



Ingeniería. Revista de la Universidad de  
Costa Rica

ISSN: 1409-2441

marcela.quiros@ucr.ac.cr

Universidad de Costa Rica  
Costa Rica

Cruz Azofeifa, Miguel F.; Vega Ramírez, Randall; Jiménez Castro, Ronald; Ramírez  
Dondi, Brenda; Boza Castro, Juan I.  
DESCRIPCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO Y DESPLAZAMIENTOS EN MARCOS  
DE CONCRETO REFORZADO A ESCALA 1/3  
Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica, vol. 15, núm. 1-2, enero-diciembre,  
2005, pp. 21-37  
Universidad de Costa Rica  
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44170516002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## DESCRIPCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO Y DESPLAZAMIENTOS EN MARCOS DE CONCRETO REFORZADO A ESCALA 1/3.

*Miguel F. Cruz, Azofofeifa, Randall Vega Ramírez, Ronald Jiménez Castro  
Brenda Ramírez Dondi, Juan I. Boza Castro*

### Resumen

Este trabajo muestra los resultados de los ensayos de elementos viga, de elementos columna y de marcos de concreto reforzado de dos niveles, contruidos a escala 1/3. Fueron ensayados bajo un sistema de desplazamientos laterales cíclicos alternantes. Las características de los elementos ensayados corresponden a las de los mismos elementos de los marcos. Las dimensiones de los marcos son de 2 m de ancho por 2,26 m de alto, 1,13 m por cada nivel. Los elementos ensayados son en realidad medios elementos, bajo el supuesto de que su punto de inflexión se encuentra a la mitad de su longitud.

Se calcula para cada espécimen ensayado y en cada ciclo de carga el índice de daño de Park y Ang, el desplazamiento relativo y la energía plástica disipada. Se observó que los elementos individuales mostraron mayor capacidad de deformación lateral que los marcos. Se pudo observar que los índices de daño para el daño leve, entendido este como agrietamiento menor a 1 mm, no superan el valor de 0,28 y que el daño severo, que contiene agrietamientos mayores a 3 mm y desprendimiento del concreto, empieza a presentarse para índices de daño mayores a 0,60.

El daño severo se presenta para valores de desplazamiento relativo mayor al 4 %, mientras que el daño moderado se presenta para valores del orden del 2 %. Un 1 % o menos de desplazamiento relativo implica daño leve. La energía plástica disipada normalizada a la energía máxima plástica estática, alcanzó valores de 2, para condiciones de daño severo y valores menores que 1, para condiciones de daño moderado.

Para predecir el comportamiento elástico inicial de los marcos debió utilizarse un  $E_{eq} = 0,65 E_c I_g$  en las secciones de columnas y un  $E_{eq} = 0,27 E_c I_g$  en las secciones de vigas. Un análisis tipo *push-over* que utiliza los valores iniciales de la rigidez antes mencionados predice la envolvente de la curva histerética carga-desplazamiento con valores menores a los reales en el orden de un 30 %.

**Palabras clave:** concreto reforzado, cálculo de daño, modelos a escala.

### Abstract

The results of the tests performed on beam and column specimens and on R/C frames, built in a reduced 1/3 scale, are presented in this work. The frames were two level frames, and the elements had the same characteristics of correspondent element of the frame. The elements and the frames were subjected to lateral cyclic displacements.

The tested element lengths were one half the length of the correspondent element of the frame; this was so because it was supposed that the inflexion point was located at the center of the element length..

The Park and Ang damage index was calculated for each specimen at each cycle of loading, as well as the relative displacement and the plastic dissipated energy. It was observed that the elements showed a deformation capacity greater than that of the frames. Light damage (thin cracks less than 1 mm) showed a damage index less than 0,28. Severe damage (cracks wider than 3mm and cover falling) showed a damage index greater than 0,60.

Severe damage was attained when the relative displacement was greater than 4 %. Moderate damage was obtained for relative displacements around 2 %, 1 % or less of relative displacement means light damage. The normalized plastic dissipated energy with respect to the maximum plastic static energy is around 2 for severe damage and less than 1 for moderate damage.

It was necessary to use  $E_{eq} = 0,65 E_c I_g$  for columns and  $E_{eq} = 0,27 E_c I_g$  for beams to predict the elastic initial behavior of the frames. The push-over analysis, which used initial stiffness values, predicts the envelope of the hysteretic load-displacement curve with 30 % lower values than those of the test.

**Key words:** reinforced concrete, damage calculations, scaled models

**Recibido:** 29 de noviembre del 2004 / **Aprobado:** 02 de junio del 2005

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra los procedimientos y resultados de ensayos realizados sobre elementos y marcos de concreto reforzado, construidos a escala 1/3 y sometidos a cargas laterales alternantes hasta la falla estructural.

El objetivo de esta investigación es correlacionar el valor del índice de daño, calculado con la expresión de Park y Ang (Park & Ang, 1985), con la descripción cualitativa del daño observable. También se correlaciona el índice de daño con los desplazamientos relativos de los especímenes y con la energía disipada durante el ensayo. Adicionalmente, se requiere conocer cuál es el valor de  $EI_{eq}$  (módulo de elasticidad por momento de inercia) de los elementos a utilizar en los análisis estructurales, elásticos y elasto-plásticos, para determinar los desplazamientos laterales de los marcos ensayados.

Los especímenes son cargados únicamente con carga lateral, así que los efectos de carga axial no son considerados, y por ende, los efectos  $P-\Delta$  no están incluidos en los ensayos ni en los análisis. Se trabaja con modelos planos y los ensayos se realizan introduciendo desplazamientos laterales incrementados de manera lenta con el fin de que no haya efectos dinámicos.

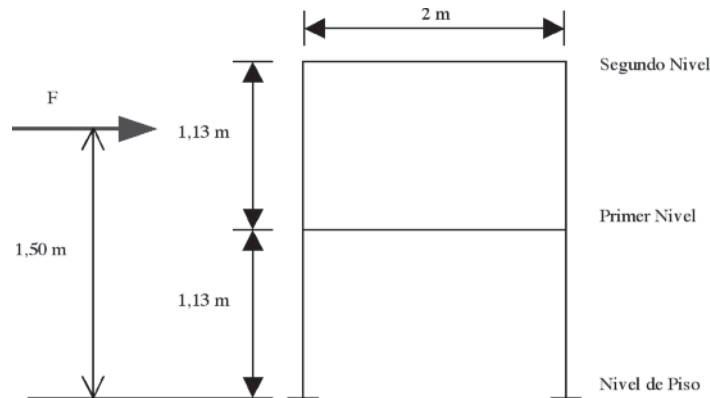
Los especímenes son construidos con materiales y la mano de obra común de las obras de concreto reforzado existente en Costa Rica.

