

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FATIGA DE BAJO CICLAJE EN ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO A FLEXIÓN

EXPERIMENTAL STUDY OF LOW CYCLING FATIGUE IN ARMED CONCRETE ELEMENTS DUE TO FLEXION

María Fabiana Muñoz¹, María Elena Perdomo², Ricardo Picón³

Recibido 18/04/2017; Aprobado: 14/06/2017

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla un estudio experimental de la fatiga de bajo ciclaje en elementos de concreto armado con comportamiento dominante a flexión. Los elementos de concreto armado son sometidos a ciclos de desplazamientos hasta la rotura. Un total de dos vigas a flexión se sometieron a ensayos. En cada ciclo se evalúa la degradación de la resistencia y rigidez por efecto de la fatiga de bajo ciclaje. Los resultados preliminares y las observaciones son presentados y discutidos. Los ensayos son relevantes para desarrollar un modelo analítico de comportamiento no-lineal que describa la degradación de resistencia y rigidez de estructuras de concreto armado sometidas a sismos severos.

Palabras clave: Elementos esbeltos, falla a flexión, fatiga de bajo ciclaje, elementos de concreto armado, propagación de grietas.

¹María Fabiana Muñoz. Universidad Lisandro Alvarado. Venezuela. Ingeniero Civil. Correo: ing.fabiana@outlook.com

²María Elena Perdomo. Dra. Ingeniería Estructural. Docente Investigadora en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Departamento de Ingeniería Estructural. Ingeniero Civil. Correo: mariaperdomo@ucla.edu.ve

³Ricardo Picón. Dr. Ingeniería Estructural. Universidad Católica de Temuco. Departamento de Ingeniería Civil de obras civiles y Geológicas. Temuco. Chile. Ingeniero Civil. Correo: rpicon@uct.cl

ABSTRACT

In this work, an experimental study of low cycling fatigue in reinforced concrete elements with dominant flexural behavior is developed. The reinforced concrete elements are subjected to cycles of displacement until rupture. A total of two bending beams were tested. In each cycle, the degradation of the resistance and rigidity due to the effect of low cycling fatigue is evaluated. Preliminary results and observations are presented and discussed. The tests are relevant to develop an analytical model of non-linear behavior that describes the degradation of strength and rigidity of reinforced concrete structures subjected to severe earthquakes.

Keywords: *Slender elements, bending failure, low cycling fatigue, reinforced concrete elements, crack propagation.*

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los materiales bajo cargas variables es diferente a aquel sometido a cargas estáticas; un elemento de concreto armado puede fallar con una carga mucho menor si se repite un gran número de veces. Los esfuerzos variables en un elemento tienden a producir grietas que crecen a medida que éstos se repiten, hasta que se produce la rotura; este fenómeno se denomina fatiga. La naturaleza cíclica de la carga sísmica induce una demanda por fatiga a los elementos estructurales [1], por lo que los modelos matemáticos para simular los efectos inelásticos que inducen los sismos en las estructuras de concreto armado, deben considerar la aparición y desarrollo de grietas, después de cierto número de repeticiones de carga o efecto de fatiga de bajo ciclaje.

Mander [2], indicó que la fractura de refuerzo longitudinal debido a la fatiga de bajo ciclaje podría ser uno de los modos de falla característicos en elementos estructurales a flexión durante un sismo severo. Por otro lado, Brown y Kunnath [3] ensayaron barras de refuerzo grado 60 ($F_y = 420$ MPa) que van desde el diámetro N° 6 (0,750 pulgadas o 19,10 mm) al N° 9 (1,125 pulgadas o 28,60 mm) para evaluar el comportamiento a fatiga de bajo ciclaje. Los resultados indicaron que la falla depende del diámetro de la barra, para altas deformaciones ($\pm 3\%$) la rotura se produce para 5 a 10 ciclos, de menor a mayor diámetro, ver Figura 1.

Borg et al. [4], realizaron un conjunto de ensayos de fatiga de bajo ciclaje en columnas y en conexiones viga-columna de concreto armado. Los resultados generales mostraron que para derivas de 0,3% en columnas y de 0,10% en conexiones se observa la formación de grietas. Los principales modos de falla consistieron en aplastamiento del concreto, pandeo del acero de refuerzo longitudinal, rotura de los estribos y deslizamiento del refuerzo.

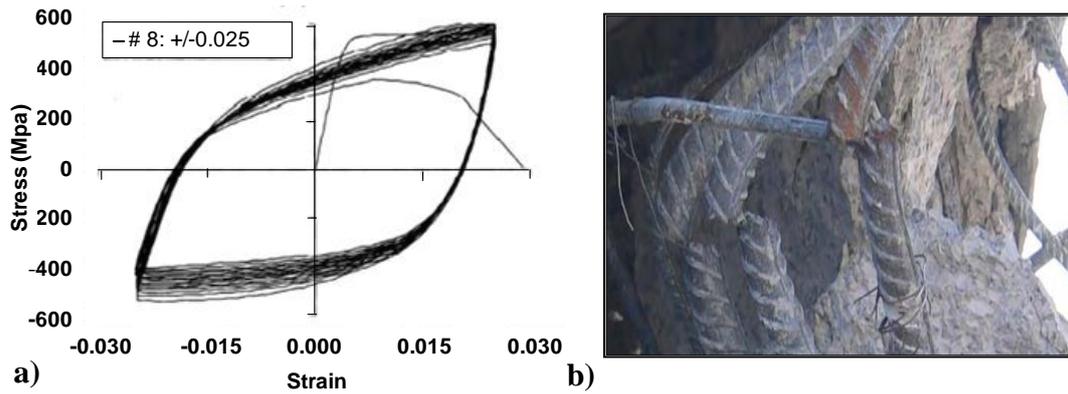


Figura 1. a) Curva de comportamiento en columnas de concreto armado de Brown y Kunnath. b) Falla física en columnas de concreto armado por fatiga de bajo ciclaje para altas deformaciones ($\pm 2.5\%$). Fuente: [3]

