



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revenct
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



Quiébranos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia

Patrimonio del Estado Zulia e
interés Cultural desde 2001

Fecha de Construcción:
1954-1958

Diseño: Arquitecto Carlos Raúl
Villanueva, con elementos
novedosos de adaptación
climática.

Policromía de la obra: Artista
Zuliano Víctor Valera.

Bending behavior in HSS elements subject to ultra-low cycle fatigue using the concentrated damage model: Numerical simulation

L. López¹, M. E. Marante¹, J. Torres² , R. Torres² , W. Barreto^{1,2} , R. Picón^{1,2*} 

¹Laboratorio de Mecánica Estructural. Departamento de Ingeniería Estructural. Universidad Centrocidental "Lisandro Alvarado". Barquisimeto 3001. Venezuela.

²Departamento de Obras Civiles y Geología. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Temuco 4780000. Temuco. Chile.

*Autor Contacto: rpicon@uct.cl

<https://doi.org/10.22209/rt.ve2019a13>

Recepción: 20/06/2019 | Aceptación: 03/11/2019 | Publicación: 01/12/2019

Abstract

This paper studies the bending behavior of steel elements of hollow structural sections (HSS), subjected to effects of cycle ultra-low fatigue (FUBC). The FUBC phenomenon is present when the strength exceed the yield of the material, producing a decrease in its strength each time the same displacement is achieved. The cycle ultra-low fatigue effect can affect civil structures such as eolic towers and offshore structures. Experimental tests and numerical simulations are presented using the Concentrated Damage Model (MDC). The MDC is based on the theory of plasticity and mechanics of continuous damage. The results obtained numerically can be compared with the experimental ones, having the calibration of model parameters and an adequate behavior. The permanent deformations and the level of damage in the HSS profile are results obtained as numerical simulation. The level of damage, physically representing the degree of local buckling that presents the HSS element, which is slight and its load drop due to repetitive displacements.

Keywords: cycle ultra-low fatigue; HSS elements; local buckling; plastic hinges; lumped damage model; plastic deformations and damages.

Comportamiento a flexión en perfiles HSS sujeto a fatiga de ultra-bajo ciclaje con el modelo de daño concentrado: Simulación numérica

Resumen

El presente trabajo estudia el comportamiento a flexión de perfiles de acero de secciones estructurales huecas (HSS), sometidos efectos de fatiga de ultra-bajo ciclaje (FUBC). La FUBC se hace presente cuando los esfuerzos superan el esfuerzo cedente del material, produciendo una disminución de su resistencia cada vez que se alcanza el mismo desplazamiento. El efecto de ultra-bajo ciclaje puede afectar a las estructuras civiles como las torres eólicas y las estructuras costa afuera. Se presentan ensayos experimentales y simulaciones numéricas usando el Modelo de Daño Concentrado (MDC). El MDC se basa en la teoría de plasticidad y mecánica del daño continuo. Los resultados obtenidos numéricamente se pueden comparar con los experimentales, teniendo un adecuado comportamiento y calibración de parámetros del modelo. Resultados numéricos se obtienen las deformaciones permanentes y el nivel de daño en el perfil HSS. El nivel de daño, representando físicamente el grado de pandeo local que presenta el perfil HSS, el cual es leve y su caída gradual de la carga por alcanzar desplazamientos repetitivos.

Palabras clave: fatiga de ultra-bajo ciclaje; perfiles HSS; pandeo local; rótula plástica; modelo de daño concentrado; daño; deformación plástica.

Introducción.

Las estructuras pueden estar sometidas a acciones cíclicas, generando un efecto de fatiga del material. El deterioro físico que genera la fatiga es la presencia de grietas, fisuras y pérdida de rigidez en la estructura. Según S. Oller [1], se pueden clasificar los rangos de fatiga, desde "Fatiga Ultra-Bajo Ciclaje" (FUBC), pasando por "Fatiga de Bajo Ciclaje" (FBC) hasta llegar a "Fatiga de Alto Ciclaje" (FAC). Algunas estructuras pueden estar sometidas a FAC, como por ejemplo los puentes y estructuras costa afuera. Estas estructuras se caracterizan por soportar cargas repetitivas con un número mayor de 10^5 ciclos y sus esfuerzos siempre varían en el rango elástico [1,2]. Mientras que la FBC se presenta con ciclos de cargas entre 10^2 y 10^5 y los esfuerzos se encuentran entre el esfuerzo máximo elástico y el esfuerzo último. La fatiga ultra-bajo ciclaje se caracteriza por que la estructura pierde rigidez con esfuerzos aplicados entre el máximo elástico y el último, con cargas repetitivas menores de 10^2 ciclos.

