

COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CARGAS DE PANDEO DE PLANCHAS CON REFUERZOS

José María Rodríguez Lamchang

RESUMEN

Debido a la poca experiencia en el medio sobre la estimación de Cargas Críticas de estructuras formadas por planchas con refuerzos, se desarrolló el presente proyecto que pretendía revisar formulaciones para evaluar el parámetro mencionado, y compararlas con resultados de experimentación. La referencia clásica [7], describe cuatro modos de pandeo típicos para dichas estructuras: Plancha entre refuerzos, Flexural de refuerzos longitudinales, Torsional de refuerzos longitudinales, y, Total del panel. Se implementaron formulaciones para cada Modo de Pandeo: plancha simplemente soportada.

Las formulaciones revisadas para la estimación de la Carga Crítica para pandeo de paneles reforzados fueron implementadas, y luego, variando los parámetros geométricos se logró definir cuatro paneles, cada uno de los cuales tenía como mínimo el esfuerzo crítico de uno de los Modos de pandeo ya descritos. Luego, empleando plancha de acero inoxidable de 1.5 mm de espesor, se construyeron dos especímenes de cada tipo de panel, con una longitud máxima de 1.20 m, considerando el equipo disponible. Antes de desarrollar las pruebas, se midieron los espesores y las pre-deformaciones resultantes. Los espesores tenían poca variación; en cambio las pre-deformaciones resultaron elevadas, del orden del espesor de la plancha.

Las pruebas experimentales fueron realizadas en la Máquina Universal de Ensayos de la FIMCP, y se determinó la fuerza máxima que soportaba cada espécimen. En el Pandeo de la plancha entre refuerzos, los resultados experimentales son mayores que los analíticos, porque los bordes de la plancha están soldados a los refuerzos, mientras que el modelo analítico los considera simplemente soportados. En el Pandeo Flexural de refuerzos longitudinales, los resultados teóricos son más altos que los experimentales, porque hubo falla local entre ala y alma de los refuerzos, por la distancia entre puntos de soldadura. En el Pandeo Torsional, quien se torció fue la plancha y no el refuerzo, debido a que no se rigidizó lo suficiente los bordes laterales; esto redujo sustancialmente el esfuerzo crítico experimental. En el Pandeo del panel total, los refuerzos longitudinales se flexionaron en forma paralela, dado que los bordes laterales no fueron suficientemente rigidizados, lo que trajo una diferencia sustancial entre los resultados.

Palabra clave: Pandeo

SUMMARY

Due to the limited experience in the ecuadorean scope on estimation of critical loads of structures formed by plates with reinforcements, this project sought to revise formulations to evaluate the mentioned parameter, and compare it with experimental results. The classic reference [7], describes four typical buckling modes for such structures: plate between

reinforcements, Flexural bending of stiffeners, torsion of stiffeners, and Total deflection of the panel. Formulations were implemented for each buckling mode.

The reviewed formulae for estimating critical load for buckling of reinforced panels were implemented, and after varying the geometric parameters were set four panels, each of whom had at least the effort of one of the critical modes of buckling and described. Then, using stainless steel plate 1.5 mm thick, were built two specimens of each type of panel, with a maximum length of 1.20 m, considering the available equipment. Before developing the test, thickness and the resulting pre-deformation were measured. Thickness had little variation but pre-deformations were high, in the order of the thickness of the plate

The experimental tests were conducted in the Universal Testing Machine of FIMCP, and determined the maximum force that bore the specimen. On the buckling of the plate between stiffeners, the experimental results are larger than the analytic, because the edges of the plate are welded to the reinforcements, while the analytical model considered simply supported. On the Flexural Buckling of longitudinal reinforcement, the theoretical results are higher than experimental ones, because of local failure between flange and web of the reinforcements, the distance between welds. In the torsional buckling, the plate twisted instead of the stiffeners, because side edges were not stiffen enough, and this substantially reduced the experimental effort critical. In total buckling of the panel, the longitudinal reinforcements flexes in parallel, since the edge stiffeners were not enough, resulting in a substantial difference between the results.

