

Comportamiento de Prototipos de Columnas de Hormigón Armado Post-Reparación Parcial ejecutada bajo carga

Behavior of Post- Partial Repair reinforced concrete columns prototypes executed under loads

Turibio J. Da Silva*, Wemerton L. Evangelista**

* Universidad Federal de Uberlândia, BRASIL

** Centro Federal de Educação Tecnológica-BambuÍ, BRASIL
xxx@xxx

Fecha de recepción: 14/ 12/ 2005
Fecha de aceptación: 18/ 07/ 2006
PAG. 43 - 56

Resumen

Este trabajo es el resultado de una investigación sobre el comportamiento estructural de columnas de hormigón armado cuando sometidas a un proceso de reparación parcial, con carga mantenida durante todo el proceso. La reparación ha sido ejecutada con material mixto, constituido por un mortero con base de cemento, modificado con polímero y fibras sintéticas. Durante el proceso de ejecución de la reparación la carga fue reducida parcialmente. Se hizo el análisis a partir de las deformaciones de las barras de acero, del hormigón y del material de reparación, obtenidas mediante transductores de resistencia eléctrica pegados y un sistema de adquisición de datos. Las columnas han sido ensayadas hasta la rotura. Los resultados indican que el mortero de reparación solamente empieza a actuar para cargas mayores que la existente cuando de la realización de la reparación, pero la carga de rotura es cercana a las columnas sin reparo. Los aportes de esta investigación pueden resultar en un mejor entendimiento de la variación de tensiones y de la efectividad de la reparación estructural frente a la capacidad portante de una columna sometida a una intervención realizada con ese tipo de mortero.

Palabras Clave: Reparación estructural, deformaciones, materiales de reparación, ensayo de columna reparada

Abstract

This work is the result of a research of structural behavior of reinforced concrete columns subjected to a process of partial repair, with sustained load during the whole process. The repair has been executed with mixed material, constituted by a mortar with cement base, modified with polymer and synthetic fibers. A partial reduction of the load occurred during the repair. The analysis has been made from data of strains on steel bars, concrete and repair material, obtained by strain gages connected a data acquisition system. The columns have been tested until failure. The results indicate that the repair mortar begins taking loads once the external load overcomes the one when the repair was executed, but the ultimate load is near to that in the columns without repair. The contributions of this research are a better understanding of the stress variation and of the effectiveness of the structural repair with regard to the capacity of a column.

Keywords: Structural repair, strains, materials of repair, repaired columns tests

1. Introducción

La elaboración de proyectos mas sofisticados junto con el avance tecnológico, y la dinámica actual de las construcciones, sin la debida preocupación por un control de la calidad de la mano de obra y de los materiales empleados, está conduciendo a las estructuras construidas recientemente a necesitar de un proceso de reparación estructural con la finalidad de llevar estas a su estado original, en cuanto a comportamiento en servicio y capacidad última.

El tema ha sido motivo de recientes investigaciones relacionadas a la reparación de estructuras dañadas por la corrosión de las armaduras, existiendo

diversas publicaciones sobre sistemas y técnicas de reparación (Canovas, 1994; Helene y Pereira, 2003; Souza y Ripper, 1998). Sin embargo, las técnicas de reparación no serán discutidas ya que esto excede los objetivos del presente trabajo.

En el marco de la reparación localizada, la compatibilidad en un sistema de reparación puede ser considerada como el equilibrio de las propiedades físicas, químicas, electroquímicas y dimensionales entre el material de reparación y el hormigón existente (Emmons y Vaysburd, 1996).

Para que ocurra la redistribución de cargas en

una estructura reparada, de modo semejante a la distribución original en la pieza, es recomendable que se haga un alivio de toda la carga actuante, durante la ejecución de la reparación. Solamente después del curado y alcance de la resistencia especificada del material de reparación, serían permitidas cargas en la estructura. Sin embargo, por dificultades de descarga, la ejecución de la reparación estructural es normalmente realizada con alivio debido a la disminución de las sobrecargas y a la utilización de apuntalamiento (Emmons, 1994).

