



## Pandeo de paneles reforzados sometidos a diferentes temperaturas

Miguel Renato Manco Rivera  
COPPE / UFRJ

[mmanco1@peno.coppe.ufrj.br](mailto:mmanco1@peno.coppe.ufrj.br)

Murilo Augusto Vaz  
COPPE / UFRJ – POLI / UFRJ

[murilo@peno.coppe.ufrj.br](mailto:murilo@peno.coppe.ufrj.br)

Julio César R. Cyrino  
COPPE / UFRJ – POLI / UFRJ

[julio@peno.coppe.ufrj.br](mailto:julio@peno.coppe.ufrj.br)

### Resumen:

El fenómeno del pandeo de paneles reforzados ha sido ampliamente estudiado a lo largo de muchos años mediante diversas metodologías. A partir de los resultados de trabajos anteriores, ha sido posible definir una serie de parámetros que caracterizan el comportamiento y los modos de pandeo de los paneles reforzados, sometidos a condiciones específicas de carga. Igualmente, se ha identificado a los modos de pandeo local (en la placa y en el refuerzo) como los más desfavorables, definiendo límites de interacción entre dichos modos de pandeo. A pesar de toda la bibliografía existente, pocos estudios han analizado la variación que sufren: la carga de pandeo y el modo de falla, ante un incremento en la temperatura a la cual la estructura flotante podría ser sometida debido a un accidente a lo largo de su vida operacional.

Este estudio utiliza un modelo de elementos finitos que considera la variación de las principales propiedades mecánicas (tensión de fluencia ( $\sigma_y$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ) y módulo de elasticidad ( $E$ )) en función de la temperatura, con el objetivo de analizar: la variación de la carga de pandeo y modos de pandeo local a diferentes temperaturas.

## Nomenclatura

$A$	área de la sección transversal total del panel reforzado	$r_{x,y,z}$	radios de giro sobre o eixos x-x, y-y e z-z
$A_f$	área de sección transversal del ala del refuerzo	$T$	magnitud de la temperatura
$A_p$	área de la sección transversal de la placa	$t_f$	espesor del ala del refuerzo
$A_w$	área de la sección transversal del alma del refuerzo	$t_p$	espesor de la placa
$b_f$	ancho del ala del refuerzo	$t_w$	espesor del alma del refuerzo
$b_p$	ancho del panel reforzado	$u_{x,y,z}$	desplazamientos a lo largo de los ejes $x$ , $y$ y $z$
$E$	módulo de elasticidad del acero	$U_1$	acortamiento axial del panel reforzado
$\sigma_r$	magnitud de la tensión residual máxima en la placa	$U_T$	desplazamiento causado por la temperatura
$\sigma_{yp}$	tensión de fluencia de la placa	$x, y, z$	distancia a lo largo de los ejes $x$ , $y$ y $z$ , respectivamente
$\sigma_{ys}$	tensión de fluencia del refuerzo	$\alpha_T$	coeficiente de dilatación térmica
$h_w$	altura del alma del refuerzo	$\delta_p$	imperfección inicial máxima de la placa
$L_u$	longitud del panel reforzado	$\delta_s$	imperfección inicial máxima en el refuerzo
$M_a$	momento de flexión aplicado	$\delta_0(x, y)$	magnitud de la imperfección en el punto $(x, y)$ de la placa
$M_p$	momento plástico del panel reforzado	$\varepsilon_{y,2,3}$	magnitud de la deformación verdadera en la carga de fluencia, al final del régimen plástico y en la carga ultima
$M_y$	momento de fluencia del panel reforzado	$\phi_{x,y,z}$	rotaciones nodales en torno de los ejes globales $x$ , $y$ y $z$
$n_p$	número de medias ondas senoidales de las imperfecciones a lo largo de la longitud del panel reforzado	$\pi$	3.14159...
$P$	carga axial aplicada	$\nu$	coeficiente de Poisson para el acero
$P_c$	carga máxima sobre el panel reforzado	$\alpha$	coeficiente de dilatación térmica.
$P_y$	carga de fluencia del panel reforzado		

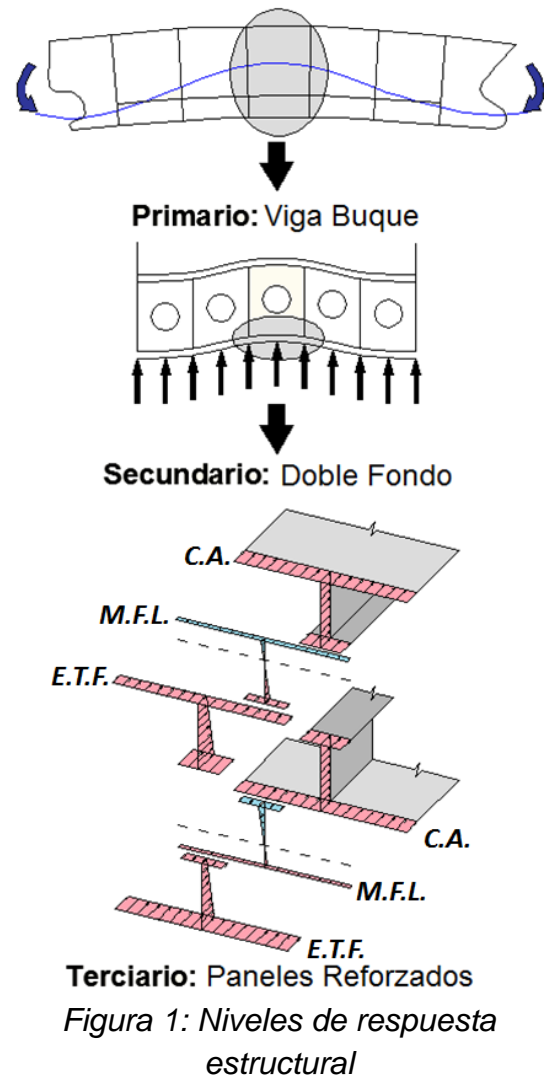
## 1. Introducción

La flexión del casco del buque induce esfuerzos de compresión longitudinal sobre parte de los elementos que lo constituyen. Esto

es acompañado de momentos de flexión local debidos a las cargas que actúan directamente sobre los paneles, por ejemplo, la presión del agua sobre

el casco, como se muestra en la Figura 1.

