

EVALUACION ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS MARINAS PARA LA EXPLOTACION DE HIDROCARBUROS

Oscar Valle Molina y J. Efraín Rodríguez Sánchez Instituto Mexicano del Petróleo

RESUMEN

Se presenta la identificación de las causas que originan una evaluación así como las categorías de exposición definidas tomando en cuenta la seguridad de la vida humana y el impacto ambiental, por otra parte se establece la información necesaria para realizar una evaluación y se explican los tipos de análisis para satisfacer los requerimientos de seguridad establecidos dependiendo de la categoría de exposición. Se enuncian las posibles medidas mitigantes que pueden implementarse en caso de no cumplirse con los requisitos de seguridad. Por último se comenta el análisis de costos para decidir la factibilidad de continuar explotando un yacimiento de hidrocarburos mediante una plataforma marina así como las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la participación en este proyecto.

1. ANTECEDENTES

Las plataformas marinas de acero para la explotación de hidrocarburos se han venido utilizando desde 1946, la primera fue instalada en las costas de Louisiana y posteriormente se instalaron en las costas de California y en el Golfo Pérsico. A la fecha la estructura de acero tipo *jacket* es la más ampliamente utilizada para la explotación de hidrocarburos en ambiente marino existiendo tan solo en los Estados Unidos de América (EUA) alrededor de 4000 plataformas de este tipo. Actualmente en México, se cuenta con 190 plataformas marinas, instaladas principalmente en las costas de Campeche y un mínimo de éstas en las costas de Tampico y Veracruz.

Los criterios de diseño para plataformas han cambiado significativamente en los últimos 40 años, las primeras plataformas fueron diseñadas para soportar oleajes con períodos de retorno de 25 años, sin embargo desde 1969 la mayoría de las plataformas han sido diseñadas para oleajes con períodos de retorno de 100 años. El *American Petroleum Institute* (API) introdujo por primera vez en 1969, prácticas recomendadas para plataformas marinas a través de su código API-RP-2A, con el fin de establecer un criterio consistente para

el diseño, fabricación e instalación de plataformas marinas. El API ha revisado periódicamente las recomendaciones contándose en la actualidad con la edición 20. La industria petrolera en México para el desarrollo de sus instalaciones costafuera se ha apoyado entre otras, principalmente en esta normatividad, primordialmente por la similitud de las condiciones ambientales que existen en todo el golfo de México, región en la cual se localizan la mayor parte de las instalaciones costafuera de los E. U. A. y de México.

A la fecha existen a nivel mundial alrededor de 2000 plataformas marinas que han consumido la totalidad de su vida útil de diseño, muchas de estas plataformas marinas existentes al someterse a una evaluación no cumplen con los códigos o reglamentos vigentes para el diseño, fabricación e instalación de este tipo de estructuras, lo cual obligó al Minerals Management Service (MMS) a promover el establecimiento de la normatividad requerida para la evaluación de plataformas existentes, habiéndose logrado ésta a través del API al publicar la sección 17 del API RP2A.

Es importante mencionar que con el fin de tomar en cuenta las condiciones particulares de las instalaciones de cada opera-

tor, el MMS organizó un proyecto que consistió en la aplicación de esta sección 17, y así poder evaluar la claridad de su aplicación e incorporar los comentarios correspondientes a la edición final ⁽¹⁾.

2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA

La estructura de una plataforma marina tiene la función de soportar los equipos de perforación, proceso y auxiliares, necesarios para la extracción, adecuación y transporte de los hidrocarburos, en un medio tal que las sujeta al efecto del oleaje, corrientes marinas, mareas, viento y sismo.

2.1. Identificación estructural de una plataforma

Una plataforma marina fija consta de tres componentes principales: superestructura, subestructura y pilotes, (Figura 2.1).

La superestructura es la parte de la plataforma que sobresale del agua, su función es soportar los equipos e instalaciones de proceso mediante cubiertas y cuyas cargas se transmiten a los pilotes a través de columnas. El número de cubiertas depende de la función asignada a la plataforma.

