

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE PERFILES TUBULARES DE PARED DELGADA SOMETIDOS A FATIGA DE ULTRA-BAJO CICLAJE

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TUBULAR WALL- THREADED SECTIONS SUBMITTED TO ULTRA- LOW CYCLING FATIGUE

Leonardo López¹, María Eugenia Marante², Ricardo Picón³

Recibido 11/08/2017: Aprobado: 13/09/2017

RESUMEN

El presente trabajo de investigación estudia el comportamiento de perfiles estructurales de acero de pared delgada, de producción nacional venezolana Conduven ECO, de sección transversal cuadrada, construidos en forma de viga tipo cantiléver, bajo los efectos de fatiga de ultra-bajo ciclaje. Se realizaron ensayos experimentales aplicándose historias de desplazamientos cíclicos, con baja velocidad y actuando en un rango que va desde el esfuerzo cedente hasta el esfuerzo último del elemento, obteniendo una degradación de la capacidad resistente de los perfiles mediante el fenómeno de fatiga de ultra-bajo ciclaje, inducido por la aparición de la falla por pandeo local en los elementos ensayados.

Palabras clave: *Fatiga de ultra-bajo ciclaje, elementos tubulares de acero, falla por pandeo local*

¹Leonardo López. Docente Investigador en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Ingeniero Civil. Correo: leonardo.lopez@ucla.edu.ve

²María Eugenia Marante. Docente Investigadora en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Ingeniero Civil. Correo: emarante@ucla.edu.ve

³Ricardo Picón. Docente investigador en la Universidad Católica de Temuco. Departamento de Ingeniería Civil de Obras Civiles y Geológicas. Temuco. Chile. Ingeniero Civil. Correo: rpicon@uct.cl

ABSTRACT

The present work of investigation studies the behavior of steel structural sections of thin wall, made in Venezuelan Conduven ECO, of square cross section, constructed in the form of a cantilever type beam, under the effects of fatigue of ultra-low cycling. Experimental tests were carried out applying histories of cyclic displacements, with low speed and acting in a range that goes from the yielding effort to the last effort of the element, obtaining a degradation of the resistant capacity of the elements through the phenomenon of fatigue of ultra-low Cycling, induced by the appearance of the fault by local buckling in the elements tested.

Keywords: *Fatigue of ultra-low cycling, tubular steel elements, failure due to local buckling*

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de Fatiga de ultra-bajo ciclaje (FUBC) observado en ensayos experimentales es causa de degradación de la resistencia en los elementos cuando cargas cíclicas, inducidas mediante historias de desplazamientos controladas, y son aplicadas en un rango de esfuerzos que varían entre el esfuerzo cedente y el esfuerzo último sin superarlo y de manera repetitiva. Tal cual planteó Oller [1] en un determinado número bajo de ciclos, normalmente entre 10^2 y 10^3 , existen estructuras diseñadas para soportar cargas máximas ya sea estáticas o dinámicas de manera eficiente, sin embargo existen fenómenos que ocasionan que las cargas aplicadas en las estructuras sean menores a las máximas soportadas, y al ser cíclicas pueden ocasionar la fatiga del material y su consecuente fallo [2] (ver Figura 1).

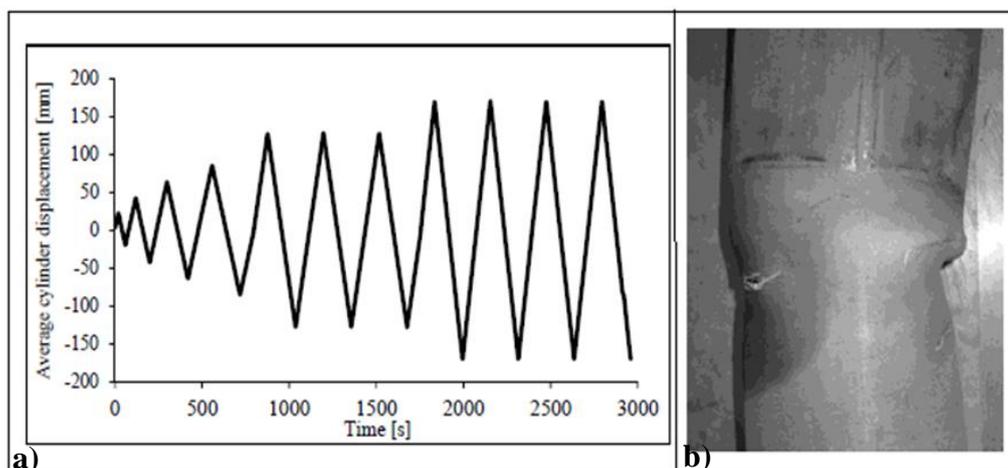


Figura 1. a) Historia de desplazamientos cíclica aplicada en el ensayo, b) tubería afectada por efectos de FUBC (derecha). Fuente: [7]