Debido a la presencia de fuerzas de compresión axial (C.A.) - supuesta uniforme – así como de momentos flectores locales (M.F.L.), los paneles son susceptibles a fallar por inestabilidad. Esta inestabilidad da como resultado el fenómeno denominado pandeo, el cual puede ser global o local. Investigaciones anteriores han determinado las cuatro formas de pandeo que generalmente presentan este tipo de estructuras (Hu et al. [1], Grondin et al. [2], Paik e Thayamballi [3], Sheikh et al. [4]): pandeo global inducido por la placa (*Plate Induced Overall Buckling-PI*), pandeo global inducido por el refuerzo (*Stiffener Induced Overall Buckling-SI*), pandeo de la placa (*Plate Buckling-PB*) o pandeo lateral torsional del refuerzo (*Stiffener Tripping-ST*). Estos modos de pandeo guardan relación con el Estado de Tensiones Finales (E.T.F), que depende de la ubicación del refuerzo con respecto al sentido de la flexión de la viga-buque (*Figura 1*).

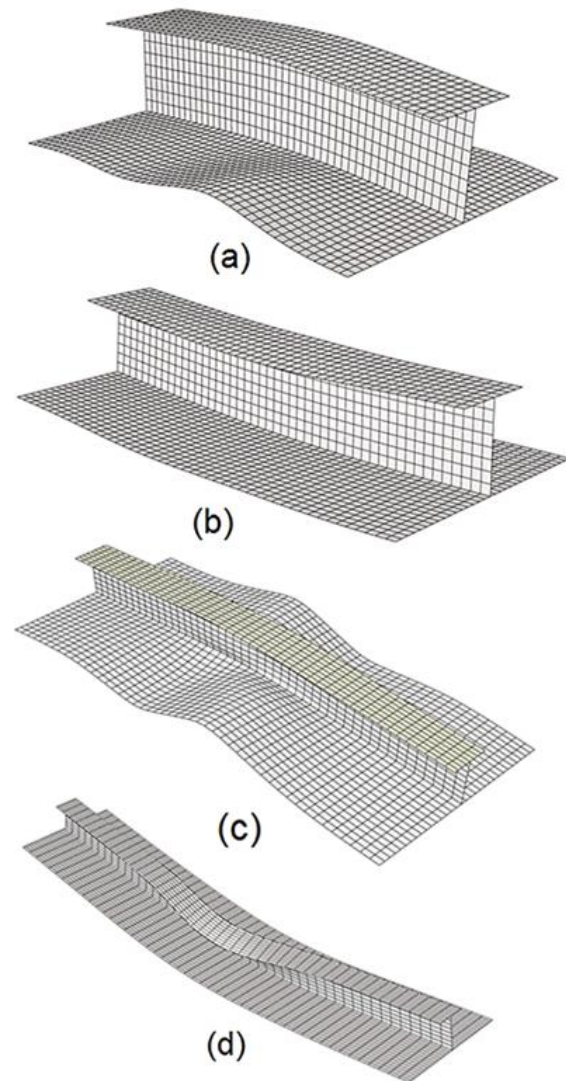


El pandeo global se caracteriza por la flexión simultánea de la placa y del refuerzo, denominándose de inducido por la placa (*PI - Figura 2 (a)*) cuando el refuerzo se ubica en el lado cóncavo del panel, o de inducido por el refuerzo (*SI - Figura 2 (b)*) cuando este se ubica en el lado convexo. Los modos de pandeo global, se caracterizan por poseer una curva de tensión-deformación bastante estable, esto quiere decir que ante incrementos en

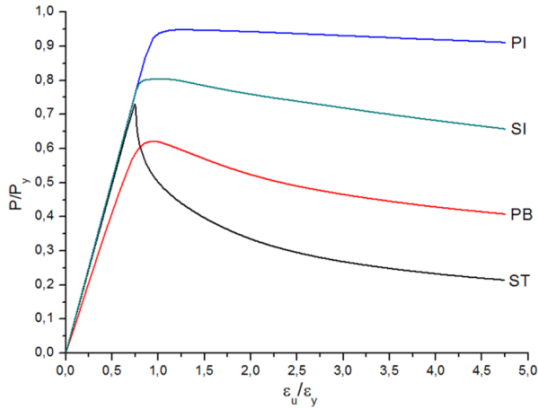
la deformación media del panel presentan variaciones leves en la carga de post pandeo, tal como se aprecia en la *Figura 3*.

En el pandeo local solo uno de los miembros del panel será afectado, pudiendo ocurrir el pandeo en la placa (**PB** - *Figura 2 (c)*) o en el refuerzo (**ST** *Figura 2 (d)*). En el modo de pandeo en la placa existe una redistribución de la carga hacia los refuerzos debido a la pérdida de capacidad de carga, originando que el ancho efectivo de la placa disminuya. Este modo de pandeo posee un comportamiento similar al del pandeo global, presentando una caída de la capacidad de carga más pronunciada conforme aumenta la deformación media (ver *Figura 3*). El pandeo lateral torsional del refuerzo (**ST** *Figura 2(d)*) se caracteriza por la rotación del refuerzo en su unión con la placa tal como se aprecia en la *Figura 2 (d)*. Al contrario de los otros modos de pandeo, que ocasionan una falla por estado límite, este modo normalmente resulta en el colapso del panel debido a una disminución brusca en la capacidad de carga

ante un leve incremento de la deformación media del panel como se muestra en la *Figura 3*, siendo por tanto el modo de pandeo más crítico.



*Figura 2: Formas típicas de pandeo de un panel reforzado: (a) pandeo global inducido por la placa (PI); (b) pandeo global inducido por el refuerzo (SI); (c) pandeo de la placa (PB) y (d) pandeo lateral torsional del refuerzo (ST)*



**Figura 3:** Curvas típicas de carga-deformación media para cada uno de los modos de pandeo de un panel reforzado

Mediante un análisis paramétrico, Sheikh et al [4] proponen una serie de parámetros adimensionales que son capaces de prever el modo de falla de los paneles reforzados. Así mismo su estudio identifica a los modos de pandeo local como los menos favorables, siendo el pandeo lateral torsional del refuerzo el más crítico. Finalmente, encuentra un grupo de valores de los parámetros adimensionales que originan cada uno de los modos de falla y proponen una frontera entre los modos de pandeo local a temperatura ambiente.

Manco [5], basándose en el estudio realizado por Sheikh et al. [4],

propone los parámetros mostrados en la *Tabla 1*.

