

# Confiabilidad estructural de los escenarios de iniciación del pandeo lateral de ductos marinos operando con HPHT

*Enedina Musito Córdova*

*[emusito@imp.mx](mailto:emusito@imp.mx)*

*Instituto Mexicano del Petróleo*

*Dirección de servicios de ingeniería*

*Análisis de esfuerzos y flexibilidad en tuberías*

Información del artículo: recibido: junio de 2016-aceptado: julio de 2016

## Resumen

El diseño de ductos con alta presión y/o alta temperatura (HPHT) en aguas profundas (AP) difiere significativamente del diseño tradicional, debido al costo que representa estabilizar el ducto y a la capacidad límite de la tecnología existente. El ducto se diseña superficial al lecho marino, previendo que se desplace de forma natural o inducida y con ello liberar la fuerza acumulada a través del pandeo lateral, provocando deformaciones plásticas al ducto.

Un ducto marino en AP operando con HPHT presenta ciclos de expansión/deflexión, debido a las fluctuaciones térmicas o por condiciones de paro/arranque. La resistencia por fricción ducto-suelo limita el movimiento, acumulándose una fuerza de compresión en el ducto, que si es muy grande se desarrolla el pandeo lateral, (PL).

Las temperaturas máximas de operación de los hidrocarburos que actualmente explota Pemex, han alcanzado los 150°C. Por otro lado, Pemex planea explotar hidrocarburos en AP, donde se vislumbran temperaturas mayores que 200°C, con esta temperatura los ductos serán susceptibles al PL, el criterio de diseño consiste en liberar la fuerza de compresión, permitiendo que el ducto se desplace horizontalmente de forma controlada y segura, garantizando la integridad del ducto de acuerdo con la filosofía de confiabilidad estructural.

La modelación numérica con FEM de ductos marinos operando con HPHT es muy compleja, debido a todos los parámetros que intervienen en el diseño, tales como las características del lecho marino, incertidumbres en la interacción ducto-suelo, propiedades de los mecanismos inductores de desplazamiento, variación de la presión y temperatura del hidrocarburo, entre otros.

**Palabras clave:** Ducto, pandeo lateral, alta presión, alta temperatura, confiabilidad estructural.

## Structural reliability of lateral buckling initiation scenarios of offshore pipelines operating with HPHT

### Abstract

This paper addresses the design considerations of HPHT offshore pipeline with lateral buckling. The design of offshore pipelines in Deepwater differs significantly from traditional design, due to the cost for pipeline stabilization and the capacity of installation technology. Unburied pipelines subject to HPHT can be susceptible to lateral buckling, straining above their elastic limit.

Temperature changes on fluid create cycles of expansion/deflection, producing compressive longitudinal stresses, as a result of pipe-soil interaction the pipeline movement is restrained, so it accumulates a true axial force, that if it is very large then the pipeline could laterally buckle.

The maximum temperatures of hydrocarbons that Pemex exploits currently overcome 150°C. By the other hand, Pemex plans to exploit oil in Deepwater, where temperatures will be greater than 200°C, under these conditions the pipes will be susceptible to lateral buckling, in this case the acceptance criteria are based in release the compressive force, allowing at the same time the horizontal displacement of pipeline in a controlled and reliable manner, ensuring pipeline integrity according to the philosophy of structural reliability.

Finite element analysis considering HPHT of offshore pipelines is very complex, due to all the parameters involved in the design, such as the characteristics of the seabed, pipe-soil uncertainties, properties of triggers to initiate buckling, and variation of pressure and temperature of the fluid, among others.

**Keywords:** Pipeline, lateral buckling, high pressure, high temperature, structural reliability.

## Introducción

La explotación de hidrocarburos costafuera en México está orientándose hacia AP, con posibilidad de encontrar HPHT, mayor que 15,000 psi y 180°C. Además de la profundidad del agua, la HP conlleva a mayor espesor del ducto, incrementando el costo de fabricación e instalación. La HT tiene un impacto mayor, ya que por la fluctuación térmica se acumula una fuerza de compresión, que tiende a liberarse a través del mecanismo conocido como pandeo lateral (PL), como se observa en la **Figura 1**.

El reto consiste en estabilizar el ducto pandeado, simulándolo como una viga en compresión, que se flexiona cuando la fuerza axial de compresión es alta; la rigidez del ducto para resistir el pandeo es insuficiente, especialmente en casos donde la resistencia tubo-suelo es menor que la fuerza actuante. Si el ducto no se mueve axialmente, la fuerza se acumula; cuando se mueve la fuerza se libera y al mismo tiempo el ducto se deforma.