Algunas estructuras que soportan cargas cíclicas son las costa afuera (Off-Shore), que por efectos del oleaje sufren fatiga en sus elementos estructurales, plasmado en investigaciones como lo son las de [3] y [4]. Otras, a efectos de fatiga como son los aerogeneradores, que están sometidos a cargas cíclicas de viento utilizados como fuente de energía limpia, ejemplo de esto son la investigaciones de [5] y [6]. Un análisis estático y dinámico sobre éstas

estructuras no parece ser suficiente para garantizar su vida útil, es por ello que el análisis del fenómeno de FUBC en los elementos estructurales es de vital importancia. Mediante la aplicación de ensayos experimentales, y según conceptos expresados en investigaciones como en [2] la FUBC se caracteriza por presentar grandes deformaciones plásticas y pocos ciclos de carga hasta la falla, la cual se produce en un inicio por la propagación de grietas a nivel microscópico del acero estructural.

En indagaciones como las llevadas a cabo sobre tuberías de acero [7] y sección circular, demuestran que en éstos perfiles de sección cerrada, el fenómeno de FUBC produce fallas visibles y localizadas cuando se aplican ciclos de carga relativamente bajos, menores a 10^2 ciclos, pero que producen esfuerzos en un rango entre el esfuerzo de plastificación y el esfuerzo máximo del elemento (ver Figura 2). Este tipo de falla es el pandeo local, luego se observa la aparición y propagación de grietas que conducen al fallo total del elemento. El fenómeno de FUBC en perfiles de acero de pared delgada de sección cuadrada, es el estudiado en el presente trabajo de investigación [8].

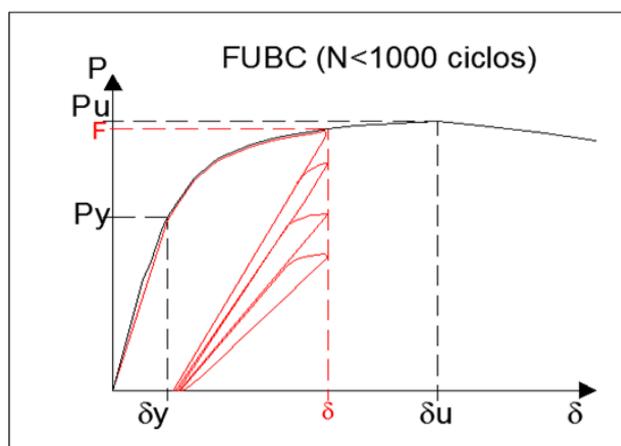


Figura 2. Curva de Fuerza vs Desplazamiento representando el rango en donde se encuentra la Fatiga de ultra-bajo ciclaje. Fuente: los autores

Según la investigación [9] la evolución del daño ocasionado por pandeo local, fue obtenida mediante ensayos experimentales donde se observó que a medida que aumenta el desplazamiento, las pendientes de descarga dejan de ser paralelas y tienden a inclinarse con respecto a la inmediata anterior, indicando que existe una degradación de la capacidad resistente del elemento en cada ciclo ensayado, debiéndose introducir el concepto de rotación plástica conductora del pandeo P_{cr} , que sirve para identificar el valor máximo de rotación plástica y a partir del cual la capacidad resistente del perfil disminuye con cada ciclo progresivo, tal como se observa en la Figura 3.

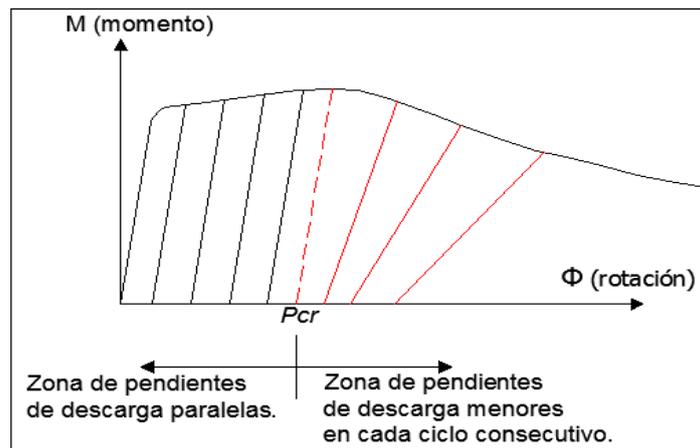


Figura 3. Esquema de identificación de P_{cr} . Fuente: los autores

1. METODOLOGÍA

Para simular los efectos de fatiga de ultra-bajo ciclaje se ejecutaron una serie de ensayos experimentales con probetas confeccionadas con perfiles tubulares de acero de pared delgada en el laboratorio de mecánica estructural del Decanato de Ingeniería Civil de la UCLA, donde fueron soldadas a una placa de acero de 5,00 cm de espesor, apoyándose en una base de concreto reforzado, dejándose un extremo libre el cual se acopló el actuador hidráulico servo-controlado de 150 kN de capacidad (ver Figura 4).