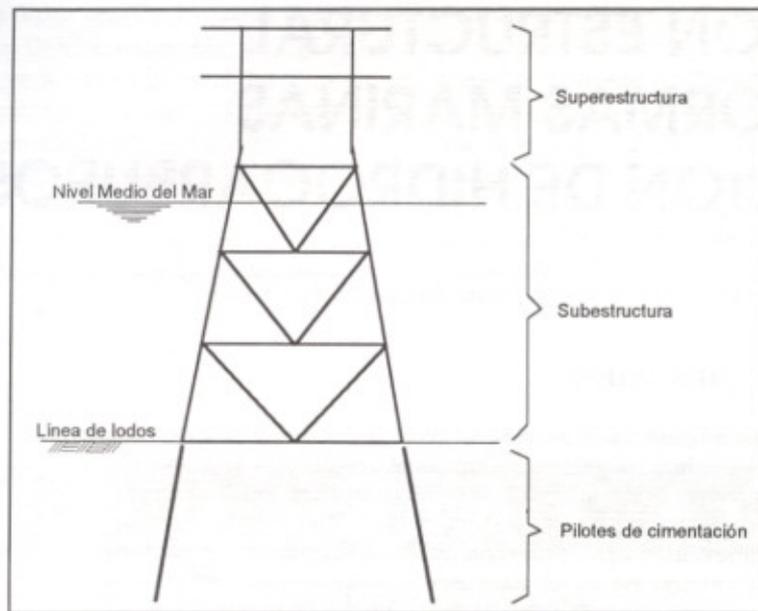


Figura 2.1 Componentes estructurales principales de una plataforma

La subestructura queda sumergida en el agua, está conformada por marcos trapezoidales rigidizados por riostras, sus piernas alojan y dan apoyo lateral a los pilotes desde el fondo marino hasta su extremo superior, que es donde se conectan con la subestructura y la superestructura.

Los pilotes son elementos tubulares hincados en el suelo, se prolongan a través de las piernas de la subestructura hasta conectarse con la superestructura para recibir las cargas.

2.2. Tipos de plataforma acorde a los servicios que soporta

Los complejos petroleros marinos están constituidos por plataformas de diferentes servicios tales como: producción, enlace, compresión y habitación. Para complementar dichos complejos se instalan estructuras secundarias destinadas al soporte de quemadores, sistemas de telecomunicación y puentes; estos últimos necesarios para el paso peatonal y el apoyo de tuberías entre plataformas contiguas.

2.3. Solicitaciones

Las cargas más significativas para el diseño de plataformas son: el peso propio,

oleaje, corrientes marinas, mareas, viento, sismo y efectos dinámicos.

Para la definición de los parámetros meteorológicos y oceanográficos (meteoceánicos), tales como: altura de la marea, altura y período de las olas, velocidades de las corrientes y del viento así como sus correspondientes direcciones, deberán realizarse campañas de medición para ajustar modelos matemáticos, mediante los cuales se determinan valores de estos mismos parámetros para huracanes o tormentas de invierno para diferentes períodos de retorno.

2.4. Vida útil

La evaluación estructural de plataformas marinas ha adquirido gran relevancia debido a que con el mejoramiento de las técnicas de perforación, recuperación y operación de pozos petroleros la vida económicamente productiva de los yacimientos se ha incrementado y en algunos casos excede los 25 años de vida útil considerada para diseño de las plataformas, por lo que es necesario prolongarla. Por otra parte la industria petrolera costafuera es cada vez más exigente con respecto a la seguridad de sus instalaciones para con la vida humana y el medio

ambiente, debido a que las plataformas marinas para la explotación de hidrocarburos presentan un incremento en el riesgo estructural a medida que aumenta su tiempo en servicio ^[3].