En la teoría del daño para medios continuos se usa el concepto de variable de daño para medir la intensidad de microfisuras y microgrietas en un miembro. El criterio de Griffith [5], base de la Mecánica de la Fractura, establece que sólo puede haber propagación de una grieta o incremento del daño si la tasa de restitución de energía G de elemento degradable es igual a la resistencia al agrietamiento del elemento (R).

En la Figura 2 se muestra la curva carga desplazamiento experimental y la simulación numérica obtenida con el modelo de daño de Perdomo et al. [6], correspondiente a una viga corta con relación de aspecto igual a 1,78, con falla a corte. En la curva experimental se observa que la degradación de la resistencia y rigidez por cargas repetidas se produce para un número bajo de ciclos de carga-descarga, para un desplazamiento máximo impuesto de $\pm 30,00$ mm. El modelo no considera la pérdida de resistencia y rigidez por efecto de fatiga de bajo ciclaje.

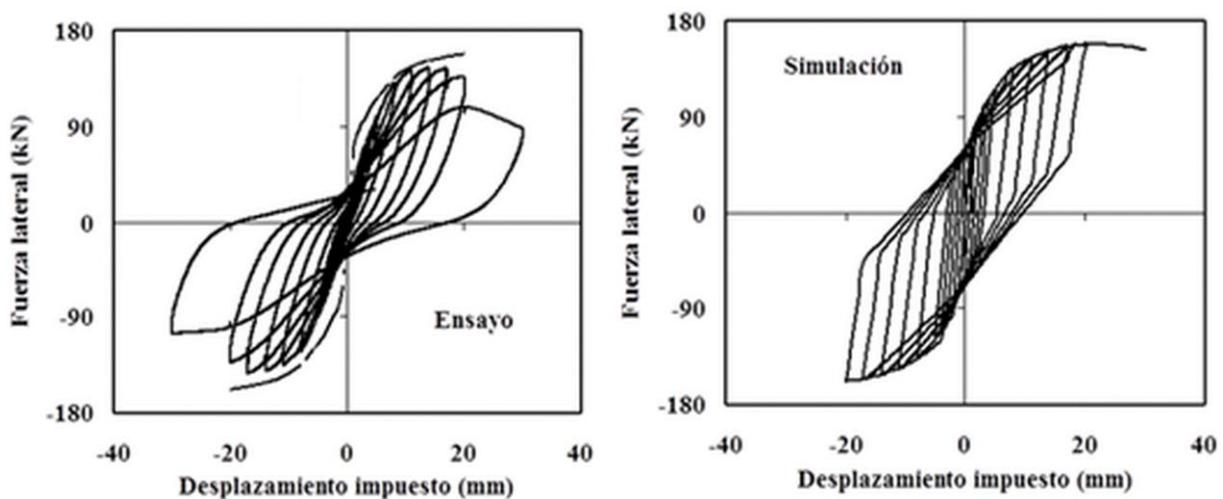


Figura 2. Curva de comportamiento histerético ensayo y simulación de una viga corta (desplazamiento impuesto $\pm 30,00$ mm) Fuente: [6]

En la Figura 3 se muestra la curva carga-desplazamiento experimental y la simulación

numérica obtenida con el modelo de daño desarrollado, correspondiente a una viga esbelta con relación de aspecto igual a 6, con falla a flexión [6]. El modelo de comportamiento cíclico representa de forma muy adecuada la respuesta inelástica. En la curva experimental se observa que no hay degradación de resistencia para un desplazamiento máximo impuesto de $\pm 125,00$ mm.