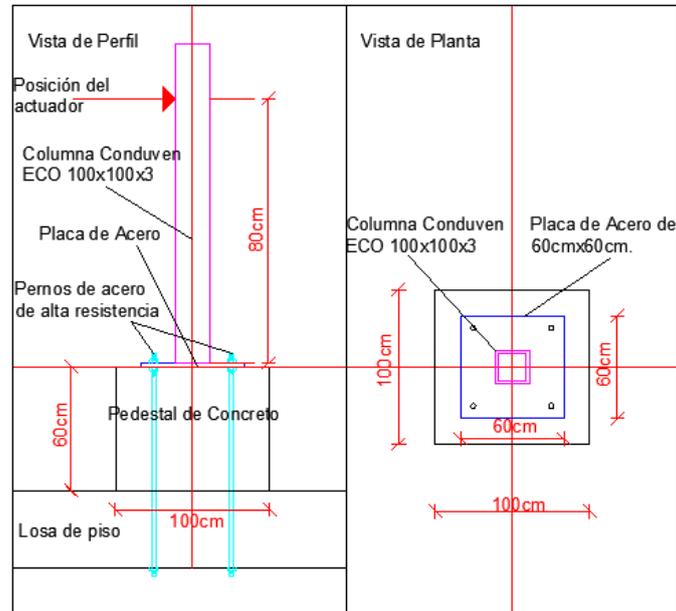


Figura 4. Esquema de implementación de los ensayos experimentales. Fuente: los autores

Los procedimientos experimentales constaron de la imposición de desplazamientos laterales en una sola dirección (δ), registrándose para cada instante la carga generada (P). La longitud de las probetas fue fijada en 80,00 cm, ya que el actuador ejerce un desplazamiento máximo de 25,00 cm en dirección positiva o negativa. Para manipular estos datos, se programó en el

sistema para que el tiempo del ensayo, el desplazamiento y la fuerza generada fuesen almacenados en un archivo de formato .txt para su fácil manipulación. En primer lugar una probeta fue sometida a cargas laterales de naturaleza unidireccional, con el objetivo de conocer las propiedades básicas del perfil: la fuerza última P_u , la fuerza cedente P_y y los desplazamientos correspondientes. Se implementó una historia de desplazamientos de incrementos constantes (ver Figura 5).

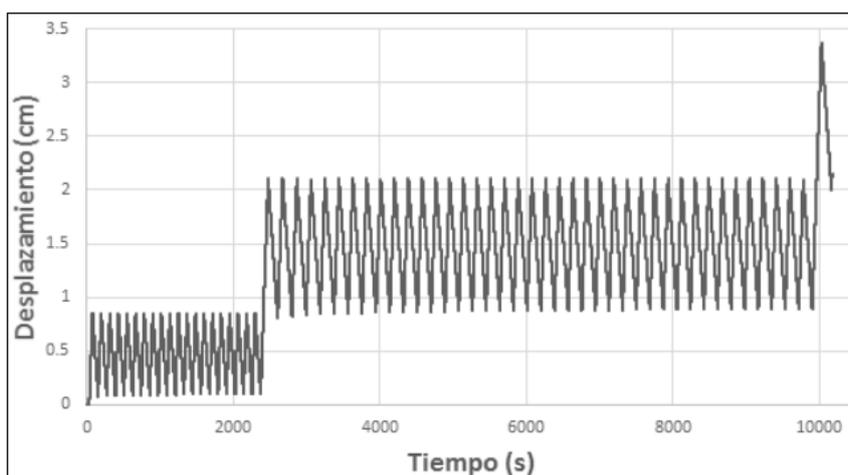


Figura 5. Historia de desplazamientos de incrementos constantes aplicada al ensayo inicial (ensayo de identificación de P_y y P_u). Fuente: los autores

En este ensayo se programó una historia de desplazamientos de 0,00 a 0,85 cm en 20 ciclos, de 0,85 cm a 2,10 cm en 40 ciclos y de 2,10 a 3,30 cm. El comportamiento observado en el ensayo de identificación permitió organizar la programación de los demás realizados, tal como se muestra en las Figuras 6 y 7.

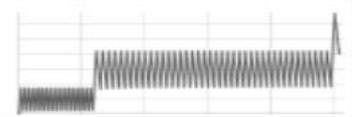
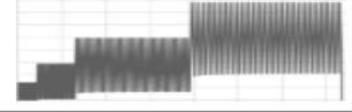
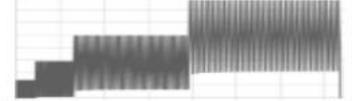
Ensayos monosigno.		Historia de desplazamiento.
Ensayo 1 (identificación de P_y y P_u).		
Ensayos para verificación de la calidad de la soldadura.	Ensayo 2	
	Ensayo 3	
	Ensayo 4	
	Ensayo 5	

