

REHABILITACIÓN DE UN PÓRTICO DE HORMIGÓN ARMADO CON GFRP

REHABILITATION OF A REINFORCED CONCRETE FRAME WITH GFRP

GUSTAVO PALAZZO¹, VICTOR ROLDÁN², FRANCISCO CALCERÓN³

1 Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. gpalazzo@frm.utn.edu.ar

2 Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. victor.rolدان@frm.utn.edu.ar

3 Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. francisco.calderon@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

En algunas estructuras sismorresistentes diseñadas con reglamentos antiguos puede ser necesario implementar estrategias de rehabilitación. Entre las estrategias disponibles se encuentra el refuerzo mediante la aplicación de materiales compuestos, tal como las fibras de vidrio (GFRP). Si bien se disponen de guías para diseñar estos refuerzos, es necesario evaluar el nivel de desempeño que presentan estas metodologías cuando las estructuras son sometidas a acciones dinámicas. Así, en este trabajo se presenta la comparación experimental de la respuesta de una estructura con y sin refuerzo de GFRP, excitada en una mesa vibradora. Como estructura se consideró un pórtico de hormigón armado 3D, de un nivel y un vano en cada dirección. Sus dimensiones geométricas se fijaron de acuerdo a las limitaciones del equipamiento para el estudio experimental. El diseño de los elementos de este pórtico se efectuó con un reglamento sismorresistente antiguo de la provincia de Mendoza, (Argentina). La estructura sin refuerzo fue excitada según su dirección longitudinal. Se aplicaron 6 *inputs* con picos de aceleración máxima variable, hasta llegar a una demanda aproximadamente igual a la capacidad de la estructura. Luego el pórtico fue reforzado reemplazando el hormigón del pie de columnas, y zunchando los extremos de las mismas y de las vigas con fibra de vidrio. Posteriormente la estructura fue nuevamente excitada en la mesa vibradora, aplicando 5 *inputs* similares a los implementados en la estructura original. En las conclusiones se resaltan las ventajas del procedimiento de refuerzo implementado, y las investigaciones futuras necesarias.

PALABRAS CLAVE: estructuras de hormigón armado, polímeros reforzados con fibras.

ABSTRACT

In some seismic-resistant structures designed with old codes and regulations it may be necessary to implement rehabilitation strategies. Among the strategies available there is reinforcement by the application of composite materials, such as glass fibers (GFRP). Although guidelines are available to design these reinforcements, it is necessary to evaluate the level of performance presented by these methodologies when the structures are subjected to dynamic actions. Thus, in this work the experimental comparison of the response of a structure with and without reinforcement of GFRP, excited in a shaking table, is presented. The structure was a 3D reinforced concrete frame, one level and one span in each direction. Its geometric dimensions were set according to the limitations of the equipment for the experimental study. The design of the elements of this frame was carried out with an old seismic regulation of the province of Mendoza, (Argentina). The structure without reinforcement was excited according to its longitudinal direction. Six load *inputs* were applied with peaks of variable maximum acceleration, reaching a demand approximately equal to the capacity of the structure. Then the frame was reinforced by replacing the concrete of the bottom of columns, and locking the column ends and of the beams with glass fibers. Subsequently the structure was again excited in the shaking table, applying 5 load *inputs* similar to those implemented in the original structure. The conclusions highlight the advantages of the reinforcement procedure implemented, and the necessary future research.

KEYWORDS: reinforced concrete structures, fiber reinforced polymers

DOI: <http://dx.doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.207>

RECIBIDO: 30/05/2015

ACEPTADO: 30/08/2015

INTRODUCCIÓN

Los nuevos conocimientos en ingeniería sísmorresistente permiten conocer si algunas las estructuras proyectadas con filosofías de diseño antigua podrían tener un comportamiento inadecuado frente a un terremoto destructivo. El análisis sirve para establecer si es necesario aplicar alguna estrategia de refuerzo estructural, a los efectos de mejorar su desempeño frente a eventos extremos (INPRES - CIRSOC 103, 1983).