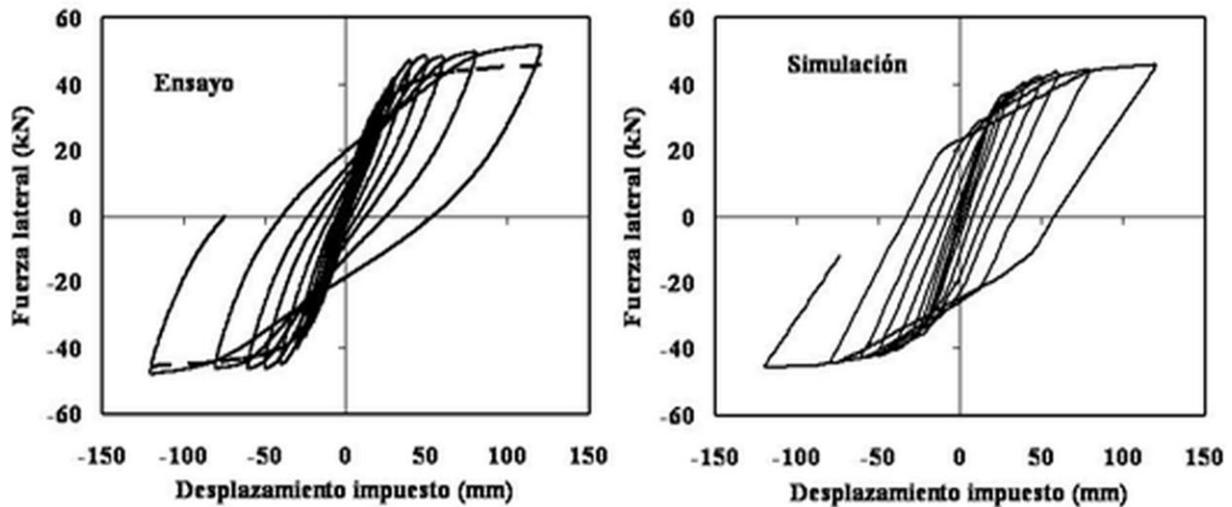


Figura 3. Curva de comportamiento histerético ensayo y simulación de una viga esbelta (desplazamiento impuesto $\pm 125,00$ mm) Fuente: [6]

El criterio de Griffith, no es válido bajo cargas repetidas, cuando la sollicitación máxima en el ciclo está muy cerca de la carga última. La evidencia experimental indica que los daños no son despreciables y se producen antes de que el valor real de G alcance la resistencia al agrietamiento R [7, 8]. Para considerar la degradación por efecto de fatiga de bajo ciclaje en el modelo de daño propuesto por Puglisi [7] se modifica la ley de evolución del daño para incluir el efecto de fatiga. El incremento de daño queda definido con la ecuación (1):

$$\Delta d = \frac{(G/R)^n}{\partial R / \partial d} \Delta G \quad (1)$$

Donde:

ΔG = variación de la tasa de restitución de energía en cada ciclo, R = resistencia al agrietamiento. Estas variables están plenamente definidas en el trabajo de Puglisi (1994) [7]. Despejando de la ecuación anterior el parámetro “n” se tiene la expresión (2):

$$n = \frac{\ln \left[\frac{\Delta d}{\Delta G} \times \frac{\partial R}{\partial d} \right]}{\ln \left(\frac{G}{R} \right)} \quad (2)$$

La constante n es un parámetro de la ley de evolución de fatiga y puede tomar valores entre 0 y $+\infty$. El máximo efecto de fatiga se obtiene cuando $n = 0$ y no existe fatiga alguna si $n = +\infty$.

En este trabajo se desarrolla un estudio experimental de la fatiga de bajo ciclaje en elementos de concreto armado con comportamiento dominante a flexión, para definir la ley de evolución del daño por fatiga en el modelo de daño propuesto por Perdomo [9].

2. METODOLOGÍA

Con la finalidad de estudiar la fatiga de bajo ciclaje en elementos de concreto armado con falla dominante a flexión, se ensayaron dos probetas que corresponden a un elemento columna con falla predominante a flexión (relación de aspecto (a/d) mayor a 6), designada como VF (ver Figura 4). Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Mecánica Estructural del Decanato de Ingeniería Civil de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela. El equipo de aplicación de carga consiste en dos actuadores hidráulicos de 50 toneladas de capacidad y de una unidad de adquisición de datos “Testar II” de MTS, acoplado a un sistema computarizado de procesamiento de datos (Textware-SX) que permite obtener lecturas carga-desplazamientos en los puntos donde se acoplan los actuadores.

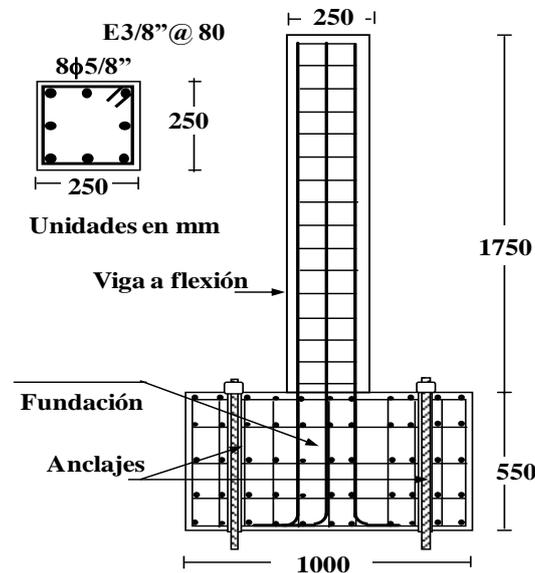


Figura 4. Detalles de armado y dimensiones de las probetas de ensayo VF. Fuente: los autores

2.1. Características de las probetas

Las características geométricas y detalles del refuerzo de las probetas de ensayo se indican en la tabla 1. El acero de refuerzo utilizado tiene una resistencia cedente $F_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$. El recubrimiento del refuerzo longitudinal es de 2,50 cm y el recubrimiento del refuerzo

transversal de 1,20 cm. Las probetas se conectan a la fundación del banco de ensayo a través de elementos rígidos de concreto armado mediante 10 pernos de 1" de diámetro. En la Figura 4 se muestran detalles de armado y dimensiones de las probetas de ensayo.

