



## RELACIÓN AMORTIGUAMIENTO-DUCTILIDAD DE MARCOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PVA

Carlos Alberto Miramontes Zapata<sup>1</sup>, Diego Miramontes De León<sup>1</sup>, Juan Enrique Martínez Rueda<sup>2</sup> y Humberto Miguel Sansebastián García<sup>3</sup>

### RESUMEN

En los últimos años se han desarrollado distintos procedimientos de diseño sísmico con base en el desplazamiento. Destaca entre ellos el denominado método por desplazamiento directo. Dicho método ha sido adaptado a diferentes sistemas estructurales. Sin embargo, con la finalidad de mejorar el comportamiento de las estructuras, también se han desarrollado nuevos materiales. Como es el caso de los concretos con fibras de alto desempeño, en los que se busca aumentar la ductilidad a tensión. Con el objeto de aplicar el diseño por desplazamiento directo a sistemas estructurales con esta clase de materiales, se propone una relación entre el amortiguamiento y la ductilidad de elementos de concreto con juntas viga-columna y regiones adyacentes de ECC.

### ABSTRACT

In recent years, different displacement-based seismic design methods have been proposed. The direct displacement-base design method has been adapted to a wide range of structural configuration. However, in order to improve the behavior of structures, innovative materials have been also developed. As an example, high performance fiber reinforced composite is a kind of concrete with enhanced ductility in tension. In order to apply the direct displacement-base design to structural systems with this kind of mechanical properties, a new relationship ductility-damping is proposed.

### INTRODUCCIÓN

Ante la acción sísmica, las estructuras son sometidas a grandes desplazamientos transversales. Es por estos desplazamientos que en los marcos de concreto, las uniones viga-columnas son expuestas a esfuerzos considerables. Debido a lo anterior, en la vecindad de las juntas viga-columna es donde se espera que se produzcan las articulaciones plásticas. Proveer de una suficiente ductilidad en esta zona sin que se presente daño considerable en ella, asegura una mayor disipación de energía. Es por eso que los compuestos de cemento reforzados con fibras de alto desempeño parecen una solución adecuada para las regiones de articulación plástica. Puesto que se han propuesto diversos compuestos de cemento con distintos tipos de fibras, a continuación se describe su clasificación, sus propiedades, su comportamiento y sus aplicaciones, en particular el compuesto ECC.

Por otra parte, en el diseño sísmico de estructuras se ha reconocido que estos desplazamientos son la fuente principal del daño ocasionado. En consecuencia, para el adecuado diseño de la estructura, y en especial el de las zonas de articulación plástica, se han propuesto los métodos por desplazamiento. En este trabajo se describe particularmente las bases del método por desplazamiento directo (DDBD) y se efectúa un estudio paramétrico para relacionar el amortiguamiento con la ductilidad de elementos con articulaciones plásticas de concreto con fibras. Esta relación permitirá aplicar el método en el diseño de marcos planos con juntas de compuesto ECC.

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. Ramón López Velarde No. 801, CP 98000, Col. Centro, Zacatecas, Zac. Teléfono, (492) 923-9407; [cmiramontesz@yahoo.com](mailto:cmiramontesz@yahoo.com), [diego.miramontes@gmail.com](mailto:diego.miramontes@gmail.com)

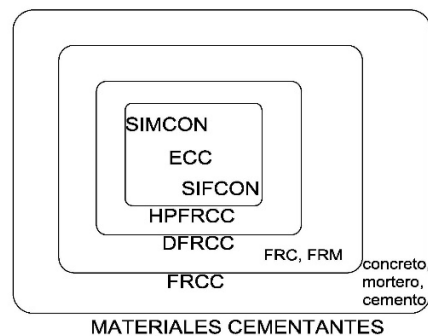
<sup>2</sup>Faculty of Science & Engineering, University of Brighton, SET, Brighton, UK.

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

## CEMENTANTES REFORZADOS CON FIBRAS (FRCC)

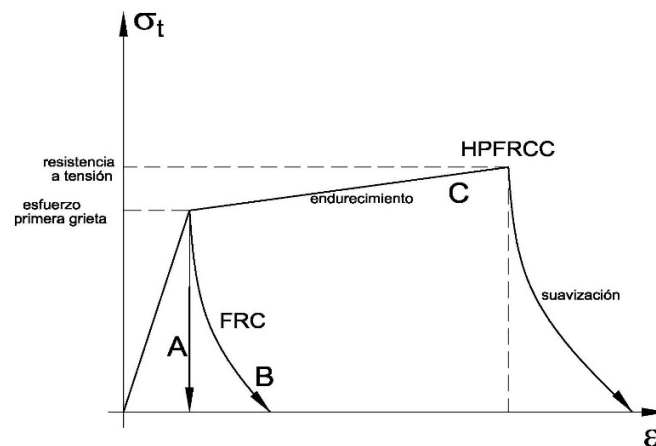
### CLASIFICACIÓN

A lo largo de la historia se han utilizado diferentes tipos de fibras para mejorar las propiedades de los bloques de arcilla, morteros y concretos. Para tal fin, se han empleado diferentes tipos de fibras tales como las fibras naturales, de acero, poliméricas o sintéticas. Debido a la diversidad de cementantes fibra reforzados que se han investigado para distintas aplicaciones, se ha propuesto una clasificación y nomenclatura para explicar las diferencias entre éstos (Matsumoto y Mihashi, 2003). En esta clasificación se consideran los cementantes reforzados con fibras (FRCC) como una categoría general en la que se incluyen, además de los concretos reforzados con fibras (FRC) y los morteros reforzados con fibras (FRM), a una clase especial de compuestos denominados compuestos dúctiles de cemento reforzados con fibras (DFRCC), ver (Figura 1).



**Figura 1** Clasificación de compuestos reforzados con fibras (Matsamoto y Mihashi, 2003)

La característica principal de estos compuestos, a diferencia de los FRC, es que presentan múltiple agrietamiento, posterior a la aparición de la primera grieta. Este tipo de comportamiento mejora las características de ductilidad, tenacidad, capacidad de deformación por tensión, compresión y flexión y además, presentan un comportamiento similar al endurecimiento por deformación en el acero, ver (Figura 2).