Entre las diversas estrategias de rehabilitación se cuenta con los materiales compuestos, tal como los tejidos de fibras de vidrio que se consideran en este trabajo (SIKA, 2014). Estos materiales permiten mejorar la capacidad a flexión y a corte de elementos estructurales, presentando como ventajas: flexibilidad y adaptación a geometrías estructurales complejas, bajo peso, facilidad y rapidez de aplicación, no son corrosivos, son resistentes a los ácidos, y poseen bajo impacto estético. Como desventaja se menciona que necesitan una protección contra el fuego, y que el costo de las fibras y el adhesivo para su colocación es elevado respecto a los materiales empleados en otras metodologías de refuerzo (Ferracuti y Savoia, 2005; Spoelstra y Monti, 1999).

Son necesarios nuevos estudios para corroborar la eficiencia de este procedimiento de refuerzo frente a acciones dinámicas.

En el estudio experimental implementado para este trabajo se evaluó la respuesta de un pórtico de hormigón armado, con y sin refuerzo de fibra de vidrio, frente a una excitación dinámica en la mesa vibradora del Instituto de Investigaciones Antisísmicas “Ing. Aldo Bruschi” de la Universidad Nacional de San Juan de Buenos Aires.

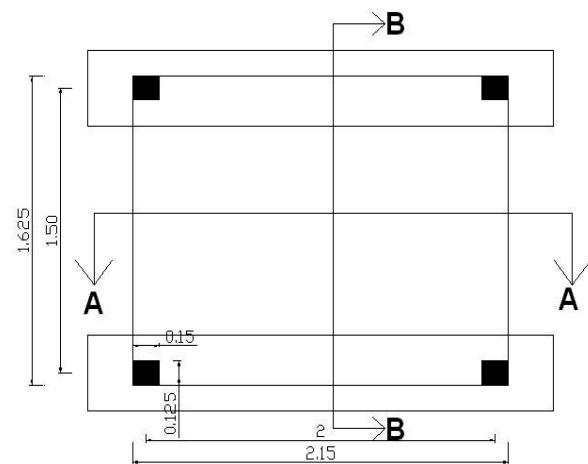
Se describe la estructura estudiada, tanto en su configuración original como reforzada. Se presenta la excitación dinámica aplicada a esta estructura. Se muestran los resultados, comparando parámetros de respuestas obtenidos para el pórtico con/sin GFRP. Finalmente en las conclusiones se destaca la eficiencia del refuerzo implementado y se mencionan investigaciones futuras necesarias.

ESTRUCTURA ORIGINAL

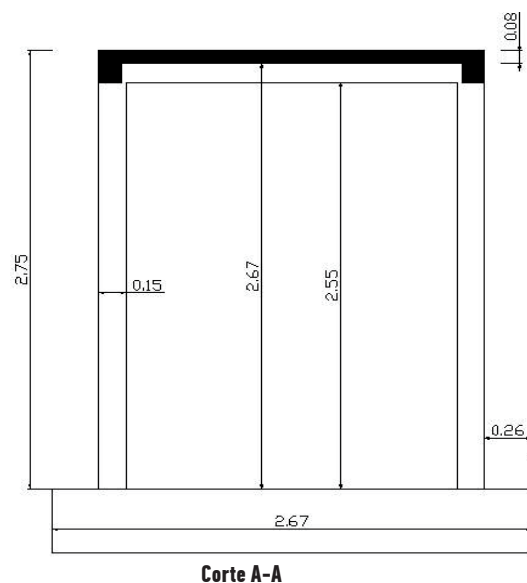
La estructura ensayada estuvo conformada por el pórtico de hormigón armado que se muestra en la figura 1. La geometría del mismo se presenta en la figura 2, y las dimensiones de sus elementos estructurales en la figura 3.



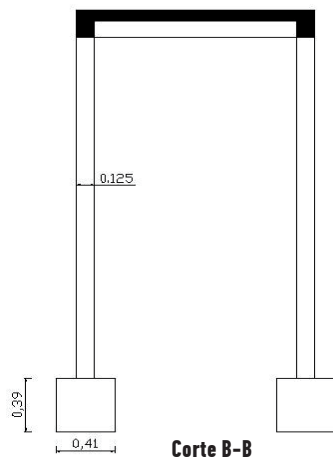
Figura 1. Pórtico de hormigón armado en la mesa vibradora de la Universidad Nacional de San Juan.



a) Vista superior.



Corte A-A



b) Cortes.

Figura 2. Parámetros geométricos del prototipo ensayado.