Tabla 1. Características de los especímenes

Probeta	b (mm)	t (mm)	a (mm)	a/d	Rcr (MPa)	As	Ash ($\phi 3/8''$)	ρ_v (%)	ρ_s (%)
VF-01	250	250	1600	7,11	20,3	8 $\phi 5/8''$	c./80 mm	2,53	1.03
VF-02	250	250	1600	7,11	17,6	8 $\phi 5/8''$	c./80 mm	2,53	1.03

t = ancho de la sección transversal en columnas o espesor en muros; b = altura de la sección transversal; a = punto de aplicación de la fuerza lateral; a/d = relación de aspecto (ver Figura 5); Rcr = resistencia del concreto para la edad del ensayo; $c./$ = separación estribos o ligaduras " empleado este símbolo en la columna de "Ash"; As = acero longitudinal; Ash = acero transversal; ρ_v = porcentaje acero longitudinal; ρ_H = porcentaje acero transversal.

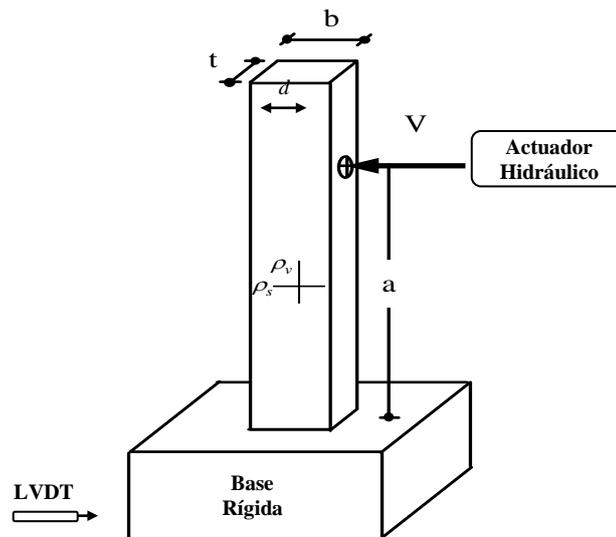


Figura 5. Esquema de aplicación de desplazamientos impuestos en las probetas de ensayo. Fuente: los autores

2.2. Historia de desplazamientos impuestos

El comportamiento de las probetas sujetas a fatiga de bajo ciclaje es evaluado imponiendo historias de desplazamientos repetidos en una dirección, en el punto de aplicación del actuador hidráulico. En la Figura 6 se muestra la historia de desplazamiento impuesta a las probetas, se aplican un total de 8 ciclos (5 repeticiones en cada ciclo), con desplazamientos de +10,00 mm, +20,00 mm, +40,00 mm, +80,00 mm, + 100,00 mm, +140,00 mm, +180,00 mm, +200,00 mm.

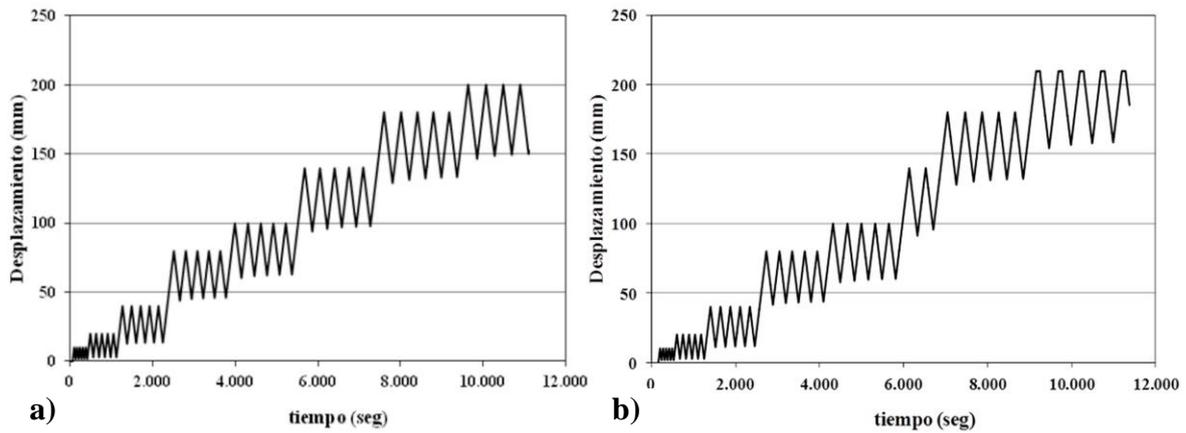


Figura 6. Historia de desplazamientos en los elementos sometidos a flexión: a) VF-01, b) VF-02. Fuente: los autores

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados son procesados para los elementos esbeltos o vigas con falla dominante a flexión. En cada ensayo, se obtienen las curvas carga-desplazamiento registradas, se evalúa la degradación de resistencia (Fuerza máxima para el desplazamiento impuesto), la degradación de rigidez en términos de la variable de daño, las curvas de tasa de restitución de energía vs daño.

3.1. Vigas esbeltas

En la Figura 7 se muestran las curvas de comportamiento para la historia de desplazamientos cíclicos-repetidos impuestos a las vigas esbeltas. El máximo desplazamiento impuesto es de +200,00 mm para la probeta VF-01 y +210,00 mm para la probeta VF-02.