Figura 6. Esquema de ensayos realizados. Fuente: los autores

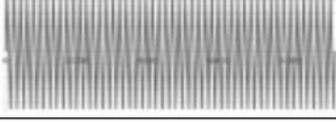
Ensayos ciclicos.		Historia de desplazamiento.
Ensayos para identificación del tipo de falla.	Ensayo 6	
	Ensayo 7	
	Ensayo 8	

Figura 7. Esquema de ensayos realizados. Fuente: los autores

Los ensayos 2, 3, 4 y 5, fueron realizados bajo la modalidad de aplicación de cargas monosigno, con la intención de observar el comportamiento de la unión perfil-placa. La historia de desplazamientos fue implementada de la siguiente manera: 20 ciclos desde un desplazamiento 0,00 hasta un desplazamiento de 0,27 cm, 20 ciclos desde un desplazamiento 0,00 hasta un desplazamiento 0,57 cm; 40 ciclos desde un desplazamiento 0,00 hasta un desplazamiento 0,98 cm; y 40 ciclos desde un desplazamiento 0,00 hasta un desplazamiento de 1,55cm, como se observa en la Figura 8.

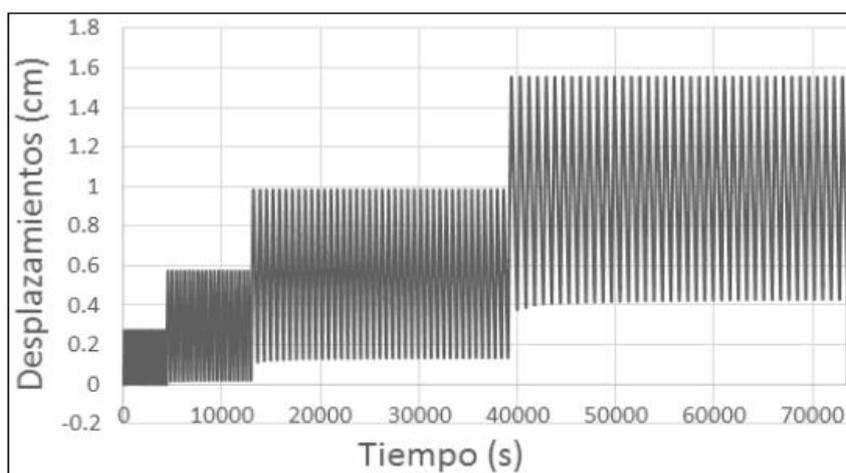


Figura 8. Historia de desplazamientos unidireccionales y de incrementos constantes aplicada a los ensayos 2, 3, 4 y 5. Fuente: los autores

Los ensayos 6, 7 y 8 se realizaron bajo la modalidad de aplicación de cargas cíclicas, cada historia de desplazamientos se describe en su correspondiente ensayo, el objetivo fue el de determinar si tipo de falla correspondía a micro-fisuración y crecimiento de grietas [10], o a la aparición del pandeo local. La probeta empleada en el ensayo número 6, fue sometida a desplazamientos cíclicos de $\pm 1,60$ cm como se muestra en la Figura 9, se realizaron 18 ciclos, en el ensayo número 7 la historia de desplazamientos utilizada fue de $\pm 1,20$ cm, aplicándose un total de 40 ciclos, la probeta del ensayo 8 fue sometida a la historia de desplazamientos de

$\pm 0,90$ cm y se aplicaron 50 ciclos.