**Tabla 1:** Parámetros adimensionales que afectan el comportamiento y modo de pandeo del panel reforzado.

$\beta_1 = \frac{b_p}{t_p} \sqrt{\frac{\sigma_{yp}}{E}}$  esbeltez transversal de la placa a flexión

$\beta_2 = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E}}$  esbeltez del alma del refuerzo

$\beta_3 = \frac{b_f}{t_f} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E}}$  esbeltez del ala del refuerzo

$\beta_4 = \frac{L_u}{r_z} \sqrt{\frac{\sigma_{yp}}{E}}$  razón entre la esbeltez a torsión del refuerzo y la esbeltez de la placa

$\beta_5 = \frac{A_s}{A_p}$  razón entre las áreas del refuerzo y la placa

$\beta_6 = k\beta_1^2$  imperfección inicial máxima en la placa

$\beta_7 = \frac{L_u}{const}$  imperfección inicial máxima en el refuerzo

$\beta_8 = \frac{f_r}{f_{yp}}$  razón entre las tensiones residual y de fluencia

$\beta_9 = \frac{M_a}{M_p}$  razón entre los momentos aplicado y plástico

$\beta_{10} = \frac{P_c}{P_y}$  razón entre las cargas de pandeo y de fluencia

$\beta_{11} = \varepsilon_u / \varepsilon_y$  razón entre la deformación media del panel y la deformación en el límite de elasticidad

$\beta_{12} = \frac{A_f}{A_w}$  razón entre las áreas del ala y el alma del refuerzo

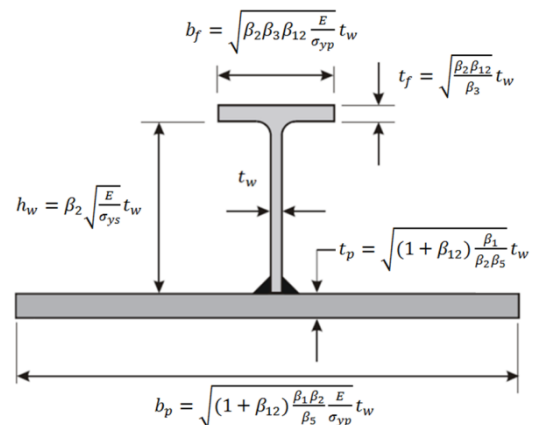
Así mismo realiza un refinamiento de la frontera propuesta por Sheikh et al. [4] para los modos de pandeo local a temperatura ambiente así como también realiza un estudio de su comportamiento a diferentes temperaturas. Como resultado de este trabajo propone tres zonas en el límite de interacción entre los modos de pandeo local: en la primera (ST) solo se apreciara el pandeo lateral torsional del refuerzo, en la segunda zona, llamada zona intermedia (Z.I.) es posible encontrar los dos modos de falla y finalmente en la tercera zona, solo ocurre el pandeo en la placa (PB).

El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento de la carga y modo de pandeo a diferentes temperaturas, siendo

necesario para ello el uso de un modelo de elementos finitos, el mismo que detallamos a continuación.

## 2. Modelo de Elementos Finitos:

Un panel reforzado consta de una placa lisa con refuerzos igualmente separados, limitados en sus extremos por elementos de mayor rigidez (por ejemplo, mamparos o varengas reforzadas). La sección transversal de un panel reforzado es mostrada en la *Figura 4*. Debido a la simetría existente, solo una parte del panel es modelada, es decir, solo una placa con ancho  $b_p$  y un refuerzo centrado en ella.



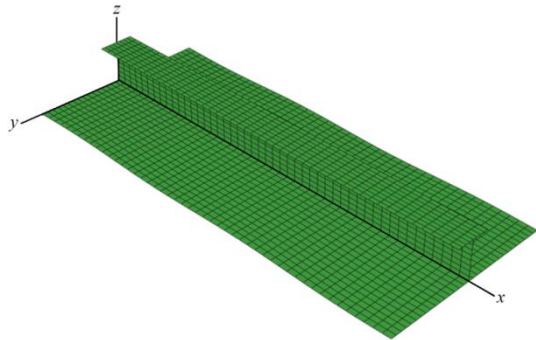
*Figura 4: Sección transversal del panel reforzado*

### 2.1 Malla de Elementos Finitos

El modelo de elementos finitos del panel reforzado es desarrollado en el software ABAQUS [6], este software es capaz de realizar análisis con no

linealidades físicas y geométricas (pandeo).

Luego de realizar un estudio de sensibilidad de malla con diferentes elementos (S4, S4R, S8, S8R, S9 y S9R5) se optó por un elemento de cascaron de cuatro nodos tipo S4R de ABAQUS. Este elemento posee cuatro nodos con seis grados de libertad en cada uno de ellos (tres desplazamientos y tres rotaciones), acepta doble curvatura y es un elemento de integración reducida, con un único punto de integración en el centro del elemento. La malla utilizada se muestra en la *Figura 5*.



*Figura 5: Malla de elementos finitos*

### 2.1.1 Geometría del modelo

En el modelado del panel reforzado utilizamos el modelo propuesto por Grondin et al. [3], el cual utiliza las magnitudes máximas de imperfección inicial en la placa y

refuerzo propuestas por Smith et al. [7], mostrados en la *Tabla 2*.

***Tabla 2:*** Imperfecciones iniciales máximas

Nivel	Placa ( $\delta_p/t_p$ )	Refuerzo ( $\delta_s/L_u$ )
Leve	$0.025\beta_1^2$	0.00025
Medio	$0.1\beta_1^2$	0.0015
Grave	$0.3\beta_1^2$	0.0046

### Geometría de la Placa

Carlsen & Czujko [8], sugieren que la geometría deformada de las placas soldadas de la estructura de un navío sea expresada por la siguiente serie trigonométrica:

$$\delta_0(x, y) = \delta_p \sin\left(\frac{n_p \pi x}{L_u}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_p}\right) \quad (1)$$

### Geometría del refuerzo

La distribución de las máximas imperfecciones iniciales en el refuerzo es definida mediante una semi-onda sinusoidal en el sentido longitudinal de la unión del ala y alma del refuerzo, con una variación parabólica en el sentido vertical del alma. La forma deformada del alma es definida admitiendo como hipótesis que el ángulo entre el alma y el ala del refuerzo se mantiene en 90 grados y el ala del refuerzo se mantiene en línea

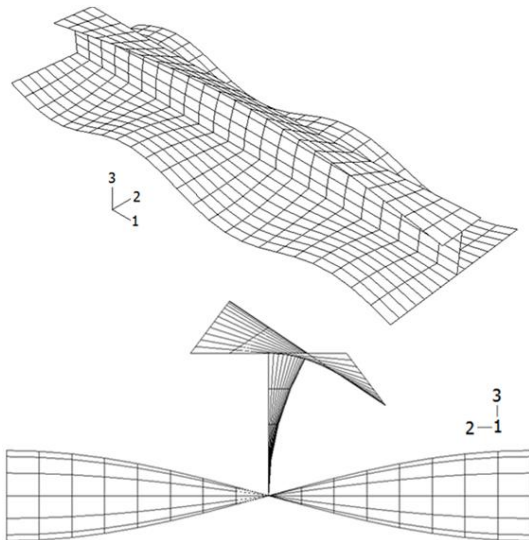
recta en el sentido transversal. La geometría inicial del alma del refuerzo es descrita por la siguiente expresión:

$$\delta_y(x, z) = \delta_s \left(\frac{z}{h_w}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi x}{L_u}\right) \quad (2)$$

Por otra parte, la geometría del ala del refuerzo es definida mediante la siguiente expresión:

$$\delta_z(x, y) = -2\delta_s y \left(\frac{h_w + b_f}{h_w b_f + 4\delta_s^2}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{L_u}\right) \quad (3)$$

La geometría inicial del panel es mostrada en la *Figura 6*.



