



por el M. en Ing. Jorge Meyer Corral,
Consultor.



En Estructuras Marinas y la Posible Medida de Mitigación de las Alturas de Ola.

1 CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL

Las estructuras marinas en general se diseñan estructuralmente, tomando en cuenta oleajes, viento, mareas de viento, sismos y tsunamis.

El cambio climático posiblemente afecte el diseño de futuras estructuras y los coeficientes de seguridad de las ya construidas.

En este trabajo nos referimos a la afectación del cambio climático, en cuanto a los oleajes de diseño utilizados en el pasado y por utilizarse en el futuro.

En general, salvo casos particulares, las olas de diseño son generadas por ciclones.

Para la estimación de las olas ciclónicas se han empleado en nuestro país principalmente métodos estadísticos, como el del Dr. Rolando Springall (Referencia 1), o el adoptar ciclones específicos de características conocidas o deducidas, como ciclón de diseño.

Los métodos estadísticos nos pueden dar una mejor información sobre las peores condiciones de oleaje que deben considerarse, para un ciclón de diseño, de acuerdo al tipo de estructura y localización de la misma.

Los métodos estadísticos consideran los posibles vientos máximos a esperar en una región, los radios de vientos máximos medidos desde el centro del ciclón, así como los vientos a cualquier radio medido desde el centro del ciclón y así poder considerar los fetches que puedan producir los oleajes mas desfavorables para la obra a diseñar.

En este trabajo utilizaremos el método estadístico de Sprigall, con algunas modificaciones realizadas por el autor, tomando en cuenta datos meteorológicos recientes y publicados por el "National Hurricane Center" (NHC), de los Estados Unidos y que obtuvimos para las costas de Estados Unidos del Golfo de México y Océano Atlántico, para las cuales es aplicable el método indicado.

Springall publicó su trabajo en 1975; los datos obtenidos del NHC abarcan el periodo del año 1851 al 2005. Estos últimos datos incluyen las trayectorias de los ciclones desde los años 1931 al 2005.

Los reportes de NHC dan la presión en el centro del huracán, medida o deducida, al entrar este en la costa. De 1980 al 2005, reportan la velocidad del viento sostenido y a 10.00 m de altura, en el mismo sitio.

Nuestro trabajo se enfocara a obras costa afuera, con profundidades relativamente grandes, del orden de 50 a 100 m y a la latitud de 20 grados Norte, en el Golfo de México. Es decir nos concretamos a plataformas marinas del Golfo de Campeche.

El método de Springall reduce las variables requeridas para estimar las olas máximas posibles, que pudieran afectar dichas plataformas, a las siguientes:

- Presión mínima en el centro del ciclón, Po.
- Latitud en el centro del ciclón, estudiamos solo 20 grados Norte.
- Velocidad de desplazamiento del ciclón, Vd.



Con estas características es factible deducir, mediante el método, el resto de las variables, tales como velocidad de viento máximo, radio de viento máximo y características y duración del oleaje.

De acuerdo a Springall para la latitud mencionada, las características estándar de diseño son:

$$P_o \text{ min} = 27 \text{ pulgadas de mercurio.}$$

$$V_d = 14 \text{ nudos.}$$

En lo que sigue respetaremos las unidades empleadas por Springall.

2 PRESIONES MÍNIMAS REPORTADAS POR NHC

$P_o \text{ min} = 26.34$, observada o deducida para el ciclón "Labor Day", de 1935 en Florida a una latitud 30 grados Norte. Este dato puede ser poco confiable por la época para el cual el valor de P_o , fue posiblemente inferido.

$P_o = 26.85$ observada a 30 grados Norte en las costas de Florida, durante la ocurrencia del ciclón "Camille", en 1969.

Debemos señalar que la presión P_o aumenta con la latitud. De ello podemos decir que cuando los anteriores dos ciclones se encontraban en la latitud de 20 grados Norte, debieron tener aun menor presión en el centro del huracán, que la observada o deducida en las costas de Florida, tal como lo muestra la figura 2.10 del trabajo de Springall. Podemos concluir que los valores P_o , recomendados por Springall no deben aplicarse a estructuras mar afuera, donde los oleajes máximos extraordinarios, con periodos de 100 años, pueden ser mucho mayores.