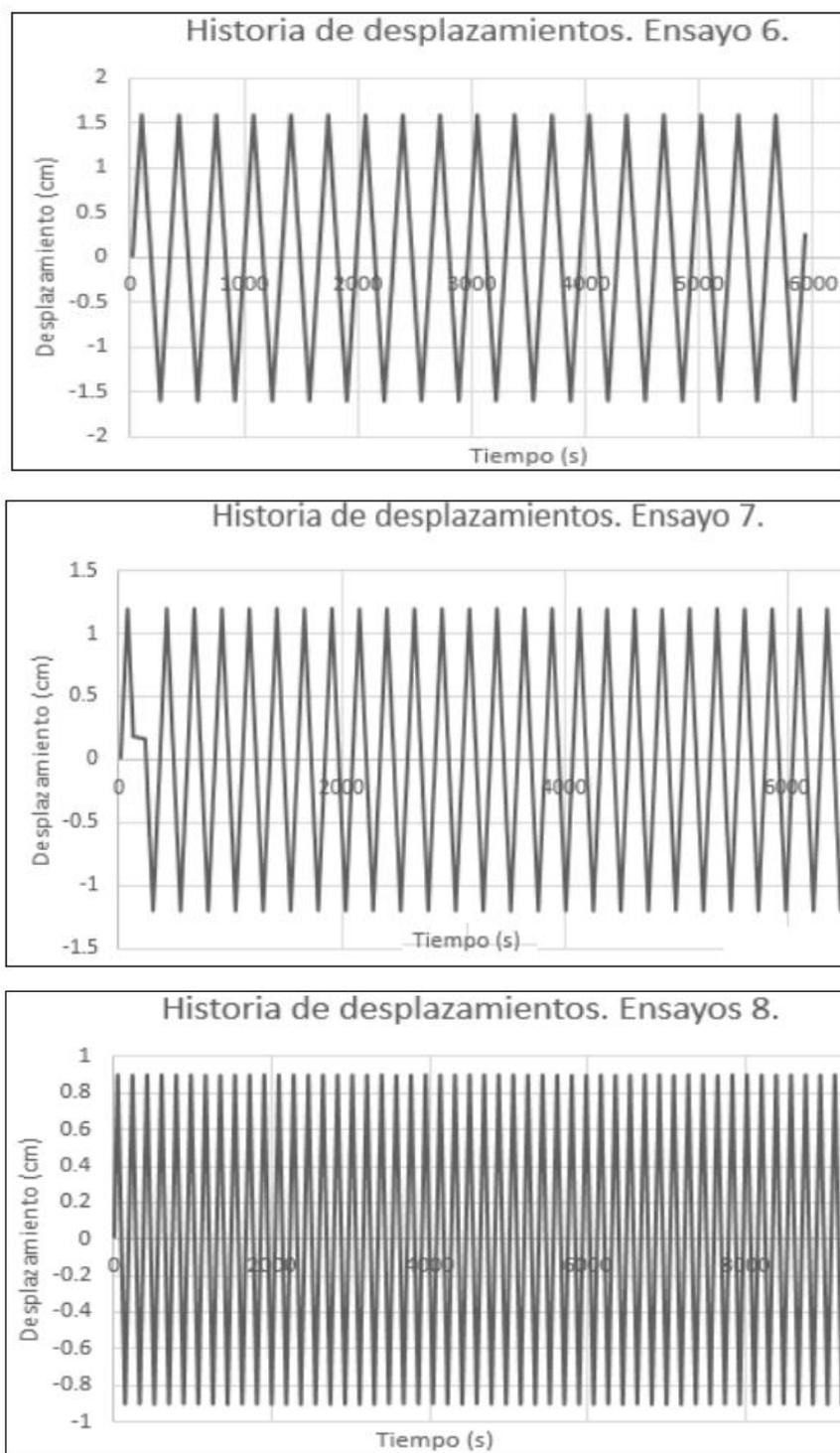


Figura 9. Historia de desplazamientos de incrementos constantes aplicada a los ensayos 6, 7 y 8.
Fuente: los autores

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La finalidad de los ensayos 2, 3, 4 y 5 fue verificar la influencia de la soldadura en la unión perfil-placa garantizando mediante estos ensayos que existiera una correcta conexión. Mediante la observación de los ensayos 6, 7 y 8 se pudo notar que el tipo de falla ocurrida en

los perfiles de acero de pared delgada bajo efectos de FUBC, viene dado por la aparición del pandeo local. En el ensayo inicial se logró obtener los límites para definir las historias de desplazamientos a ser impuestas en el resto de los ensayos experimentales, estos límites fueron $P_y=726,03$ kg, $\delta_y=0,416$ cm, $P_u=2088,00$ kg y $\delta_u=2,075$ cm (ver Figura 10).

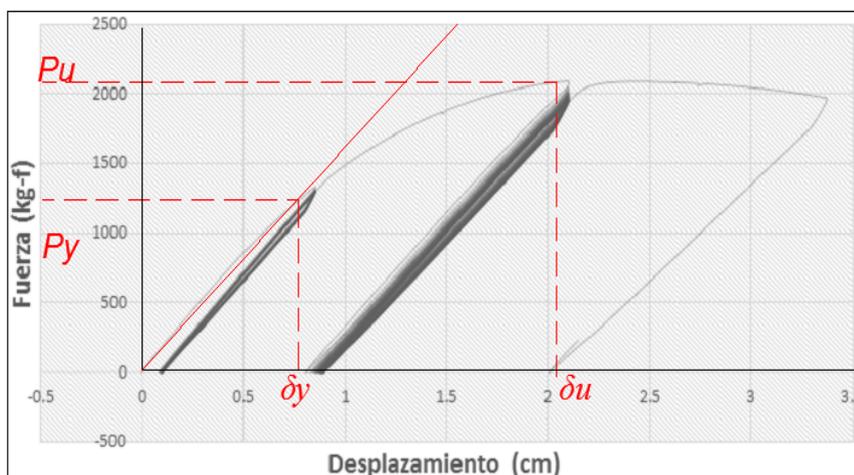


Figura 10. Curva de comportamiento (δ vs P) del ensayo inicial. Fuente: los autores

La grafica mostrada en la Figura 9 “Fuerza vs Desplazamiento”, debe ser transformada a una gráfica de momento “Flector vs Rotación” para determinar la rotación plástica conductora del pandeo local, parámetro denominado P_{cr} . El momento flector se obtiene multiplicando la fuerza generada en el actuador, que es perpendicular al perfil, por la altura del perfil que es de 80,00 cm. Para determinar las rotaciones, se divide el desplazamiento por esta longitud; la gráfica resultante se muestra en la Figura 11.