*Figura 6: geometría inicial del panel*

### 2.1.2 Condiciones de Contorno

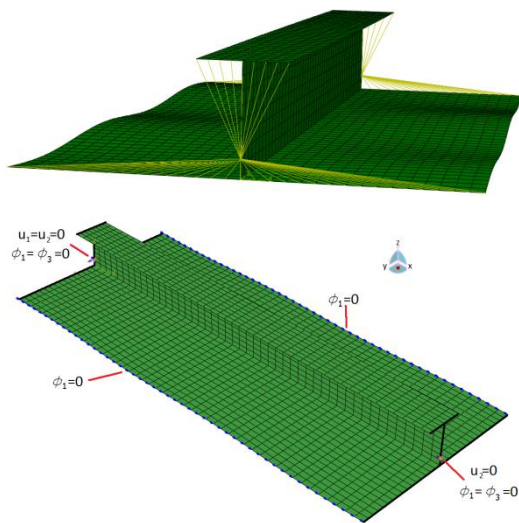
Dos conjuntos de condiciones de contorno son consideradas: una para las secciones transversales en los extremos cargados y la otra en los bordes de la placa (en el sentido longitudinal) que no soportan carga.

En la primera condición, se considera que el panel está soldado a elementos estructurales de mayor rigidez, tales como mamparos o varengas reforzadas, los cuales son rígidos en su plano pero flexibles lateralmente. Esta condición de contorno exige que los extremos del modelo puedan girar localmente, manteniendo la forma de la sección transversal. Este efecto es modelado, proporcionando secciones rígidas mediante el comando COUPLING de ABAQUS, este comando restringe el movimiento de todos los nodos que constituyen la sección en relación a los movimientos de un nodo de referencia único, en nuestro caso el centroide de la sección transversal.

Las cargas son aplicadas en el centro de gravedad de la extremidad rígida donde el comando COUPLING distribuye uniformemente la carga aplicada a lo largo de la sección transversal. Un apoyo en el centro geométrico de la extremidad rígida restringe el movimiento lateral (Y) y vertical (Z), así como las rotaciones en torno del eje longitudinal (X) y vertical (Z).

En la segunda condición la rotación en torno del eje longitudinal es restringida en todos los nodos a lo largo de los bordes para simular continuidad a lo largo de la placa tal como se muestra en la *Figura 7*.

Estas condiciones de contorno permiten durante el calentamiento del panel que este se expanda, siendo aplicada posteriormente una fuerza compresiva, obteniendo las curvas de comportamiento presentadas más adelante.

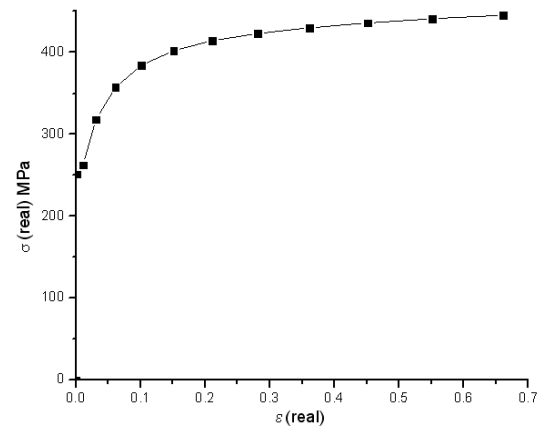


*Figura 7: condiciones de contorno del modelo*

### 2.1.3 Propiedades del Material

Un modelo elasto-plástico, con criterio de fluencia de Von Mises, es utilizado para modelar el comportamiento del material del panel. Generalmente las curvas de

tensión-deformación de ingeniería no son utilizadas en este tipo de análisis dado que el modelo sufre grandes deformaciones, sobre todo después del pandeo, por eso la curva tensión-deformación verdadera es utilizada. La curva a ser utilizada (a temperatura ambiente), es mostrada en la *Figura 8*.



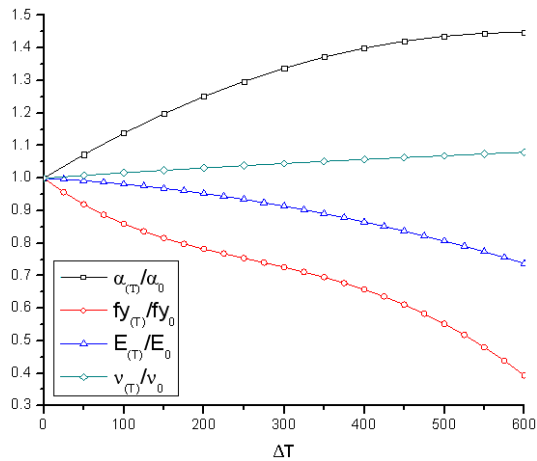
*Figura 8: curva tensión-deformación verdadera (MPDB [9])*

El material considerado posee a temperatura ambiente, las propiedades mecánicas mostradas en la *Tabla 3*.

***Tabla 3: Propiedades del material del panel a temperatura ambiente.***

Módulo de Elasticidad	$E_0 = 2.12.02 \text{ GPa}$
Coeficiente de Poisson	$\nu_0 = 0.289$
Tensión de fluencia	$\sigma_{y0} = 251.23 \text{ MPa}$
Coef. Dilatación térmica	$\alpha_0 = 1.0128 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$

En la *Figura 9* se muestra la variación de esas propiedades con la temperatura divididas con respecto a sus valores a temperatura ambiente para hacerlas adimensionales.



*Figura 9:* variación de las propiedades del material con la temperatura.