3 ¿PUEDE EL CAMBIO CLIMÁTICO AFECTAR LOS VALORES DE P_o Y LA ENERGÍA DE LOS CICLONES?

De acuerdo con lo indicado en el inciso anterior pareciera que no, pues la menor presión en el centro de un ciclón se pudo dar aparentemente en 1935 o en 1969.

Sin embargo, si tomamos en cuenta los valores reportados por el NHC en los últimos años tenemos duda al respecto, ya que la disminución de presiones en el centro, son debidas precisamente a los incrementos de temperatura en los trópicos.

Si tomamos los datos de ciclones observados en las costas de Texas hasta Florida, de la presión mínima anual medida, desde los años 1999 al 2005, observamos lo siguiente:

1999 $P_o = 28.09"$
 2000 No hay reporte.
 2001 No hay reporte
 2002 $P_o = 28.44"$
 2003 $P_o = 28.26"$
 2004 $P_o = 27.79"$
 2005 $P_o = 27.17"$

Estos datos, parecen indicar que el cambio climático si afectó los valores de P_o y el aumento de energía de los ciclones.

Sin embargo, estos últimos datos no pueden considerarse concluyentes; por ello nos avocamos a calcular el que llamaremos el índice de energía anual.

Este índice es proporcional a la suma de las energías de todos los ciclones generados en el Atlántico y Golfo de México y que arribaron a las costas del Golfo y del Atlántico de los Estados Unidos.

Los datos requeridos los obtuvimos de los reportes de NHC y se refieren, como antes se dijo, a datos medidos o deducidos al arribar el ciclón a la costa. Solo se tomaron en cuenta los datos reportados de 1980 al 2005, que se consideran con mayor grado de confiabilidad.

El índice de energía anual "IEA" es la suma del índice de energía "IE" de todos los ciclones reportados en un año.

$$IE = (\text{energía del ciclón} \times \text{seno de la latitud})^{1/3} / 13,913.00$$

Como prácticamente todos los ciclones de mayor categoría o energía, arribaron a la costa a la latitud de 30 grados Norte, puede considerarse que el IEA es proporcional a la energía que llegó en un año a las costas de Estados Unidos, del Golfo de México y del Atlántico.

Indicamos solo los años con mayor valor del IEA, de 1980 al 2005. Los años que no se indican en la tabla siguiente, dan valores del IEA menores a los señalados.

Año	1985	1989	1999	2004	2005
IEA	65.35	34.33	37.57	84.06	84.41

El cambio climático parece que si ha influido en el número y categoría o energía de los ciclones que se presentan año con año en la región. De 1985 al 2005 ha aumentado la energía anual de los huracanes en un 30%. Ello posiblemente debido al cambio climático.

Los ciclones con categoría 1 a 5 en los años 2004 y 2005 fueron seis, numero no reportado desde el año 1985, año en el que también se reportan seis eventos.

4 CONDICIONES DE ESTABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS FUERA DE LA COSTA DISEÑADAS EN LOS AÑOS 80 A 90'S DEL SIGLO PASADO

Dichas plataformas, desplantadas en profundidades del orden de los 80 m, consideraban alturas de ola del orden de los 17.00 m.

Si consideramos que las estructuras deberían resistir los oleajes máximos posibles, en las condiciones más desfavorables en cuanto a grado o intensidad del ciclón, dirección de desplazamiento y posición mas desfavorable de la estructura en relación a la posición del ciclón, concluimos lo siguiente.

Las olas máximas que pudieron producir los ciclones de 1935 y de 1969, corrigiendo la presión central con la latitud, de acuerdo a lo propuesto por Springall, serían:

Ciclón "Labor Day" de 1935:

Altura Máxima posible $H_{max} = 31.75$ m. Periodo significativo $T_s = 15.58$ seg.