**Figura 2** Comportamiento A) frágil, B) quasi frágil y C) dúcil (Matsamoto y Mihashi, 2003)

Dentro de esta clasificación se encuentran los cementantes reforzados con fibras de alto desempeño (HPFRCC). El compuesto de cemento ECC es un tipo especial de HPFRCC que ha sido micro estructuralmente optimizado (Li, 1993).

Estas características han sugerido el uso de los concretos dúctiles en aplicaciones estructurales. Para mejorar el desempeño de estructuras sismoresistentes, Fukuyama propone el uso de ECC en dispositivos para absorción de energía y en elementos resistentes al daño (Fukuyama, 2000). Parra-Montesinos (2007) sugiere la reducción de la cantidad de refuerzo en juntas viga-columna debido a la resistencia a cortante y el confinamiento inherente de los HPRFRC y la aplicación en vigas de acoplamiento. Por su parte, Sasaki investiga el uso de compuestos con fibras de polipropileno en regiones de articulación plástica, (Sasaki *et al.*, 2012).

### COMPUESTO DE CEMENTO REFORZADO CON FIBRAS, ECC

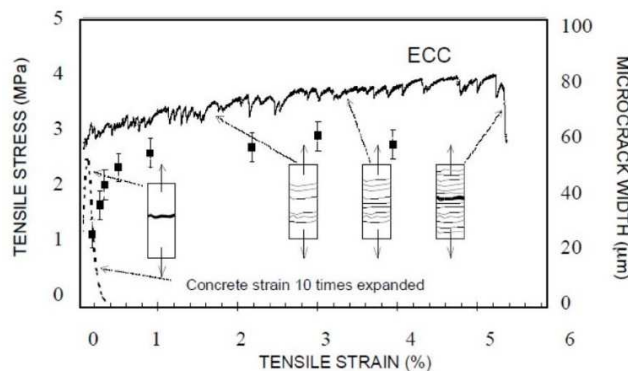
Debido a las propiedades mencionadas anteriormente, en las últimas décadas se ha incrementado el interés en la obtención de compuestos dúctiles. En particular, destaca el compuesto ECC desarrollado inicialmente en la Universidad de Michigan (Li, 1993). Este compuesto ha sido optimizado microestructuralmente creando una interacción entre la fibra, la matriz de cemento y la interfase, minimizando el volumen de fibra (generalmente del orden del 2% en volumen o menor), empleando comúnmente fibra de alcohol de polivinilo (PVA). Este bajo contenido de fibra lo hace factible para aplicaciones estructurales, desde el punto de vista económico. Además, es posible ajustar la resistencia y ductilidad del compuesto para aplicaciones específicas, manteniendo en todos los casos ductilidades del orden de 3% al 5%. Las propiedades físicas principales también comprenden un amplio rango de valores (ver tabla 1).

**Tabla 1 Principales propiedades físicas del ECC (Li, Nawy, 2008)**

Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a la primer grieta (Mpa)	Resistencia última a tensión (Mpa)	Deformación última a tensión (%)	Módulo de Young (GPa)	Resistencia a Flexión (Mpa)	Densidad (g/cc)
20 - 95	3 - 7	4 - 12	1 - 8	18 - 34	10 - 30	0.95 - 2.3

### Características a tensión, compresión y flexión

El comportamiento a tensión se puede describir mediante la curva esfuerzo a tensión-deformación (ver figura 3), la cual presenta un punto de fluencia característico correspondiente a la aparición de una micro grieta en el espécimen. Un incremento posterior de la carga conduce a un incremento en la deformación, ocasionado por la aparición de múltiples micro grietas paralelas hasta formar un plano de fractura causando la falla del espécimen. El comportamiento posterior es similar al caso de los FRC, presentando una suavización por deformación, (ver figura 2). Li menciona que la gran ductilidad a tensión que se alcanza mejora la capacidad de carga y deformación estructural así como la absorción de energía.



**Figura 3 Curva esfuerzo a tensión-deformación del ECC (Li, 2008)**

Las propiedades a compresión del ECC no difieren sustancialmente a las del concreto normal. En la tabla 1 se pueden observar el rango de valores de resistencia a compresión que se pueden alcanzar. El módulo de elasticidad es menor al del concreto normal debido a la ausencia de agregado grueso, pero la capacidad de deformación a compresión es mayor, oscilando entre 0.45% y 0.65%.

La capacidad a flexión refleja la ductilidad a tensión, permitiendo desarrollar curvaturas importantes. Además, se pueden alcanzar valores de módulo de ruptura entre 10 y 15 MPa. En cuanto a la fatiga, el ECC tiene un mejor comportamiento comparado con el concreto convencional y los FRC.

### Modelo constitutivo del ECC

Debido a la gran aceptación del compuesto ECC, se han llevado a cabo diversos estudios experimentales con el fin de evaluar el desempeño a nivel del elemento estructural. Sin embargo, es imprescindible contar con herramientas analíticas que puedan reproducir los resultados experimentales y permitan efectuar simulaciones numéricas en lugar de llevar a cabo costosas pruebas experimentales.

Recientemente se ha propuesto un modelo constitutivo cíclico para el ECC (Gencturk y Elnashai, 2012). Dicho modelo ha sido desarrollado a partir del modelo de Han (Han *et al*, 2003). A diferencia del modelo de Han, éste establece reglas de recarga de mayor orden tanto a tensión como a compresión, un modelo de deformación plástica con base en un análisis de regresión y curvas de transición de tensión a compresión y viceversa.

El modelo se desarrolló con base en datos experimentales de dos investigaciones independientes, una para desarrollar el modelo (Kesner y Billington, 2004) y la otra para validarlo (Fukuyama, 2002). Kesner y Billington efectuaron pruebas monotónicas a tensión y compresión, además de pruebas cíclicas bajo tres esquemas de carga. Un esquema cíclico a compresión, otro a tensión tomado de Yankelevsky y Reinhardt y uno cíclico de carga equilibrada.