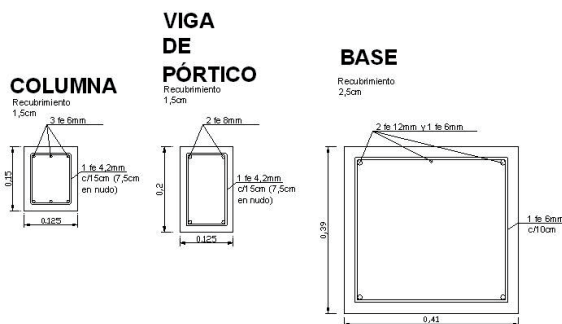


Figura 3. Dimensiones de la sección transversal de los elementos estructurales del pórtico.

Sobre la losa se dispusieron dos bloques de hormigón, que en conjunto tenían un peso de 8.0 kN. El peso total del prototipo, considerando un peso específico del hormigón armado de 24 kN/m³, fue de 52.39 kN (con un peso de 34.38 kN para la estructura sin los bloques agregados, y de 13.81 kN para la estructura sin las bases).

Durante el hormigonado de toda la estructura se confeccionaron tres probetas normalizadas, que arrojaron una tensión de rotura promedio de 28 MPa. Tomando como base las consideraciones del reglamento CIRSOC 201 (2005), se adoptó una resistencia característica f'_c de 20 MPa. El módulo de elasticidad longitudinal E medido en una de las probetas, fue de 26596 MPa (un 26.5% mayor al que se obtiene en función de f'_c según el reglamento CIRSOC 201, 2005).

Como armadura se emplearon barras nervuradas Acindar, clase ADN 420 (no se realizaron ensayos para corroborar la tensión de fluencia característica de este material).

En distintas etapas de los ensayos se realizaron mediciones experimentales de los parámetros dinámicos de la estructura, cuyos valores se presentan en la tabla 1.

TABLA 1. PARÁMETROS DINÁMICOS DEL PÓRTICO DETERMINADOS EXPERIMENTALMENTE

MEDICACIÓN		FRECUENCIA NATURAL (HZ)	AMORTIGUAMIENTO (% DEL CRÍTICO)
Pórtico sin refuerzo	Antes de los ensayos	2.75	4.0
	Al final de los ensayos	1.50	8.8
Pórtico con refuerzo	Antes de los ensayos	2.25	7.0
	Al final de los ensayos	2.10	6.8

ESTRUCTURA REFORZADA

El refuerzo de la estructura se realizó en dos fases:

Fase 1: Se realizó la reparación del hormigón en pie de columnas, ya que durante los ensayos del pórtico sin refuerzo se observaron importantes fisuras en esa zona.

Para ello se picó el hormigón de recubrimiento, y se aplicó un adhesivo epoxídico para adherir el hormigón nuevo a otro existente (Impridamp de Ferrocement). Luego se colocó un mortero tixotrópico (Policret MR de Ferrocement) de aplicación recomendada para reparaciones en hormigón. En la figura 4 se muestra las acciones ejecutadas durante esta fase de refuerzo.



a) Hormigón eliminado en base de columnas.



b) Adhesivo epoxi en zona de hormigón eliminado.



c) Mortero Aplicado en la zona de base de columnas.
Figura 4. Rehabilitación de las bases de las columnas del pórtico.

Fase 2: En esta fase se efectuó el zunchado de los extremos de vigas y columnas con el tejido de fibra de vidrio. Para ello se limpió con amoladora la superficie de hormigón donde se ubicaría el tejido, se colocó una capa de imprimación de adhesivo, luego la fibra de vidrio, y una capa final de adhesivo. Como fibra de vidrio se empleó *SikaWrap Hex 100G*, y como adhesivo *Sikadur 300*.

Los parámetros geométricos y mecánicos de la fibra, según información entregada por el fabricante, se presentan en la tabla 2.

TABLA 2. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y MECÁNICOS DE LA FIBRA DE VIDRIO

PARÁMETRO	MAGNITUD
Espesor nominal (mm)	0,359
Peso específico (g/m ²)	913,0
Resistencia a tracción (MPa)	2276,0
Módulo de elasticidad longitudinal (MPa)	72413,0
Elongación	4,0

En la figura 5 se presentan distintas etapas del refuerzo del pórtico con fibra de vidrio.



a) Limpieza de superficie.



b) Colocación de fibra.



c) Colocación capa final de adhesivo.



d) Columna reforzada.



e) Nudo de pórtico reforzado.



f) Pórtico reforzado.