El diseño de los marcos se realizó siguiendo los lineamientos del (Reglamento para Construcciones de Concreto Estructural y Comentarios ACI 318, 1999) y del (Código Sísmico de Costa Rica, 1986).

Las dimensiones de los marcos se muestran en la Figura 1a de tal manera que la altura de los pisos es de 1,13 m y el ancho del vano de viga es de 2,00 m. Las columnas tienen una sección de 15x15 cm y las vigas de 13x20 cm. La Figura 1b muestra el marco experimental.

Los refuerzos correspondientes, se muestran en la Figura 2a incluyendo el refuerzo del nudo. Los refuerzos de estos elementos son el resultado de diseñar el marco para una cortante basal de 3,1 ton distribuida con un 1/3 del total en el segundo nivel y 2/3 del total en el primer nivel.

Los elementos construidos y fallados individualmente, corresponden a medios elementos obtenidos del diseño del marco original. De esta manera el elemento columna tiene una longitud de 50 cm y los elementos viga tienen una longitud de 90,5 cm. Los materiales utilizados en el diseño y construcción de los especímenes (Vega, 2000),



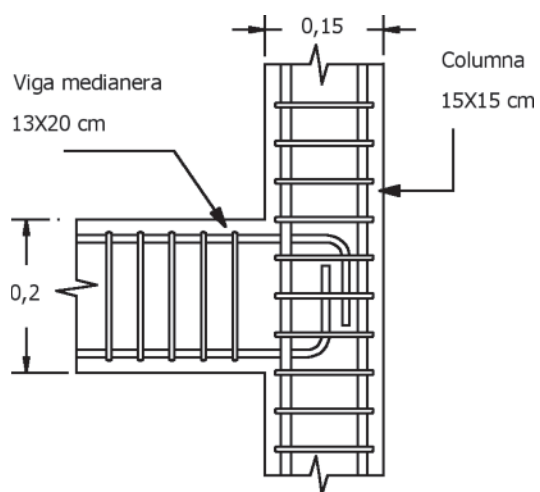
**Figura 1a.** Modelo de marco y punto de aplicación de la fuerza



**Figura 1.b** Modelo real del marco en un estado de carga



**Figura 2a.** Secciones De Vigas Y Columnas



**Figura 2.b** Detalle del nudo

(Jiménez, 2003), (Boza, 2002) y (Ramírez, 1992) son de concreto de 210 kg/cm<sup>2</sup> y acero de refuerzo grado 40.

## 2. ENSAYOS Y RESULTADOS DE LOS ELEMENTOS INDIVIDUALES.

Se construyeron dos espécimenes de los elementos individuales. Es decir se construyeron dos espécimenes de ensayo por cada modelo a analizar, y se realizaron dos ciclos de carga para cada valor de desplazamiento lateral considerado. El Cuadro 1 muestra los valores de desplazamiento lateral aplicados a cada espécimen de los modelos de viga de primer nivel, viga de segundo nivel y columna.

En la viga del primer nivel se aplicaron ciclos de carga de diferentes valores en desplazamientos positivos y negativos, esto para considerar que la viga tiene diferente refuerzo en las caras de tracción correspondientes a momento positivo y momento negativo. Los dos espécimenes fueron ensayados para los mismos valores de desplazamiento lateral. Obsérvese que el primer espécimen toleró un desplazamiento relativo último de un 13 %.

En la viga del segundo nivel uno de los espécimenes fue ensayado para ciclos de carga y descarga simétricos a pesar de la diferencia

de refuerzo para momento positivo y negativo. El otro espécimen fue cargado con ciclos de diferente valor de desplazamiento positivo y negativo. Estos espécimenes de viga también alcanzaron valores de desplazamiento relativo del orden de 13 %.

Los espécimenes de columna fueron cargados con ciclos simétricos de desplazamiento y toleraron desplazamiento relativos superiores al 12 %.

Los ciclos de carga se detuvieron cuando se observó una caída de la resistencia y cuando el daño observado era evidentemente *severo*.

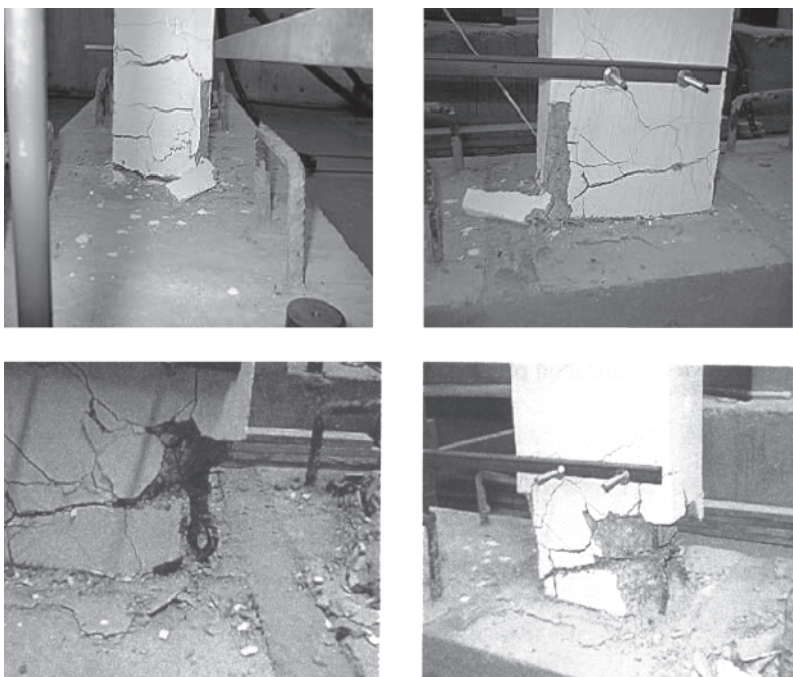
La Figura 3 muestra fotografías del primer espécimen de la viga del segundo nivel durante el ciclo de 5,4 cm y durante el ciclo de 12,4 cm. Obsérvese el pandeo del refuerzo durante el último ciclo de carga.