Para mantener el carácter monolítico de una estructura reparada, es fundamental que la interfase entre el hormigón existente y el material de reparación transmita las tensiones provenientes de las cargas actuantes sobre la estructura (Vanderlei, 1996).

Para estudiar el comportamiento estructural de columnas de hormigón armado cuando sometidas a un proceso de reparación localizada, con carga mantenida durante todo el proceso, se ha llevado a cabo por Evangelista (2004) una investigación con prototipos de columnas, considerándose las contribuciones de otros investigadores y buscando la proximidad con la realidad de ejecución de las reparaciones.

La reparación localizada completa comprende la delimitación de la región de reparación, la escarificación y remoción del hormigón deteriorado, la limpieza del local, o si es necesario, la sustitución de la armadura corroída, la aplicación de una protección para la armadura, la aplicación de puente de adherencia entre el sustrato y el material de reparación, y la reconstitución de la sección de hormigón con posterior protección de su superficie.

Este trabajo a diferencia de otros, está en mantener las cargas durante toda la ejecución del experimento, incluso durante los proceso de reparación estructural, periodo en que las cargas aplicadas han sido solamente disminuidas.

2. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental que se ha llevado a cabo ha sido una simulación de la reparación de columnas deterioradas de hormigón armado por la corrosión de las armaduras, pero, sin la pérdida de sección de las armaduras. El comportamiento estructural ha sido analizado mediante las deformaciones de las barras longitudinales de acero, del hormigón y del material de reparación, monitoreadas mediante transductores de resistencia eléctrica pegados y un sistema de adquisición

de datos para la obtención de las deformaciones.

El procedimiento experimental ha sido realizado en dos etapas. La primera etapa fue la fabricación de dos grupos de prototipos de columnas (Cuatro ejemplares por grupo) y moldeo de las probetas. La segunda etapa se refiere al monitoreo y obtención de los datos (cargas-deformaciones) antes, durante y después de la reparación de las columnas. En cada grupo, uno de los prototipos ha sido considerado como de referencia, no siendo sometido, por lo tanto, a ningún proceso de reparación estructural.

2.1 Prototipos de columnas

2.1.1 Dimensiones

Han sido utilizados prototipos simples de columnas prismáticas, con sección transversal rectangular de 12 x 20cm y 60cm de altura, teniendo en vista la simplicidad de la ejecución y del transporte, además de bajo peso. Con estas dimensiones la columna presenta índices de rigidez equivalentes a los de una columna con sección de 18x30cm y 300cm de altura, o sea, compatible a las columnas usuales.

2.1.2 Armaduras

Las armaduras han sido compuestas de 4 barras de diámetro de 10mm y estribos. Esto resulta en una tasa de armadura de un 1,33%. En una columna equivalente de 18x30cm, las barras de 10mm serían equivalentes a barras de 16 mm.

2.1.3 Resistencia

El cálculo de las columnas ha sido realizado en conformidad con las prescripciones de la norma brasileña (ABNT, 1978), considerando que las columnas que actualmente necesitan de reparación han sido dimensionadas de acuerdo a esta norma.

La carga aplicada ha sido definida por el valor de la sollicitación característica, o sea, sin los coeficientes de seguridad. Su valor, calculado según la norma brasileña (ABNT, 1978) ha sido de 319,13 kN (320 kN). La capacidad portante en la rotura calculada para estos elementos ha sido de 768 kN, utilizándose los valores característicos de los materiales (resistencia del hormigón de 25 MPa y el límite elástico del acero de 551 MPa).

2.1.4 Curado

Las columnas se dejaron por siete días en sus respectivos encofrados en una cámara húmeda, y después fueron desencofradas y colocadas en ambiente externo en las condiciones normales de humedad y temperatura.