Ciclón "Camille" de 1969:

Altura Máxima posible $H_{max} = 29.75$ m. Periodo significativo $T_s = 15.03$ seg.

Estos oleajes se pudieron presentar con un periodo de retorno de 100 años.

Si consideramos que una plataforma marina debe diseñarse para un oleaje con periodo de retorno de 100 años, podemos pensar que las estructuras de las plataformas diseñadas en los años 80 y 90 o anteriores, pueden estar en riesgo de colapso.

Como dato importante debemos recordar que las plataformas del Mar del Norte se diseñaron para olas con altura máxima cercana a los 30 m.

De lo anterior parece necesario sobre-elevar y reforzar las plataformas o bien tratar de mitigar el posible oleaje a que puedan estar sujetas.

5 POSIBLES MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL OLEAJE

Se estima que como elementos de mitigación de los oleajes generados se podrían usar cualquiera de los siguientes:

- Rompeolas Neumáticos
- Rompeolas Sumergidos
- Rompeolas Flotantes

Consideramos que los rompeolas neumáticos son los más apropiados y posiblemente los más económicos, para casos especiales como las plataformas costa afuera. Por tanto, a continuación se abunda sobre este tipo de elementos.

6 ROMPEOLAS NEUMÁTICOS

Como ventajas de los rompeolas neumáticos anotamos:

- Este tipo de aparato puede modificarse de posición de acuerdo a la

dirección de las olas esperadas.

- No es necesaria la suspensión de operaciones en la plataforma.
- La construcción se puede realizar en tierra y transportar flotando, a la posición deseada.
- Permite mitigar el oleaje en cualquier momento, para facilitar operaciones tales como carga de crudo, amarre de embarcaciones, etc.
- Su operación no es permanente, solo operará el artefacto en los momentos en que se desee mitigar el oleaje, por lo que sus costos de operación son mínimos.

6.1. Antecedentes de los Rompeolas Neumáticos.

El primer artefacto fue construido en 1915 por Bracher y funcionó para proteger un muelle previamente dañado, en California.

En 1959 el Engineering News Record, reporta los resultados obtenidos con un artefacto similar, a la entrada del puerto para ferries de Dover.

El ancho de la entrada se protegió en su totalidad, esto es, en 91.44 m.

Un oleaje de 3.66 m de altura y longitud de 24.40 m, se dispó al 50% en altura.

La profundidad en la bocana era de 8.00 m.

La inyección de aire se hacía por dos tubos horizontales de 91.44 m de longitud, diámetro de 3.81 cm, separados entre si en 30.5 m y colocados en el fondo de la bocana y en todo su ancho.

A este tubo horizontal estaban conectadas las toberas verticales de inyección de 1.27 cm de diámetro separadas cada 2.14 m entre si.

Se inyectaban 3,000 pies cúbicos por minuto a una presión de 30 psi, para lo cual estimamos una potencia requerida en compresores de 245 HP.

Dicha potencia equivale al 5% de la potencia de la ola, antes mencionada, que entraba al puerto de Dover y con la cual se mitigaba la altura de ola al 50%.

6.2. Estudios en Modelos Hidráulicos Reducidos

Estos estudios tenían por objeto el entendimiento del sistema y dar los principios para su diseño racional, que no se había utilizado en los casos antes mencionados.

En los países bajos, Thijse llega a la conclusión de que los chorros de aire forman un vórtice, que en forma de contracorriente, disipa el oleaje, pero el volumen de aire requerido hace impracticable el sistema.

Carr en California llega a la misma conclusión.

Evans en 1952, en Inglaterra, llega a la misma conclusión de los holandeses, aunque reconoce que el aire por efecto de turbulencia y creando fricción entre partículas de aire y agua ayuda a la mitigación. Considera que es lo mismo crear los vórtices con chorros de aire o de agua.