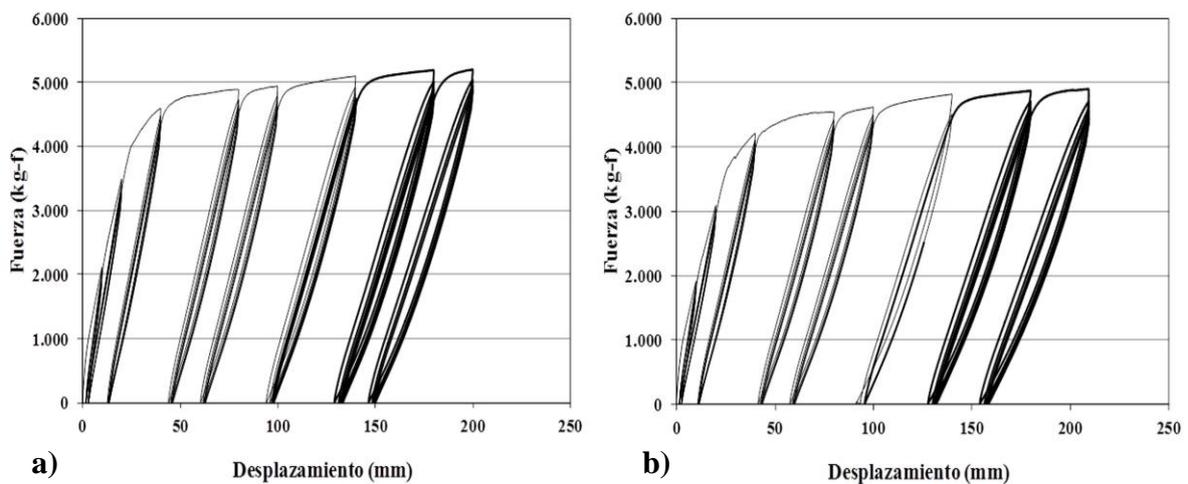


Figura 7. Curvas de desplazamiento vigas esbeltas: a) VF-01, b) VF-02. Fuente: los autores

La degradación de resistencia de las vigas esbeltas, medida como la relación entre la fuerza lograda para cada repetición de un ciclo entre la fuerza máxima alcanzada en el ciclo, se muestra en la Figura 8. En ambas curvas no se observa una caída brusca de resistencia para los 8 ciclos de desplazamiento impuestos, con cinco repeticiones en cada ciclo. Se observa que para las vigas ensayadas esta pérdida de resistencia es menor del 10% para los desplazamientos impuestos.

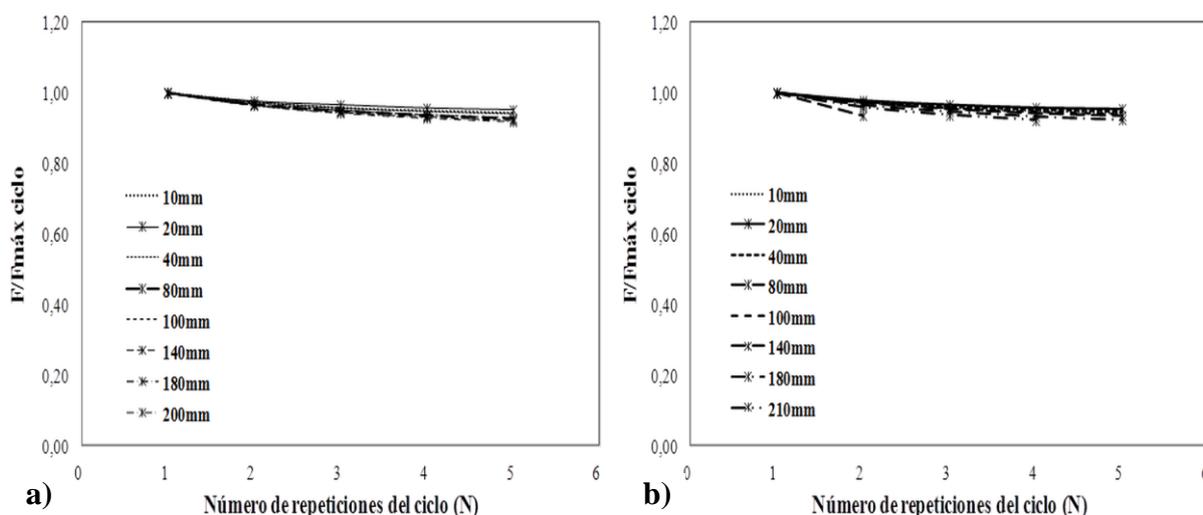


Figura 8. Degradación de la resistencia en vigas esbeltas: a) VF-01, b) VF-02. Fuente: los autores

Se determinan las pendientes en la descarga elástica de las curvas carga-desplazamiento de cada ensayo, para obtener el daño (d) o degradación de rigidez mediante la expresión (3) donde: “z” representa la pendiente de la descarga elástica en cada ciclo y “zo” la pendiente de la carga elástica inicial. Siendo válido sólo para ensayos de un solo elemento en voladizo, como se mostró en la Figura 4.

$$d = 1 - z / z_o \quad (3)$$

En las Figura 9, y Figura 10a y 10b se muestran los lazos de los ciclos de desplazamientos impuestos de la probeta VF-01 y VF-02 respectivamente, se incluye la gráfica de caída de pendientes de los lazos del ciclo. No se observan variaciones de la pendiente de los lazos para los ciclos de desplazamientos impuestos en ambas probetas.