### 2.1.4 Casos de estudio

En este estudio analizaremos las fronteras de interacción entre los modos de pandeo local, para lo cual partiremos de los valores de la frontera entre los modos de pandeo local a temperatura ambiente, en seguida analizamos el comportamiento de estas fronteras para seis incrementos de temperatura de 100 °K. En estos análisis usaremos como condición de carga una combinación de

compresión uniaxial y flexión combinadas, para lo cual aplicaremos tres steps en ABAQUS. En el primer step calentamos el panel mediante la aplicación de un campo de temperatura uniforme, en el segundo step aplicamos el momento flector, con una magnitud igual al 20% del momento plástico de la sección transversal y finalmente en el tercer step comprimimos el panel reforzado hasta una deformación media del panel igual a 1%.

### 2.1.5 Hipótesis simplificadoras

En el desarrollo de este trabajo se han adoptado las siguientes hipótesis simplificadoras:

- i. Una gran parte del navío es sometida al fuego, lo que permite simular a expansión térmica del panel como una extremidad libre, evitando de esta forma el pandeo térmico.
- ii. Se asumirá un campo de temperaturas uniformes (estado permanente), dejando de lado la solución transitoria del problema del calentamiento del panel.
- iii. Las tensiones residuales no son consideradas en este estudio.

- iv. No se consideran los efectos visco-elásticos y visco-plásticos.

### 2.1.6 Método de solución

Como la respuesta del panel reforzado, con geometría y material no-lineal, está en el intervalo de inestabilidad de post-pandeo, ABAQUS utiliza el método de Riks [10] para prever a curva de tensión – deformación.

En este procedimiento, tanto la carga y los desplazamientos no son conocidos, por esto la resolución debe ser realizada en forma simultánea. Por ello es necesario utilizar otra cantidad para medir el progreso de la solución. ABAQUS utiliza la "longitud de arco" (arc length) a lo largo de la trayectoria de equilibrio de la curva carga – desplazamiento para medir el progreso de la solución. Esta metodología ofrece una solución, independientemente de si el problema es estable o inestable. La magnitud máxima de la carga o el valor del desplazamiento máximo en cierto grado de libertad es necesaria para terminar el análisis.

## 3. Resultados

Como resultado de su estudio, Manco [5], propone una serie de valores para los parámetros adimensionales, mostrados en la *Tabla 1*, que originan cada uno de los modos de pandeo local (**ST** o **PB**). Para nuestro estudio seleccionamos los valores de los parámetros adimensionales mostrados en la *Tabla 4*.

***Tabla 4:*** valores de los Parámetros adimensionales considerados.

---

$\beta_1$	Variable
$\beta_2$	1.05
$\beta_3$	0.75
$\beta_4$	Variable
$\beta_5$	0.30
$\beta_6$	$0.1 \beta_1^2$
$\beta_7$	$0.0015 L_u$
$\beta_8$	0.00
$\beta_9$	0.20
$\beta_{10}$	Respuesta buscada
$\beta_{11}$	5.00
$\beta_{12}$	1.00

---

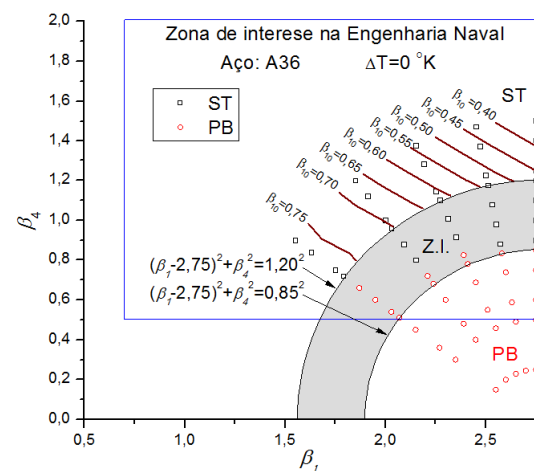
Con estos valores se modelan 12 grupos con 5 paneles reforzados cada uno, de forma que cada grupo obedezca a la ecuación (4):

$$(\beta_1 - 2,75)^2 + \beta_4^2 = R^2 \quad (4)$$

Al graficar el modo de pandeo obtenido para cada panel reforzado en un plano  $\beta_1$ - $\beta_4$  es posible identificar la zona fronteriza entre los modos de pandeo de la placa y pandeo lateral torsional del refuerzo. Para la temperatura ambiente obtenemos la *Figura 11*, en la cual es visible la existencia de tres regiones: en la primera (ST) solo existe el pandeo lateral torsional del refuerzo, en la segunda zona, llamada zona intermedia (Z.I.) es posible encontrar los dos modos de falla y finalmente en la tercera zona, solo ocurre el pandeo en la placa (PB). De igual forma en esta figura, interpolando las cargas de pandeo obtenidas, es posible obtener las curvas de nivel del parámetro adimensional  $\beta_{10}$ .

En la *Figura 12* se muestra las curvas  $P/P_y$  vs  $\varepsilon/\varepsilon_y$  para los grupos que obedecen la ecuación (4) para valores de  $R$  igual a: 1.20, 0.90 y 0.85. Estos valores de  $R$ , representan la frontera inferior de la zona donde solo ocurre el pandeo lateral torsional del refuerzo, una condición intermedia dentro de la

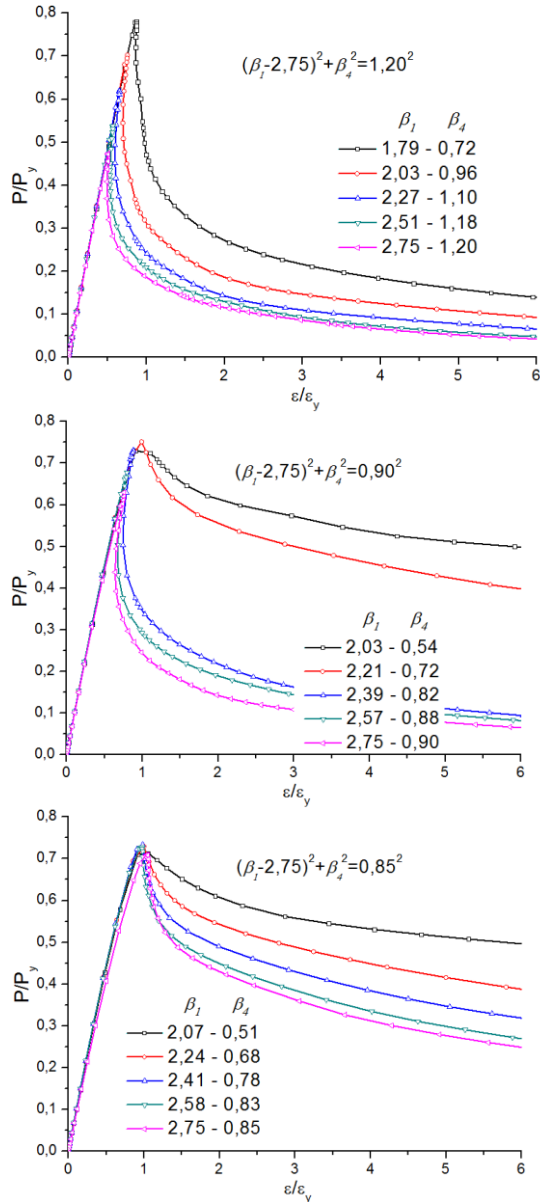
Z.I. y la frontera superior de la región en donde solo ocurre el pandeo de la placa, respectivamente. Observamos que en el caso del pandeo lateral torsional del refuerzo, existe una caída pronunciada de los valores de la carga de pandeo conforme la razón  $\beta_4/(\beta_1 - 2.75)$  aumenta, por otro lado, en el caso del pandeo de la placa el valor de la carga de pandeo se mantiene constante, observando una variación brusca en el comportamiento de post pandeo.