2.5. Modelación, Análisis y Diseño

El propósito fundamental del diseño estructural es lograr plataformas seguras, funcionales y económicas; para lograrlo, se aplican modelos matemáticos para calcular y verificar los esfuerzos en cada miembro y conexión de las plataformas.

El diseño se inicia con la generación de un modelo numérico que se integra con la forma geométrica de la estructura, las propiedades mecánicas de sus elementos, de la cimentación y del suelo de soporte; estos modelos se utilizan para simular la estructura bajo diversas condiciones de carga que se presentan durante su construcción, instalación y operación. Las cargas más significativas son: peso propio, oleaje, corrientes marinas, viento y sismo.

La solución de este modelo da como resultado los desplazamientos y las fuerzas a que están sujetos los elementos estructurales, con lo cual se efectúa el dimensionamiento de los mismos, así como de sus conexiones. Todo este proceso se realiza cumpliendo con la normatividad vigente.

3. FABRICACIÓN E INSTALACIÓN

El armado de la subestructura, superestructura, módulos y pilotes, se efectúa en patios de construcción habilitados para el manejo de estructuras robustas y pesadas, los cuales se encuentran ubicados en la margen de un río.

La subestructura se fabrica en posición horizontal en el patio; al término de esta etapa se carga, corriéndola sobre las vigas de fabricación hacia la barcaza que efectuará el transporte hasta el sitio de instalación; al llegar a su destino se desliza del chalán al mar, en donde flota libremente. Para su colocación en posi-

ción vertical se emplean sistemas de inundación; posteriormente se apoya sobre el fondo marino, se nivela y se procede al hincado de los pilotes. Los tubos empleados en la fabricación de estos pilotes se ensamblan en patio para formar los tramos que se acoplarán durante el hincado; dichos tramos se transportan también en una embarcación.

La superestructura se fabrica en el patio, en posición vertical, se carga y transporta en forma similar a la subestructura, sobre una barcaza desde la cual se iza para colocarla sobre los extremos superiores de los pilotes, que sobresalen de la subestructura.

Los módulos se fabrican y equipan en patio, se cargan, transportan e izan en forma similar a la superestructura.

4. CONSIDERACIONES PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS

La práctica recomendada en la sección 17 del API-RP2A está basada en la seguridad de la vida humana y en el riesgo de afectación al medio ambiente, sin embargo no toma en cuenta el riesgo económico, el cual debe ser establecido por el operador de la plataforma mediante análisis de riesgo costo-beneficio.

4.1. Causas que originan una evaluación

Una plataforma se recomienda sea evaluada si existe una o más de las siguientes condiciones:

- Adición de personal.
- Aumento significativo de equipo, tal que exceda las cargas de diseño.
- Incremento significativo en la combinación de cargas ambientales más cargas de operación.
- Altura insuficiente de la primera cubierta sobre el nivel medio del mar.
- Daños significativos encontrados durante las inspecciones.

En los casos anteriores el concepto significativo se aplica a daños o a cambios que alteren el diseño original disminuyendo

la resistencia de la plataforma o incrementando las cargas en más de 10%.

4.2. Categorías de exposición

Las plataformas se evalúan de acuerdo a su categoría de exposición a la cual le corresponde un criterio de evaluación. La categorización como se explicó anteriormente se establece tomando en cuenta la seguridad de la vida y el impacto ambiental.

Las categorías establecidas para la seguridad de la vida son:

- Tripulada No evacuada durante el evento ambiental considerado para su diseño.
- Tripulada-Evacuada durante el evento ambiental considerado para su diseño.
- No tripulada.

Las categorías establecidas para el impacto ambiental son:

- Impacto Ambiental Significante.
- Impacto Ambiental Insignificante.

Se entiende que el impacto ambiental es causado cuando por el colapso de la estructura se derrama aceite o gas que estuviese almacenado en las cubiertas o circulando por los ductos instalados en la estructura.