Existen varios modelos que se han usado en el mundo de la ingeniería para representar el deterioro de las capacidades estructurales de las estructuras, tomando gran importancia durante la década del 50, uno de estos modelos que fue propuesto en investigaciones como las de Kachanov [3] donde tomaba en cuenta el daño del elemento a escala microscópica y a escala macroscópica. A escala microscópica el daño se puede definir como la rotura de ligaduras atómicas y el agrandamiento irreversible de micro-cavidades. A escala macroscópica se puede tomar un elemento representativo de volumen en donde esté contenido el plano de falla de estas micro-cavidades. Basados en este modelo siguieron un número considerable de investigaciones como las de Lemaitre [4], en donde el autor propuso que cuando se produce una rotura de ligaduras atómicas comienza el proceso de daño y se crean micro-deformaciones plásticas.

Varios modelos numéricos se han desarrollado para simular este fenómeno de fatiga. Algunos modelos pueden describir el comportamiento cíclico de los materiales metálicos bajo rutas de cargas proporcionales y no proporcionales, descuidando el efecto cuasi unilateral, así como la localización del daño por fatiga en la superficie libre de la muestra [5]. Otros modelos consideran el endurecimiento o ablandamiento isotrópico y cinemático en relación con el daño material [6,7]. Y modelos propuestos totalmente tridimensional también son implementados en un código de elementos finitos [8-11].

En este artículo se realiza un estudio experimental [12] y numérico del comportamiento de estructuras de acero conformadas con perfiles HSS bajo cargas cíclicas sujeto a fatiga ultra-bajo ciclaje. Los perfiles HSS proviene del nombre en inglés de estos perfiles (Hollow Structural Sections). Y son tubos estructurales de acero formados en frío huecos, con secciones transversales diferentes (cuadrados, redondos y rectangulares). Es importante

conocer el comportamiento de los materiales y uso de las estructuras sujetas a fatiga y los daños físicos que pueden presentarse [13-15]. El modelo de daño concentrado (MDC) para análisis de estructuras de acero con perfiles HSS es usado en este trabajo. Este modelo fue implementado como un elemento finito de usuario en ABAQUS. Dicho modelo se basa en la teoría de plasticidad y la mecánica de la fractura [7]. El MDC es un modelo simple y a la vez complejo, ya que permite modelar diferentes fenómenos físicos como la plasticidad con endurecimiento cinemático e isotrópico y el pandeo local (daño) que sufren este tipo de perfiles. Los resultados numéricos obtenidos reflejan una buena correlación con los resultados experimentales. Pudiendo validar los parámetros del modelo numérico usados.

Materiales y Métodos

Modelo de daño concentrado (MDC) para estructuras de acero con perfiles HSS.

El modelo numérico desarrollado en base a la mecánica de la fractura y la teoría de plasticidad [7,15] fue tomado en cuenta en este trabajo. Se considera uno de los modelos simples y a la vez completos para modelar diferentes fenómenos físicos en estructuras con perfiles HSS. El MDC desarrollado como un elemento finito, maneja las ecuaciones cinemáticas, ecuaciones de equilibrio y la ley de comportamiento para su análisis [15]. Considerando un elemento "b" de acero tipo HSS, las siguientes variables se incorporan en el MDC (figura 1):

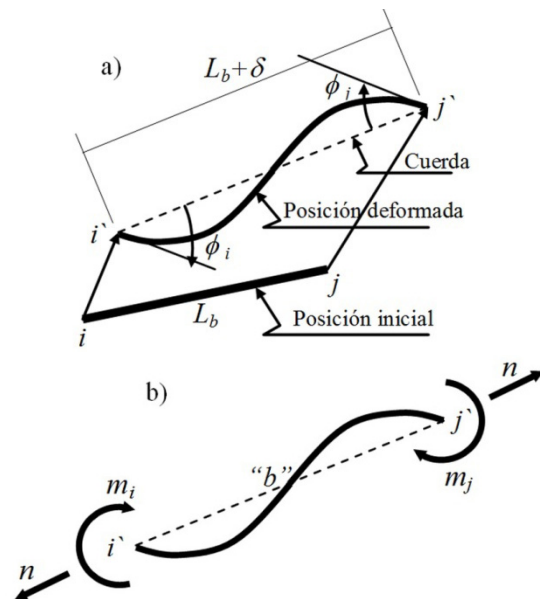


Figura 1. a) Deformaciones generalizadas. b) Esfuerzos generalizados

Las deformaciones generalizadas son las deformaciones totales que sufre el elemento y se representa por el vector $\{\Phi\}_b^t = \{\phi_i, \phi_j, \delta\}$ (figura 1a). Mientras que los esfuerzos generalizados son ordenados por el vector $\{M\}_b^t = \{m_i, m_j, n\}$ (figura 1b). Uno de los fenómenos físicos que toma en cuenta el modelo son las deformaciones permanentes $\{\Phi^p\}_b = \{\phi_i^p, \phi_j^p, 0\}$, asumiendo una deformación permanente axial nula. El pandeo local (como una variable de daño) con la pérdida de rigidez. Los daños ocurridos en el elemento están relacionados directamente con el pandeo local y su pérdida de rigidez. El grupo de variables de daños por pandeo local se introducen en el modelo con $(D^+)_b = (d_i^+, d_j^+)$ para acciones positivas y $(D^-)_b = (d_i^-, d_j^-)$ para acciones negativas (figura 2b), logrando tomar valores entre cero y uno, cero si el elemento no está dañado y uno si está totalmente dañado. El pandeo local se caracteriza físicamente como se observa en la figura 2.