En 1955, Hensen (Referencia 2), en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Hannover, llega a conclusiones importantes:

- No es válida la ley de semejanza de Froude para interpretar los resultados de un modelo, para diseñar un prototipo de mayores dimensiones.
- Si se toman en cuenta los resultados en modelo y los resultados mencionados en Dover. Los resultados del modelo aplicados a Dover darían como resultado, que se requeriría un gasto de aire 100 veces mayor al realmente requerido, para mitigar el oleaje mencionado al 50%.
- El sistema es mas efectivo para esbelteces de ola (relación altura a longitud de ola) mayores de 0.15. Es decir olas a punto de romper.
- Llega a la conclusión que en un modelo reducido la disipación es por el efecto de vórtice, en tanto en los prototipos, como el de Dover, o a mayores profundidades, la mitigación se debe fundamentalmente a efectos viscosos, es decir a disipación por fricción entre aire y agua a través de la turbulencia generada por el aire.

Entre los años de 1952 y 1956, investigadores japoneses realizan un estudio teórico experimental en modelo y prototipo, del cual no se tiene reporte, salvo información proporcionada por el mismo Hensen.

Además de comprobar las deducciones de Hensen en cuanto al principio de funcionamiento del sistema, de que la turbulencia y la fricción o efectos viscosos son los causantes de la mitigación en los prototipos, establecen un numero adimensional, que representa la densidad o cantidad de burbujas de aire en relación al volumen de agua. Este número adimensional es: -0.5 a -1.5

$$J = q g^{-0.5} D^{-1.5}$$

q = gasto de aire por metro de rompeolas, m^3/seg .

g = aceleración de la gravedad, m/seg^2 .

D = profundidad en metros.

6.3. Método Preliminar para el Diseño de un Rompeolas Neumático

La diferencia de densidades entre el aire y el agua y la presión de inyección son los responsables de la velocidad de ascenso del aire y por tanto de la turbulencia y la mitigación por fricción.

De acuerdo a la experiencia en **Dover**, donde se tenía un tirante de agua de 8.00 m, la presión de inyección debe ser del orden del doble de la presión hidrostática sobre el tubo de inyección colocado en el fondo.

En los modelos hidráulicos para una mitigación del 50% en altura de ola, el numero "J" debía ser del orden de 10 a la menos dos, en tanto en Dover dicho numero adimensional era del orden 10 a la menos cuatro. Es decir cien veces menor. Posiblemente para prototipos a mayores profundidades, el numero "J" podría ser aun menor.

Como primera aproximación, en forma conservadora, para evaluar la factibilidad de un rompeolas neumático, para proteger una plataforma a 80 m de profundidad, utilizaremos el valor de "J" de Dover, para diseñar y cuantificar el aire requerido para proteger la plataforma.

Ello significa que utilizaremos la igualdad en los números adimensionales "J" para establecer las leyes de semejanza y las escalas obtenidas de la igualación del numero "J", para estimar el gasto requerido para un prototipo a mayor profundidad que el de Dover; este último se considera como el modelo reducido.

La aceleración de la gravedad permanece igual en modelo y prototipo.

Consideramos como prototipo una plataforma marina con un tirante de agua de 80 m, sujeta a un oleaje de 32 m de altura y longitud de onda de 228 m.

De acuerdo con Danell, en una comunicación de la Sociedad Hidrodinámica de Francia, para una relación profundidad a longitud de onda mayor a 0.30, la ola rompe cuando la relación altura de ola a profundidad es de 0.14.

En nuestro caso $D / L = 80 / 228 = 0.35 > 0.30$ y $H // L = 32 / 228 = 0.14$

Esto significa que esta ola esta en estado de rompiente al alcanzar la profundidad de 80 m y cumple con lo encontrado por Hensen. Además, es una ola que si puede generarse con las condiciones mas desfavorables, con un ciclón como el de "Labor Day" de 1935 y que tiene un periodo de recurrencia de 100 años.

La escala de líneas y de gastos de aire resultan de igualar los valores de "J" en prototipo (la plataforma) y en modelo (Dover).