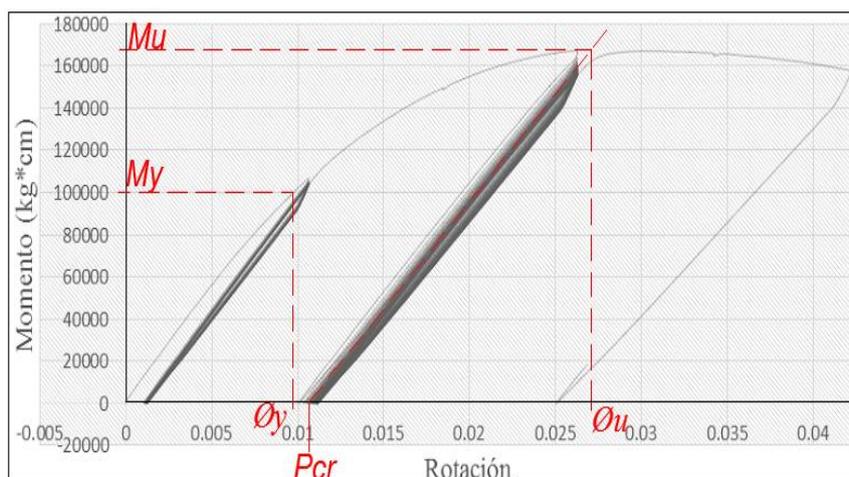


Figura 71. Curva de comportamiento (θ vs M) del ensayo inicial. Fuente: los autores

También se pueden extraer de la Figura 11 los valores del momento último que soporta el perfil (M_u) y los de momento bajo el cual el comportamiento del perfil deja de ser elástico (M_y), siendo $M_u=167,040$ kg*cm y $M_y=100,000$ kg*cm. A partir de este momento último M_u

se obtiene la rotación plástica conductora del pandeo cuyo valor es $P_{cr} = 0,01150$. A partir de esta rotación la degradación de la rigidez del material se acentúa, por tanto, para rotaciones permanentes mayores a $0,01150$ los valores de momento correspondientes no serán mayores a M_u , indicando que el perfil no puede aumentar su capacidad de resistir momentos aun cuando su rotación permanente sea mayor a P_{cr} .

Mediante la inspección visual de la probeta del ensayo 6 se logró observar la formación de una arruga en ambas caras perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga; se nota de manera clara la evolución del pandeo local durante los ciclos consecutivos, éste fue detectado durante el segundo ciclo cuando el perfil aun no alcanza su capacidad última. En la Figura 12, se observa que el momento alcanzado es igual a $M=154,633$ kgf.cm, lo que representa el 92% de la capacidad del perfil.

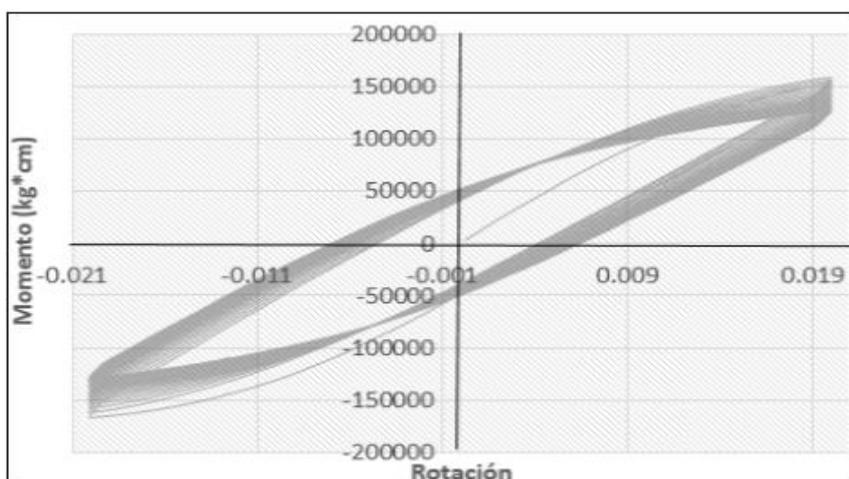


Figura 8. Curva de comportamiento (\varnothing vs M) del ensayo 6. Fuente: los autores

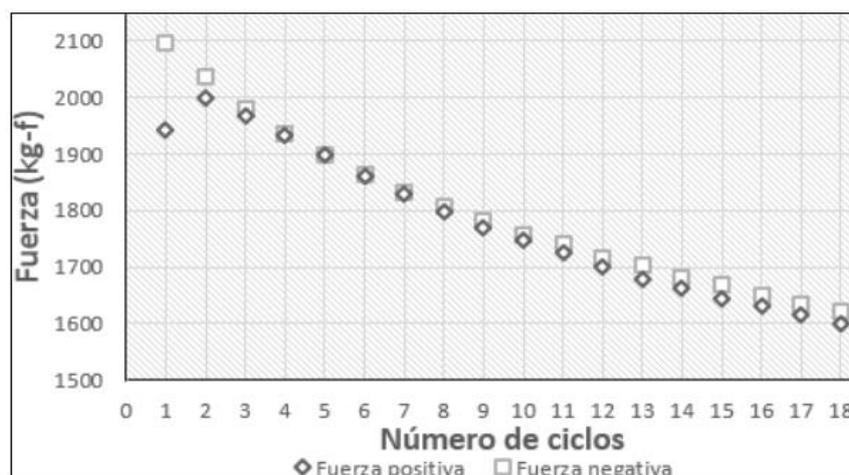


Figura 9. Fuerzas máximas positivas y negativas registradas en el ensayo 6. Fuente: los autores