### Fuerza axial de compresión

Para determinar el punto de inestabilidad del ducto se evalúa la fuerza axial efectiva de compresión, de acuerdo a lo especificado en DNV-OS-F101:

$$S \approx H - \Delta p_i \cdot A_i \cdot [1 - 2\nu] - A_s \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad \dots(1)$$

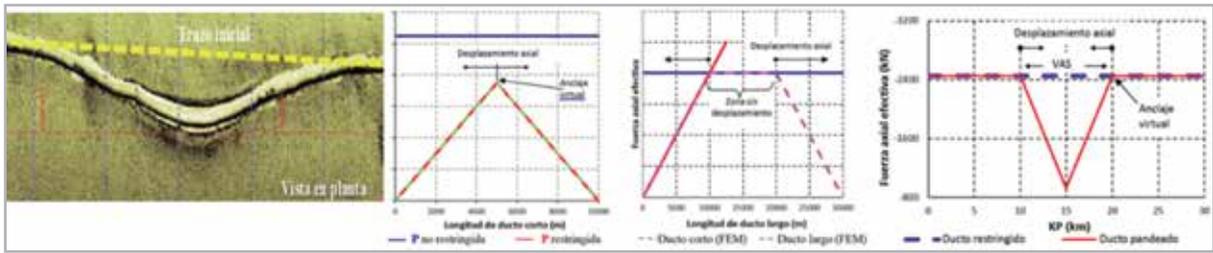
## Pandeo lateral de ductos marinos

Una tubería parcialmente confinada y sujeta a fuerzas térmicas de compresión, se pandea lateralmente para liberar dicha fuerza. Técnicamente es más factible liberar la fuerza que tratar de detenerla, garantizando la formación del pandeo, a través de mecanismos de inducción o mitigación, cuya finalidad es reducir o amplificar el desplazamiento, los más comunes son: tendido en serpenteo, durmientes y flotadores.

La modelación numérica de ductos operando con HPHT es compleja, debido a las condiciones ambientales extremas in-situ, batimetría del fondo, incertidumbres en la interacción tubo-suelo, condiciones críticas de operación, inestabilidad de taludes, confiabilidad de la formación del pandeo, configuración del ducto, etc, ya que intervienen fenómenos y variables que complican el análisis, además se deben prevenir fallas no deseables por desplazamiento excesivo y la deformación por pandeo local.

- $H$  = fuerza residual
- $\nu$  = coeficiente de Poisson
- $\alpha$  = coeficiente térmico
- $\Delta T$  = temperatura relativa
- $\Delta P_i$  = presión interna relativa
- $A_s$  = área de acero del ducto
- $E$  = módulo de elasticidad.

Cuando la fricción tubo-suelo no resiste el deslizamiento axial del ducto, se origina una articulación, referida como punto de anclaje virtual, la distancia al siguiente punto se conoce como separación del anclaje virtual (VAS), ver **Figura 1**. Cuando el ducto tiene suficiente longitud y la fricción tubo-suelo es mayor que la fuerza actuante, entonces cierta longitud del ducto no se desliza axialmente.



**Figura 1.** Distribución de la fuerza axial efectiva en un ducto susceptible al pandeo lateral.

Para garantizar la probabilidad de la formación del pandeo, el deslizamiento axial del ducto y la deflexión lateral deben equilibrarse, definiendo la separación óptima entre cada pandeo y satisfaciendo que la deformación axial máxima sea menor o igual que la deformación axial permisible:

$$\epsilon_{max} \leq \epsilon_{ca}; \quad \epsilon_{ca} = \frac{0.78}{\gamma_\epsilon + SNCF} \left( \frac{t_{st}}{OD_{st}} - 0.01 \right) \left( 1 + 5.75 \frac{P_{min} - P_e}{P_b} \right) \alpha_h^{-1.5} + \alpha_{gw} + \epsilon R_c \quad \dots (2)$$

- $t_{st}$  = espesor del tubo
- $p_e$  = presión externa
- $p_{min}$  = presión interna mínima
- $\gamma_\epsilon$  = factor de resistencia a la deformación
- $OD$  = diámetro exterior del tubo
- $p_b$  = presión de reventamiento
- $SNCF$  = factor de concentración de deformaciones

### Pandeo lateral de Hobbs

Hobbs (1984) estudió experimentalmente el PL simple de ductos marinos operando con HT; obtuvo las formas modales del ducto a partir de una configuración inicial, concluyendo que las curvas trigonométricas periódicas de amplitud constante dependen de la imperfección inicial. Es decir, un tubo recto se pandea en una serie infinita de ondas, siendo la forma modal 3 la que mejor representa el comportamiento.