Las Figuras 4, 5 y 6 muestran las curvas histeréticas de carga y descarga de los espécimenes de viga del primer nivel, viga del segundo nivel y del primer modelo de columna. Obsérvese que las vigas mantienen una curva histerética abierta y estable hasta tanto no se introduzcan los desplazamientos laterales superiores al 10 %. No sucede lo mismo en las curvas de las columnas, las que presentan una curva con estrangulamiento en la parte central (fenómeno conocido como *shear pinching*). Esto

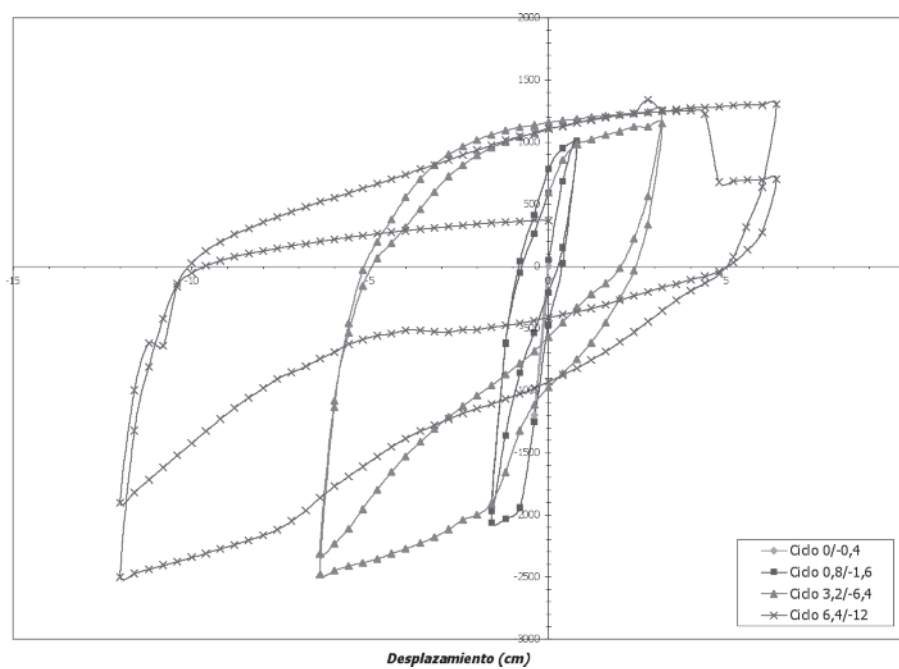
**Cuadro 1.** Desplazamiento de elementos

Elemento	Modelo	Ciclo de Carga	Elemento	Modelo	Ciclo de Carga	Elemento	Modelo	Ciclo de Carga
Viga 2	1	0,1/-0,1	Viga 1	1	0/-0,4	Columna	1	0,8/-0,8
		0,4/-0,4			0,8/-1,6			2,0/-2,0
		1,6/-1,6			3,2/-6,4			4,0/-4,0
		6,4/-6,4			6,4/-12			6,0/-6,0
		12,8/-12,8			0/-0,4			8,0/-8,0
	2	0/-0,4		2	0,8/-1,6		2	0,4/-0,4
		0,8/-1,6			3,2/-6,4			2,4/-2,4
		4/-6,4			6,4/-10,4			4,4/-4,4
		8,4/-12,4						6,4/-6,4

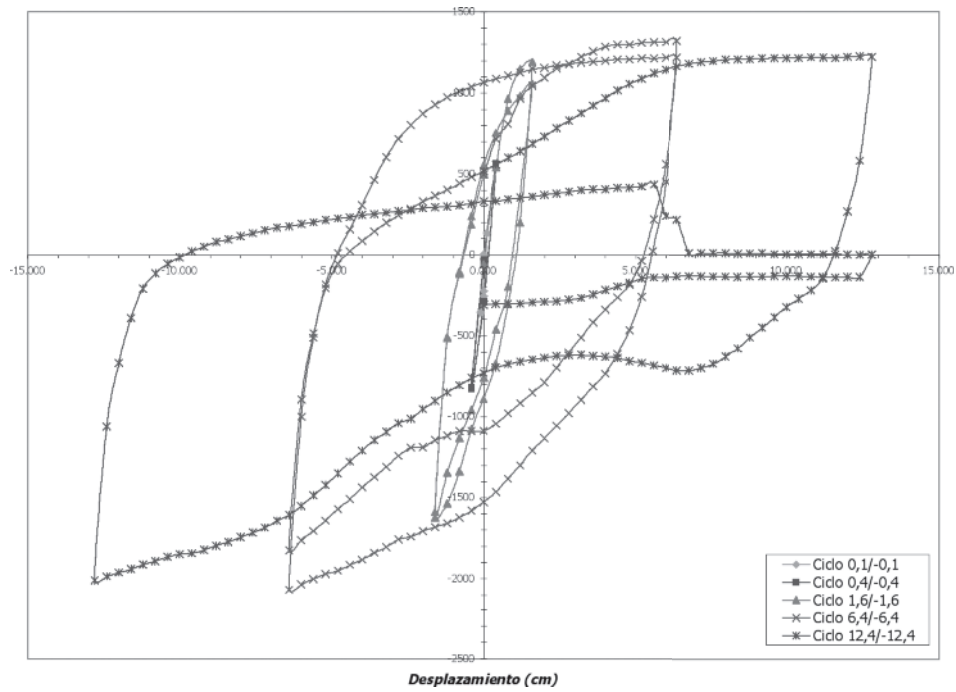
Fuente: El autor



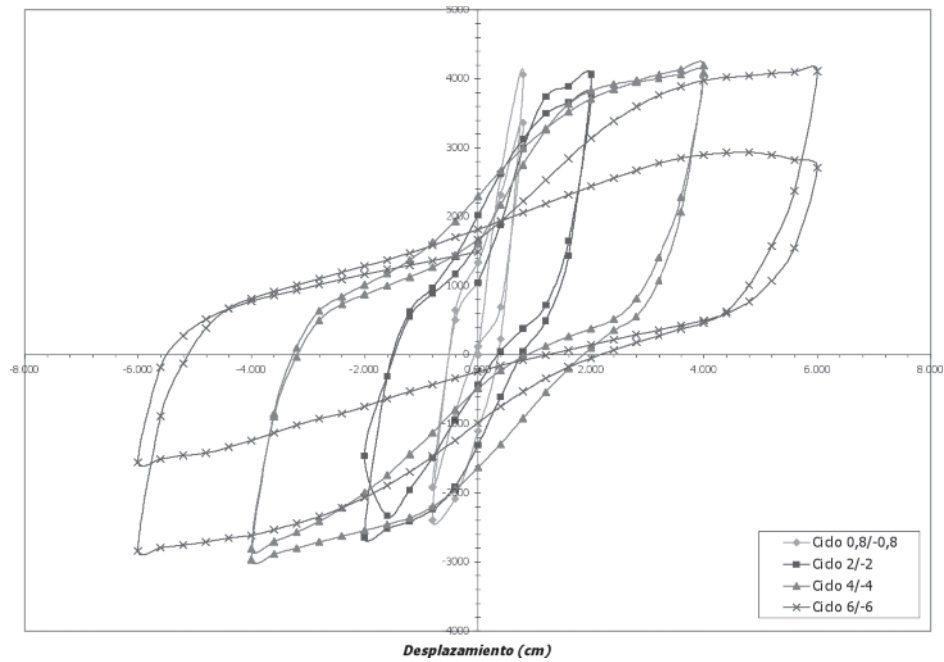
**Figura 3.** Nivel de daño moderado y severo en viga del segundo nivel



**Figura 4.** Curva de histéresis primer modelo, viga primer nivel e idealización elasto-plástica.



**Figura 5.** Curva de histéresis primer modelo, viga segundo nivel e idealización elasto-plástica.



**Figura 6.** Curva de histéresis, primer modelo de columna.

es producido, probablemente, por el efecto del cortante en la sección transversal más solicitada.