El modelo toma como envolvente la curva monotónica para tensión y compresión (ver figura 4) y describe un conjunto de trayectorias de recarga en tensión y compresión. La envolvente a tensión está representada por tres segmentos lineales que reflejan el comportamiento elástico hasta el inicio del agrietamiento, el endurecimiento por deformación debido al desarrollo de múltiples grietas subsecuentes y la suavización del material posterior a la formación del plano de falla (ver figura 5a).

En el comportamiento a compresión (ver figura 5b) los autores adoptan una relación elástica hasta la deformación correspondiente a 2/3 del esfuerzo máximo, además observaron un comportamiento similar al concreto convencional en la etapa post-pico. Esta etapa la representan mediante la ecuación propuesta por Saenz (1964) mostrada en la misma figura.

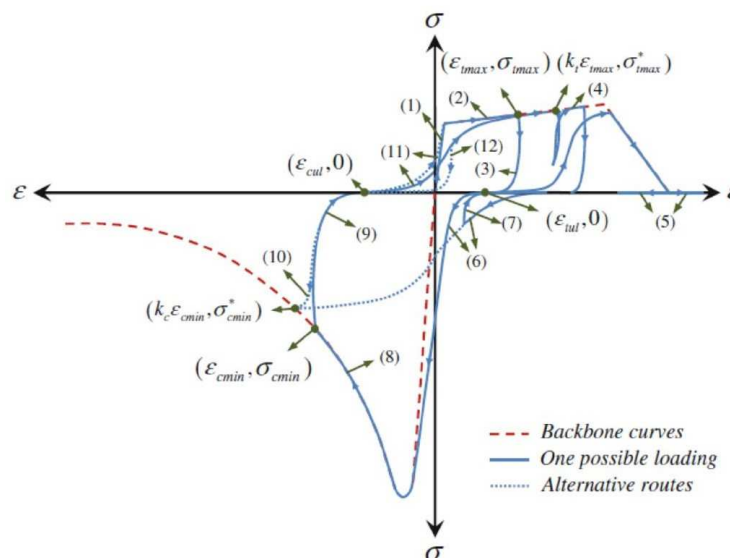
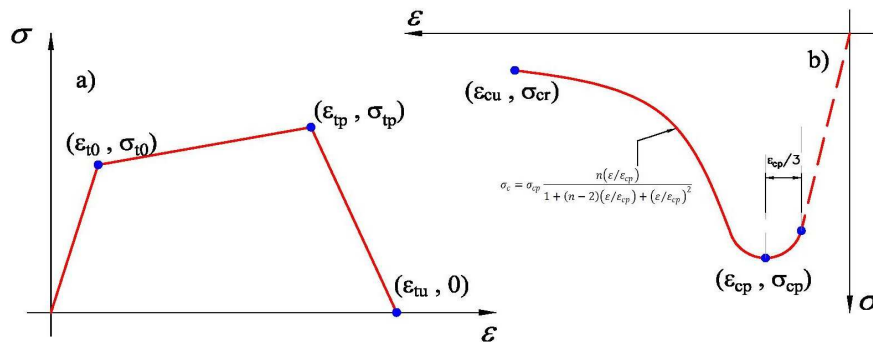


Figura 4 Modelo constitutivo del ECC (Gencturk y Elnashai, 2012)



**Figura 5** Curvas envolventes del modelo a) en tensión b) compresión (Gencturk y Elnashai, 2012)

Para la presente investigación se usa este modelo constitutivo, debido a que ha sido implementado en el software Zeus NL (Elnashai, Papanikolaou y Lee, 2010). Zeus NL es un programa de análisis de elementos finitos con elementos tipo fibra, desarrollado especialmente para aplicaciones en ingeniería sísmica.

### DISEÑO POR DESPLAZAMIENTO

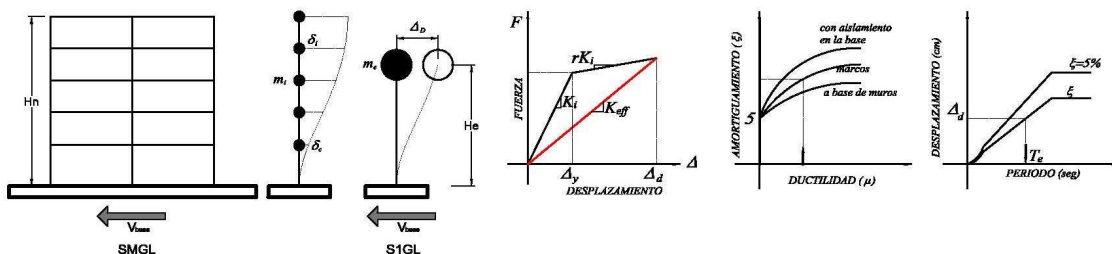
En los últimos años se han propuesto diferentes alternativas de diseño por desempeño, donde el desplazamiento se emplea como medida de la demanda sísmica, ya que éste se correlaciona directamente con la deformación y en consecuencia, directamente el desplazamiento o la deformación asociada del material, con el estado deseado.

Entre estas alternativas se pueden mencionar el espectro de capacidad (Freeman, 1998), el método de diseño sísmico controlado por deformación (Panagiotakos y Fardis, 1999), el espectro del punto de fluencia (Aschheim y Black, 2000), el método por desplazamiento directo DDBD (Priestley, 2007), entre otros.

En la comparación que hace Sullivan (Sullivan, 2002) establece que el DDBD es simple, claro y con buen desempeño. Además, este método ha tenido gran desarrollo y aceptación, aplicándolo a diferentes sistemas estructurales y propuesto como modelo para reglamento (Calvi y Sullivan, 2009). Otras alternativas propuestas recientemente son el método de diseño sísmico aplicado a puentes urbanos (Rivera y Meli, 2008), y “Displacement-base multi-level seismic design” (Barradas y Ayala, 2012).

### DISEÑO POR DESPLAZAMIENTO DIRECTO DDBD

El procedimiento por desplazamiento directo procede del método de la estructura sustituta (Shibata y Sozen, 1976). El DDBD emplea un sistema de un grado de libertad con propiedades equivalentes para estimar la respuesta inelástica de la estructura. En la figura 6 se describen los fundamentos del método aplicado a un sistema de múltiples grados de libertad y el procedimiento se describe a continuación.