De la combinación de las anteriores categorías de exposición para la vida y el medio ambiente resultan seis posibilidades, sin embargo debido a que no existen los casos de plataformas Tripuladas-No evacuadas, las posibilidades se reducen a cuatro.

Al caso de No tripulada-Impacto ambiental insignificante, se le denomina plataforma de mínima consecuencia.

4.3. Información para la evaluación de las plataformas

Para realizar una evaluación debe recopilarse información suficiente del estado estructural general de la plataforma tanto de la superestructura como de la subestructura. Esta información es recopilada durante inspecciones programadas, apli-

cando diferentes niveles de inspección dependiendo de la importancia del componente estructural y del tipo de daño encontrado.

Los resultados de las inspecciones son revisados por ingenieros especialistas quienes evalúan cada uno de los conceptos inspeccionados dictaminando el estado global de la estructura, lo que determinará si se requiere una revisión estructural de la plataforma ^{[2], [4]}.

5. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

Durante la evaluación de plataformas existentes se aplican tres niveles de análisis de diferente complejidad, al satisfacerse uno de ellos se considera que la estructura cumple con las condiciones necesarias para seguir operando, ver figura 5.1.

A continuación se explica cada uno de los tres niveles de análisis:

5.1. Análisis simplificado

El propósito de un análisis simplificado es identificar de manera rápida el estado de la estructura, la información estructural y de inspección disponible así como las cargas utilizadas para el diseño de la plataforma.

Los conceptos que se toman en cuenta en este análisis son:

- a) Causas que originan la evaluación.
- b) Categorización.
- c) Evaluación de las condiciones estructurales.
- d) Revisión de las bases de diseño.

En forma general puede decirse que si al aplicar un análisis simplificado se identifica que la plataforma en cuestión no tiene daños significativos, tiene una altura adecuada en su primera cubierta de tal manera que el oleaje de tormenta no la golpee y no haya sufrido cambios significativos desde su diseño, se considera como aceptable para continuar en condiciones de servicio siempre y cuando cumpla con las siguientes dos condiciones:

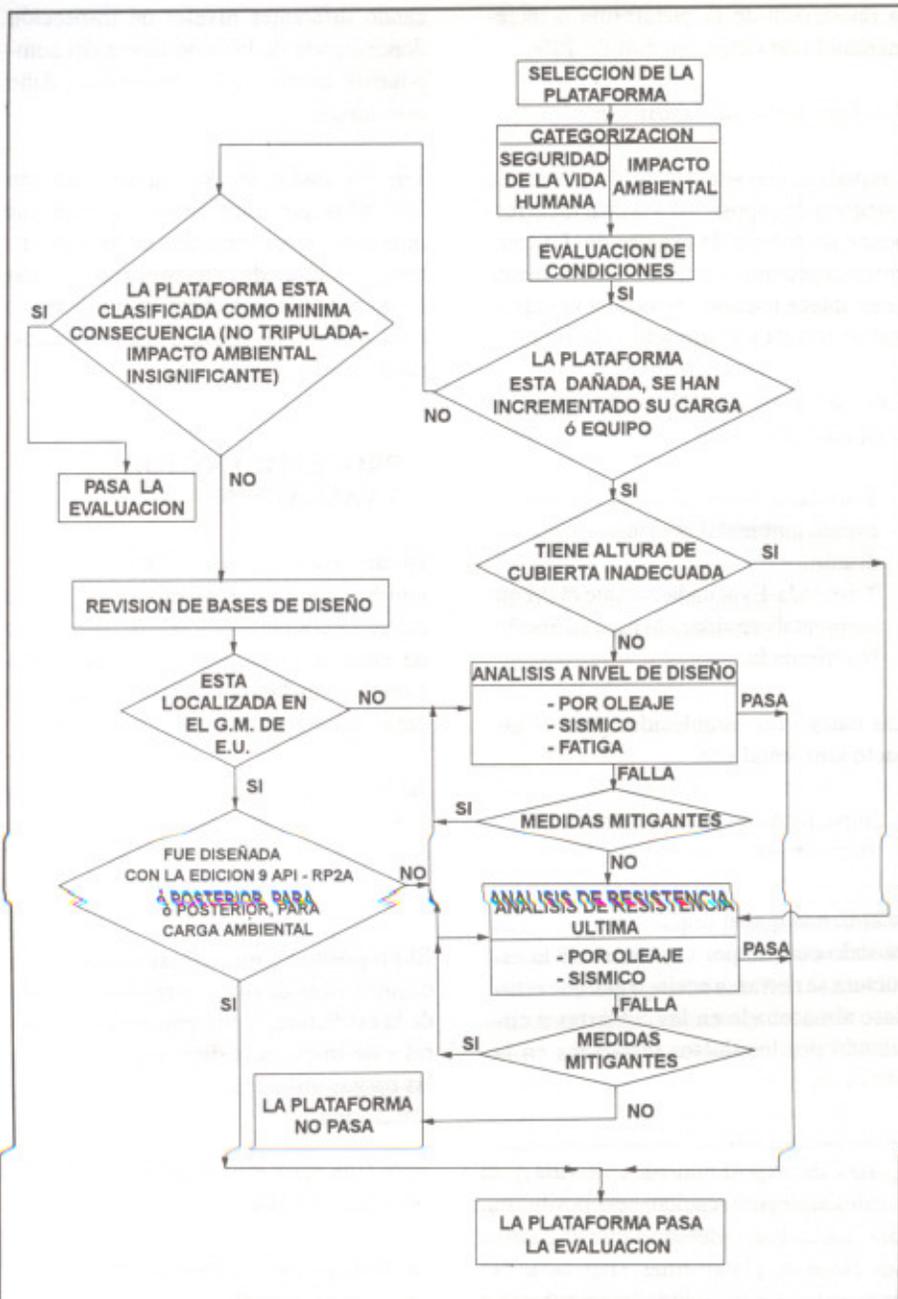


Figura 5.1 Procedimiento de evaluación para plataformas marinas existentes

- a) La plataforma es de consecuencia mínima, esto es No tripulada-Impacto ambiental Insignificante
- b) La plataforma está localizada en el Golfo de México y fue diseñada con la novena edición del API-RP2A (1977) o posterior. Adicionalmente deberá demostrarse que las cargas por oleaje utilizadas para el diseño de la plataforma se definieron acorde a la novena edición o posterior.

5.2. Análisis elástico estructural a nivel de diseño

Si una plataforma no cumple con el análisis simplificado, el segundo nivel consiste en un análisis elástico a nivel de diseño.

El análisis a nivel de diseño es similar al aplicado durante el diseño de plataformas nuevas, se consideran todos los fac-

tores de seguridad y se utilizan los esfuerzos nominales en vez de los esfuerzos de fluencia.

5.3. Análisis de resistencia última

Si una plataforma no cumple con el análisis elástico a nivel de diseño, se podrá realizar un tercer nivel consistente en un análisis de resistencia última. El análisis de resistencia última puede ser efectuado empleando métodos elásticos o métodos inelásticos. El primer caso se aplica para verificar que las juntas y elementos no excedan su resistencia última, e inclusive puede realizarse un análisis a nivel de diseño eliminando todos los factores de seguridad, tanto en cargas como en materiales. En el segundo caso se debe tomar en cuenta el comportamiento no lineal de elementos, juntas y cimentación en el modelo estructural, y la plataforma debe ser capaz de soportar las cargas definidas de acuerdo a su categoría de exposición, sin colapsarse.

Para identificar si la plataforma analizada cumple con el análisis de resistencia última, deberá revisarse la relación del cortante de resistencia última entre el cortante a nivel de diseño para la dirección más desfavorable y ésta deberá ser mayor o igual que 1.7. A esta relación se le conoce como resistencia de reserva antes del colapso.