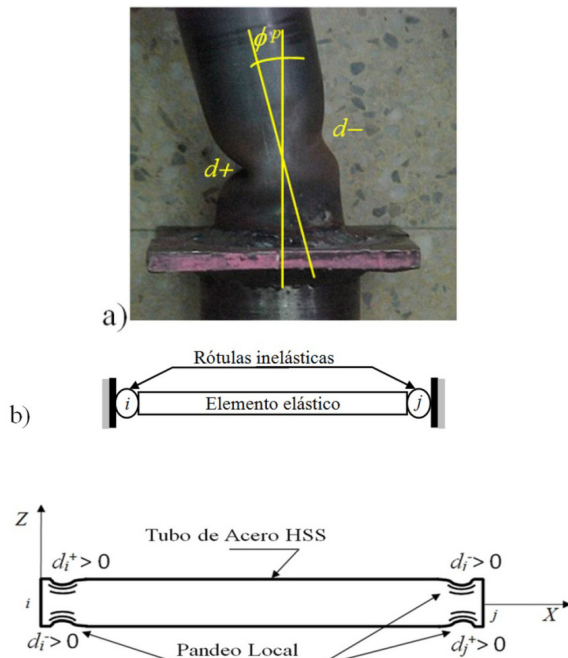


Figura 2. a) Pandeo local en un extremo. b) Modelo de daño concentrado y representación de las variables de daño (pandeo local) en cada extremo del elemento

Se describe brevemente el grupo de ecuaciones de la ley de comportamiento del MDC, conformadas por la Ley de elasticidad unilateral, la Ley de evolución de las deformaciones plásticas y la Ley de evolución del pandeo local. Este grupo de ecuaciones combinan todas las variables que representan la evolución de los fenómenos físicos presentados en los perfiles HSS.

Ley de elasticidad unilateral.

La ley de elasticidad unilateral es uno de los

primeros grupos de ecuaciones que conforman la ley de comportamiento. En ella se logra relacionar las deformaciones totales con los esfuerzos. Esta ley de elasticidad unilateral para un elemento de acero de sección hueca (HSS) se escribe [15]:

$$\{\Phi\}_b - \{\Phi^p\}_b = [F(D^+)]\langle M \rangle_b^+ + [F(D^-)]\langle M \rangle_b^- + \{\Phi^0\}_b; \quad (1)$$

$$[F(D^{+/-})] = \begin{bmatrix} \frac{L_b}{3EI_b(1-d_i^{+/-})} & -\frac{L_b}{6EI_b} & 0 \\ -\frac{L_b}{6EI_b} & \frac{L_b}{3EI_b(1-d_j^{+/-})} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_b}{EA_b} \end{bmatrix}$$

donde $\{\Phi\}_b$, $\{\Phi^0\}_b$ y $\{\Phi^p\}_b$ representan respectivamente, las matrices de las deformaciones totales, deformaciones iniciales del elemento y las deformaciones plásticas en el caso plano. Los vectores $\langle M \rangle_b^+$ son los esfuerzos generalizados del elemento con acciones positivas solamente y serán cero en caso contrario. Los vectores $\langle M \rangle_b^-$ son los esfuerzos generalizados del elemento con acciones negativas solamente y serán cero en caso contrario. Las matrices $[F(D^{+/-})]$ son matrices de flexibilidad degradable considerando acciones positivas y negativas respectivamente. Donde L_b es la longitud del elemento "b", "E" es el módulo de elasticidad del acero, I_b es el momento de Inercia de la sección transversal y el EA_b es el área de la sección transversal.

Función de fluencia unilateral y ley de evolución de la deformación plástica.

El segundo grupo de ecuaciones que conforma la ley de comportamiento es la ley de evolución de la fluencia o deformación plástica. Estas determinan cuando las deformaciones plásticas se activan y cuando no. La expresión (2) describe el comportamiento de la rótula "i" [15]:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_i^p = 0 & \text{si } f_i < 0 \text{ (rótula } i \text{ bloqueada)} \\ \dot{\phi}_i^p \neq 0 & \text{si } f_i = 0 \text{ (rótula } i \text{ activa)} \end{cases}$$

$$f_i(m_i, p_i, x_i) = \text{Max} \left(\frac{m_i}{1-d_i^-} - x_i - (M_p + Q(p_i)); -\frac{m_i}{1-d_i^-} + x_i - (M_p + Q(p_i)) \right) \leq 0$$

donde "f" es la función de fluencia, considerando (2) término de endurecimiento cinemático (x), el término de endurecimiento isótropo (Q(p)) y el momento de fluencia (M_p) de la sección transversal. Una expresión similar a (2) es usada para la rótula "j".

Función de daño y ley de evolución del pandeo local.