El porcentaje de refuerzo transversal en vigas resultó en  $\rho_v = 0.0168$  y en las columnas en  $0.0136$ . La separación de aros; entre altura efectiva, s/d, en vigas fue de  $0.23$  y en columnas de  $0.40$ . Este último valor es superior a  $0.25$  que es lo exigido por la norma. El no respetar esta reglamentación puede ser la causa del estrangulamiento de las curvas histeréticas de las columnas.

3. ENSAYOS Y RESULTADOS DE LOS MARCOS

En el caso de los marcos, también se construyeron dos especímenes para ser ensayados. Uno de ellos (marco 1) fue sometido a ciclos de carga y descarga en una sola dirección, es decir, de cero al desplazamiento máximo y luego descargado hasta cero desplazamiento. El marco 2 se cargó en ambas direcciones, es decir, de cero al desplazamiento máximo y luego volvió a cero, para ser cargado en el sentido opuesto hasta el desplazamiento máximo.

Los desplazamientos de cada ciclo en cada espécimen se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Desplazamientos marcos (cm)

Elemento	Modelo	Ciclo de carga (cm)
Marco	1	0/-0,8
		0/-2
		0/-4
		0/-8
		0/-16
	2	0,8/-0,8
		2/-2
		4/-4
		8/-8
		16/-16

Fuente: El autor

Estos valores de desplazamiento conducen a desplazamientos relativos del orden del 75 % de los tolerados por los elementos individuales. Esto es debido a que la mayor parte del daño en el marco se dio en las uniones viga columna limitando que el daño se fuera a concentrar en los extremos de los elementos. La Figura 7 muestra el daño a los 4 cm de desplazamiento

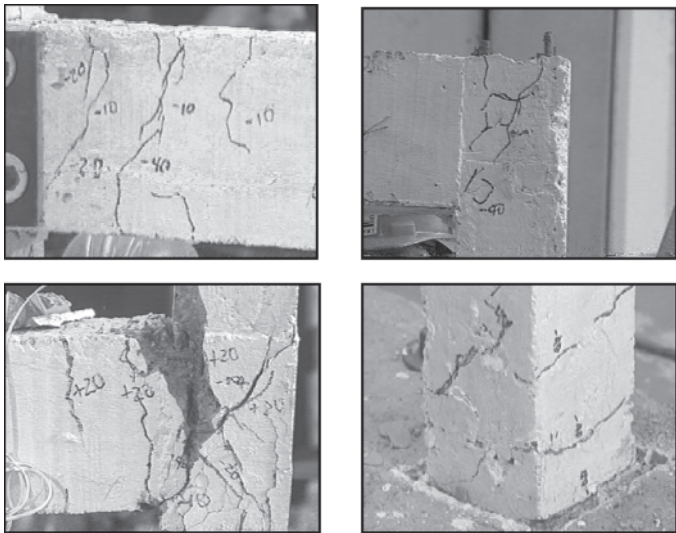


Figura 7. Nivel de Daño Moderado y Severo en marco 1



lateral y a los 16 cm de desplazamiento lateral del marco 1.

La Figura 8 muestra las curvas histeréticas del marco 1 y del marco 2. Obsérvese que la capacidad última de cada marco es más o menos

el mismo valor. Este valor es el doble de la capacidad del segundo espécimen de columna, situación que era totalmente esperable. La capacidad última del marco a nivel de cortante basal, resultó ser del orden del doble de la carga de diseño.

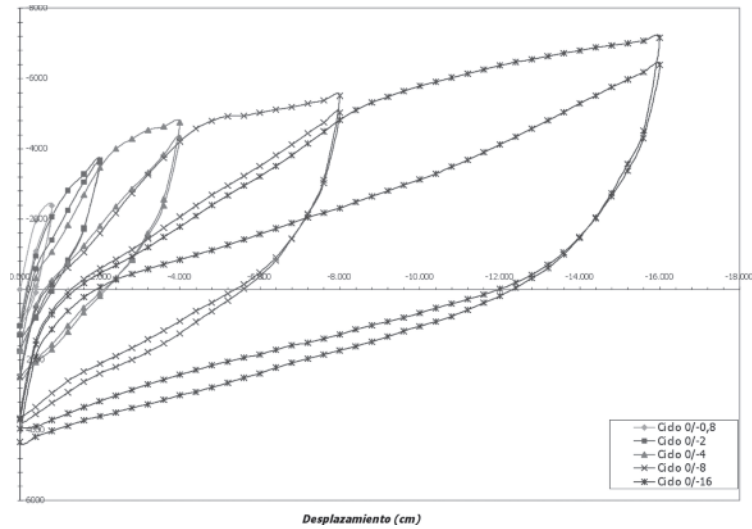


Figura 8a. Marco 1.

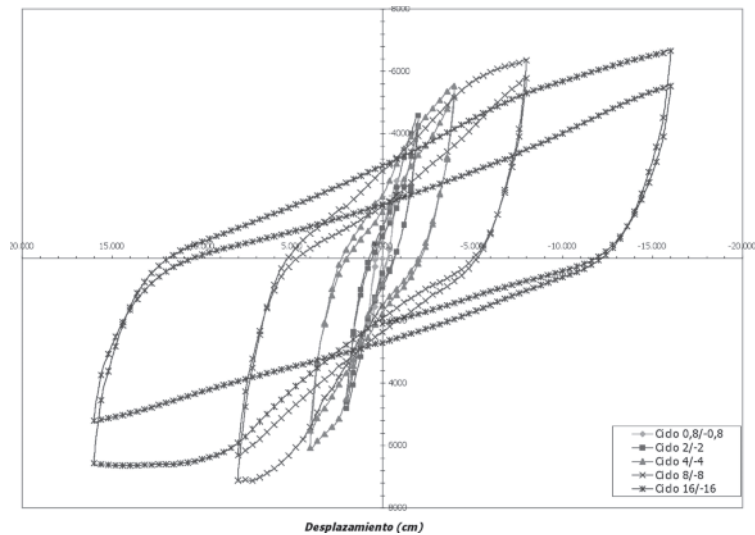


Figura 8b. Marco 2

**Figura 8.** Curvas de histéresis de marcos e idealización elasto-plástica.

Obsérvese también que la curva histerética del marco 2 muestra la misma característica de estrangulamiento en la cintura, debido al cortante que presentaron las columnas individuales. Las columnas del marco también presentaron agrietamiento en cortante importante, al igual que las columnas individuales. Las vigas del marco presentaron únicamente agrietamiento de flexión. La Figura 9 muestra la columna aislada y la columna del marco con importante agrietamiento en cortante. Esto muestra la importancia que tiene el confinamiento de las columnas en el comportamiento del marco.