2.2 Materiales utilizados

Es conocido que la gran mayoría de las estructuras que necesitan de reparación han sido proyectadas y ejecutadas en las décadas de los 70 y 80, donde los hormigones usuales tenían resistencia a la compresión alrededor de 15 MPa. Sin embargo, ya se utilizaba en ciertas obras consideradas más sofisticadas, un hormigón con resistencia de 20 MPa. Esto ha sido importante en la definición de la resistencia de 25 MPa para el hormigón utilizado en este experimento, teniendo en cuenta las resistencias actuales con que estas estructuras trabajan.

2.2.1 Hormigón

Para la confección de las columnas, ha sido utilizado hormigón diseñado con cemento compuesto con fillers CP-II F 32 (320 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días), arena fina, árido grueso y agua. La dosificación del hormigón definida para el experimento ha sido de 1: 2,47: 3,3 (cemento: arena: árido grueso) en masa, con factor agua / cemento de 0,63 y asentamiento de la probeta de (80 ± 10) mm según la norma brasileña NBR NM 67 (ABNT, 1998). El árido grueso utilizado (dimensión máxima de 25mm) ha sido proveniente de roca de basalto. La arena de graduación fina (dimensión máxima de 4,8mm) ha sido de origen natural, resultante de depósito de río.

Para cada grupo han sido moldeadas 10 probetas cilíndricas (150 x 300mm), según las normas brasileñas, para posterior determinación de la resistencia a la compresión. Las probetas han sido mantenidas en cámara con humedad relativa de un 95% y una temperatura de 26 °C hasta el instante del ensayo de rotura con el fin de simular las condiciones ambientales en Brasil.

2.2.2 Acero

Las barras de acero utilizadas para las armaduras longitudinales de las columnas han sido de 10mm de diámetro (nominal), categoría CA-50 (500 MPa de límite elástico nominal) con 551 MPa de límite elástico real y de alta ductilidad. Para los estribos han sido utilizadas barras de 5mm de diámetro (nominal), categoría CA-60 (600 MPa de límite elástico nominal) y ductilidad normal. Fueron empleados seis estribos en cada prototipo con el espaciamiento de 12cm.

2.2.3 Mortero

El mortero empleado ha sido a base de cemento, modificado con polímeros y fibras sintéticas. La relación agua/mortero recomendada por el fabricante y utilizada

en la mezcla del mortero ha sido de 0,11. Para la determinación de la resistencia a la compresión fueron realizadas 8 probetas cilíndricas (50 x 100mm), ensayándose dos en las respectivas edades, según las normas brasileñas.

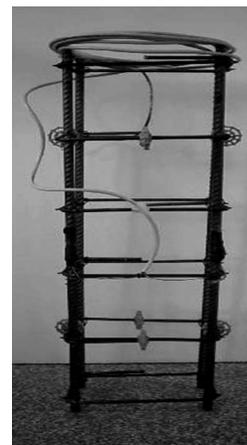
2.3 Instrumentación de las columnas

La monitoración de las deformaciones de las columnas ha sido realizada mediante transductores de resistencia eléctrica, fijados con adhesivo de alta adherencia (Figura 1) en el punto medio de la altura y en el centro de las laterales de las columnas. Los transductores tenían un largo de 5mm y 20mm en las barras de acero (Figura 1a y 1b) y superficie del hormigón y mortero, respectivamente.

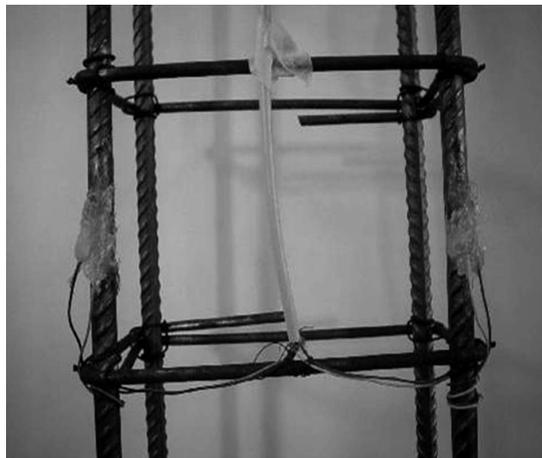
Para la identificación de las posiciones de los transductores, fue adoptada la siguiente notación:

- HF- hormigón frente- posición donde posteriormente fue realizada la reparación (fase de 12cm de ancho- figura 1c);
- HV- hormigón- posición opuesta a la frente;
- HD- hormigón derecho- posición a la derecha de la frente;
- HI- hormigón izquierda- posición a la izquierda de la frente;
- AS- acero superior- posición donde fue realizada la reparación;
- AI- acero inferior- posición opuesta a la frente.

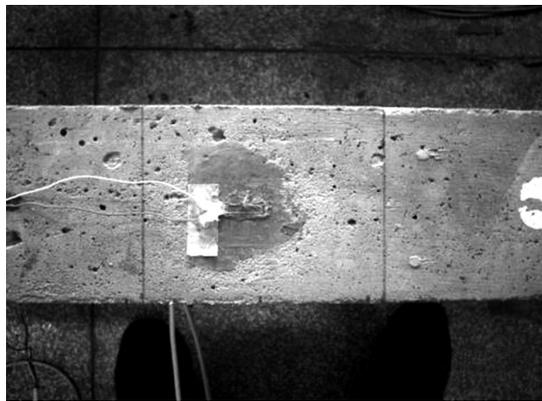
Las lecturas de las deformaciones en el acero, hormigón y mortero fueron realizadas a través de un sistema de adquisición de datos conectados a los transductores. Para una mejor precisión de las deformaciones se ha adoptado un padrón de 5mt de largo para el cable utilizado, en función de la alteración de su resistencia eléctrica.



a)



b)



c)

Figura 1. Posición de los transductores de resistencia eléctrica

2.4 Aplicación de las cargas

La segunda etapa del experimento ha sido desarrollada según las edades presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Edad de la realización de cada etapa de la segunda etapa del experimento

Grupo de Columnas	Inicio de carga (320 kN)	Reparación e/ alivio de carga (280 kN)	Reaplicación de la carga total (320 kN)
1	132 días	141 días	158 días
2	175 días	189 días	203 días

Para la aplicación de cargas en cada grupo de columnas han sido utilizados sistemas de pórticos de acero y gatos hidráulicos con capacidad individual para aplicación de carga de 500 kN (Figura 2). El control de la aplicación de la carga ha sido posible con el uso de dos celdas de cargas, con capacidad para 800kN cada, monitoreadas por el sistema computacional de adquisición de datos.

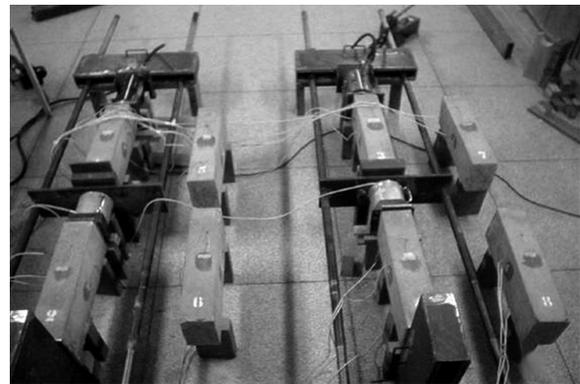


Figura 2. Sistema de aplicación de carga

2.5 Ejecución de la reparación

La reparación, con aproximadamente 4cm de profundidad (20% de la sección), ha sido ejecutada siguiendo los procedimientos conocidos, o sea, delimitación de las áreas con el disco de corte, la escarificación, limpieza de la superficie del hormigón del sustrato (Figura 3a) y la saturación del hormigón, puente de adherencia constituida del propio producto, reconstitución de la sección con el mortero (Figura 3b), acabado de la reparación y el curado húmedo.



a)



b)

