installed in only 150 m. of

water in the North Sea, the TLP would become one of the most important solutions for deep water in the Gulf of Mexico in the following years.

Offshore platforms must be designed, as most other structures, for gravity forces (dead and live load), wind, and in some cases ice and snow, as well as seismic excitation. They are subjected also to hydrodynamic loads caused by waves and currents that make them different from other civil engineering structures. These loads are of a dynamic nature. They are also nonlinear, which further complicates the problem. Yet, shallow water steel jacket platforms were normally designed considering only static loads. This was possible because these structures were very stiff with respect to the excitation. For increasing water depths, however, the natural period of conventional steel jackets would approach the period of the design waves and dynamic amplifications would be very large. It was thus necessary to devise structural solutions with smaller dynamic effects and the answer was to make structures much more flexible. This led to guyed towers (Exxon's Lena 1983), or compliant towers. An alternative is to use floating bodies tied to the subsea through vertical tethers (connected to tension piles), mooring lines (catenary or taut moorings) or a combination of both. Tension leg platforms and Spars are examples of this type of structures. So are

semisubmersibles (floating production systems) and floating production storage and offloading systems (FPSOs), which normally consist of anchored tankers appropriately modified. A third alternative is the installation of the 'Christmas trees' in the sea-bottom. The Marlim project of Petrobras in Brazil and the Mensa project of Shell in the Gulf of Mexico) are examples of subsea completions.

2. Hydrodynamic forces

There are two main approaches to simulate the hydrodynamic forces on offshore platforms: Morison's equation and diffraction theory. The former is of an empirical nature. It ignores diffraction effects and is therefore only applicable for slender bodies, with diameter smaller than 0.2 of the wavelength of the waves. It incorporates however nonlinear drag forces due to the water's viscosity. It has been used for the analysis of steel jacket platforms. Diffraction theory has a solid theoretical basis for an ideal fluid (inviscid and incompressible) and irrotational flow. The solution is expressed in terms of the sum of a potential for the incident waves, a diffraction potential (effect of a fixed body), and a radiation potential (effect of a moving body). Nonlinear effects are accounted for using perturbation theory expanding the solution in series with first, second order potentials, etc.

Usually only second order terms are included. The potentials are computed numerically in the general case) but can be obtained analytically for simple geometries like a vertical cylinder. Diffraction theory has been used for gravity platforms. The analysis of floating platforms such as TLPs or Spars is carried out using either of the two formulations. For TLPs diffraction theory is able to reproduce the interaction between the columns and the pontoons. Spars are slender bodies and it is assumed that both approaches should be equivalent.

3. Nonlinear effects

Nonlinear effects result from the computation of the forces at each instant in the displaced position of the platform, the integration up to the instantaneous free surface of the water, the computation of the water particle acceleration including the convective acceleration, the use of second or higher order wave theories, and the drag term in Morison's equation. Nonlinear expressions lead to terms with frequencies that are the sum and difference of the frequencies of the

different wave components. Thus even if the frequencies of the individual waves are far removed from the natural frequencies of the structure there can be significant amplifications of these terms if the difference (or sum) frequencies are close to the fundamental structural frequencies.

4. Conclusions

The results of a large number of studies show that the various nonlinear effects can be of similar importance but may have opposite signs and cancel each other. They also show that while the amplitudes of the components due to the nonlinear effects predicted by Morison's equation and diffraction theory may be very similar (except for the effect of the displaced geometry) their phases can be very different. As a consequence the final amplitudes obtained by both approaches when all effects are combined can have larger differences. It is interesting to notice that while the linear components of the response obtained by the two formulations can be very similar for slender bodies this may not be so for the nonlinear effects.