En todas las curvas histeréticas anteriormente mostradas, para los marcos y para los elementos, se presenta también la curva elasto-plástica equivalente que define  $\delta_y$  y  $Q_y$ . Esta curva (Chopra, 1995) mantiene la rigidez inicial y encierra un área igual al área de la curva envolvente del ensayo.

#### 4. EVALUACIÓN DE LOS ID Y COMPARACIÓN CON DAÑO DESCRIPTIVO

La expresión del índice de daño de Park y Ang (Park y Ang, 1985) contiene aspectos de desplazamiento lateral y aspectos de energía plástica disipada. Esta expresión es como sigue:

$$ID = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} E_p \quad (1)$$

donde:

$\delta_m$ : es la deformación que se experimenta en el ensayo,

$\delta_u$ : es la deformación máxima que puede tolerar el espécimen bajo carga estática,

$Q_y$ : es la resistencia a la cedencia,

$\beta$ : es un factor de ajuste considerado en este trabajo como 0.15, y

$E_p$ : es la energía disipada acumulada.

En el caso de los elementos individuales se ha utilizado un valor de  $\delta_u$  como el valor medio entre el valor de cedencia del ensayo ( $\delta_u$ ) multiplicado por la ductilidad sugerida por Park y Ang (Park & Ang, 1985) y el valor máximo del ensayo cíclico. En el caso de los marcos se ha utilizado un valor de  $\delta_u$  igual al desplazamiento último del ensayo ya que el marco 1 muestra la envolvente del ensayo estático y el desplazamiento máximo del marco queda limitado por el comportamiento en las uniones viga columna que se estima similar, en el caso del marco 1, al del correspondiente ensayo estático.



Columna Aislada



Columna en el marco

**Figura 9.** Agrietamientos similares en columnas

Según lo descrito anteriormente, se calculan los ID para cada espécimen al final del segundo ciclo para cada nivel de desplazamiento. El Cuadro 3 muestra los resultados para los elementos individuales y el Cuadro 4 muestra los valores para los marcos. Obsérvese que el Cuadro 3 no muestra valores de ID mayores que 1 ya  $\delta_u$  se consideró, en todos los casos, mayor que el  $\delta_m$  del ensayo.

En el caso de los marcos los ID superan el valor de 1 ya que  $\delta_u$  se supuso igual al  $\delta_m$  del ensayo.

Esta última condición de ID demuestra que el mismo muy dependiente del  $\delta_u$  y que la determinación apropiada de este último parámetro se hace necesaria para la correcta evaluación del ID.

**Cuadro 3.** Índices de Daño al final de cada ciclo de elemento.

Elemento	Modelo	Ciclo De Carga	Índice de daño	$\delta_{REL}(\%)$
V2	1	0,1/-0,1	0,003	0,11
		0,4/-0,4	0,014	0,44
		1,6/-1,6	0,063	1,76
		6,4/-6,4	0,324	7,05
		12,8/-12,8	0,620	14,10
		0/-0,4	0,014	0,44
	2	0,8/-1,6	0,070	1,76
		4/-6,4	0,347	7,05
		8,4/-12,4	0,691	13,66
		0/-0,4	0,013	0,44
		0,8/-1,6	0,059	1,77
		3,2/-6,4	0,270	7,08
V1	1	6,4/-12	0,563	13,27
		0/-0,4	0,018	0,44
		0,8/-1,6	0,084	1,77
		3,2/-6,4	0,403	7,08
		6,4/-10,4	0,748	11,51
		0,8/-0,8	0,055	1,60
	2	2/-2	0,164	4,00
		4/-4	0,378	8,00
		6/-6	0,618	12,00
		8/-8	0,787	16,00
		0,4/-0,4	0,031	0,80
		2,4/-2,4	0,263	4,80
C	2	4,4/-4,4	0,552	8,80
		6,4/-6,4	0,778	12,80

Fuente: El autor

**Cuadro 4.** Índices de Daño por ciclo de carga en los marcos.

Elemento	Ciclo de Carga	Índice de daño	$\delta_{REL}(\%)$
Marco 1	0/-0,8	0,052	0.53
	0/-2	0,136	1.33
	0/-4	0,280	2.66
	0/-8	0,620	5.33
	0/-16	1,354	10.66
	-0,8/0,8	0,052	0.53
Marco 2	-2/2	0,141	1.33
	-4/4	0,336	2.66
	-8/8	0,781	5.33
	-16/16	1,715	10.66

Fuente: El autor

En el caso de los elementos individuales se ha tomado el valor medio antes mencionado, pues las ductilidades sugeridas por Park y Ang (Park y Ang, 1985) resultan valores excesivos de aparente difícil obtención con el concreto reforzado. El valor medio utilizado, en todos los casos, resultó en una ductilidad del orden del doble de la del ensayo cíclico.

Obsérvese que los índices de daño superiores a 0,4 se alcanzaron para desplazamientos relativos superiores al 7 % en las vigas y superiores al 8 % en las columnas. Desplazamientos pequeños del orden del 1 % apenas si causaron índices de daño del orden de 0,05.

Después de calculado el ID se correlacionó el mismo con el daño descriptivo.

El daño descriptivo es clasificado en leve, moderado y severo, asociado cada estado con un tamaño de grietas y con condiciones en el concreto exterior y del acero de refuerzo. Se asigna un color a cada condición de daño, de esta manera se establece lo siguiente:

- Daño leve: grietas pequeñas, casi despreciables, sección intacta. Color verde.

- Daño moderado: grietas más grandes, de tamaño de 1mm, inicio de aplastamiento en el concreto. Daño reparable (Park y Ang, 1985). Color amarillo.
- Daño severo: grietas muy grandes mayores de 1mm, concreto aplastado, recubrimiento suelto o caído, refuerzo visible. Daño irreparable (Park y Ang, 1985). Color rojo.