Keyword: Buckling

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Fenómeno de Pandeo en Paneles Reforzados.- Pandeo es un fenómeno de “Inestabilidad Elástica”, que puede ocurrir en una estructura larga o “esbelta”, debido a una fuerza compresiva en dirección longitudinal, dando como resultado una deformación en dirección perpendicular a la carga; véase la Figura 1. La fuerza a la cual se produce la deformación lateral, se la denomina “Carga Crítica”, [10].

Partiendo de la descripción de una columna, el fenómeno de pandeo en el caso de paneles reforzados (plancha más refuerzo) producido por una compresión en sus extremos, depende de las condiciones de los extremos, geometría del panel y del

módulo de elasticidad. La geometría está definida por el espesor del planchaje, las separaciones entre refuerzos laterales y longitudinales, la geometría de la sección de los refuerzos, y, las condiciones de frontera. Obviamente las expresiones para el cálculo de la carga crítica de un panel reforzado serán más complicadas que para el caso de una columna simple.

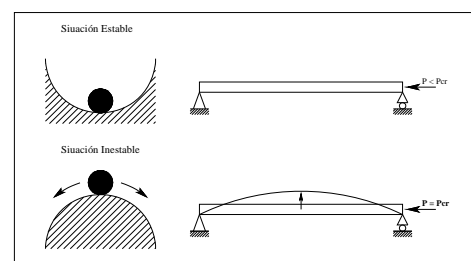


Figura No. 1.- Equilibrio Estático Estable e Inestable.

1.2.- Revisión de Zonas Típicas con Posibilidad de Pandeo en el Casco.- Al navegar un barco, en las diferentes condiciones de mar y de trabajo a las que está sometido, soporta esfuerzos de diferente naturaleza. En *Arrufo* o *Quebranto*, que son dos situaciones idealizadas en que el barco se encuentra con respecto a las olas del mar, se presenta la posibilidad de que se produzcan esfuerzos compresivos y por tanto la posibilidad de pandeo en paneles reforzados. Las zonas de cubierta y el fondo son las que se encuentran a las máximas distancias del eje neutro y por tanto desarrollan los máximos esfuerzos normales de compresión, ver Figura 2.

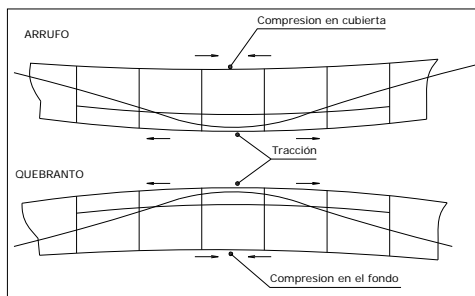


Figura No. 2.- Zonas de Compresión en el buque, [3].

Los esfuerzos normales de compresión, que se presentan en las dos situaciones ideales, anteriormente mencionadas, se los denominan “Esfuerzos Primarios”, considerando al barco como una viga de sección variable.

1.3 Descripción de los Tipos de Pandeo en Paneles Reforzados.- Los tipos o modos de pandeo en paneles reforzados son cuatro y son los siguientes, [7]:

1. Pandeo de planchaje entre refuerzos,
2. Pandeo flexural de refuerzos más planchaje,

3. Pandeo torsional de los refuerzos, y,
4. Pandeo Total de plancha más refuerzos transversales y longitudinales.

Modo 1.- Corresponde al pandeo simple del panel de plancha entre refuerzos. Para el cálculo del “esfuerzo crítico” de este modo de pandeo, existen fórmulas que consideran la razón de aspecto de la plancha, las condiciones de frontera en los bordes y el tipo de carga aplicada.

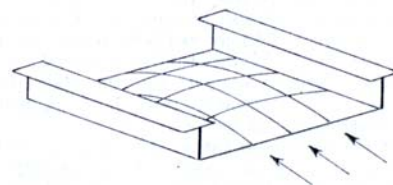


Figura No. 3.- Primer Modo de Pandeo de un Panel Reforzado, [7].