*Figura 11: Límite de interacción entre los modos de pandeo local del acero A36 a temperatura ambiente.*

Repitiendo este análisis para cinco incrementos de temperatura de 100 °K, obtenemos la variación de la frontera de interacción entre los modos de pandeo local con la temperatura. Estos

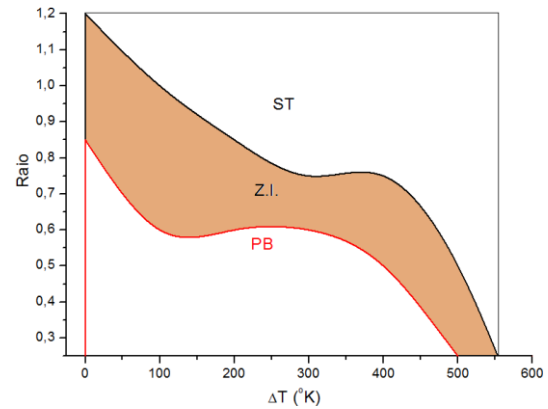
resultados son resumidos en la *Tabla 5* y presentados en forma gráfica en la *Figura 13*.



*Figura 12:* Curvas  $P/P_y$  vs  $\varepsilon/\varepsilon_y$  para los grupos que obedecen la ecuación (4) para valores de  $R$  igual a: 1.20, 0.90 y 0.85.

***Tabla 5:*** Variación de los límites de la Zona Intermedia (Z.I.)

Incremento de Temp.	$(\beta_1 - 2,75)^2 + \beta_4^2 = R^2$
0 °K	$0,85 < R < 1,20$
100 °K	$0,60 < R < 1,00$
200 °K	$0,60 < R < 0,85$
300 °K	$0,60 < R < 0,75$
400 °K	$0,50 < R < 0,75$
500 °K	$0,25 < R < 0,50$
600 °K	Indeterminado



*Figura 13:* Comportamiento de la frontera de interacción entre los modos de pandeo local en función de la temperatura.

Realizando el mismo análisis, para cada uno de los cinco incrementos considerados, obtenemos los resultados que se presentan de forma gráfica en la *Figura 14*. En esta figura se observa una rápida disminución de la Zona Intermedia (Z.I.) y de la región

de pandeo en la placa (PB). Así como también una rápida caída de la carga de pandeo, reflejada en la disminución de las curvas de nivel del parámetro  $\beta_{10}$ .

Para visualizar el comportamiento de la carga de pandeo ante variaciones en la temperatura, seleccionamos seis paneles reforzados, los cuales cumplen la ecuación (4) para valores de  $R$  igual a: 1.20, 1.00, 0.85, 0.75, 0.60 y 0.50. En la parte superior de la *Figura 15* se muestra el comportamiento de las curvas  $P/P_y$  vs  $\varepsilon/\varepsilon_y$  ante los incrementos de temperatura considerados, en donde se puede observar la presencia de valores negativos de  $\varepsilon/\varepsilon_y$ , estos valores tienen su origen en la expansión térmica que experimenta el panel debido al calentamiento al que es sometido. De igual forma se observa que para incrementos de temperatura de 300 °K existe únicamente el modo de pandeo lateral torsional del refuerzo. De igual forma observamos que en los casos en donde existe el modo de pandeo lateral torsional del refuerzo la

caída de la carga de pandeo es pronunciada mientras que para el caso de pandeo de la placa este cambio es menos acentuado. En todos los casos estudiados se observa que para incrementos de temperatura de 500 °K la carga de pandeo se reduce a alrededor del 30% de su valor a temperatura ambiente.

#### 4. Conclusiones

Los resultados presentados han permitido cumplir con los objetivos iniciales del estudio y permiten mencionar las siguientes conclusiones:

- Incrementos en la temperatura originan cambios en los modos de pandeo, originando por tanto la variación de las fronteras de interacción entre los modos de pandeo de la placa y de pandeo lateral torsional del refuerzo, tal como se describe en la *Tabla 5* y se muestra en la *Figura 13*.
- Ante incrementos de temperatura de 300 °K existe únicamente el modo de pandeo lateral torsional del refuerzo, el mismo que había sido identificado como el más crítico.