Figura 5. Refuerzo del pórtico con fibra de vidrio.

ACCIÓN DINÁMICA APLICADA ESTRUCTURA ORIGINAL

La estructura sin refuerzo fue sometida a 6 *inputs* dinámicos, consistentes en un batido de ondas senoidales. La historia de aceleraciones de uno de esos *inputs* se presenta en la figura 6; mientras que en la figura 7 se comparan los últimos *inputs* aplicados a la estructura original y a la estructura reforzada.

No se utilizó un acelerograma de un terremoto real, dada las limitaciones del gato que accionaba la mesa.

El cada *input* se fue aumentando la amplitud de las aceleraciones, con valores picos que variaron entre el 9 y el 32 % de *g* (siendo *g* la aceleración de la gravedad).

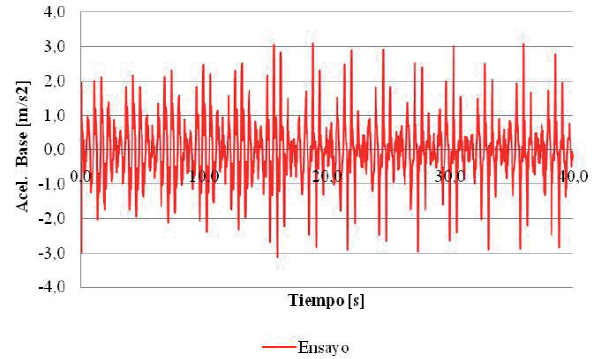


Figura 6. Ejemplo de historia de las aceleraciones aplicadas en la mesa vibradora

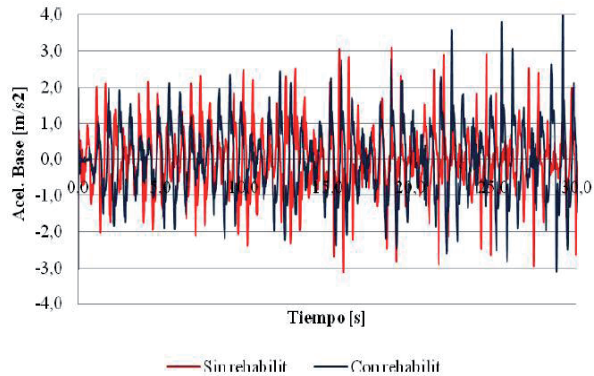


Figura 7. Historias de las aceleraciones últimas aplicadas al pórtico original y al pórtico reforzado

ESTRUCTURA REFORZADA

En la estructura rehabilitada se aplicaron 5 *inputs* dinámicos, con picos de aceleración que variaron entre el 10 al 50 % de *g*.

3.3. INSTRUMENTAL DE ENSAYO

La instrumentación empleada los ensayos del pórtico con/sin refuerzo estuvo constituida por: un acelerómetro a nivel de base de la mesa vibradora, dos acelerómetros a nivel de losa (sobre los dos pórticos longitudinales), y dos dispositivos para medir desplazamientos, colocados sobre diagonales metálicas vinculadas a las columnas (como se observa en la figura 1).

El estudio experimental se basó en los resultados obtenidos en las aceleraciones y los desplazamientos a nivel de losa. En este último caso los desplazamientos medidos en las diagonales fueron proyectados para obtener la componente horizontal de los mismos.

La aceleración de la base se empleó para determinar el nivel de excitación sobre la estructura.

ESTUDIO DE RESULTADOS ESTRUCTURA ORIGINAL

Durante la aplicación de los 6 *inputs* dinámicos a la estructura sin refuerzo, solo se observaron fisuras en cabeza y pie de columna, como las que se muestran en la figura 8, con mayor cantidad y profundidad en el pie de las mismas.



Figura 8. Fisuras en columnas del pórtico sin refuerzo, luego de aplicar los 6 *inputs* dinámicos.

Mientras se aplicaba la excitación se observó que las fisuras más importantes se localizaban en la unión de las columnas a las vigas de fundación, donde se tenía una junta de construcción. El pórtico finalmente se comportó como una estructura con 4 rótulas plásticas en el pie de las columnas, lo cual se asocia a la importante reducción de la frecuencia natural que pasó de 2.75 a 1.50 Hz, con una reducción del 45,5% (según tabla 1).