La degradación de resistencia en la probeta se evidencia en la Figura 13, donde a medida que continúan los ciclos de carga y descarga, las fuerzas máximas positivas y negativas

alcanzadas disminuyen a pesar de alcanzar el mismo desplazamiento. Esto sucede debido a que el daño en el perfil avanza y deteriora la sección transversal del mismo, reduciendo la fuerza máxima que se alcanza en cada ciclo.

Durante el ensayo 7 también se logró observar la formación de pandeo local en la probeta; se nota de manera clara la evolución del mismo detectado durante el tercer ciclo cuando aún no se alcanzó su capacidad última. En la Figura 14 que corresponde a la gráfica de “Momento vs Rotación” del ensayo, se determina que el momento alcanzado es igual a $M=129,125 \text{ kgf*cm}$, lo que representa el 77% de la capacidad del perfil.

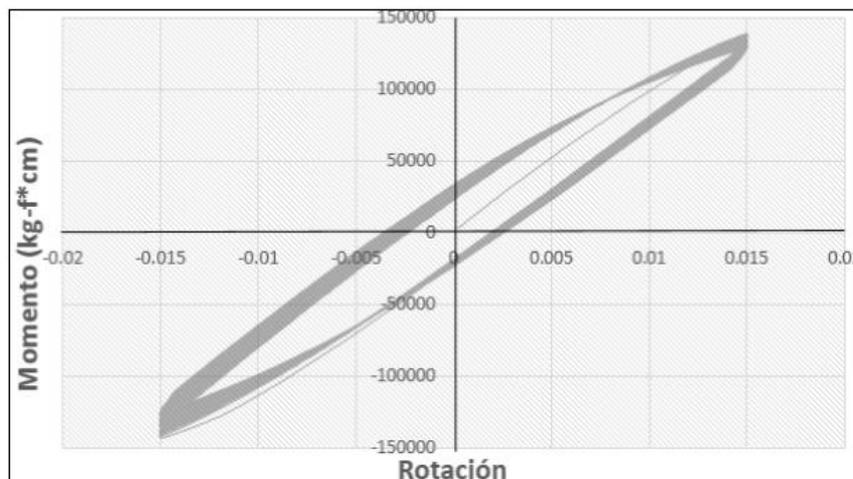


Figura 14. Curva de comportamiento (ϕ vs M) del ensayo 7. Fuente: los autores

Luego de realizado éste ensayo se pudo observar la degradación de la resistencia en la probeta durante cada ciclo consecutivo (ver Figura 15), como también fue observado en el ensayo 6.

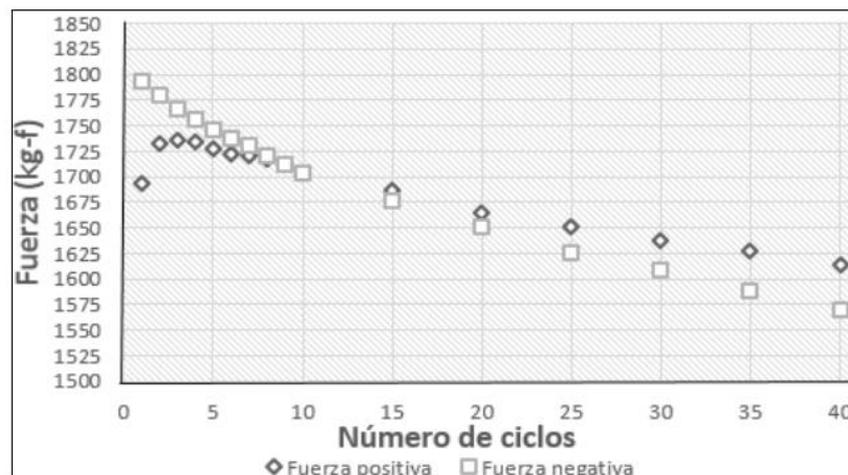


Figura 10. Fuerzas máximas positivas y negativas registradas en el ensayo 7. Fuente: los autores

En el ensayo 8 se pudo observar el pandeo local de manera muy leve, en ciclos avanzados del ensayo, no se observó la aparición y propagación de grietas, la curva de comportamiento se muestra en la Figura 16. La degradación de la resistencia también es evidente al notar que

para ciclos consecutivos y al llegar al mismo desplazamiento $\pm 0,90$ cm el momento flector alcanzado siempre disminuye.