**Figura 6** Diseño por desplazamiento directo DDBD

El primer paso en el proceso de diseño es representar a la estructura mediante un sistema de un grado de libertad (S1GL). Los desplazamientos de entrepiso se relacionan con el primer modo inelástico normalizado de la estructura, “ecuación 1”, el cual depende de la altura de entrepiso y la altura total, “ecuaciones 2a y 2b”.

$$\Delta_i = \delta_i \left( \frac{\Delta_c}{\delta_i} \right) \quad (1)$$

$$\delta_i = \frac{H_i}{H_n}; n \leq 4 \quad (2a)$$

$$\delta_i = \frac{4}{3} \left( \frac{H_i}{H_n} \right) \left( 1 - \frac{H_i}{4H_n} \right); n > 4 \quad (2b)$$

El desplazamiento de diseño se relaciona con los desplazamientos de entrepiso, “ecuación 3”. La masa efectiva y la altura equivalente se obtienen con las “ecuaciones 4 y 5” respectivamente. Con la “ecuación 6” se calcula el factor de ductilidad de diseño. El amortiguamiento viscoso equivalente del S1GL se obtiene en función de la ductilidad de diseño, “ecuación 7” para marcos de concreto reforzado y “ecuación 8” para marcos de acero.

$$\Delta_d = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) \quad (3)$$

$$m_e = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) / \Delta_d \quad (4)$$

$$H_e = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} \quad (6)$$

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.565 \cdot \left( \frac{\mu-1}{\mu\pi} \right) \frac{\Delta_d}{\Delta_y} \quad (7)$$

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.577 \cdot \left( \frac{\mu-1}{\mu\pi} \right) \frac{\Delta_d}{\Delta_y} \quad (8)$$

Mediante un espectro de desplazamiento de diseño reducido en función del amortiguamiento equivalente, se obtiene el periodo efectivo. La rigidez secante de la estructura equivalente se obtiene a partir del periodo efectivo con la “ecuación 9”. Posteriormente, se obtiene el cortante basal con el desplazamiento de diseño y la rigidez efectiva, “ecuación 10”. El cortante basal se distribuye a nivel de entrepiso de manera proporcional a la masa y al desplazamiento, “ecuación 11”. Se efectúa el análisis de la estructura debido al sistema de carga lateral para determinar la resistencia a flexión requerida en las zonas de articulación plástica. Mediante el diseño por capacidad se obtiene el diseño de las secciones donde se desee que se mantenga un comportamiento elástico.

$$K_e = 4\pi^2 m_e / T_e^2 \quad (9)$$

$$V_B = K_e \Delta_e \quad (10)$$

$$F_i = V_B (m_i \Delta_i) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) \quad (11)$$

Como se puede observar en la figura 6 y en la descripción anterior (“ecuaciones 7 y 8”), una fase esencial del método consiste en determinar el amortiguamiento viscoso equivalente en función de la ductilidad. Se puede considerar que el amortiguamiento viscoso está conformado por el amortiguamiento elástico y el amortiguamiento histerético. La parte histerética del amortiguamiento dependerá de la ley de comportamiento que mejor represente al sistema estructural a diseñar. El objetivo general de esta investigación es proponer dicha relación para aplicarla en el diseño de marcos de concreto reforzado con juntas de ECC.



## Linealización de la estructura equivalente

Dos estudios independientes dieron lugar a relaciones similares entre amortiguamiento y ductilidad, (Priestely *et al*, 2007; Dwairi, 2007; Grant, 2005). En esos estudios, se efectuaron análisis paso a paso de sistemas de un grado de libertad (S1GL), caracterizados con diferentes leyes de comportamiento histerético. Posteriormente, se ajustó el amortiguamiento equivalente del sistema lineal hasta que el desplazamiento de éste se iguale con el desplazamiento máximo inelástico obtenido del análisis paso a paso. Mediante un ajuste de curva con los resultados obtenidos se propusieron las “ecuaciones 7 y 8”.

Un proceso similar se puede observar en las recomendaciones FEMA 440. En la ecuación de movimiento del S1GL (“ecuación 12”), se busca identificar los parámetros lineales apropiados,  $c_{eff}$  y  $k_{eff}$  para estimar adecuadamente la respuesta de la estructura sujeta a una excitación sísmica. Se reemplazan los coeficientes  $c_{eff}$  y  $k_{eff}$  en función del amortiguamiento crítico y el periodo efectivo (“ecuación 13”). Se comparan los desplazamientos elástico e inelástico y se minimiza el error (“ecuación 14”), donde  $D_{lin}$  es el desplazamiento elástico  $x_{lin}$ , y  $D_{inel}$  es el desplazamiento inelástico  $x_{inel}$ , obtenido de un análisis paso a paso.

$$m\ddot{x}_{lin} + c_{eff}\dot{x}_{lin} + k_{eff}x_{lin} = -m\ddot{u}(t) \quad (12)$$

$$\ddot{x} + \frac{4\pi\beta_{eff}}{T_{eff}}\dot{x} + \left(\frac{2\pi}{T_{eff}}\right)^2 x = -\ddot{u}(t) \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{D_{lin} - D_{inel}}{D_{inel}} \quad (14)$$

## ESTUDIO PARAMÉTRICO

Asumiendo que ya se ha reducido la estructura a un S1GL, en este trabajo se considera el S1GL mostrado en la figura 7 y se lleva a cabo un estudio paramétrico para establecer la relación amortiguamiento-ductilidad. Con este propósito, se considera que cada punto del espectro de respuesta elástico de un acelerograma representa un S1GL con propiedades elásticas.