El tercer grupo de ecuaciones de la ley de comportamiento es la ley de evolución del pandeo local. Durante una carga cíclica se produce fenómeno denominado «contra-pandeo» que se puede describir de la siguiente manera: en el proceso de pandeo local, se forma una arruga en el lado de compresión del tubo en la región plástica de la bisagra [15]. Cuando se invierte la carga, esa arruga está sujeta a tensiones; metafóricamente hablando, se puede decir que estas tracciones tienden a «planchar» la arruga. Por supuesto, simultáneamente las tensiones de

compresión resultantes del mismo momento de flexión crean o aumentan las arrugas en el lado opuesto de la zona de bisagra de plástico. Este proceso de «planchado» en el lado de la tensión es el efecto de contra-pandeo. La figura 2a muestra la región de bisagra plástica de un tubo con pandeo local producido por momentos de flexión positivos y negativos de la misma intensidad; en la figura se pueden apreciar ambas superficies arrugadas; también se puede notar el resultado del proceso de contra-pandeo en uno de ellos, la parte superior.

Para modelar el proceso de contra-pandeo, se introducen las variables llamadas rotaciones conductoras del pandeo local. Estas variables se definen para el pandeo local positivo y negativo en la rótula “i” como:

$$db_i^{+/-} = \left\langle d\phi_i^p \right\rangle_{+/-} + CBF \left\langle d\phi_i^p \right\rangle_{-/+} \quad \text{if } b_i^{+/-} \geq 0; \quad db_i^{+/-} = 0 \text{ lo contrario} \quad (3)$$

el término CBF se denomina factor de contra-pandeo y puede tomar valores entre cero y uno. Un valor de CBF que se puede usar en muchas aplicaciones es 0.70. Tenga en cuenta que $b_i^{+/-}$ y $b_j^{+/-}$, ambas rotaciones de conducción de pandeo locales son siempre positivas. b_i^+ aumenta con incrementos positivos de la rotación plástica y disminuye con la negativa. Lo contrario ocurre con b_i^- ; es decir, aumenta con incrementos negativos de la rotación plástica y disminuye con la positiva.

Se muestra la expresión de cómo la evoluciona el pandeo local, como incremento de la variable de daño en el modelo ($\Delta d_i^{+/-}$), se muestra la expresión solo para la rótula “i” (4):

$$\begin{cases} \Delta d_i^+ = 0 & \text{if } b_i^+ < R(d_i^+) \\ b_i^+ = R(d_i^+) & \text{if } \Delta d_i^+ > 0 \end{cases} ; \quad \begin{cases} \Delta d_i^- = 0 & \text{if } b_i^- < R(d_i^-) \\ b_i^- = R(d_i^-) & \text{if } \Delta d_i^- > 0 \end{cases} \quad (4)$$

el término $R(d_{i/j}^{+/-})$ es la función de resistencia al pandeo local en las rótulas “i” y “j” y es determinada de forma experimental [15].

$$R(d_{i/j}^{+/-}) = p_e - \frac{1}{\kappa_c} h \left(1 - \frac{d_{i/j}^{+/-}}{0.9} \right) \quad (5)$$

Una alternativa más precisa para grandes valores de daño consiste en el uso de la función logarítmica y un valor de $\kappa_c = 2,60$ se estima a partir de los resultados experimentales [15].

Resultados y Discusión

Ensayos experimentales.

El programa experimental se basó en la construcción de una serie de probetas usando un perfil HSS como una viga en cantiliver, fija en un extremo y el otro extremo totalmente libre (figura 3a). Se realizaron ensayos

a flexión a cada probeta clasificándolos en dos grupos según su tipo de historia de desplazamiento aplicado. El primer grupo con desplazamientos reversibles positivos o bien llamado monosigno (figura 3b) y el segundo grupo con desplazamiento cíclicos (figura 3c). Los resultados de los ensayos del primer grupo se utilizarán para calibrar los parámetros del MDC. Y los resultados del segundo grupo se usan para simular el comportamiento del elemento sometido a desplazamientos cíclicos con efecto de ultra-bajo ciclaje.

La finalidad del ensayo monosigno fue de obtener los límites de fuerzas y desplazamientos para definir los parámetros del MDC. Las historias de desplazamientos a ser impuestas se muestran en la figura 3b y su resultado experimental en la figura 4, los límites experimentales se obtienen $P_y=1250$ kg, $\delta y=0,76$ cm, $P_u=2088,00$ kg y $\delta u=2,075$ cm (ver Figura 4a). La influencia de los parámetros obtenidos se muestran y visualizan en la figura 4b [12].