Modo 2.- Este modo es típico de cuadernaje longitudinal, en los que refuerzos sufre una deflexión de manera conjunta con el planchaje; este fenómeno es similar al pandeo de una columna simple. La figura No. 4, muestra la deformación en este modo de pandeo:

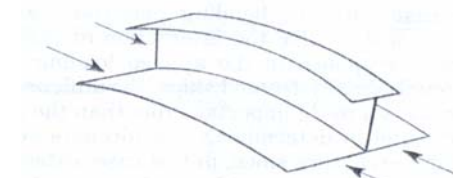


Figura No. 4.- Segundo Modo de Pandeo de un Panel Reforzado, [7].

Modo 3.- Es referido a las deformaciones Lateral-Torsional que sufren los refuerzos del panel, debido a que son relativamente más débiles en torsión que en flexión. Esta falla se inicia por la torcedura de los refuerzos, de tal manera, que las juntas entre los refuerzos y la plancha no se mueven lateralmente. La figura No. 5, muestra este modo, [2] y [7]:

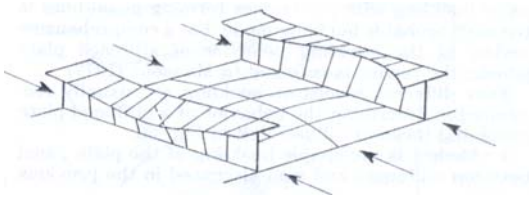


Figura No. 5.- Tercer Modo de Pandeo de un Panel Reforzado, [7].

Modo 4.- Este modo de pandeo ocurre en paneles que tienen refuerzos tanto en dirección longitudinal como transversal. El estudio de este fenómeno ha sido tratado por Mansour [5], entre otros, usando la “Teoría de Planchas Ortotrópicas”.

$$\sigma_{xcr} = k \frac{\pi^2 \sqrt{D_x D_y}}{h_x B^2}, \quad (5)$$

en donde, B , ancho transversal del panel, h_x , espesor efectivo, k , valor calculado dependiendo de las condiciones de frontera. D_x , rigidez flexural en la dirección x , D_y , rigidez flexural en la dirección y .

La figura. No. 6., presenta la deformación típica del pandeo de un panel con refuerzos en las dos direcciones.

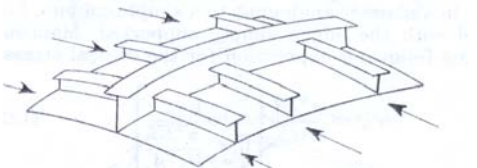


Figura No. 6.- Cuarto Modo de Pandeo de un Panel reforzado, [7].

2.- CÁLCULO DE CARGA CRÍTICA POR PANDEO EN PANELES REFORZADOS

2.1.- Pandeo de Paneles entre refuerzos.-

El primer modo de pandeo de paneles reforzados es el más simple y corresponde a la deformación de la plancha entre los refuerzos, en donde el esfuerzo crítico está en función de la razón de aspecto α y las condiciones de frontera que tenga el panel. Para el caso de un panel rectangular y con bordes simplemente soportados, [7], se establece la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = k_c \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (1)$$

Revisando la fórmula se observa que está en función de la constante k_c , el espesor t , y, de sus dimensiones, Figura No. 7.

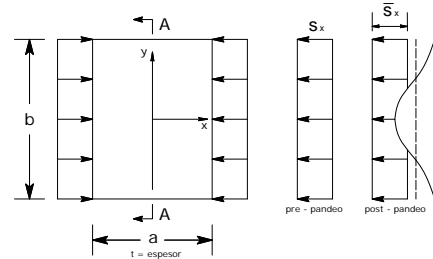


Figura No. 7. - Nomenclatura del pandeo de Plancha, [7].

k_c es un parámetro que está en función de la razón de aspecto a/b y del # de semi-ondas que se produzcan al deformarse la plancha tanto transversal como longitudinalmente, [6]:

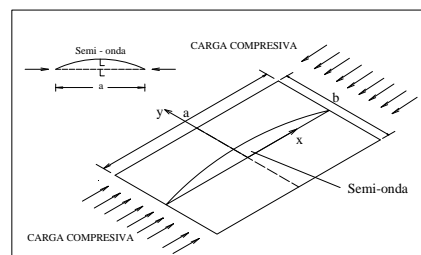


Figura No. 8. Pandeo de una plancha Longitudinalmente Reforzada.