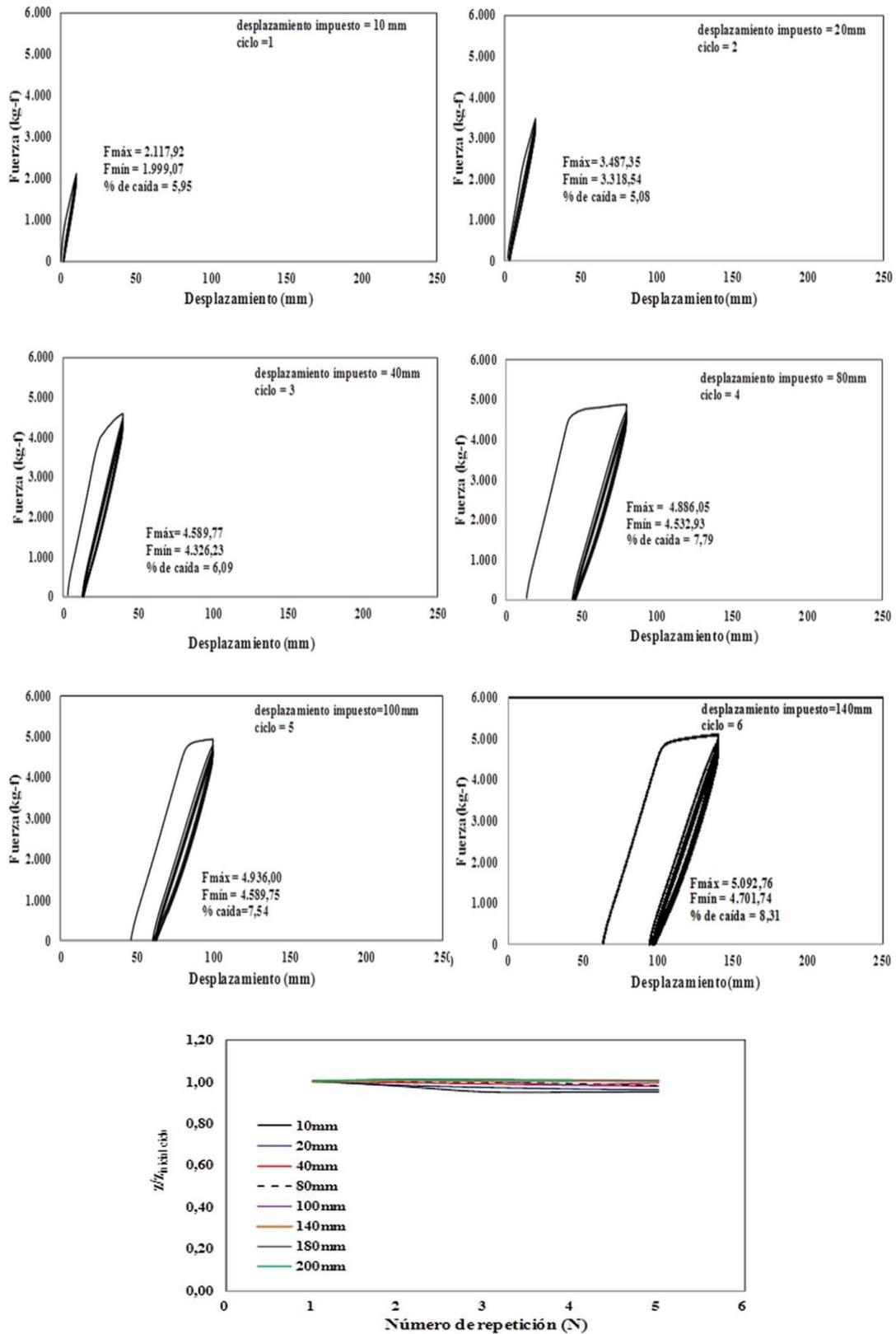


Figura 9. Lazos de los ciclos de desplazamiento impuesto VF-01. Fuente: los autores