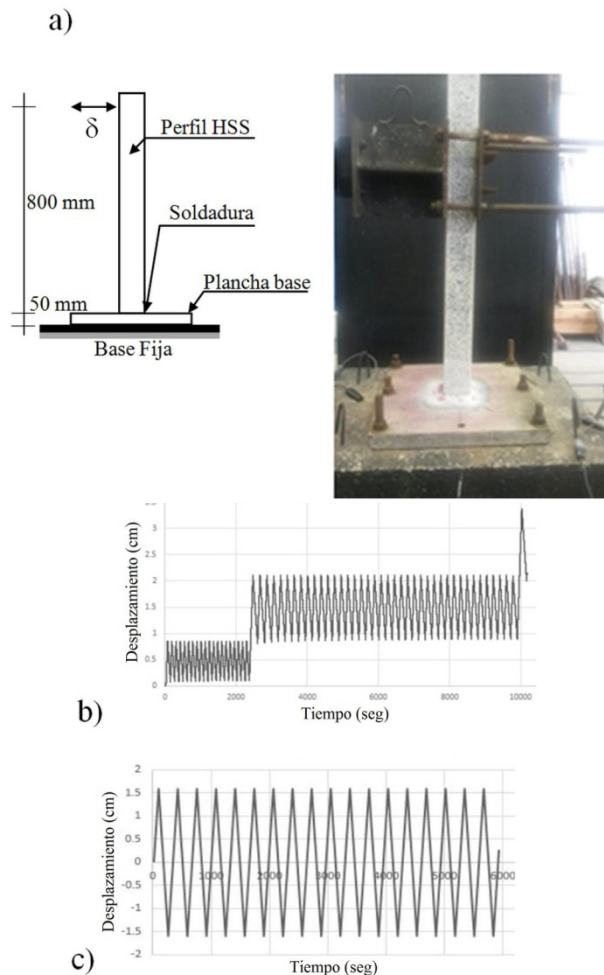


Figura 3. a) Implementación del ensayo experimental. b) Historia de desplazamiento positivo (monosigno). c) Historia de desplazamiento cíclico

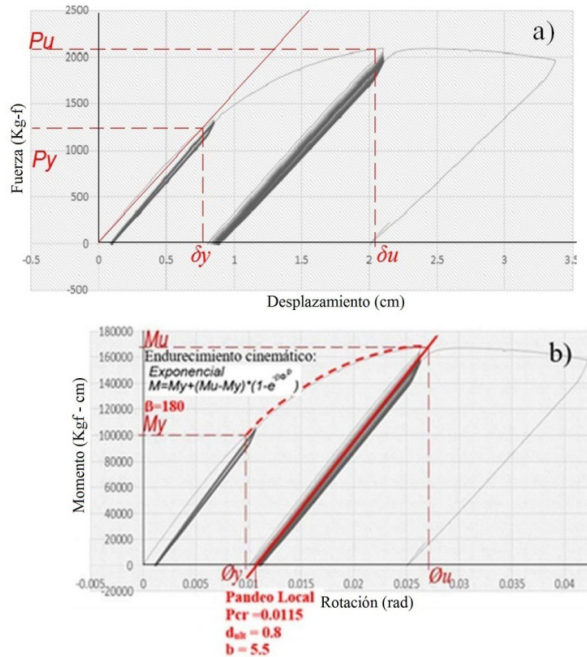


Figura 4. Resultados experimentales a) Fuerza vs. Desplazamientos. b) Momento vs. Rotación. Parámetros del MDC [12].

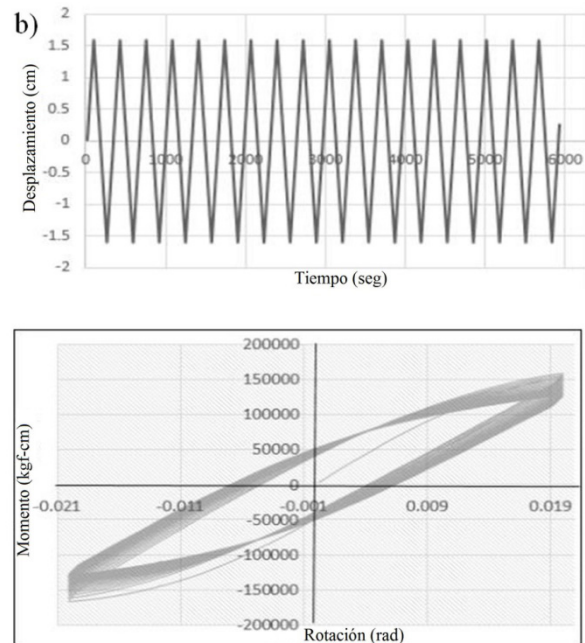
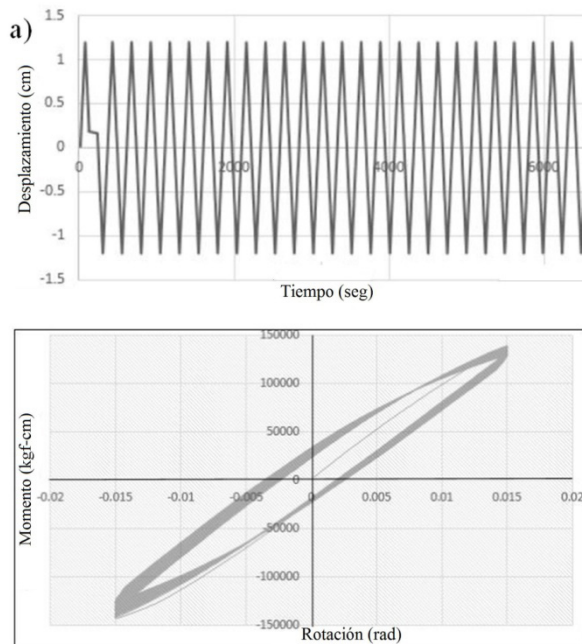


Figura 5. Historia de desplazamientos y Curva de comportamiento experimental Momento vs. Rotación a) con amplitud de +/- 1,2 cm. b) con amplitud de +/- 1,6 cm.