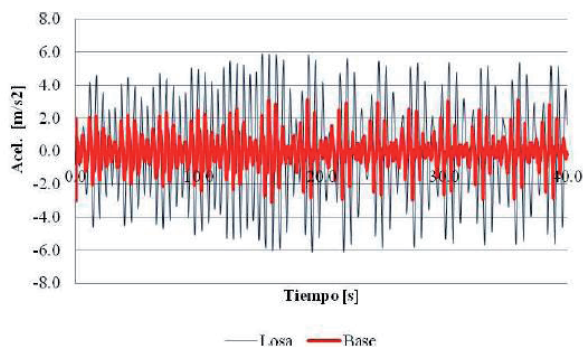


Figura 9. Historia de las aceleraciones para la estructura original: base vs. losa (para el último input).

ESTRUCTURA REFORZADA

Para la estructura con refuerzo, luego de la aplicación de los 5 *inputs* dinámicos, solo se observaron fisuras en la parte inferior de las columnas, por sobre el refuerzo con fibra de vidrio, según

muestra en Figura 10. La frecuencia natural pasó de 2.25 a 2.10 Hz (según tabla 1), con una reducción de solo 6.7 % (en comparación con la reducción del 45.5 % registrada en el pórtico sin refuerzo).



Figura 10. Fisuras en columnas del pórtico con refuerzo, luego de aplicar los 5 *inputs* dinámicos.

Al reparar la conexión del pie de cada columna, como se indicara en la figura 4, la frecuencia subió a 2.25 Hz (según tabla 1). Se mantiene una reducción del 18.2 %, seguramente debido a la reducción del momento de inercia de la sección bruta por efectos de la fisuración en el resto de la columnas (no se realizó ningún tratamiento para estas fisuras).

En la figura 11 se comparan las historias de las aceleraciones en la base y en la losa, para el último input al que fue sometido el pórtico con refuerzo.

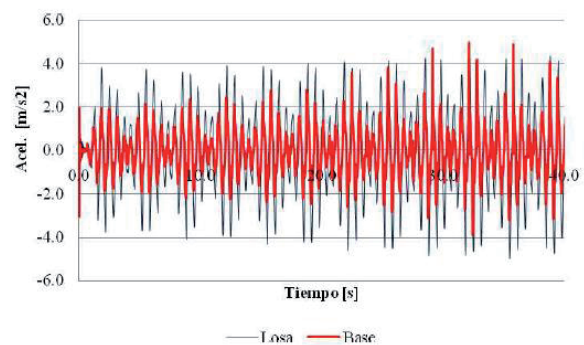


Figura 11. Historia de las aceleraciones para la estructura reforzada: base vs. losa (para el último input).

ESTRUCTURA ORIGINAL VS. REFORZADA AMORTIGUAMIENTO

En la estructura sin refuerzo se destaca que el amortiguamiento se incrementó en un 120 % (ver tabla 1), durante la aplicación de los 6 *inputs* dinámicos. Luego al rehabilitar la misma este parámetro se redujo en un 20.5%, y se mantuvo aproximadamente sin variaciones hasta la finalización de los ensayos dinámicos.

También se aprecia en tabla 1 que luego de aplicar el primer *input*, el amortiguamiento fue superior al valor del 5% sugerido en el reglamento INPRES - CIRSOC 103 - Parte I, 1983.

ACELERACIÓN Y DESPLAZAMIENTO

En la tabla 3 se presentan parámetros de respuesta máximos relativos a la aceleración y el desplazamiento, para el primer y último *input*, en el pórtico con y sin refuerzo.