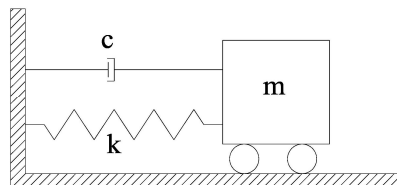


Figura 7 Sistema de un grado de libertad, S1GL

Se lleva a cabo un análisis paso a paso con el sistema de la figura 7 ante un determinado acelerograma para obtener el desplazamiento inelástico máximo. De las propiedades del sistema se obtiene la ductilidad y se calcula el periodo efectivo (“ecuación 15”), considerando un comportamiento bilineal (ver figura 8). Posteriormente, se determina el espectro de respuestas del acelerograma empleado y se varía el amortiguamiento hasta que el desplazamiento elástico, correspondiente al periodo efectivo, sea igual al desplazamiento inelástico máximo (ver figura 9).

$$\frac{T_{eff}}{T_i} = \sqrt{\frac{\mu}{1+r\mu-r}} \quad (15)$$

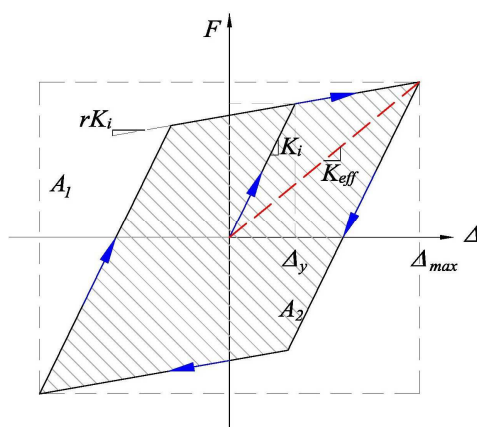


Figura 8 Modelo bilineal, S1GL

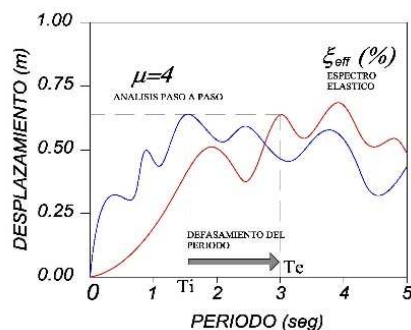


Figura 9 Procedimiento para evaluar el amortiguamiento equivalente

Con la finalidad de determinar la influencia de la incorporación del concreto ECC en el S1GL, se toman en cuenta diferentes parámetros de los cuales depende la respuesta sísmica.

Para modelar el sistema, en el presente trabajo se ligó una masa a un elemento lineal con un extremo con las propiedades del concreto ECC, en consecuencia se consideraron sistemas de un grado de libertad formados por una columna de concreto con relación de aspecto de cinco, para asegurar un comportamiento controlado primordialmente por flexión. En la base de la columna se dispone una sección de concreto ECC hasta un cuarto de la altura, (ver figura 10). El resto de la columna se modela con una sección de concreto convencional. El concreto en el núcleo se representa con un modelo de concreto confinado, (Martinez-Rueda, 1997) y el acero con el modelo bilineal.

Para proporcionar una variación en la resistencia del sistema, se proponen tres cuantías de refuerzo (0.75%, 1% y 1.25%), además se especifican 3 niveles de carga axial (2.5%, 5% y 7.5% de la resistencia nominal,  $P_n$ ). La resistencia a compresión del concreto es de 30MPa (300kg/cm<sup>2</sup>), 35MPa (350kg/cm<sup>2</sup>) y 40MPa (400kg/cm<sup>2</sup>). Con la finalidad de incluir diferentes niveles de ductilidad a tensión del ECC, se toman en cuenta dos mezclas de concreto ECC con deformaciones últimas, 2% y 3.5%, con esfuerzos máximos de 5MPa (50kg/cm<sup>2</sup>) y 3.5MPa (35kg/cm<sup>2</sup>) respectivamente. La nomenclatura para identificar los parámetros es CEccfxrxPx, Columna de concreto con ECC de  $x$  resistencia a tensión, con  $fx$  resistencia a la compresión, porcentaje de refuerzo  $rx$  y  $Px$  nivel de carga axial. En la figura 11 se muestran las secciones transversales del elemento.



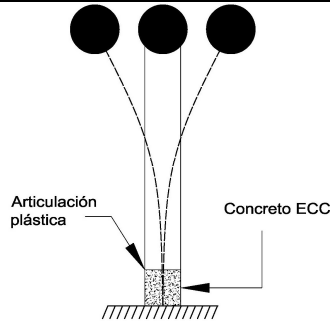


Figura 10 Sistema de un grado de libertad con concreto ECC

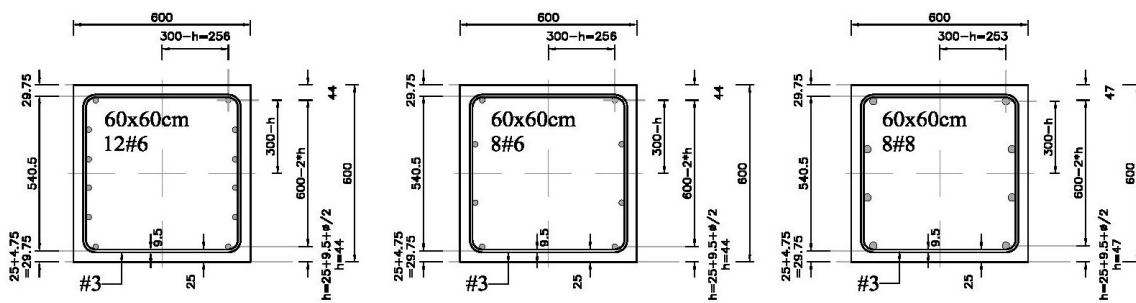


Figura 11 Dimensiones y refuerzo de las columnas analizadas

Para determinar la rigidez inicial, la rigidez secante y la ductilidad de las secciones, se efectuó un análisis estático cíclico usando el programa ZeusNL (Elnashai *et al*, 2012), con dos ciclos en cada nivel de desplazamiento, hasta una distorsión de 10% (ver figura 12).