Suponiendo que la fuerza de fricción lateral está totalmente superada, la ecuación diferencial de segundo grado que gobierna la flexión en función de la rigidez elástica y de la longitud del tubo, es:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P_0}{EI}y + \frac{\mu W}{8EI}(4x^2 - L^2) = 0$$

Cuando la fuerza de compresión máxima es menor o igual que la fuerza crítica, el ducto no se pandea; entonces se procede a buscar el equilibrio de fuerzas que dé origen al pandeo:

$$S_{max} = \min(S_0, S_{fmax}); S_c = \min(S_{0os}, S_{Hobbs}); S_{0os} = \mu_{Lmin} \cdot W \cdot R; S_{Hobbs} = 2.29 \cdot \frac{E \cdot I}{L_{crit}^2}$$

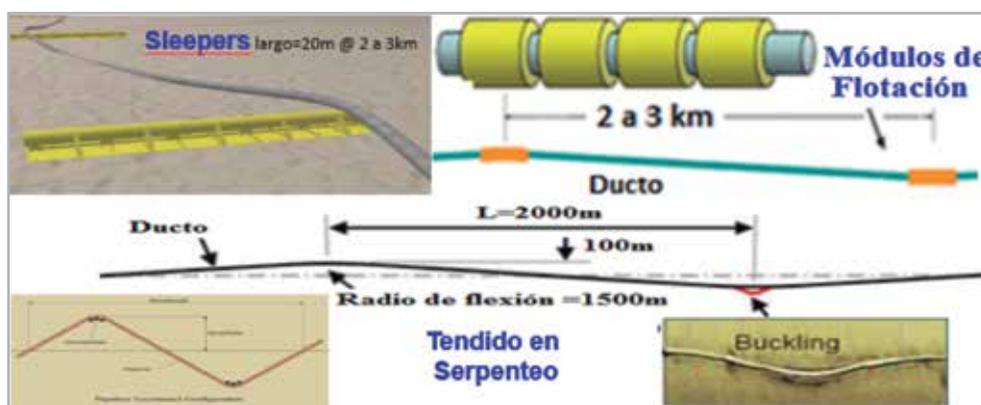
$S_0$  y  $S_{fmax}$  son las fuerzas axiales efectivas en el ducto con/sin restricción axial, respectivamente;

- $S_{0os}$  = fuerza crítica de pandeo
- $\mu_{Lmin}$  = fricción lateral mínima
- $W$  = peso sumergido del ducto
- $R$  = radio de curvatura

### Confiabilidad de los inductores del pandeo lateral

Los mecanismos de inducción del PL más utilizados en AP son los durmientes (28%) y los módulos de flotación (10%);

los mecanismos naturales debido a la batimetría del fondo inducen el 62% de los pandeos; su selección dependerá de los requerimientos de cada proyecto, **Figura 2**.



**Figura 2.** Mecanismos inductores de pandeo lateral.

La probabilidad de falla en cada pandeo debe ser menor que  $10^{-4}$ ; para que se desarrolle el pandeo se debe revisar que el desplazamiento axial máximo sea mayor que el desplazamiento de diseño.

En el caso de los durmientes, la probabilidad de pandeo depende del radio de curvatura del ducto. A menor radio de curvatura, mayor imperfección inicial, la fuerza crítica es pequeña y se incrementa la confiabilidad de la formación del pandeo, donde la probabilidad de falla es igual a  $P_f = Probabilidad(Z \leq 0)$ .

Si la confiabilidad de la formación en cada pandeo es  $C_i(x) = 1 - F_i(x)$ ;

$Z(\mu, W, R) = P_{cri} - (F_{restringida\ total} + F_{fricción\ axial})$ , y la probabilidad de falla es  $P_f(x) = 1 - C(x)$

### Aplicación a un caso hipotético

Se analiza un ducto de 10km de longitud, suponiendo: temperatura= 150°C, presión= 15MPa, área de acero= 0.015708m<sup>2</sup>, I= 0.000305m<sup>4</sup>, E= 207GPa, Ws= 1.32kN/m,  $\mu_A = 0.3$ ,  $\mu_{(estática)} = 0.7$ , movilización del suelo= 2mm, coeficiente de expansión= 1.32.