Se puede notar que en ambas curvas de comportamiento experimentales hay una pérdida de resistencia a medida que se repiten las amplitudes. Las amplitudes impuestas en cada ensayo garantizan que los esfuerzos superan el esfuerzo de fluencia y no sobrepase el esfuerzo último del perfil ensayado. Esta pérdida de resistencia o caída de rigidez cada vez que alcanza el mismo desplazamiento se denomina fatiga ultra bajo ciclaje. Y se caracteriza ultra bajo ciclaje por que el material comienza a fatigar con muy pocos ciclos, menos de 100 ciclos. También se observa que la pérdida de rigidez es de mayor grado al tener amplitudes de desplazamientos mayores.

Las deformaciones plásticas o permanentes del perfil HSS se observa al detectar que cuando la fuerza es nula existe un desplazamiento diferente de cero (ver los puntos A en la figura 5). El pandeo local en el perfil fue más difícil observarlo físicamente a simple vista. Por esta razón se utilizó el registro fotográfico para comparar una zona del perfil en diferentes momento del ensayo experimental (ver figura 6). Hay que destacar que este fenómeno de pandeo local se apreciaba mejor al tacto durante el ensayo experimental.

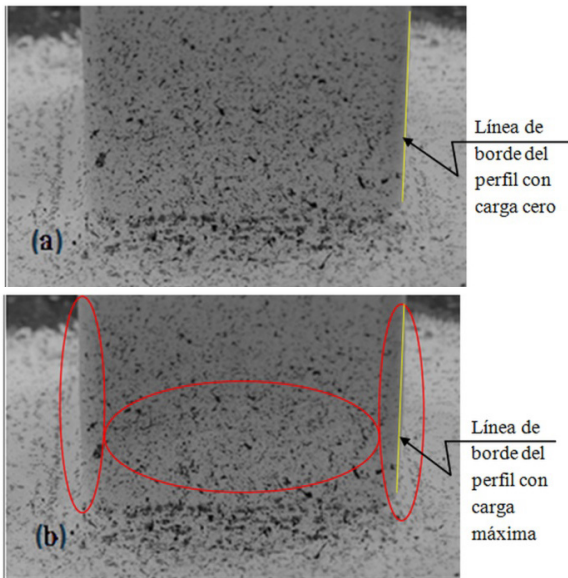


Figura 6. a) Vista sin pandeo local. b) Evidencia del Pandeo local de la sección transversal durante el ensayo experimental.

Simulaciones Numéricas.

Las simulaciones numéricas realizadas con el MDC se realizaron en un programa comercial de elementos finitos llamado ABAQUS. Este programa tiene la particularidad añadir a su librería un nuevo elemento finito de usuario. El elemento finito fue programado en código fortran [7] y resuelve el equilibrio del elemento (problema local) obteniendo los valores de las variables de daños y deformaciones plásticas. Mientras que ABAQUS solo resuelve el equilibrio de la estructura obteniendo las variables nodales, desplazamientos y reacciones de la misma.

Los parámetros para el Modelo de Daño Concentrado obtenidos de los ensayos experimentales para el perfil de sección hueca cuadrada y pared delgada (perfil HSS 100x100x3) se muestran en la tabla 1. Estos parámetros no cambian para las simulaciones a realizar por ser el mismo perfil.

Tabla 1. Parámetros del MDC obtenidos del ensayo experimental [12].

Ensayo	EI (Kgf-cm ²)	EA (Kgf)	b	Pcr (cm/cm)
Mono-signo	268,10 x 10 ⁶	17,4 x 10 ⁶	180	0,0115
dult	Mu (Kgf-cm)	My (Kgf-cm)	b	h
0,80	0,167x10 ⁶	0,10x10 ⁶	5,50	-0,80

En la figura 7 se muestran las simulaciones de los ensayos realizados. Se puede observar que los parámetros usados son los adecuados para el MDC. Las simulaciones se ajustan de forma adecuada a los resultados experimentales al comparar las curvas de comportamiento entre sus respectivos resultados.

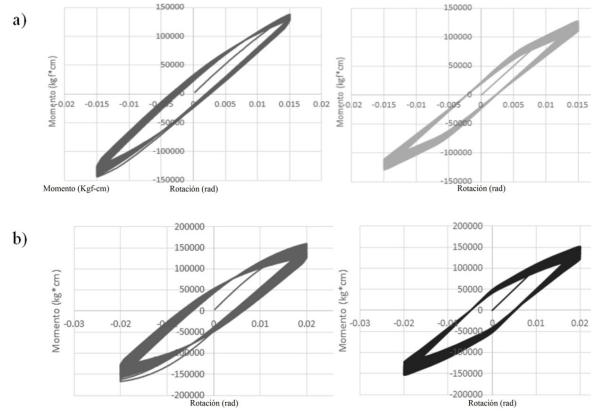


Figura 7. Simulación numérica de los ensayos experimentales con desplazamientos cíclicos: a) con amplitud de +/- 1,2 cm. b) con amplitud de +/- 1,6 cm.