La escala de líneas y de presiones, resulta:

$$Le = 80 / 8 = 10$$

La escala de gastos de aire resulta: $Qe = Le^{1.5} = 31.62$

Para el caso de la plataforma como prototipo se requiere de un gasto aire de de 1,037 pies cúbicos por minuto por metro de rompeolas neumático.

Supongamos, que se quieren proteger las columnas de la plataforma en un ancho de 100 m, igual a la longitud de los tubos de inyección.

Resultaría un gasto total de aire de 103,700 pies cúbicos por minuto.

La presión requerida sería de $30 \times 10 = 300$ psi.

Elo significa que se requiere de una potencia en compresores

$$\text{De } 70,000.00 \text{ HP} = 51,520 \text{ Kw.}$$

La potencia de la ola considerada, es de 17,226.00 HP por metro.

En este caso, la relación potencia de compresores a potencia de la ola resulta del 4.1%, para proteger 100 m de subestructura de la plataforma.

La amortiguación igual que en Dover sería del 50% en altura.

Es decir la ola de 32 m de altura se reduciría a 16 m. Menor que la altura de diseño de 17 m, con lo que se aseguraría la estabilidad y se evitaría la inundación de los niveles inferiores de operación de la plataforma.

7 CONCLUSIONES

El cambio climático parece que si afecta la energía acumulada de todos los ciclones que se presentan anualmente.

En un futuro, si no se controla el cambio climático, habrá que incluir una categoría 6, en escala Saffir-Simpson.

En dicho caso se incrementarían las velocidades del viento y por lo tanto las alturas de ola generadas por estos eventos.

Habría que revisar las estructuras marinas actuales, sobre todo las plataformas costa afuera y reforzarlas o tratar de mitigar los oleajes.

Otro problema, que no hemos mencionado, es el aumento en altura de las mareas de viento generadas por los ciclones y que afectarán tanto a las estructuras marinas como a los asentamientos costeros en forma desfavorable.

Los rompeolas neumáticos, para proteger algunas obras marítimas, son técnicamente factibles, aunque habría que profundizar en el estudio de los mismos, para establecer mejores lineamientos para su diseño. Posiblemente construyendo prototipos a diferentes profundidades mayores a los 8 m de Dover y midiendo los gastos de aire requeridos para diferentes porcentajes de amortiguación, con diferentes características del oleaje.

Importante sería conocer los valores de "J" requeridos a diferentes profundidades.

Desde el punto de vista económico y ambiental habría que evaluar el costo de estos artefactos y los beneficios que se obtendrían al evitar la falla de una plataforma, tanto desde el punto de vista de los costos de la estructura, las pérdidas de producción y el efecto de la posible contaminación del mar.

Referencias

- 1.- Estudio y Análisis Estadístico del Oleaje Generado por Huracanes en el Suroeste del Golfo de México. Rolando Springall G. 1975, Publicación del Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.
- 2.- Erprobung Von Pneumatischen Wellenbrecher im Modell und in Der Natur. Hensen, 1957, Mitteilungen des Franzius Instut, der Technischen Hochschule, Hannover.
- 3.- Oceanographical Engineering. Wiegel, 1964, Prentice Hall Inc.

DE LA FOTOGRAFÍA PORTUARIA, MARÍTIMA Y COSTERA

Publicación con vocación

La importancia de las imágenes.

No las archives,
Comparte con Noticias AMIP
aquella **fotografía especial**
y que esté relacionada con el medio
portuario, marítimo y costero.

Envíala a nuestro correo
boletinnamip@prodigy.net.mx
con tus datos generales y
una breve descripción del sitio
en el que fue tomada.



Desarrollo en dos vías de navegación.
Embarcaciones car carrier en el canal
de acceso del Puerto de Veracruz.

Fotografía enviada por
Cuahtemoc Méndez Cortés.



Oleaje de fondo rebasando el muro
deflector del oleaje en el
Puerto de Ensenada.

Fotografía enviada por
Miguel Angel Cordero Olleguín.