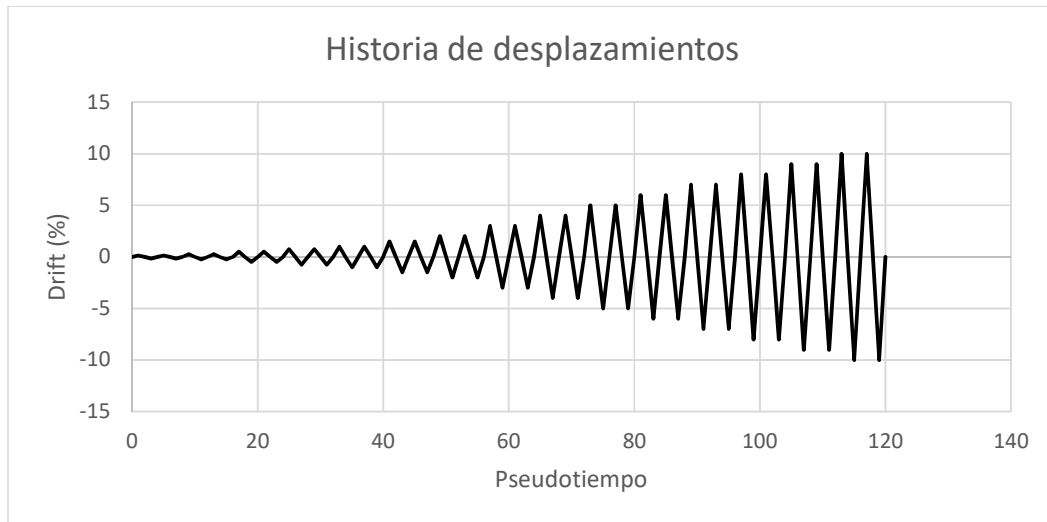
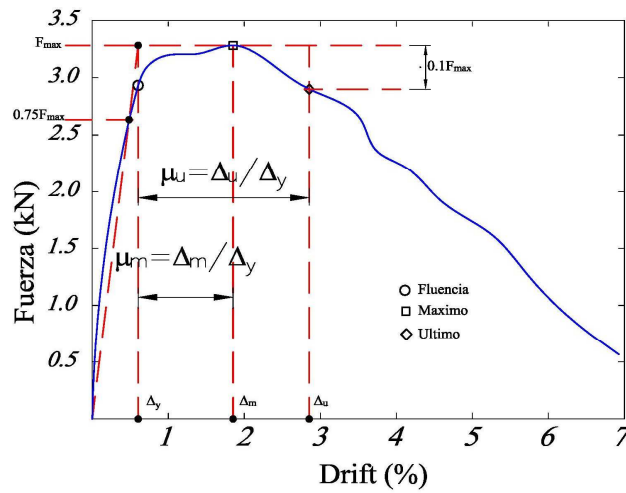


Figura 12 Historia de deformaciones impuestas

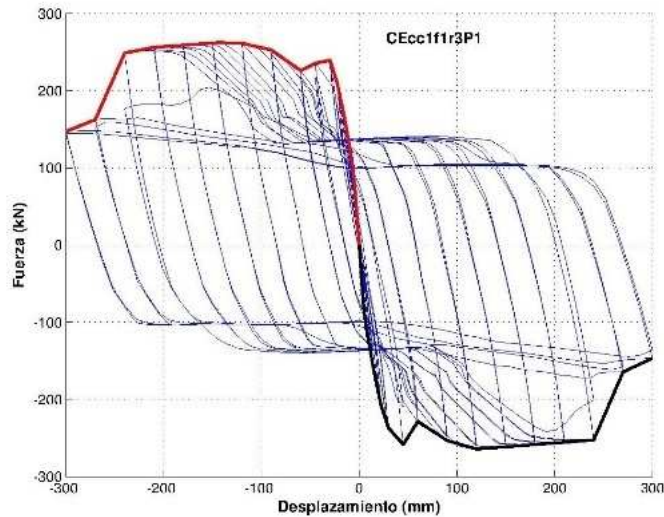
La determinación del punto de fluencia, resistencia máxima y última se llevó a cabo según (Park, 1988) como se muestra en la figura 13.



**Figura 13** Definición de los puntos de fluencia, máximo y último (Gencturk y Elnashai, 2012)

En la figura 14 se presenta la envolvente en las dos direcciones de carga, las cuales se promediaron para obtener la envolvente mostrada en la figura 15 junto con la curva trilineal que define los puntos de fluencia, máximo y último, para tres combinaciones de parámetros.

Una vez que se determinó la ductilidad y la rigidez del sistema, se ligó a una masa para efectuar un análisis paso a paso ante 10 registros sísmicos. La variación de la masa fue tal para que se obtuvieran sistemas con periodo entre 0.2 y 2 segundos, con incrementos de 0.2 segundos.