6. CRITERIO METEOCEANICO

El criterio para establecer los parámetros de las solicitaciones oceanográficas y meteorológicas (criterio meteoceánico) para evaluar una plataforma existente se definen en base a:

- a) Región geográfica
- b) Categoría de exposición de la plataforma
- c) Tipo de análisis aplicado: nivel de diseño o resistencia última

Cada región geográfica requiere de un criterio meteoceánico en particular, que debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Debe existir información obtenida de mediciones hechas en tormentas de

invierno y huracanes, o modelos numéricos soportados por dicha información.

- La extrapolación de datos de tormentas para períodos de retorno largos debe estar debidamente sustentada.
- Que el criterio sea determinado aplicando la misma lógica utilizada en la sección 17 del API RP2A.

La sección 17 del API RP2A presenta el criterio metoceanico válido para la costa de los Estados Unidos en el Golfo de México, el cual está en función de la categoría de exposición de la plataforma a evaluar. En seguida se muestra el criterio que aplica para cada categoría de exposición ⁽⁵⁾.

En las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se muestran las gráficas *altura de ola vs. tirante* correspondientes a cada uno de los tres criterios aplicables al Golfo de México, las gráficas presentan las alturas de ola que deben ser empleadas para realizar análisis a nivel de diseño o de resistencia última. Para cualquier categoría de exposición, la altura mínima de la cubierta inferior de la plataforma a evaluar debe ser mayor que la altura de la cresta de la ola más la altura de la marea, ambos correspondientes a un análisis de resistencia última.

Los parámetros que definen el criterio metoceanico son:

- Altura de ola vs tirante de agua
- Marea de tormenta
- Dirección de oleaje y corriente
- Velocidad de corriente
- Período de la ola
- Velocidad del viento

7.- CONSIDERACIONES DE MEDIDAS MITIGANTES

Cuando una plataforma ha sido evaluada y no cumple con los requerimientos definidos por alguno de los tres niveles de análisis mencionados anteriormente, será necesario aplicar medidas mitigantes para cumplir con el análisis a nivel de diseño o el de resistencia última. Las medidas mitigantes son modificaciones estructu-

CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN	CRITERIO APLICADO
Impacto ambiental significativo/ Tripulada-evacuada o No-tripulada	Huracanes
Impacto ambiental insignificante/ Tripulada-evacuada	Tormenta tropical
Impacto ambiental insignificante/ No-tripulada	Tormentas de invierno

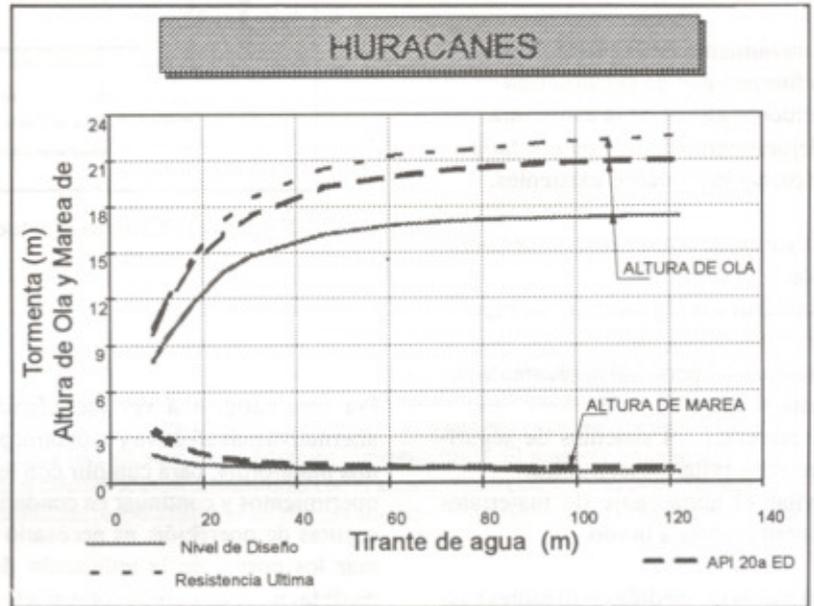


Figura 6.1 Criterio Metoceanico para «HURACANES»