Si $m=1$, se obtiene el valor mínimo del esfuerzo, entonces se recupera la fórmula (2), descrita en el primer capítulo.

$$\kappa_c = \left(\frac{n}{\alpha} + \frac{\alpha}{n} \right)^2$$

Considerando valores extremos de la razón de aspecto, se tienen las siguientes fórmulas deducidas para el cálculo del Esfuerzo Crítico de una plancha rectangular, simplemente soportada en sus bordes. Si $\alpha < 1$ (caso en que la plancha se la considera larga) el esfuerzo crítico corresponderá para $n=1$ y la fórmula para el cálculo del esfuerzo crítico resulta de la siguiente forma:

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{a} \right)^2 (1+\alpha^2)^2. \quad (7)$$

2.2.- Pandeo Flexural.- El segundo modo de pandeo o “Pandeo Flexural”, como ya se lo mencionó en el primer capítulo, consiste en la flexión individual, del refuerzo longitudinal en conjunto con el ancho efectivo de la plancha. Recordando la fórmula del esfuerzo crítico de una columna simplemente soportada, multiplicada por el siguiente factor por el que se incluyen los efectos de las “Deformaciones por Corte”, [7]:

$$Factor = \left[\frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI}{l^2 GA_s}} \right] \quad (8)$$

En este caso participa el Módulo de Corte del material “G” y el área de Corte “ A_s ”.

2.3.- Pandeo Torsional.- El Pandeo Torsional se produce cuando una porción de la plancha con el refuerzo participa de manera conjunta en la torsión. La fórmula para obtener el valor del esfuerzo crítico al cual un panel reforzado sufre este modo de pandeo es la que sigue, [2] y [7]:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(l/r_e)^2} \quad (9)$$

Esta fórmula fue presentada en el capítulo 1, y tiene como particularidad la relación l/r_e , donde, l : Longitud del refuerzo, y r_e : Radio efectivo de giro de la sección transversal. Para el cálculo del r_e se utiliza la siguiente fórmula, [2]:

$$r_e = \sqrt{\frac{n^2(\Gamma + \alpha^2 I_y) + 0.0390 K l^2 + \frac{1}{n^2} \frac{l^4 C}{\pi^4 E}}{I_{pc}}} \quad (9-a)$$

en donde: n : número de ondas a la cual el espécimen pandea en dirección de la carga, Γ : Propiedad de la sección transversal, K : Constante de torsión, C : Constante de resorte, I_{pc} : Momento de Inercia Polar de la sección transversal con referencia al Centro forzado C_E . I_y : Momento de inercia con respecto al eje y.

La constante de resorte C puede ser calculada encontrando el valor mínimo del radio de giro con respecto al número de ondas n , esto es haciendo $\frac{\partial r_e}{\partial n} = 0$, de donde se obtiene:

$$n = \frac{l}{\pi} \sqrt[4]{\frac{C}{E(\Gamma + \alpha^2 I_y)}} \quad (9-b)$$

Despejando la constante C de la ecuación anterior y reemplazando en la ecuación (9-a) se obtiene la fórmula para el radio de giro efectivo:

$$r_e = \sqrt{\frac{2n^2(\Gamma + \alpha^2 I_y) + 0.0390 K l^2}{I_{pc}}} \quad (10)$$

Las constantes K y Γ , dependen de las propiedades de la sección transversal de los refuerzos en conjunto con la plancha. En el caso de una viga-I, que tiene alas de

diferentes dimensiones las constantes mencionadas están definidas como:

$$K = 1/3 dt^3 \quad (11)$$

$$\Gamma = \frac{d^2 I_1 I_2}{I_1 + I_2} \quad (12)$$

en donde, I_1 : Inercia del ala de mayor dimensión con respecto al eje x-y, I_2 : Inercia del ala de menor dimensión con respecto al eje x-y, d : Altura total de la sección.

En la Figura No. 9, se muestra las características de una sección transversal tipo viga-I.