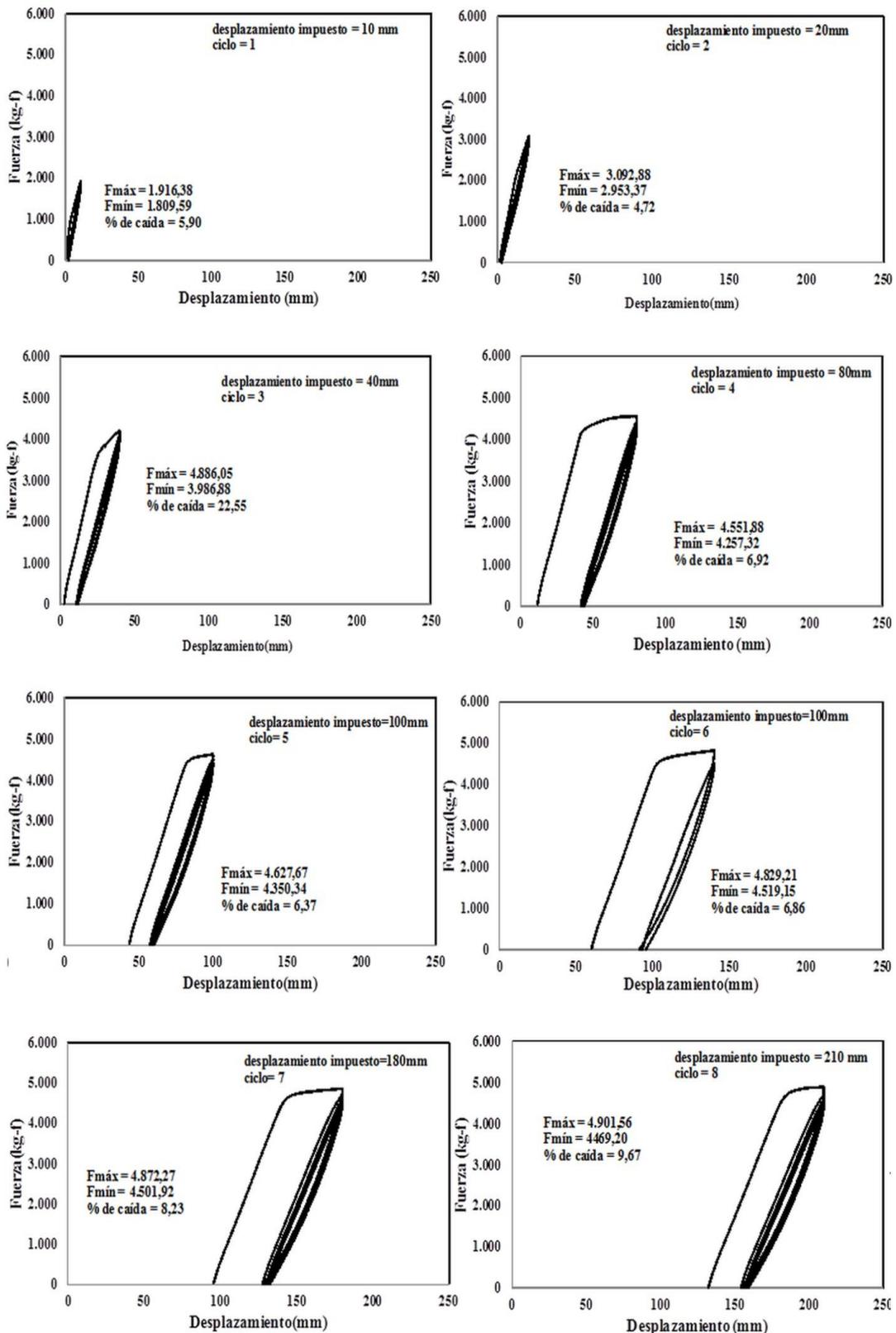


Figura 10a. Lazos de los ciclos de desplazamiento impuesto VF-01. Fuente: los autores

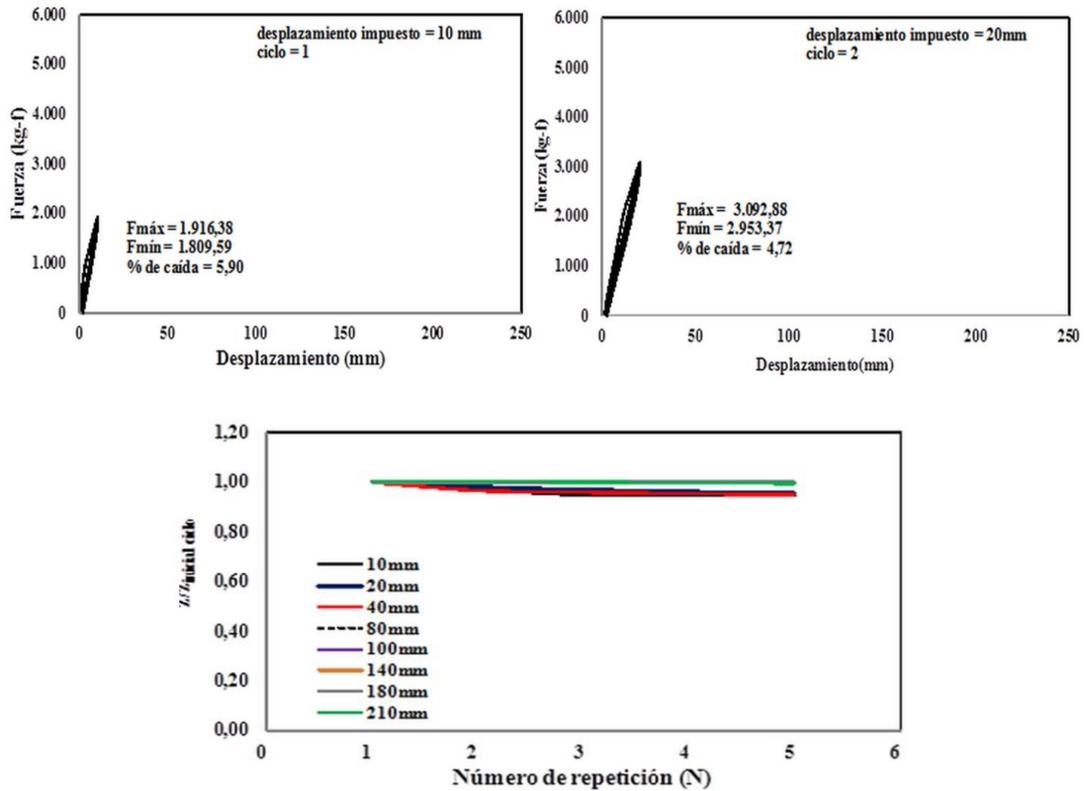


Figura 10b. Lazos de los ciclos de desplazamiento impuesto VF-02. Fuente: los autores

Se calculó la variación de la pendiente de los ciclos de desplazamiento impuestos para cada repetición de los mismos, con los valores obtenidos se dibujó las curvas mostradas en la Figura 11. La degradación de la rigidez es brusca en los primeros ciclos de desplazamientos impuestos para todas las repeticiones aplicadas como se observó en la Figura 2, tiende a mantenerse constante en los últimos cuatro ciclos. El porcentaje máximo de degradación de la rigidez es de aproximadamente el 40% en las vigas esbeltas.