En la figura 8 se presenta la degradación de la fuerza aplicada en el extremo libre de la probeta. La figura 8a muestra los datos del ensayo cíclico de amplitud ±1,2 cm, donde la carga experimental disminuye un 6% de la carga inicial con 40 ciclos, mientras que en la simulación se presenta una disminución del 10%. Los resultados de la figura 8b, corresponden al ensayo con amplitud ±1,6 cm. Aquí disminuye la carga en 20 ciclos en un 20% de la carga inicial en el ensayo experimental y solo un 15% en la simulación.

La figura 9 muestra la evolución del daño del MDC, lo que representa el pandeo local que sufre el perfil HSS sometido a fatiga ultra-bajo ciclaje. El literal a refleja la evolución del pandeo local en con amplitud ±1,2 cm, alcanzando un valor máximo de 0,14 con 40 ciclos. Mientras que el pandeo local con amplitud ±1,6 cm alcanza un valor máximo de 0,16 con 20 ciclos de carga con acciones positivos y negativos.

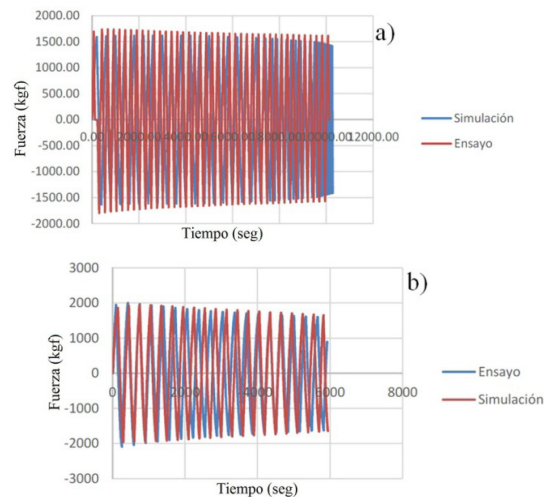


Figura 8. Degradación de la fuerza en los ensayos experimentales y simulaciones: a) con amplitud de +/- 1,2 cm y 40 ciclos. b) con amplitud de +/- 1,6 cm y 20 ciclos.

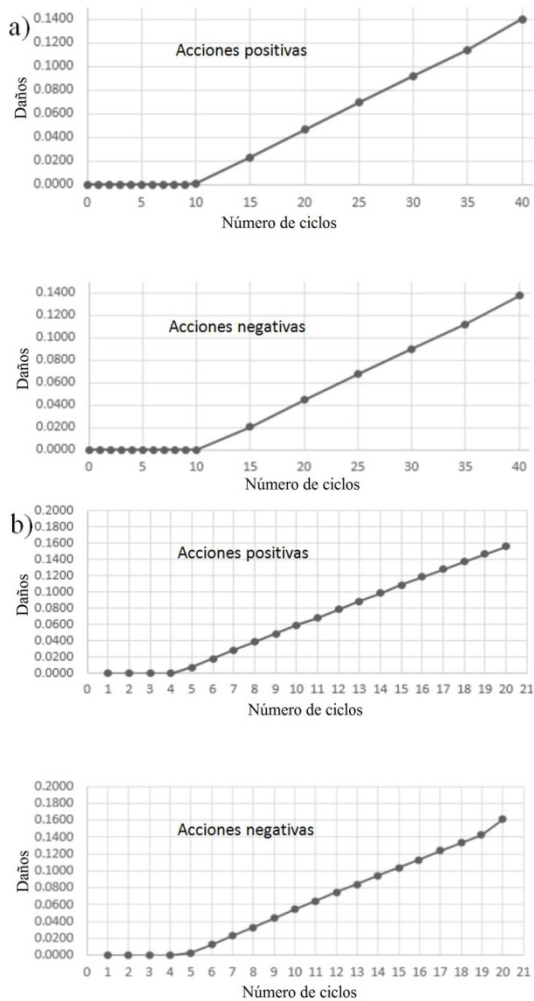


Figura 9. Evolución del pandeo local bajo acciones positivas y negativas: a) con amplitud de +/- 1,2 cm y 40 ciclos. b) con amplitud de +/- 1,6 cm y 20 ciclos.