**Figura 14** Envolvente de la curva  $F - \Delta$

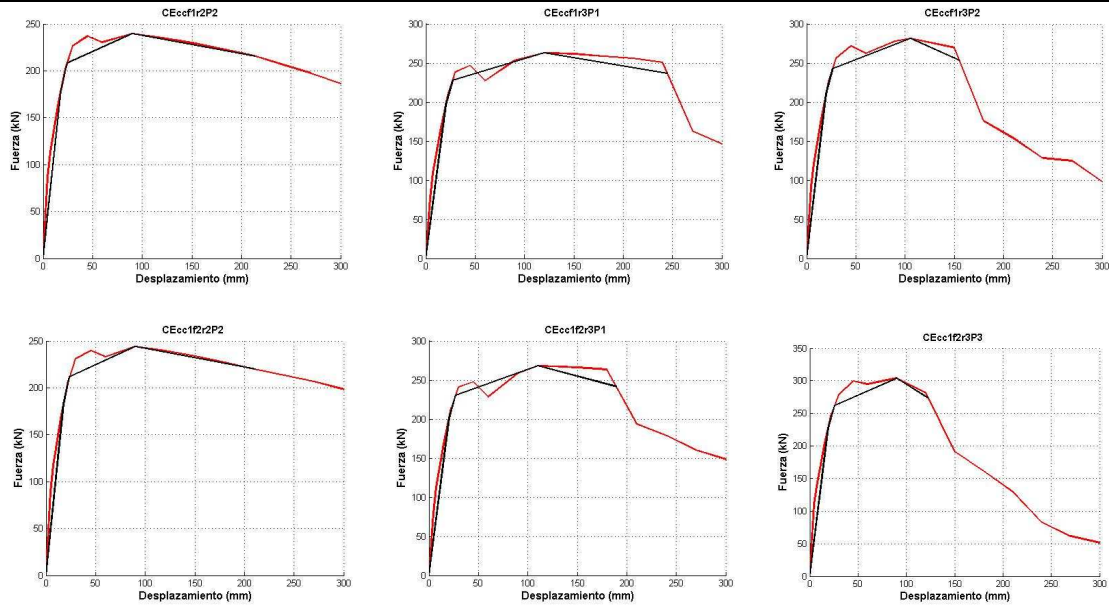


Figura 15 Puntos de desplazamiento de fluencia, máximo y último

En la tabla 2 se resumen los resultados obtenidos para  $f_c=30\text{Mpa}$  y un nivel de ductilidad del ECC del 2% y en la figura 16 se pueden observar los desplazamientos máximos del análisis paso a paso.

Tabla 2 Envoltente F-D y ductilidad de los S1GL

S1GL	$\mu_u$	$\mu_m$	$D_y$ (mm)	$F_y$ (kN)	$D_m$ (mm)	$F_m$ (kN)	$D_u$ (mm)	$F_u$ (kN)	$K_i$ (kN/mm)	$K_{eff}$ (kN/mm)	r
CEcc1f1r1P1	17.62	6.20	17.03	141.50	105.60	166.11	300.00	152.62	8.31	1.57	0.03
CEcc1f1r1P2	11.02	5.33	16.87	161.37	90.00	186.83	185.86	168.15	9.56	2.08	0.04
CEcc1f1r1P3	8.25	1.78	16.89	181.45	30.00	209.81	139.39	188.83	10.74	6.99	0.20
CEcc1f1r2P1	12.22	4.89	24.55	190.54	120.00	219.14	300.00	208.27	7.76	1.83	0.04
CEcc1f1r2P2	8.80	3.70	24.29	208.06	90.00	239.53	213.67	215.58	8.57	2.66	0.06
CEcc1f1r2P3	6.59	1.89	23.81	223.49	45.00	260.06	156.82	234.06	9.39	5.78	0.18
CEcc1f1r3P1	8.96	4.39	27.34	227.99	120.00	262.88	244.84	236.59	8.34	2.19	0.05
CEcc1f1r3P2	5.82	3.96	26.65	243.01	105.60	281.29	155.25	253.16	9.12	2.66	0.05
CEcc1f1r3P3	4.71	3.48	25.88	255.89	90.00	297.19	121.93	267.47	9.89	3.30	0.07

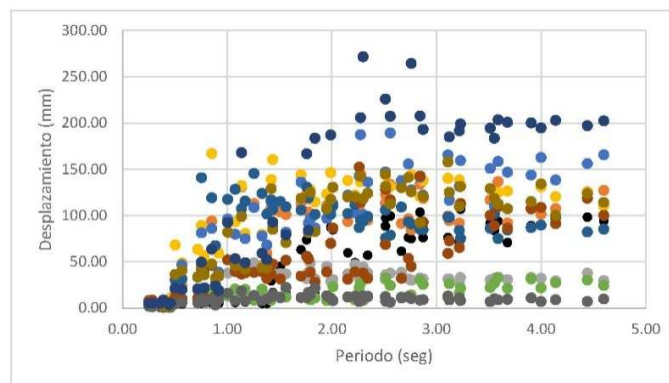
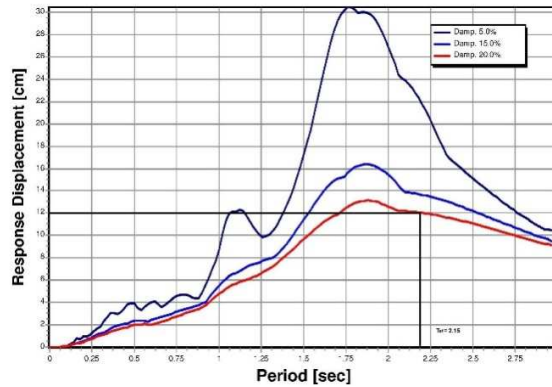


Figura 16 Desplazamientos inelásticos máximos

Para cada acelerograma se obtuvo su espectro elástico de respuesta con el programa seismosignal (2003) y se modificó el amortiguamiento hasta igualar el desplazamiento inelástico. Este proceso se ejemplifica en la figura 17, en donde el desplazamiento inelástico para el acelerograma de Kobe fue de 120mm. El sistema analizado tiene un periodo efectivo  $T_{eff}=2.15$ seg, lo que corresponde a un amortiguamiento del 20%.



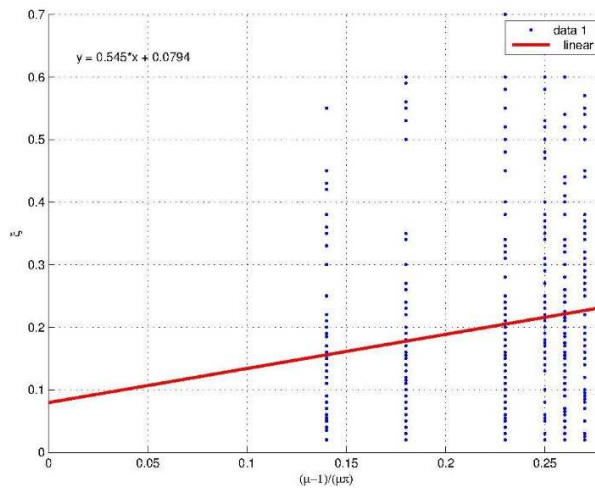
**Figura 17** Determinación del amortiguamiento equivalente

Una vez que se obtuvo el amortiguamiento de cada sistema y para cada acelerograma, se realizó un ajuste de curva proponiendo una relación lineal (“ecuación 15”) (Priestley *et al*, 2007), para obtener el coeficiente  $C$ .

$$\xi_{eq} = \xi_{el} + C \left( \frac{\mu - 1}{\pi \mu} \right) \quad (15)$$

El ajuste se muestra en la figura 18, la ecuación obtenida se indica en la misma figura y se compara con la propuesta por Priestley (“ecuación 7”) aplicable a estructuras de concreto (ver figura 19).