La Figura 10 muestra la correlación del valor del ID con el daño descriptivo y utilizando el patrón de colores, y para los diferentes índices calculados, ya sea en vigas y columnas individuales y para los marcos. Se han trazado dos límites arbitrarios en 0,20 y 0,6, para determinar los cambios entre leve y moderado y entre moderado y severo. El límite (Park y Ang, 1985) entre moderado y severo está en  $ID > 0,40$  lo que concuerda bien con lo obtenido con las vigas y los marcos, no así con las columnas, que presentan índices de daño mayores a 0,4 aun cuando se puede describir su condición con daño moderado.

La línea de ID igual a 0,6 se trazó arbitrariamente para definir el daño severo (Park y Ang, 1985), el daño extensivo se presenta cuando los índices están entre 0,5 y 1,0. Según los resultados de este

trabajo, el daño severo se presenta en promedio para ID mayor a 0,6.

## 5. CORRELACIÓN DEL DAÑO CON LOS DESPLAZAMIENTOS LATERALES Y CON LA ENERGÍA DISIPADA

Para correlacionar el daño con la energía disipada se define el término energía plástica normalizada como sigue:

$$E_{plástica\ estática} = Q_y \delta_u \quad (2)$$

siendo la  $E_{plástica-cíclica}$  la acumulada del ensayo realizado y la  $E_{plástica-cíclica}$  igual a

$$E_{PN} = \frac{E_{plástica-cíclica}}{E_{plástica-estática}} \quad (3)$$

la que define la energía máxima que puede absorber el elemento o la estructura si es cargada estáticamente desde cero hasta el desplazamiento último con comportamiento elasto-plástico.

La correlación del índice de daño con la energía plástica normalizada, se muestra en la Figura 11.

Es claro en esta Figura que mientras la energía plástica normalizada no supere el valor de 1, el daño será moderado o leve.

Para valores de  $E_{PN}$  entre 1 y 2 el daño será moderado o severo, y claramente, para valores de  $E_{PN}$  mayores que 2 el daño será severo. A manera de resumen, se puede suponer que los ensayos cíclicos fueron capaces de disipar el doble de la energía que se disiparía en un ensayo estático llevado hasta los desplazamientos últimos.

En la Figura 12 se muestra la correlación del índice de daño con los desplazamientos relativos. Se muestra que el comportamiento de los marcos es muy diferente al de los elementos. Los elementos muestran una capacidad de deformación muy superior a la de los marcos. El daño severo para los elementos se alcanzó para deformaciones superiores al 12 %, mientras que en marcos el daño severo se alcanzó para deformaciones superiores al 4 %.

Es claro que deformaciones menores al 2 % implican, en todos los casos, daño leve.

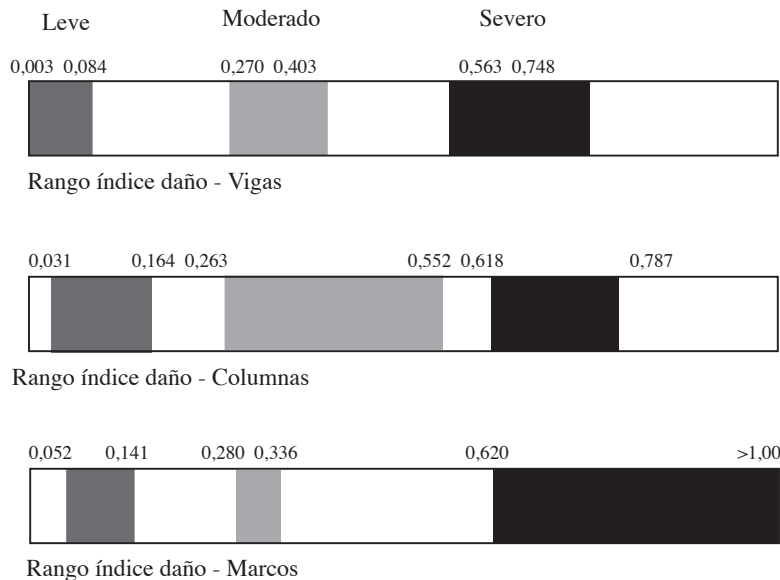
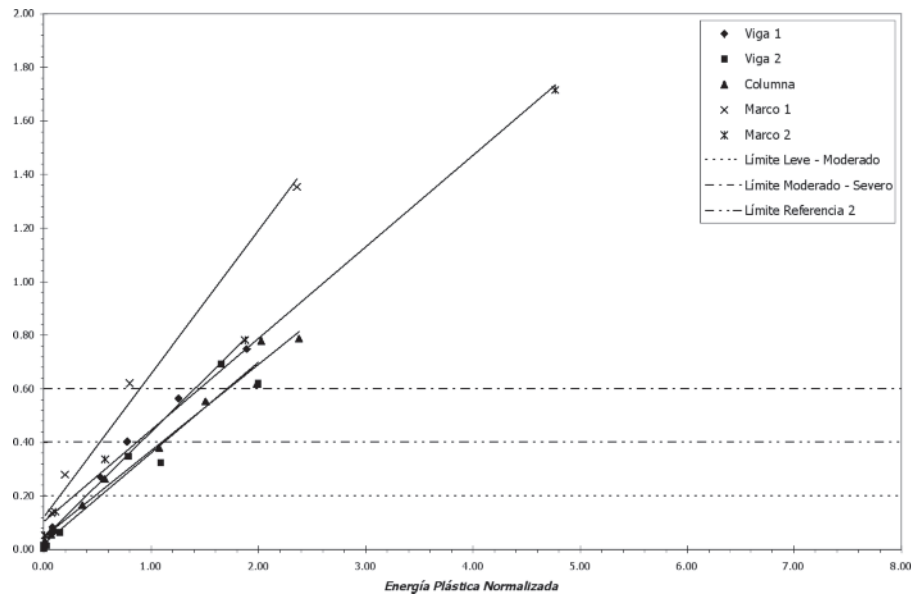


Figura 10. Correlación del ID con el daño descriptivo.



**Figura 11.** Índice de daño Vs energía plástica normalizada.

Se observa que el daño moderado en marcos se presenta para deformaciones del orden del 3 %, por lo tanto los límites de desplazamiento relativo (Park & Ang, 1985) impuestos por las normas parecen ser muy conservadores.

Puede que la carga axial influya en limitar estos valores, efecto no considerado en este trabajo, pero aun así, no parece razonable limitar el desplazamiento lateral, incluyendo los efectos de ductilidad a valores tan bajos como los del inicio del comportamiento inelástico.

## 6. VALORES DE RIGIDEZ EQUIVALENTE PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para determinar los valores de rigidez equivalente se realizan análisis estructurales de cada modelo del marco con la distribución correspondiente de carga lateral. Como se cuenta con los desplazamientos laterales obtenidos en cada piso y en cada ciclo, se modifica mediante prueba y error el  $EI_{eq}$  de las vigas y el  $EI_{eq}$  de las columnas, para cada ciclo de carga, hasta obtener los desplazamientos según el análisis estructural similares a los obtenidos en cada ciclo del ensayo. Los análisis estructurales que se

realizan para cada ciclo son elástico-lineales, de manera que se aprecia la forma como se degrada la rigidez secante de la estructura. Los resultados que obtuvieron para la rigidez equivalente en cada marco se grafican en la Figura 13 y 14.