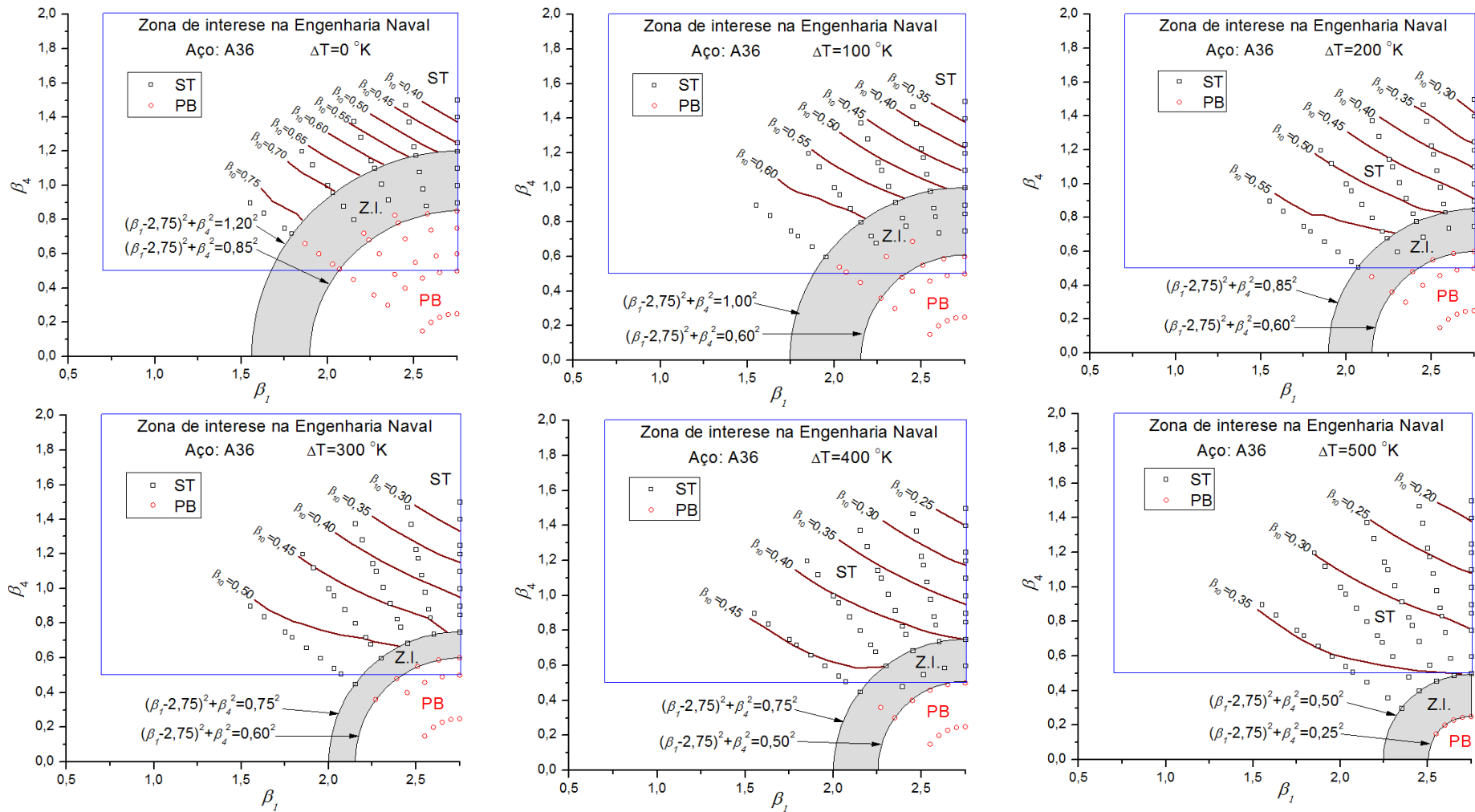


Figura 14: variación de los límites entre los modos de pandeo local debido a incrementos en la temperatura.

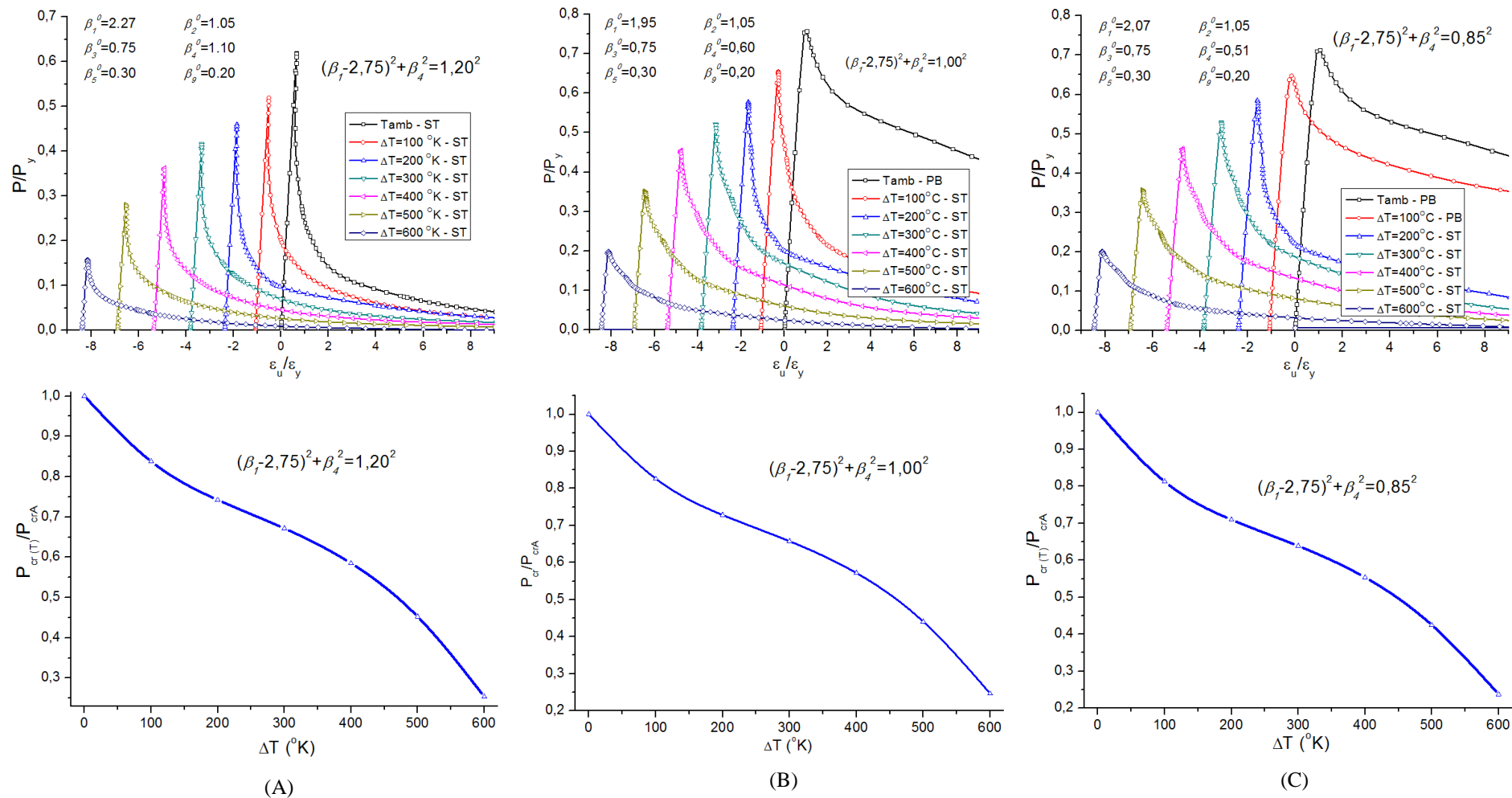


Figura 15: Comportamiento de la carga de pandeo ante variaciones en la temperatura, para valores de  $R$  igual a: 1.20, 1.00, 0.85, 0.75, 0.60 y 0.50.