Como puede observarse en la figura 19, la incorporación de las propiedades del concreto ECC en el sistema analizado, provee un mayor amortiguamiento para un mismo nivel determinado de ductilidad.



**Figura 18** Ajuste amortiguamiento-ductilidad

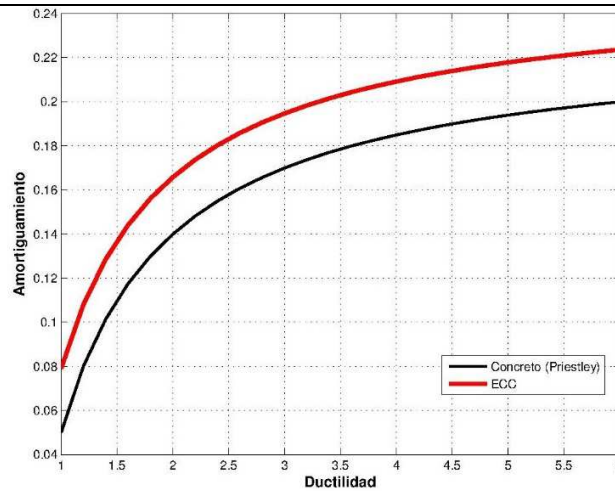


Figura 19 Comparación RC – RECC

## CONCLUSIONES

La relación amortiguamiento-ductilidad propuesta se obtuvo considerando un elemento de concreto convencional con una zona de concreto dúctil de alto desempeño en la base ligado a una masa.

La ecuación obtenida refleja las ventajas de colocar el concreto dúctil de alto desempeño ECC solo en la zona de articulación plástica, en el sentido de proveer de mayor ductilidad a la estructura sin un substancial incremento en su costo, en comparación con una estructura de concreto reforzado.

En el ámbito del diseño por desplazamiento, esta relación cubre una etapa esencial en el método. Sin embargo, se contempla considerar otras variables como lo son el perfil de desplazamientos, incrementar el número de acelerogramas y evaluar la factibilidad del método para estimar el desplazamiento inelástico en función de un desplazamiento de diseño.

## REFERENCIAS

Barradas J. y Ayala A. (2012) “**A displacement-based multi-level seismic design method for reinforced concrete frame structures**”, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, Paper ID: 2872.

Dwairi H. y Kowalsky M. (2006) “**Implementation of inelastic displacement patterns in direct displacement base design of continuous bridge structures**”, Earthquake Spectra. Vol. 22(3), pp 631-662.

Elnashai A., Papanikolaou V. y Lee D. (2010) “**Zeus NL-a system for inelastic analysis of structures**”, User’s manual. Mid-America Earthquake (MAE) Center, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana.

FEMA (2005) “**Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures**”, FEMA 440.

Fukuyama H., Sato Y., Li V., Matsuzaki Y. y Mihashi Y. (2000) “**Ductile engineered cementitious composite elements for seismic structural application**”, 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zeland, Paper ID: 1672.

Fukuyama H., Suwada H. y Ilseung Y. (2002) “**HPFRCC damper for structural control**”, JCI international workshop on ductile fiber reinforced cementitious composites (DFRCC): application and evaluation, Japan Concrete Institute, Takayama, Japan.

- Grant D., Blandon C. y Priestley M.J.N (2005) “**Modeling inelastic response in direct displacement-base design**”, IUSS Press, Pavia, Report 2005/03, 104 pp.
- Gencturk B. y Elnashai, A. (2012) “**Numerical model and analysis of ECC structures**”, Materials and Structures, DOI 10.1617/s11527-012-9924-0.
- Han T., Feenstra P. y Billington S. (2003) “**Simulation of highly ductile fiber-reinforced cement-based composite components under cyclic loading**”, ACI Struct J 100(6): 749-757.
- Kesner K. y Billington S. (2004) “**Tension, compression and cyclic testing of engineered cementitious composite materials**”, Technical report MCEER-04-0004. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Li V. (1993) “**From micromechanics to structural engineering: the design of cementitious composite for civil engineering applications**”, Struct. Mech. Earthquake Eng., 10(2), 37-48, JSCE.
- Martínez-Rueda, J.E. y Elnashai, A.S. (1997) “**Confined concrete model under cyclic load**”, Materials and Structures, Vol. 30, 139-147.
- Matsumoto T. y Mihashi H. (2003), “**DFRCC terminology and application concepts**”, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 3, pp. 335-340, Japan Concrete Institute.
- Parra-Montesinos G. (2007), “**High-performance fiber reinforced concrete in earthquake-resistant construction**”, Structure Magazine/articles/Buildings blocks, pp. 20-22.
- Priestley M.J.N., Calvi G. M. y Kowalski M. J. (2007) “**Displacement-base seismic design of structures**”, IUSS Press, Pavia.
- Rivera D. (2012) “**A procedure of displacement-based seismic design applied to urban bridges of Mexico City**”, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, Paper ID: 1626.
- Saenz L. (1964), “**Discussion of equation for the stress-strain curve of concrete by Desavi and Krishnan**”, ACI, Journal, 61(9): 1229-1235.
- Sasaki T, Zafra R. y Kawashima K. (2012), “**Effect of polypropylene fiber reinforced concrete for enhancing the seismic performance of bridge columns**”, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, Paper ID: 2064.
- Seismosignal (2003), “**Software para el proceso de datos de movimientos Fuertes**”, URL: <http://www.seismosoft.com>.
- Sullivan T. (2002), “**The current limitations of displacement base design**”, Master degree, IUSS, Pavia.
- Sulliva T. y Calvi G. M. (2009), “**A model code for the displacement-based seismic design of structures**”, IUSS Press, Pavia.
- Scott B.D., Park R., y Priestley M.J.N. (1982), “**Strain-stress behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates**”, ACI Journal, enero-febrero, 100 pp.