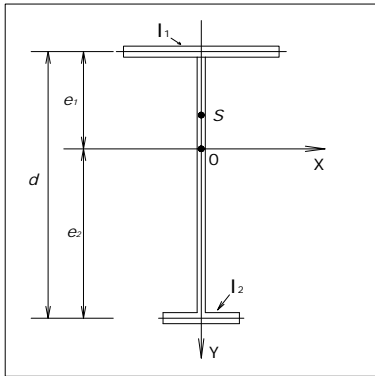


Figura. No. 9. Viga-I con diferente tamaño de alas, [2].

En la figura anterior se destacan dos puntos, O y S en donde: O : centro de gravedad de la sección transversal, y S : centro de rotación forzado.

Observando la fórmula (9a) se puede notar que a medida que se aumenta la longitud del refuerzo y disminuye su “Radio Efectivo de Giro”, se reduce el esfuerzo crítico. También puede notarse que la predicción de la ocurrencia de este modo de pandeo es más complicada que los dos modos mencionados anteriormente. En el esquema del panel se aprecia que en la parte inferior hay una región sombreada, la

cual representa el ancho efectivo de la plancha que es $0.8b$.

Para aplicar la fórmula (9), se tiene que calcular el radio efectivo de giro, para lo cual a su vez se calculan primero Γ , k e I_{pc} . Se realizarán los cálculos con fórmula para un refuerzo en I, teniendo en cuenta el ancho efectivo de la plancha; por tanto las fórmulas a usarse son las siguientes:

$$\Gamma = \frac{d^2 I_1 I_2}{I_1 + I_2},$$

$$K = 1/3 dt^3,$$

$$I_{pc} = I_x + A(h-d)^2$$

2.4.- Pandeo Total de Plancha Reforzada en Dos Direcciones.- El Esfuerzo Crítico por pandeo total de una plancha reforzada es calculado usando Teoría de Planchas Ortotrópica. La fórmula para obtener el valor de dicho parámetro con más de tres refuerzos en dos direcciones es, [5]:

$$\sigma_{xcr} = k \frac{\pi^2 \sqrt{D_x D_y}}{h_x B^2}. \quad (5)$$

Las variables de esta fórmula fueron ya descritas en el primer capítulo, ahora se procederá a explicar su forma de implementación. Para determinar el valor de la constante k se usan las siguientes fórmulas:

Para paneles simplemente soportados, [5] y [7] :

$$k = \frac{m^2}{\rho^2} + 2\eta + \frac{\rho^2}{m^2}, \quad (5-a)$$

y, para paneles simplemente soportados en dos extremos y empotrados en los otros dos extremos:

$$k = \frac{m^2}{\rho^2} + 2.5\eta + 5 \frac{\rho^2}{m^2}, \quad (5-b)$$

donde, m : Es el número de medias ondas de la plancha pandeada, ρ : Radio virtual de aspecto, η : Coeficiente de torsión.

El Radio Virtual de Aspecto se lo obtiene con la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{a}{b} \sqrt[4]{\frac{D_y}{D_x}} = \frac{a}{b} \sqrt[4]{\frac{i_b}{i_a}}, \quad (5-c)$$

donde,

$$i_a = \frac{I_{na}}{S_a} + 2 \left(\frac{I_a - I_{na}}{b} \right) \quad (5-d)$$

$$i_b = \frac{I_{nb}}{S_b} + 2 \left(\frac{I_b - I_{nb}}{a} \right) \quad (5-e)$$

$$D_a = \frac{E I_a}{S_b (1 - \nu^2)}, \quad (5-f)$$

$$D_b = \frac{E I_b}{S_a (1 - \nu^2)}, \quad (5-g)$$

El Coeficiente de torsión se lo obtiene de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{D_{ab}}{\sqrt{D_a D_b}} = \sqrt{\frac{I_{pa} I_{pb}}{I_{na} I_{nb}}},$$

3.- PROGRAMA EXPERIMENTAL DE PANDEO DE PANELES REFORZADOS

3.1.- Descripción del Equipo de Experimentación.- El equipo utilizado para las pruebas de pandeo es una Máquina de Ensayo Universal marca Instron que se encuentra en el Laboratorio de Sólidos de la Facultad de Ingeniería Mecánica. El equipo tiene una fuerza máxima de compresión de 50 ton, y la separación máxima entre la base y el dispositivo compresor es de 1.2 metros, que fue considerado como límite en la construcción de los especímenes, ver foto N° 1.