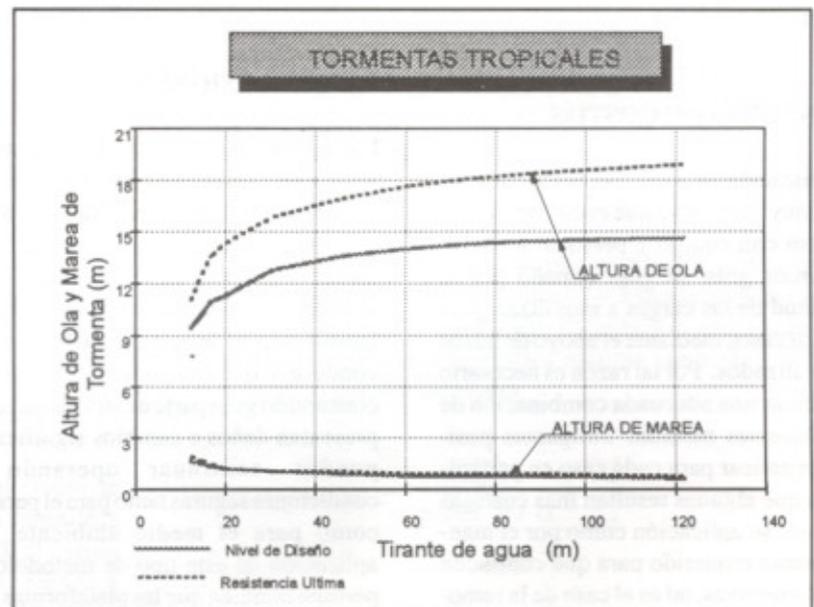


Figura 6.2 Criterio Metoceanico para «TORMENTAS TROPICALES»

rales o de procedimientos de operación para la reducción de cargas, incremento en la resistencia de la plataforma o la reducción de consecuencias en caso de falla [6].

Las medidas mitigantes más comunes son:

- 1) Reducción de cargas.
 - Reducción de cargas gravitacionales.
 - Reducción de fuerzas hidrodinámicas removiendo elementos no estructurales tales como atracaderos, defensas y crecimiento marino.
- 2) Reforzamiento de la plataforma.
 - Refuerzo local de la estructura.
 - Refuerzo global de la estructura.
 - Mejoramiento de la vida por fatiga.
 - Reparación de daños existentes.
- 3) Reducción de consecuencias de operación.
 - Convertir a la plataforma a no tripulada.
 - Estancia del personal únicamente durante el día.
 - Incrementar los sistemas de seguridad para evitar descontrol.
 - Evitar el almacenaje de materiales contaminantes a bordo.

Identificadas las medidas mitigantes más convenientes para la plataforma en cuestión se deberá cumplir con el análisis a nivel de diseño o con el de resistencia última.

8. ANÁLISIS DE COSTOS

La aplicación de medidas mitigantes resulta muy costosa ya que estos trabajos se realizan con equipo y personal alojados en barcos grúa de gran tamaño por la magnitud de las cargas a movilizar, y en algunos casos mediante el apoyo de buzos especializados. Por tal razón es necesario identificar una adecuada combinación de las diferentes medidas mitigantes posibles de aplicar para cada caso en particular, ya que algunas resultan más costosas tanto por su aplicación como por el mantenimiento requerido para que continúen siendo efectivas, tal es el caso de la remoción del crecimiento marino para la disminución de las fuerzas por oleaje.