La **Figura 3** muestra las fuerzas de pandeo de Hobbs, la carga crítica para resistir el pandeo (3,450kN), es menor que la carga máxima actuante (8,350kN), lo cual indica que el ducto se pandeará lateralmente. Se observa que a menor longitud de pandeo, la deformación longitudinal por compresión del ducto se incrementa. La expansión total en el extremo es de 1.820m.

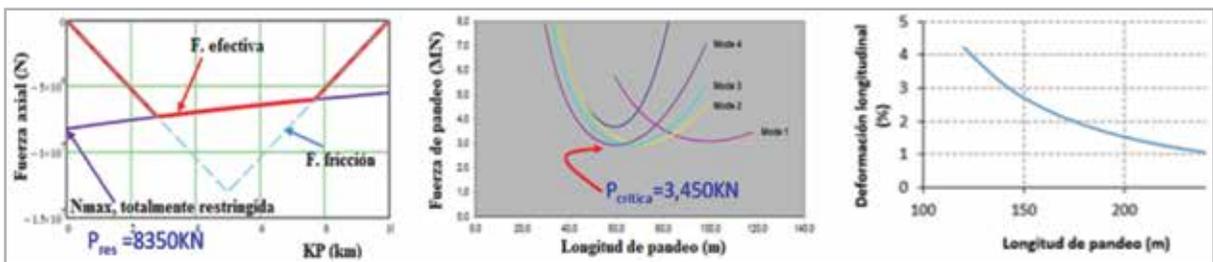


Figura 3. Fuerza axial efectiva de acuerdo al modelo de Hobbs.

Los resultados obtenidos con FEM son la expansión total en el extremo del ducto=1.868m. Para un radio de curvatura de 1,500m el desplazamiento axial=1.3m y la carga post-pandeo=2,100kN. Para un radio de curvatura de 2,500m el desplazamiento axial=1.71m y la carga post-pandeo=2,841kN, **Figura 4**.

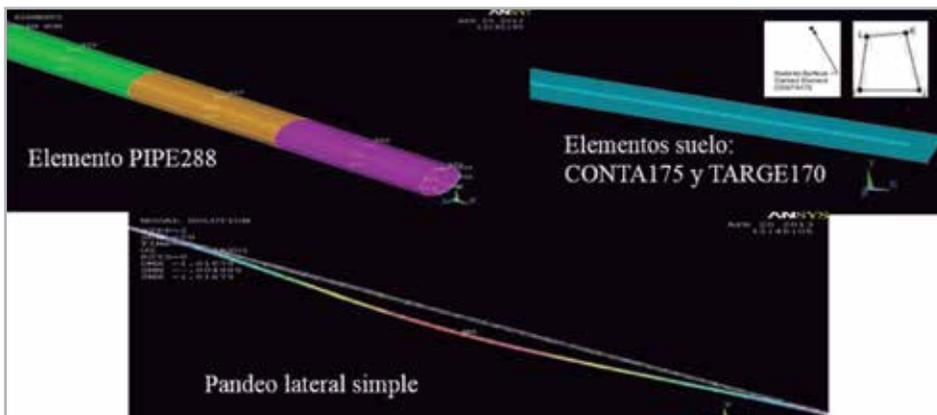
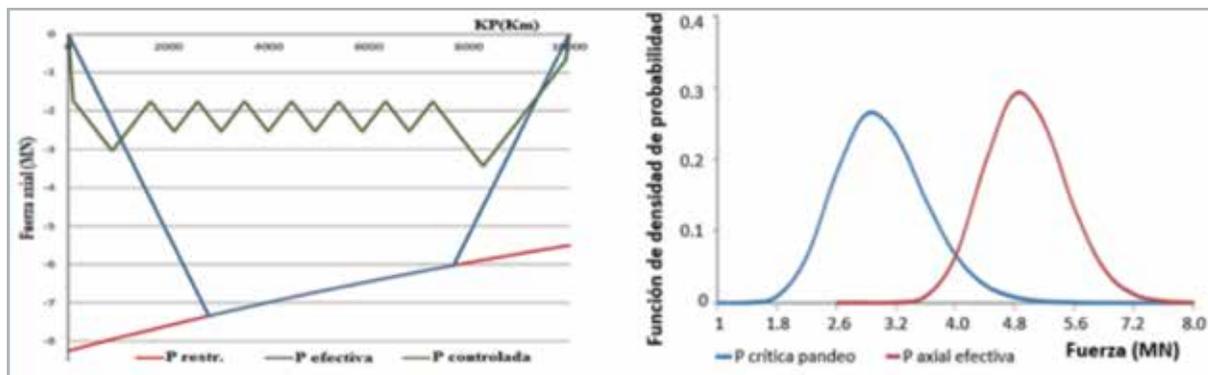


Figura 4. Ducto con pandeo lateral analizado por medio del método de elementos finitos.