Foto. No. 1.- Espacio disponible para instalar los especímenes en la Máquina Instron.

Durante las pruebas, el dispositivo mecánico que mueve el papel tuvo problemas, y únicamente se pudo trabajar con velocidades de 5 y 10 mm/seg.

3.2.- Construcción de los Paneles Reforzados.- Para la construcción de los paneles se utilizó plancha de acero inoxidable estándar de 1.5 mm de espesor y soldadura para acero inoxidable. Además, en los extremos se soldaron ángulos de acero de 3"x3"x1/4", para que por su alta rigidez, se pueda distribuir de manera uniforme la fuerza compresiva a todo el borde del panel.

Modo de pandeo N° 1: La geometría del panel para producir el primer modo de pandeo se lo describe en la figura N° 15. Se espera que los paneles de plancha de 20x60 cm entre cada par de refuerzos, pandee en el modo N° 1.

Modo de pandeo N° 2: La geometría del panel para producir el segundo modo de pandeo se lo describe en la figura N° 16. Incluye 4 refuerzos longitudinales en forma de T, y los bordes laterales tienen un

doblez de 1 cm., en la plancha, para rigidizar.

Modo de pandeo N° 3.- La geometría del panel para producir el tercer modo de pandeo se lo describe en la figura N° 17. Se trata de un solo refuerzo con sección transversal en T y en los bordes laterales tienen un doblez de 1 cm., en la plancha.

Modo de pandeo N° 4: La geometría del panel para producir el cuarto modo de pandeo se lo describe en la figura N° 18. Consta de 5 refuerzos longitudinales y 4 transversales, los primeros en platina y los segundos en T. En los bordes laterales se colocaron una platina para rigidizar.

3.4.- Resultados Experimentales.- A continuación se presentan fotografías de los especímenes una vez que llegaron al pandeo.

Modo N° 1: Pandeo de Plancha entre Refuerzos: El panel superior fue el primero en pandear; luego pandearon los dos inferiores, pero soportaron menor deflexión. Los refuerzos transversales se mantuvieron rectos.



Foto. No. 1.- Especimen deformado.

Modo N° 2: Pandeo Flexural: En este caso, se espera que cada refuerzo en conjunto con la plancha se deforme, dejando una región de plancha en la

condición original. En los presentes experimentos todos los refuerzos se flectaron en conjunto con la plancha, sin dejar zona alguna en posición recta.



Foto. No. 2. Especimen deformado.

Modo N° 3: Pandeo Torsional: Se nota que el refuerzo no se torció, sino que la plancha fue quien se torció al alcanzar el Pandeo. Considerando como refuerzo a la plancha, esta tendría mayor altura, y más fácilmente podría torcerse, explicando posiblemente el fenómeno observado.



Foto. No. 3. Especimen deformado.

Modo N° 4: Pandeo Total: La deformación resultante para estos especímenes semejan los resultados del segundo modo de pandeo; esto se debe a que no se colocaron refuerzos en las bordes transversales del panel, suficientemente fuertes para que dichas fronteras trabajen como simplemente soportadas. Al no

colaborar los bordes laterales con soporte, se espera que la resistencia al pandeo decrezca ostensiblemente.



Foto. No. 4. Espécimen deformado.

A continuación se presenta el cuadro de resultados de las fuerzas críticas obtenida experimentalmente para cada espécimen. Se incluye también el área transversal del espécimen que va a desarrollar el esfuerzo crítico:

Modo	Espec.	F.Crit	F. Prom.	Area	Es.Critico
	und	kg	kg	cm ²	Kg/cm ²
Pandeo .P.R	1	2600	2800	9,9	283
	2	3000			
Pandeo Flexural	3	6250	6125	10,8	570
	4	6000			
Pandeo Torsional	5	3400	4100	4,01	1024
	6	4800			
Pandeo Total	7	5000	4850	13,6	357
	8	4700			

Tabla N° 1.- Cuadro de resultado de la Fuerza y Esfuerzo Crítico a la cual pandearon los especímenes.