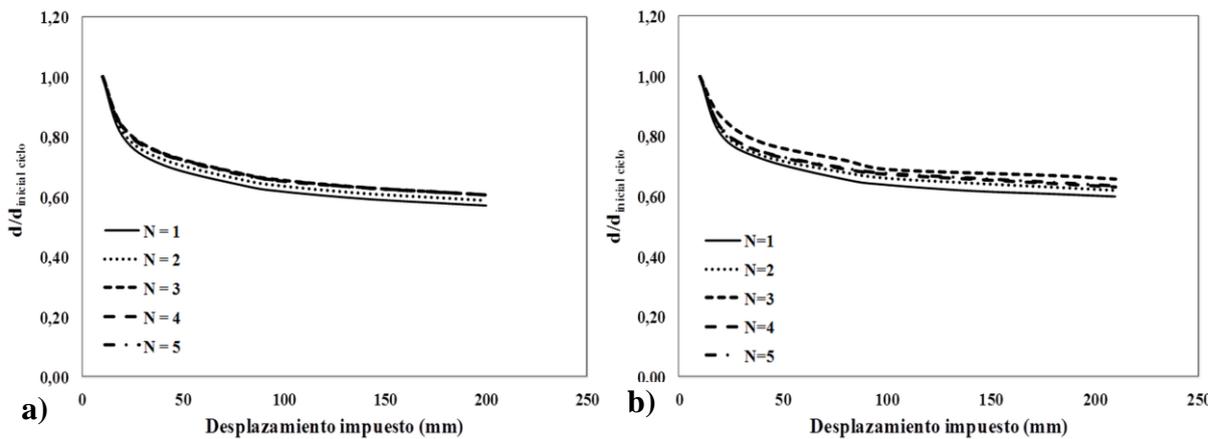


Figura 11. Degradación de la rigidez probeta: a) VF-01, b) VF-02. Fuente: los autores

4. CONCLUSIONES

Los elementos de concreto armado con relación de esbeltez (a/d) superior a 6 tienen un comportamiento cuya falla predominante es flexión. Cuando es sometido a desplazamientos cíclicos repetidos el material sufre un fenómeno de llamado fatiga, el cual es producido por la propagación de las fisuras y grietas presentadas en el concreto. Esto se refleja en la degradación de rigidez y la caída de esfuerzos progresivo, cada vez que alcanza el mismo desplazamiento el elemento de concreto armado resiste menos fuerza. Este fenómeno de Fatiga de bajo ciclaje se refleja de forma evidente cuando los esfuerzos o momentos actuantes varían entre el momento plástico, y el momento último del elemento de concreto armado.

De acuerdo a los ensayos experimentales obtenidos se evidencia que la degradación de rigidez y resistencia se hace notoria entre los dos primeros ciclos de carga. Una vez superado este ciclo la degradación se estabiliza, ya que la grieta o fisura entra en una etapa de estabilización por el balance de energía de la Teoría de Griffith. La grieta no se propaga por que su resistencia al agrietamiento es superior a los esfuerzos actuantes.

5. RECONOCIMIENTO

Este trabajo es producto del proyecto de investigación registrado en El Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad Centrocidental Lisandro Alvarado (UCLA), bajo el código 009-IC-2012.

6. REFERENCIAS

- [1] G. Penelis y A. Kappos, "Earthquake-Resistant Concrete Structures" Francis and Taylor, London, UK, 1997
- [2] J. B. Mander, A. Dutta y C. T. Cheng, "Capacity Detailing of Columns, Walls and Piers for Ductility and Shear" In NCEER Bulletin, vol 11 (2) US National Center for Earthquake Engineering Research, 1997
- [3] J. Brown y S. K. Kunnath, "Low-cycle fatigue failure of reinforcing steel bars" ACI materials journal, vol 101(6), 457-466, 2004
- [4] R. C. Borg, T. Rossetto y H. Varum, "Low Cycle Fatigue Tests of Reinforced Concrete Columns and Joints, Built with Ribbed Reinforcement and Plain Stirrups" In 15th WCEE, World Conference on Earthquake Engineering, September, 2012
- [5] A.A Griffith "The phenomena of rupture and flow in solids" Phil. Trans. Roy. Soc. Lond, A221, pp. 163-198, 1921
- [6] M. E. Perdomo, R. Picón, M. E. Marante, F. Hild, S. Roux y J. Florez-Lopez "Experimental analysis and mathematical modeling of fracture in RC elements with any aspect ratio" Engineering Structures, vol 46, pp 407-416, 2013
- [7] M. Puglisi, "Fallas por fatiga en estructuras de concreto armado" Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural, Universidad de Los Andes Venezuela, 1994
- [8] E. Thomson, A. Bendito y J. Flórez-López, "Simplified model of low cycle fatigue for RC frames" Journal of Structural Engineering, vol 124 (9), pp. 1082-1085, 1998

- [9] M. E. Perdomo, “Fractura y Daño en Estructuras Duales de Concreto Armado” Tesis Doctoral, Universidad de Los Andes, Venezuela, 2010