Obsérvese como las vigas varían su rigidez desde valores cercanos a 0,30 hasta valores inferiores a 0,10 para los últimos estados de carga. En el caso de las columnas estas varían la rigidez desde 0,7 hasta valores de 0,10.

Posteriormente se realizó un análisis inelástico estático no lineal con comportamiento elasto-plástico en las rótulas de los extremos de los elementos y con carga lateral incrementada monotónicamente. Para esto se ajustó el valor del  $EI_{eq}$  para las vigas y las columnas de manera que se ajustase la rigidez inicial. Los valores obtenidos resultaron ser  $0,65 EI_g$  para las columnas y  $0,27 EI_g$  para las vigas en ambos marcos. Con estos valores se realizó el análisis inelástico considerando la modificación de rigidez únicamente por la aparición de las rótulas.

Las curvas inelásticas estáticas se muestran para ambos marcos en las Figuras 15 y 16.

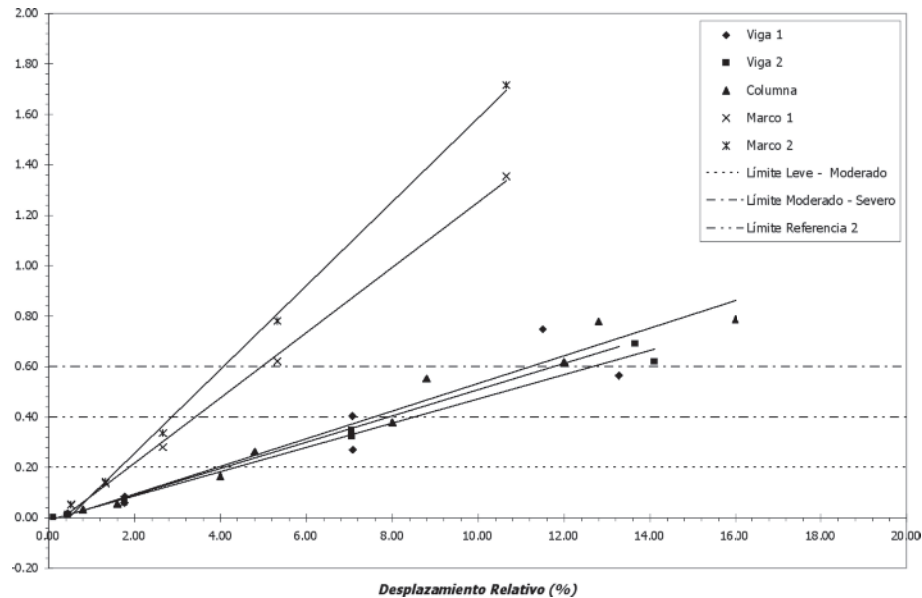


Figura 12. Índice de daño vs desplazamiento relativo

Estas curvas se muestran junto con las correspondientes curvas histeréticas. Las curvas se obtuvieron calculando los  $M_p$  de los extremos de los elementos como  $M_n$  según la teoría del concreto reforzado y con  $f_y$  del diseño especificado. Se observa que las curvas estáticas no alcanzan los máximos de las curvas histeréticas, estas últimas presentan una sobre-resistencia sobre la curva estática de más de un 50 % en el caso del marco 1 y del orden de un 30 % en el caso del marco 2. Estos valores de sobre-resistencia de los ensayos cíclicos respecto a los análisis elasto-plásticos estáticos justifican, entre otros aspectos, los valores de sobre-resistencia considerados en las normas sísmicas actuales.

## 7. CONCLUSIONES

1. El rango de índices de daño para determinar el daño descriptivo quedó establecido de manera similar a los propuestos en la literatura técnica; con la salvedad de que los resultados de este trabajo indican de que el daño severo empieza a presentarse para ID igual o mayor a 0,60.
2. Los elementos individuales presentaron mayor capacidad de deformación inelásticas que los marcos.
3. Desplazamientos relativos del 1 % apenas si causan daño en los marcos y en los elementos.
4. El daño severo se presenta para desplazamientos relativos mayores al 4 % en marcos y mayores al 8 % en elementos individuales.
5. Tanto los elementos como los marcos fueron capaces de disipar una energía cíclica de al menos el doble de la energía que se disipa estáticamente hasta la deformación última.
6. El valor del  $EI_{eq}$  para columnas resultó ser  $0,65 EI_g$  y para las vigas  $0,27 EI_g$ .
7. El análisis inelástico con comportamiento elasto-plástico de las rótulas subestima la capacidad lateral del marco, de manera que los marcos presentan sobre-resistencia respecto a este tipo de análisis del orden de 1,50.