4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS CON LOS EXPERIMENTALES

Resumen de los Resultados Teóricos y Experimentales.- Cuando una columna totalmente recta y esbelta es sometida a una fuerza de compresión en sus extremos, se espera que falle por pandeo al llegar a su máxima carga crítica [8] y [9]. Sin embargo, si la columna es corta, la fuerza de compresión necesaria para que falle es

tan grande, que antes de que pandee es seguro que falle por exceder el límite de fluencia del material. De manera que el criterio de falla debe considerar tanto el Esfuerzo Crítico de Euler, como el de fluencia, dependiendo de la esbeltez de la columna.

De acuerdo a lo descrito anteriormente la Sociedad de Clasificación ABS, [1], presenta en sus reglas (*Reglas para Construcción y Clasificación ABS, 1996, Parte 3, Apéndice 3C.3; Esfuerzos Críticos de Pandeo*) las siguientes formulaciones para estimar la Carga Crítica para alcanzar pandeo para planchas, [1]:

$$\sigma_c = \sigma_E; \sigma_E \leq \frac{\sigma_F}{2}, \quad (10)$$

$$\sigma_c = \sigma_E \left(1 - \frac{\sigma_F}{4\sigma_E} \right); \sigma_E > \frac{\sigma_F}{2}$$

donde, σ_c , esfuerzo crítico por la Sociedad Clasificadora, σ_E , esfuerzo crítico teórico, y, σ_F , esfuerzo de fluencia del material, 2400 Kg/cm².

Modo	Esfuerzo Crítico	Esfuerzo Crítico ABS	Esfuerzo Crítico Exp
	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
Panel de Plancha	126	126	283
Flexión Ref. Long.	796	796	570
Torsión Ref. Long	3529	1992	1024
Pandeo Panel Total	2426	1806	357

Tabla. No. 2.- Resumen de Esfuerzos Críticos Teóricos y Experimentales

4.2.- Comparación entre los Resultados Teóricos y Experimentales

Al comparar los resultados de los Esfuerzos Crítico analíticos con los experimentalmente, se tuvo en cuenta las pre-deformaciones ocasionadas por el calor generado en la construcción de los especímenes, así como también, la distancia entre cada punto de soldadura.

Modo N° 1: Pandeo de Plancha entre Refuerzos.

Observando los resultados en la tabla N° 10 de las pruebas en los especímenes para el Pandeo de Plancha entre Refuerzos se puede decir que el Esfuerzo Crítico teórico es la mitad del Crítico Experimental. Aquí debe recordarse que para la solución analítica se asumieron los bordes como simplemente soportados, pero en la realidad estaban soldados, aumentando su resistencia.

Modo N° 2: Pandeo Flexural.

En este caso se observó una deformación del ala respecto del alma. Es como si la plancha entre punto de soldadura hubiera pandeado localmente.

Modo N° 3: Pandeo Torsional.

En este caso la diferencia fue aproximadamente del 50%, siendo el Esfuerzo teórico mayor que el experimental, con la particularidad de que en vez de ser el refuerzo que se tuerza, lo fue la plancha haciendo la vez de refuerzo, posiblemente a que no se colocaron refuerzos en los bordes laterales que impidan a la plancha ceder.

Modo N° 4: Pandeo Total.

Como se describió en el Capítulo 3, en estos especímenes los refuerzos longitudinales pandearon básicamente en flexión con los transversales, posiblemente a que no se reforzó los extremos laterales con platinas de mayor dimensión para provocar de alguna forma que el panel se flectara también lateralmente. Esto hubiera incrementado la carga crítica.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se trató el fenómeno de Pandeo causado por esfuerzos compresivos en paneles de plancha con refuerzos, de uso común en buques. Se pretendía alcanzar experiencia en la determinación de las Cargas Críticas, al aplicar formulaciones teóricas para su determinación y experimentación para corroborarlas.