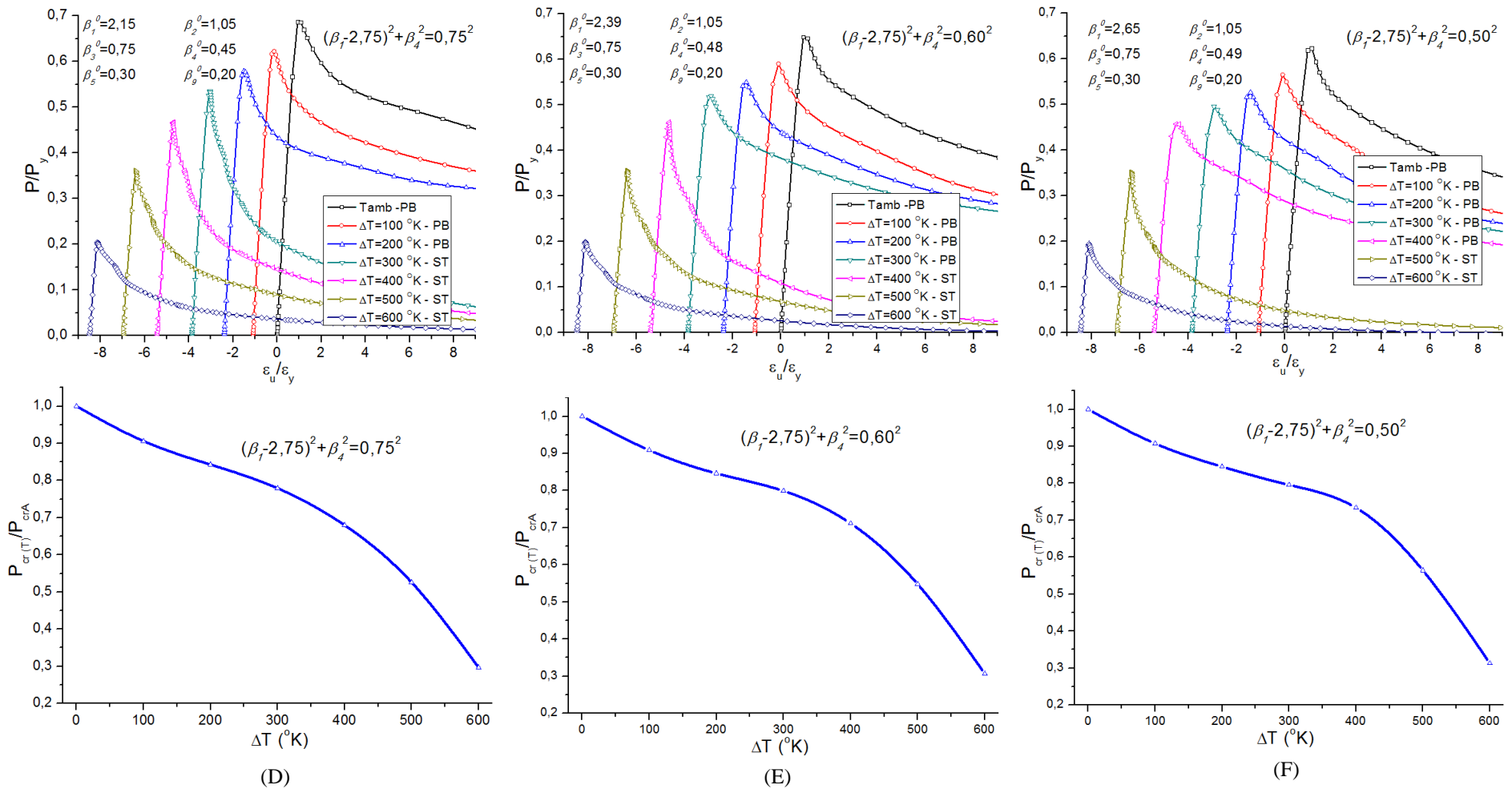


Figura 15 (continuación): Comportamiento de la carga de pandeo ante variaciones en la temperatura, para para valores de  $R$  igual a: 1.20, 1.00, 0.85, 0.75, 0.60 y 0.50.

- La carga de pandeo varia con el incremento de la temperatura, por ejemplo, para incrementos de 300 °K su valor se reduce en 30% de su valor a temperatura ambiente.

## 5. Agradecimientos:

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Agencia Nacional de Petróleo **ANP – PRH-03** por su apoyo económico para la realización de este trabajo.

## 6. Referencias Bibliográficas

[1] Hu, S.Z., Chen, Q., Pegg, N. and Zimmerman, T.J.E., Ultimate Collapse Tests of Stiffened-Plate Ship Structural Units, Marine Structures, Vol. 10, pp. 587 – 610, 1997.

[2] Grondin, G.Y., Elwi, A.E. and Cheng, J.J.R., Buckling of Stiffened Steel Plates – A Parametric Study, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 50, No. 2, pp. 151 – 175, 1999.

[3] Paik J.K. and Thayamballi A.K., Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures, John Wiley & Sons, Limited, 2003.

[4] Sheikh I., Grondin G., Elwi A., Stiffener Tripping in Stiffened Steel

Plates. Structural Engineering Report No.236. University of Alberta, Canada, 2003.

[5] Manco M. R., Flambagem de Painéis de aço enrijecidos em diferentes temperaturas, Dissertação de mestrado-UFRJ/COPPE – Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

[6] ABAQUS/Standard Versión 6.9-2, Copyright © 2009 ABAQUS, Inc.

[7] Smith, C.S., Anderson, N., Chapman, J.C., Davidson, P.C. and Dowling, P.J., Strength of Stiffened Plating under Combined Compression and Lateral Pressure, the Royal Institute of Naval Architecture, Vol. 133, pp. 131 – 147, 1991.

[8] Carlsen, C.A. and Czujko, J., The Specification of Post Welding Distortion Tolerances for Stiffened Plates in Compression, The Structural Engineer, Vol. 56A, No. 5, pp. 133 – 141, 1978.

[9] MPDB Versión 7.08, Copyright © 2009, JAHM Software, Inc.

[10] Riks, E., An Incremental Approach to the Solution of Snapping and Buckling Problems. International Journal of Solids and Structures, Vol. 15, pp. 529 – 551, 1979.