Debido a que los desplazamientos son mayores que 1, se procedió a inducir nueve pandeos a lo largo del ducto; la **Figura 5** muestra la distribución de la fuerza axial y la gráfica de función de densidad de probabilidad para las cargas crítica y axial.

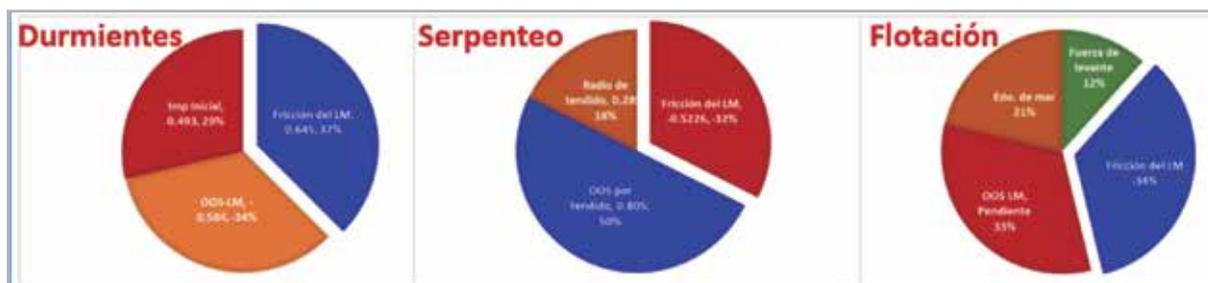


**Figura 5.** Distribución de la fuerza en ducto con nueve zonas pandeadas.

El desplazamiento axial máximo en el extremo del obtenido con FEM es de 0.74 m, el cual es menor que 1. La separación máxima del anclaje virtual es de 2,400 m, que corresponde a una deformación de diseño de 0.004 m/m contra la deformación permisible de 0.0125 m/m; en ambos casos se satisface el criterio de diseño.

31%, radio de curvatura 19 % y condición fuera de rectitud 50 %. Como se puede observar en la **Figura 6**, la dispersión de las variables aleatorias para los durmientes, tendido en serpenteo y módulos de flotación, es muy diversa, siendo un indicativo de que en cada proyecto se debe realizar un análisis específico para seleccionar uno o más de los mecanismos para estabilizar un ducto.

Del análisis probabilístico se obtuvo la dispersión siguiente de las variables involucradas: fricción del lecho marino



**Figura 6.** Dispersión de las variables involucradas en el modelo.

## Conclusiones

El criterio de diseño de ductos con HPHT consiste en permitir que el ducto se pandee lateralmente para liberar las fuerzas actuantes, de manera controlada y segura, garantizando la integridad estructural del ducto. El control del PL es una solución viable técnica y económicamente, en contraste con los costos que implicaría enterrar el ducto para estabilizarlo.

## Semblanza de la autora

### **Enedina Musito Córdova**

Ingeniera Civil con Maestría es Estructuras y Candidata al Grado de Doctorado en Ingeniería por Investigación, II–UNAM.

De 1990 a la fecha ha laborado en el Instituto Mexicano del Petróleo, en el desarrollo de tecnología sobre ductos y risers para la explotación de hidrocarburos costafuera.

Reconocimiento en la categoría de innovación por participar en el desarrollo de tecnología para el “Análisis de confiabilidad estructural para el diseño integral de sistemas flotantes”, 2010.

Ha publicado 39 artículos técnicos en torno al comportamiento de ductos marinos sujetos a cargas de oleaje y su interacción con el lecho marino.

En su haber cuenta con cinco registros de derechos de autor relacionados con la estabilidad estructural e hidrodinámica de ductos marinos.

Asociaciones profesionales a las que pertenece:

Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A. C.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A. C.

Sociedad Mexicana de Termodinámica, A. C.