Se encontró en la literatura que existen cuatro modos o formas en que los paneles se podrían deformar luego de alcanzar el Pandeo, y también algunas fórmulas para estimar las cargas críticas, esto es, aquellas Fuerzas que deberían aplicarse para que ocurra este fenómeno. Estos modos son: Pandeo de la plancha entre refuerzos, Pandeo flexural de los refuerzos alineados en la dirección de aplicación de la carga, Pandeo por torsión de los refuerzos, y, el Pandeo con flexión total del panel reforzado.

Los fenómenos mencionados anteriormente, podrían considerarse como posibles en estructuras de barcos, construidos tanto con cuadernaje transversal como con cuadernaje longitudinal. Dependiendo de la geometría que posean los paneles, en el cuadernaje transversal podría producirse el primer modo de pandeo, esto es, flexión del panel de plancha entre refuerzos; esto porque la razón de aspecto influye sobre el esfuerzo crítico, reduciéndolo y haciendo más fácil alcanzar la falla.

Las formulaciones existentes en la literatura para estimar el valor de la Carga Crítica para cada uno de los modos de pandeo, se basan comúnmente en el

Principio de Mínima Energía Potencial, [2], [7] y [5], y están en función de la geometría de los paneles y de las propiedades mecánicas del material.

Los especímenes empleados para comprobar la aplicabilidad de las formulaciones teóricas, debieron construirse con una alta razón de escala por el reducido espacio disponible en la máquina de Ensayos Universales que se empleó para las pruebas. Esto condujo a utilizar plancha de bajo espesor.

RECOMENDACIONES

En general se siente que el corroborar resultados teóricos con dos pruebas experimentales es muy poco. Aún cuando en ciertos casos la diferencia entre los resultados de los dos especímenes era pequeña, se piensa que lo recomendable sería probar al menos tres, por cada tipo de falla esperada. Esto por supuesto es muy dependiente del presupuesto disponible para el proyecto.

Para próximos cálculos de esfuerzos Críticos, por medio de las fórmulas obtenidas de la literatura, se debería tener en cuenta escoger formulaciones que incluyan de forma adecuada otras condiciones de frontera que asemejen más cercanamente a la realidad. O bien, aunque es más complicado, tratar de que las pruebas se desarrollen con los especímenes con bordes simplemente soportados.

Con respecto a la elaboración de los especímenes, sería recomendable incrementar el espesor de planchas y refuerzos, para reducir las pre-deformaciones resultantes y de esta forma se podría aumentar el número de puntos de soldadura para tratar de evitar fallas

locales. Sin embargo, esto posiblemente incrementaría el tamaño de los especímenes, lo cual depende del espacio disponible en la Máquina de Ensayos disponible para las pruebas.

Dado que las pre-deformaciones no se las va a poder eliminar completamente, y debido a que aplicando una carga axial, se produce flexión aún para bajos valores de fuerza aplicada, se podrían colocar extensómetros en ambas caras del panel. De esta forma, promediando las lecturas, se podría estimar el esfuerzo compresivo que se desarrolla en distintos puntos de la estructura.

BIBLIOGRAFIA

1. ABS, Rules for Building and Classing, Hull Construction and Equipment, Parte 3. ABS 1996.
2. Bleich, F., Buckling Strength of Metal Structures. Editado por Bleich, H., 1ra Ed, Columbia, 1952.
3. Boom, B., Arrangement and Structural Component Design. Cap 17, en Ship Design and Construction Vol. II., editado por Lamb, T. SNAME, 2003.
4. Mansour, E., Charts for Buckling and Post – Buckling Analysis of Stiffened plates under combined load. SNAME, Julio de 1976.
5. Mansour, E., Gross Panel Strength Under Combined Loading, Cap 2. SSC, Diciembre de 1977.
6. Muckle, W., Strength of Ships' Structures, Great Britain by the Camelot Press Ltd., 1ra Ed. 1967
7. Paulling, R., Load Carrying Capability and Structure Performance Criteria, 2da rev., ed. por Lewis, E. SNAME, 1988.

8. Popov, E., Introducción a la Mecánica de Sólidos. Editorial Limusa, Primera Edición 1976.
9. Coello, R, Estructuras Navales I, Apuntes de clases. FIMCM, ESPOL, 2004.
10. Timoshenko, S., y Gere J. Theory of Elastic Stability. McGraw – Hill, Segunda Edición, 1961.