TABLA 3. PARÁMETROS DE RESPUESTA MÁXIMOS, RELATIVOS A LA ACCELERACIÓN Y EL DESPLAZAMIENTO, EN EL PÓRTICO CON Y SIN REFUERZO

MEDICIÓN			PÓRTICO SIN REFUERZO		PÓRTICO CON REFUERZO	
			1er <i>input</i>	6to <i>input</i>	1er <i>input</i>	5to <i>input</i>
Aceleración máxima	En base	[m/s ²]	0.91	3.12	0.98	4.99
		[%g]	9.31	31.86	10.00	0.51
	En losa	[m/s ²]	2.23	6.08	1.15	5.00
	Amplif.	[admin]	2.45	1.95	1.17	1.00
Desplazamiento máximo	En losa	[mm]	17.26	64.88	8.81	0.31
	Deriva de piso	[%]	0.64	2.40	0.31	1.50

La aceleración en la base prevista en el INPRES - CIRSOC 103 - Parte I, 1983 para zona sísmica 4 y para cualquier tipo de suelo, es de 3.43 m/s² (0.35 fracción de g). Por lo que este valor solo fue superado para el 5to *input* en el pórtico con refuerzo. La amplificación de aceleraciones en la losa fue aproximadamente nula en la losa, lo que indicaría un movimiento de cuerpo rígido. Para aceleraciones aproximadamente iguales en la base, los desplazamientos máximos en la losa se redujeron aproximadamente un 50% en la estructura con refuerzo respecto a la estructura sin refuerzo.

Las mediciones de aceleraciones a nivel de losa, y de desplazamientos en las diagonales de los pórticos longitudinales, tuvieron las variaciones máximas que se indican en tabla 4, indicando que también la estructura estuvo sometida a sollicitaciones torsionales.

TABLA 4. VARIACIONES PORCENTUALES EN MEDICIONES SOBRE LOS DOS PÓRTICOS LONGITUDINALES

MEDICIÓN	PARA ACCELERACIÓN EN TECHO		PARA DESPLAZAMIENTO EN TECHO	
Pórtico sin refuerzo	1er <i>input</i>	8.9	24.9	
	6to <i>input</i>	4.4	34.4	
Pórtico con refuerzo	1er <i>input</i>	23.01	12.3	
	5to <i>input</i>	6.8	13.8	

En las figuras 12 y 13 se comparan las historias de desplazamientos en la losa para la estructura con/sin refuerzo, tanto en el primer como en el último *input*.

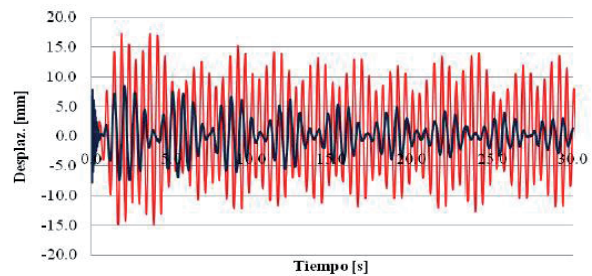


Figura 12. Historia de los desplazamientos en la losa del pórtico para el primer *input*.

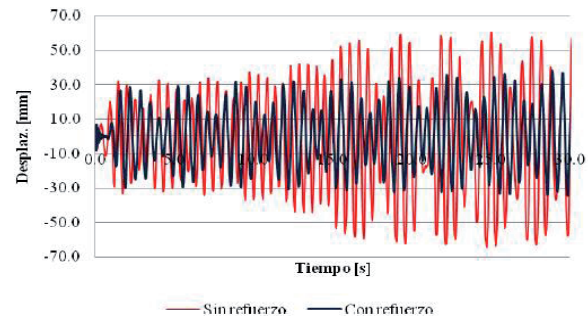


Figura 13. Historia de los desplazamientos en la losa en el pórtico para el último *input*.

Los desplazamientos en la losa del pórtico para el último *input* (figura 13) son aproximadamente iguales en los primeros 7.0 s. En el caso del pórtico con refuerzo, la historia se mantuvo aproximadamente constante a lo largo del registro; pero en el pórtico sin refuerzo los desplazamientos aumentaron hasta mantenerse con picos de 60.0 mm. Esto indicaría que a partir de los 7.0 s se inició un daño importante en el pie de las columnas; así el pórtico pasó de tener columnas empotradas, a columnas articuladas, con la consiguiente reducción de rigidez.

DAÑO

La cuantificación del daño se estimó a través de la degradación de la rigidez de la estructura. Dicha rigidez se determinó a partir de las

mediciones realizadas mediante los LVDT (para cuantificar el desplazamiento o distorsión del pórtico) y con la medición de la aceleración multiplicada por la masa del pórtico. Con estas magnitudes se realizaron curvas del tipo histeréticas, y de esta manera se estimó la rigidez. En la figura 14 se presenta una de las curvas fuerza - desplazamiento utilizadas para la cuantificación del daño.