Conclusiones

Las estructuras de acero con perfiles HSS sometidas a cargas cíclicas, aunque sean aplicadas de forma muy lenta, y si sus esfuerzos varían entre el esfuerzo cedente y el último del material pueden sufrir una pérdida de rigidez y fallar. La falla física que se presentan en los perfiles HSS que conforman las estructuras es el pandeo local. Este fenómeno hace que la sección transversal cambie y pierda de forma gradual su Inercia, por lo tanto, su resistencia a flexión. Experimentalmente se observó que después de los primeros 10 ciclos de carga repetitivas, la pérdida de rigidez y pandeo local aparecen. Una vez que se manifiesta el fenómeno físico en alguno de los perfiles, la fuerza que inicialmente soportaba la estructura comienza a disminuir. El pandeo local no es posible visualizarlo fácilmente, solo se detectó al tacto al alcanzar la máxima carga.

El Modelo de Daño Concentrado para perfiles de sección hueca de pared delgada, resultó ser una buena herramienta para simular el comportamiento de estructuras de acero con este tipo de perfil. Los parámetros del modelo fueron obtenidos y calibrados comparando los resultados numéricos con los experimentales. Estos resultados reflejan una excelente semejanza entre las curvas de comportamiento numéricas y experimentales. Entre los parámetros calibrados se puede mencionar el β , M_y y M_{ult} para definir su endurecimiento cinemático no lineal. Y los parámetros P_{cr} , b , h y d_{ult} son parámetros que describen la evolución del pandeo local y su pérdida de rigidez. Las propiedades de los elementos, como el área (A), la Inercia (I) de la sección transversal de cada elemento y el módulo de elasticidad (E), son datos iniciales del modelo numérico. Los desplazamientos aplicados en la simulación garantizaron que los esfuerzos variaran entre un 77% hasta un 92% del esfuerzo último de la sección.

Agradecimientos

El agradecimiento al CDCHT-UCLA Proyecto 004-IC-2014 por su colaboración y financiamiento para realizar los ensayos experimentales.

Referencias Bibliográficas

- [1] S. Oller, Fractura mecánica : un enfoque global, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2001.
- [2] L.G. Barbu, S.H. Oller Martínez, J. Martínez García, H.A. Barbat Barbat, Computational Plasticity XIII proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity - Fundamentals and Applications, held in Barcelona, Spain 1 - 3 September 2015, International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2015.
- [3] M. Kachanov, On the Concept of Damage in Creep and in the Brittle-Elastic Range, Int. J. Damage Mech., 3 (1994) 329–337.
- [4] J. Lemaitre, J.-L. Chaboche, Aspect phénoménologique de la rupture par endommagement, J. Mécanique Appliquée, Vol.2, No.3, Pp.317-365, (1978).
- [5] K. Saanouni, A. Abdul-Latif, Micromechanical modeling of low cycle fatigue under complex loadings — Part I Theoretical formulation, Int. J. Plast., 12 (1996) 1111–1121.
- [6] R. Kunc, I. Prebil, Low-cycle fatigue properties of steel 42CrMo4, Mater. Sci. Eng. A, 345 (2003) 278–285.
- [7] R. Febres, P. Inglessis, J. Flórez-López, Modeling of local buckling in tubular steel frames subjected to

- cyclic loading, *Comput. Struct.*, 81 (2003) 2237–2247.
- [8] C. Ovalle Rodas, F. Zaïri, M. Naït-Abdelaziz, A finite strain thermo-viscoelastic constitutive model to describe the self-heating in elastomeric materials during low-cycle fatigue, *J. Mech. Phys. Solids*, 64 (2014) 396–410.
- [9] N. Guerrero, M.E. Marante, R. Picón, J. Flórez-López, Model of local buckling in steel hollow structural elements subjected to biaxial bending, *J. Constr. Steel Res.*, 63 (2007) 779–790.
- [10] M.E. Marante, R. Picón, N. Guerrero, J. Flórez-López, Local Buckling in Three-Dimensional Frames: Experimentation and Simplified Analysis, *Lat. Am. J. Solids Struct.*, 9 (2012).
- [11] M.E. Marante, J. Flórez-López, Three-dimensional analysis of reinforced concrete frames based on lumped damage mechanics, *Int. J. Solids Struct.*, 40 (2003) 5109–5123.
- [12] R.P. Leonardo López, Maria Eugenia Marante, Análisis experimental de perfiles tubulares de pared delgada sometidos a fatiga de ultra-bajo ciclaje, *Rev. Gac. Técnica*, ISSN-e 1856-9560, 18 (2017) 23–34.
- [13] K.H. Nip, L. Gardner, C.M. Davies, A.Y. Elghazouli, Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel, *J. Constr. Steel Res.*, 66 (2010) 96–110.
- [14] E. Alarcón, A. Recuero, R. Perera, C. López, J.P. Gutiérrez, A. De Diego, R. Picón, J. Flórez-López, A reparability index for reinforced concrete members based on fracture mechanics, *Eng. Struct.*, 23 (2001) 687–697.
- [15] J. Florez-Lopez, M.E. Marante, R. Picon, Fracture and damage mechanics for structural engineering of frames : state-of-the-art industrial applications, n.d.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen Especial, 2019, No. 1, pp. 154 - 262 _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada
en Diciembre de 2019, por el **Fondo Editorial Serbiluz**,
Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientificaluz.org