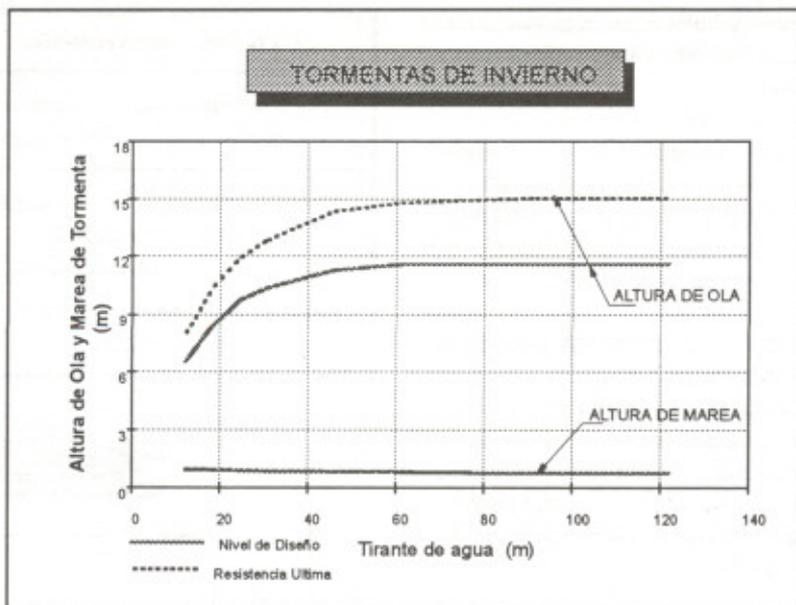


Figura 6.3 Criterio Meteoceánico para «TORMENTAS DE INVIERNO»

Por otra parte, una vez identificada la alternativa más efectiva y económica para una plataforma, para cumplir con los requerimientos y continuar en condiciones seguras de operación, es necesario estimar los costos de la aplicación de las medidas mitigantes para compararlos con los costos del aceite y gas que aún producirá el yacimiento y así determinar la rentabilidad de la inversión.

9. CONCLUSIONES

La evaluación de plataformas existentes aplicando metodologías tal como la presentada en la sección 17 del API RP2A adaptadas al ámbito nacional, permitirá tomar decisiones fundamentadas desde el punto de vista técnico, repercutiendo también en el aspecto económico, esto conduce a que las plataformas que han consumido gran parte de su vida útil o que presentan daños o cambios significativos puedan continuar operando en condiciones seguras tanto para el personal como para el medio ambiente. La aplicación de este tipo de metodologías permite también que las plataformas sean certificables, cumpliendo con la normatividad internacional.

10. REFERENCIAS

- [1] Digre, K. A., Krieger, W. F., Wisch, D., and Petrauskas, C., *API RP2A Draft Section 17 Assessment of Existing Platforms*, July 1994.
- [2] Kallaby, J. and O'Connor, P., *An Integrated Approach for Underwater Survey Damage Assessment of Offshore Platforms*, OTC 7487, Offshore Technology Conference Proceedings, May 1994.
- [3] Kallaby, J., Lee, G., Crawford, C., Light, L., Dolan, D., and Chen, J. H., *Structural Assessment of Existing Platforms*, OTC 7483, Offshore Technology Conference Proceedings, May 1994.
- [4] Krieger, W. F., Banon, H., Lloyd, J., De, R., Digre, K. A., Nair, D., Irick, J. T. and Guynes, S., *Process for Assessment of Existing Platforms to Determine Fitness for Purpose* OTC 7482 Offshore Technology Conference Proceedings, May 1994.
- [5] Petrauskas, C., Finnegan, T. D., Heideman, J., Santala, M., Vogel, M. and Berek, G., *Meteocean Criteria/Loads for Use in Assessment of Existing Offshore Platforms*, OTC 7484, Offshore Technology Conference Proceedings, May 1994.
- [6] Turner, J. W., Wisch, D. and Guynes, S. A *Review of Operations and Mitigation Methods for Offshore Platforms*, OTC 7486, Offshore Technology Conference Proceedings, May 1994.