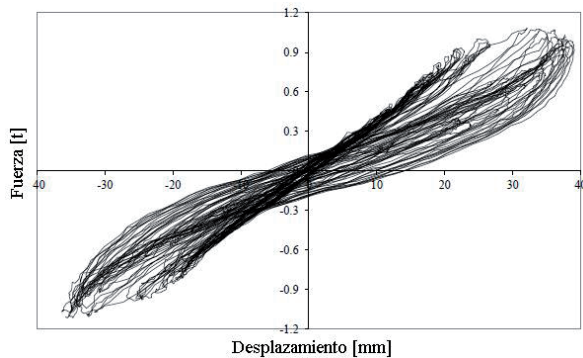


Figura 14. Curva fuerza - desplazamiento.

En la figura 15 se presenta la degradación de la rigidez para cada ensayo.

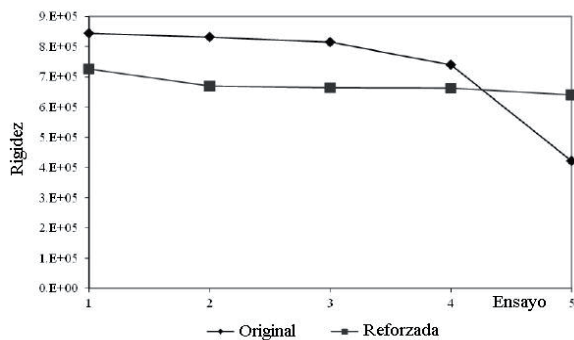


Figura 15. Progreso del daño para cada ensayo medido a través de la rigidez del pórtico.

Para la estructura original el daño progresó rápidamente durante los últimos dos ensayos. La rigidez del pórtico cayó a un 50% respecto de la rigidez inicial, luego de aplicarse los primeros 5 ensayos dinámicos.

En cambio, para la estructura reforzada la rigidez se mantiene prácticamente constante, con una reducción solo del 24% respecto de la original, al final del último ensayo dinámico.

CONCLUSIONES

Se presentaron en este trabajo los resultados experimentales de un pórtico de hormigón armado sometido a acciones dinámicas en una mesa vibradora, diseñado con un código antisísmico antiguo, y reforzado con fibra de vidrio.

La estructura sin refuerzo sometida a 6 *inputs* de aceleración creciente, sufrió un daño excesivo (para una aceleración pico en la base menor a la aceleración prevista en zona sísmica 4 en el reglamento argentino vigente). En la historia de los desplazamientos a nivel de la losa, para el último *input*, se observa como esta magnitud se duplicó luego de los primeros segundos de aplicación de la acción dinámica. El daño parecería corresponder a la formación de rótulas plásticas en el pie de todas las columnas (con fisura importante en esa zona, según se observó durante el ensayo).

El procedimiento de refuerzo estructural consistió en la recomposición del hormigón en pie de columnas, y en el zunchado de extremos de los elementos estructurales con tejido de fibra de vidrio. Las respuestas experimentales del pórtico, bajo 5 *inputs* dinámicos similares a los aplicados a la estructura sin refuerzo, mostraron la eficiencia del refuerzo implementado. Para un nivel de excitación en la base superior al establecido en el reglamento sismorresistente argentino, la estructura no sufrió daño apreciable, con una pequeña reducción de la frecuencia natural respecto al primer *input* aplicado.

Son necesarias nuevas investigaciones para: (i) determinar el procedimiento de diseño del refuerzo más conveniente según las distintas tipologías estructurales; y (ii) desarrollar modelos computacionales confiables que puedan simular el refuerzo implementado en una estructura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 440.2R, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", American Concrete Institute, 2008.
- CIRSOC 201, Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. INTI y CIRSOC, 2005.
- Ferracuti, B. and Savoia, M., Cyclic behaviour of FRP-wrapped columns under axial and flexural loadings. Proceedings of the International Conference on Fracture, Turin, Italy, 2005.
- INPRES - CIRSOC 103 - Parte I, Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes, Parte I: Construcciones en general. INPRES y CIRSOC, 1983.
- Spoelstra M., Monti, G., FRP-confined concrete model. Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 3, pp. 143-150, 1999.
- SIKA. Manual de rehabilitación de obras. 2014.