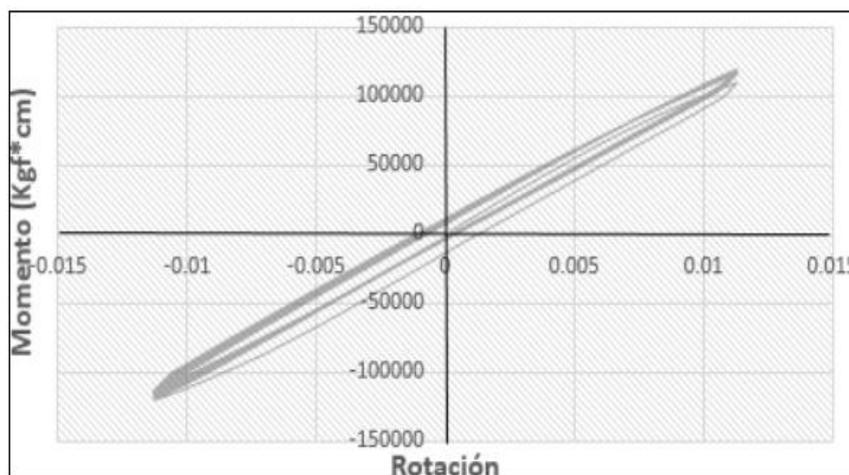


Figura 11. Curva de comportamiento (ϕ vs M) del ensayo 8. Fuente: los autores

4. CONCLUSIONES

Se presentan resultados experimentales de elementos tubulares de acero de pared delgada sometidos a Fatiga de ultra-bajo ciclaje, pudiendo ser importantes para futuras investigaciones ya que expresan una metodología descrita para realizar ensayos de este tipo, y obtener resultados satisfactorios. Luego de ser aplicados ensayos experimentales de naturaleza unidireccional para la determinación de la calidad de la conexión placa-perfil, se concluye que es necesario aplicar una historia de desplazamientos cíclica para poder obtener el tipo de falla en el elemento.

Aunque en la concepción de esta investigación se invirtió tiempo y esfuerzos considerables para tratar de observar y de alguna manera medir la aparición y consecutiva propagación de grietas, el fenómeno que conduce el fallo de los perfiles cerrados de pared delgada es el fenómeno del pandeo local, y la degradación de la resistencia de los elementos ensayados ocurre cuando las rotaciones plásticas acumuladas superan el valor de P_{cr} tal como el observado en la Figura 3. En los ensayos experimentales cíclicos, de amplitudes $\pm 1,60$ cm y $\pm 1,20$ cm, se aprecia con facilidad la aparición de la abolladura local e inclusive el ciclo donde se presentaba, el fallo del perfil se produjo por pandeo local como demuestran los resultados y esto se debe la acumulación de las rotaciones plásticas.

5. REFERENCIAS

- [1] S. Oller, FRACTURA MECANICA UN ENFOQUE GLOBAL, Barcelona, España, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2001.
- [2] J. Arana y L. Gonzalez, Mecánica de Fractura, Bilbao, España: Servicio Editorial,

- 2008.
- [3] A. Loureiro, Ensayos de Estructuras Offshore y Otras Estructuras Singulares. Ingeniería de Puertos y Costas. CEDEX., Madrid, España, 2000.
 - [4] G. Maciel, The WindFloat Project, EDP. Inovacao, 2010.
 - [5] D. Fernandez de Rucoba, Optimización del Diseño a Fatiga de Uniones Soldadas a Tope y su Aplicación al Dimensionamiento de Soldaduras Transversales de Torres Eólicas, Santander, España, 2012.
 - [6] L. Calderón, Propuesta de Optimización Estructural de Torre Eólica Metálica Sometida a cargas Estáticas, Catalunya, España, 2012.
 - [7] J. C. R. Pereira, J. Van Wittenberghe, A. Jesus, P. Thibaux y A. A. Fernandes, ULTRA LOW CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF FULL-SCALE STRAIGHT PIPES UNDER ALTERNATING BENDING, Vancouver, British Columbia, Canada: Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, 2016.
 - [8] L. Lopez, Análisis Numérico-Experimental de Estructuras de Acero con Perfiles Tubulares de Pared Delgada Sometidos a Fatiga de Ultra-Bajo Ciclaje, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Lara, Venezuela, 2017.
 - [9] R. Febres, P. Inglessis y J. Flórez-López Modeling of local buckling in tubular steel frames subjected to cyclic loading. Computers and Structures 81 (2003) 2237-2247, 2003.
 - [10] H. R. Amiria, A. Aghakouchaka, S. Shahbeyka y M.D. Engelhardt, Finite element simulation of ultra-low cycle fatigue cracking in steel structures, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Teheran, Tarbiat Modares University, Journal of Constructional Steel Research 89 175-184, Elsevier, 2013.