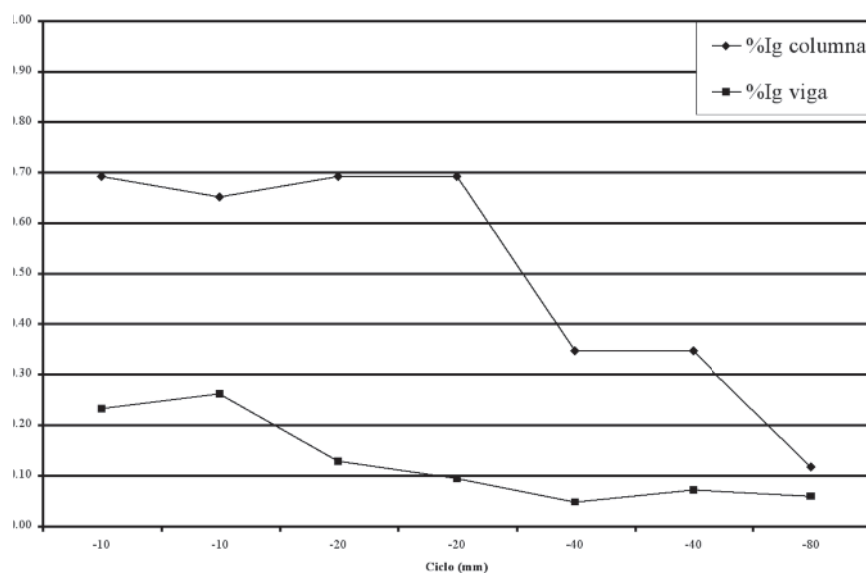


Figura 13. Cambio de rigidez del marco 1, según los ciclos aplicados

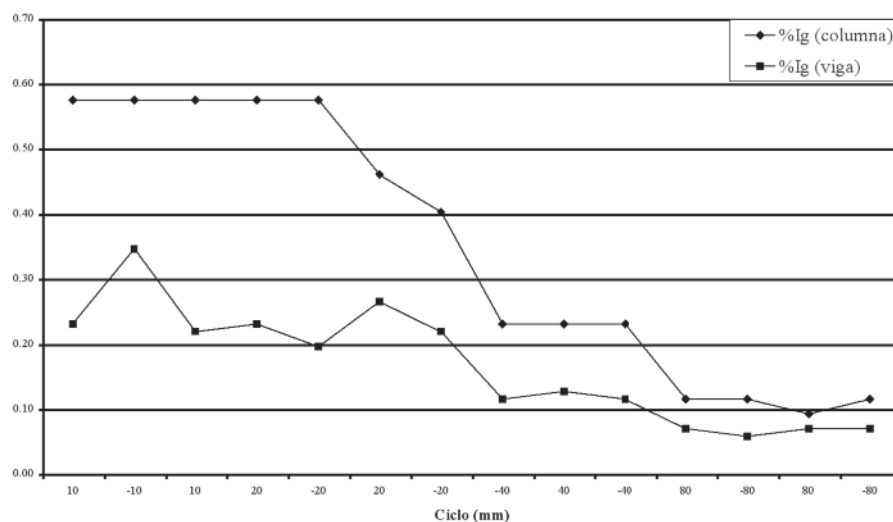


Figura 14. Cambio de rigidez del marco 2, según los ciclos aplicados

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica por el soporte técnico y científico aportado para realizar esta investigación.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Park, Y.J. y Ang, A. (1985). Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. *ASCE Journal*, 111(4), 722-739.



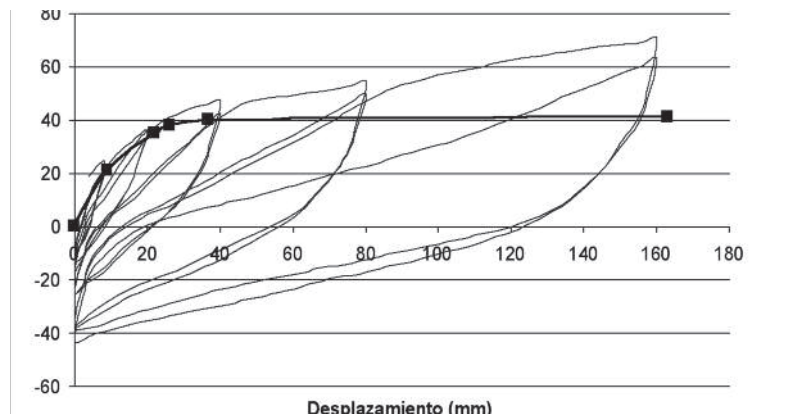


Figura 15. Aproximación del comportamiento del marco 1 por medio del análisis inelástico.

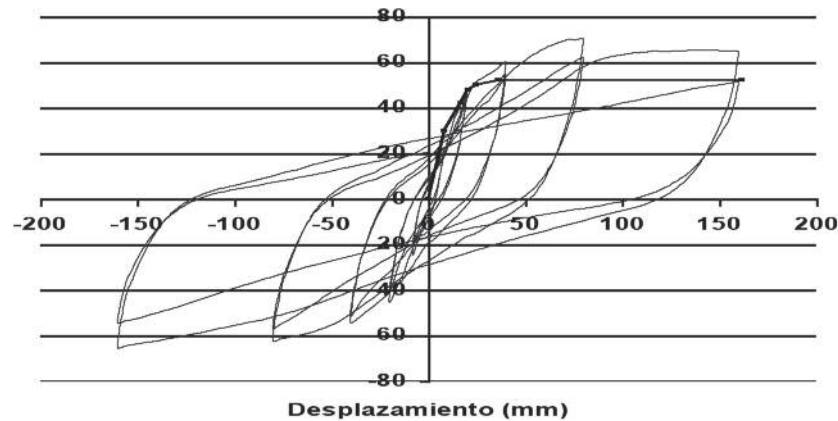


Figura 16. Aproximación del comportamiento del marco 2 por medio del análisis inelástico.

Park, Y.J. y Ang, A. (1985). Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings. *ASCE Journal*, 111(4), 740-757.

ACI 318-99. (1999). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. ACI, Michigan.

Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (1986). *Código Sísmico de Costa Rica*.

Vega R., R. (2000). *Evaluación del Índice de Daño en Elementos de Concreto Reforzado*.

Tesis de Graduación, Universidad de Costa Rica.

Jiménez C., R. (2002). *Determinación del Índice de Daño en Marcos de Concreto Reforzado*. Tesis de Graduación, Universidad de Costa Rica.

Boza C., J. I (2003). *Variación de Rigidez en Marcos de Concreto*. Proyecto de Graduación, Universidad de Costa Rica.

Ramírez D., B. (1992). *Análisis Comparativo de Indicadores de Daño en Elementos y*

*Marcos de Concreto Reforzado.* Tesis de Graduación, Universidad de Costa Rica

Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of Structures*. Prentice Hall. New Jersey.

## **SOBRE LOS AUTORES**

### **Miguel F. Cruz Azofeifa**

Ph.D. Ingeniero Civil  
Profesor Catedrático Escuela de Ingeniería Civil,  
Universidad de Costa Rica  
Teléfono: 2075510  
Facsímil: 224 24 08  
Correo electrónico: mfcruz@racsa.co.cr

### **Juan I. Boza Castro**

Licenciado en Ingeniería Civil. Administrador de proyectos en la empresa Gestión y Consultoría Integrada.  
Teléfono: 290 95 75/ 362 27 96  
Correo electrónico: Ignacio-boza@gci-ing.com

### **Ronald Jiménez Castro**

Licenciado en Ingeniería Civil.  
Diseñador en la empresa Miguel Cruz y Asociados Ltda.  
Teléfono: 226 58 59/ 832 77 92  
Facsímil: 257 25 74  
Correo electrónico:  
[rojica@costarricense.cr](mailto:rojica@costarricense.cr)  
[rjimenezc@cfia.or.cr](mailto:rjimenezc@cfia.or.cr)

### **Brenda Ramírez Dondi**

Licenciada en Ingeniería Civil  
Valuadora en Icicor S.A  
Teléfono: 226 26 06/ 355 76 26  
Correo electrónico: brendondi@hotmail.com

### **Randall Vega Ramírez**

Licenciado en Ingeniero Civil  
Coordinador de obras civiles de la Municipalidad de Alajuela  
Teléfono: 441 21 25/ 373 65 46  
Facsímil: 441 21 25