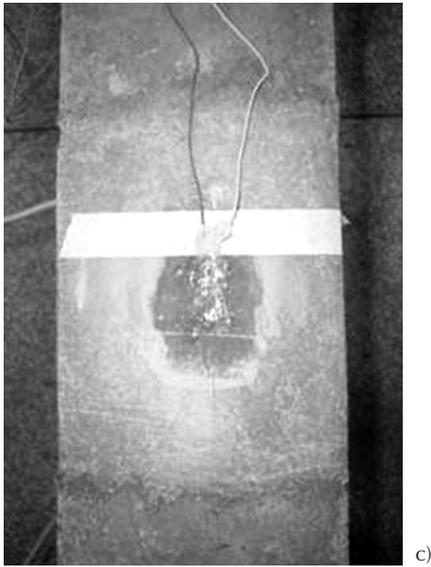


Figura 3. Reparación y fijación de transductor en el mortero de reparo

Durante la ejecución de la reparación hasta el instante del curado del material de reparación, hubo una disminución de orden de un 12,5% de la carga actuante en las columnas (reducida para 280 kN). Este procedimiento tuvo como objetivo la simulación de un proceso real de reparación de las estructuras. La disminución puede ser conseguida con la eliminación de parte de las sobrecargas actuantes y con la utilización de sistemas de transferencia de carga adecuados.

Después de la obtención de la resistencia del mortero de reparación, aproximadamente 7 días de curado húmedo, confirmada a través del ensayo de compresión en probetas, la columna ha sido monitoreada en esta región con la fijación con nuevo transductor (Figura 3c) y la carga ha sido aumentada para su valor inicial de 320 kN.

2.6 Rotura de las columnas

Para la realización del ensayo de rotura en los dos grupos de columnas, con edad de 217 días, se ha cambiado el sistema de carga. Así, las columnas han sido retiradas de los pórticos y llevadas a la prensa con capacidad para aplicación de 1000 kN de carga máxima. Los valores de la carga aplicada, así como las deformaciones en las columnas durante el ensayo, han sido obtenidos en una escala de 50 kN de carga, hasta la rotura.

3. Resultados y discusión

A continuación serán presentados los resultados y el análisis de los ensayos de rotura (compresión) de las

columnas, así como, una comparación con las resistencias teóricas de las mismas.

En la Tabla 2 son mostrados los resultados de los ensayos de compresión de las probetas cilíndricas, realizados para diferentes edades del hormigón. Las probetas del grupo 1 fueron moldeadas simultáneamente a los prototipos del grupo 1. Lo mismo ocurrió con las probetas y prototipos del grupo 2. Los resultados de las resistencias presentados son los mayores valores obtenidos en las dos probetas, por ejemplo, 11 y 12; 13 y 14; etc.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión del hormigón

Grupo 1			Grupo 2		
Probeta	Edad (días)	Resistencia a la compresión (MPa)	Probeta	Edad (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
11 y 12	7	21,17	21- 22	7	20,21
13 y 14	28	26,04	23 - 24	28	27,08
15 - 16	132	32,29	25 - 26	175	31,52
17 - 18	141	32,53	27 - 28	203	31,53
19 - 110	217	32,99	29 - 210	217	31,60

3.1 Resistencia a la compresión del mortero de reparación

La tabla 3 muestra los resultados de los ensayos a la compresión de las probetas cilíndricas del mortero de reparación observa que fueron realizados para las edades de 1, 3, 7 y 28 días, teniendo así, un control sobre la evolución de la resistencia.

La resistencia a la compresión obtenida a los 28 días no tuvo gran variación a la obtenida a los 7 días de curado, siendo esta próxima a la indicada por el fabricante (60 MPa). Esto llevó a la conclusión que a partir de la edad de 7 días las columnas podrían ser solicitadas a la carga máxima teórica de 320 kN.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión del mortero de reparación

Edad (días)	Resistencia a la compresión del mortero (MPa)	Edad (días)	Resistencia a la compresión del mortero (MPa)
1	47,94	7	62,93
3	53,55	28	67,70

El módulo de elasticidad longitudinal del mortero a los veintiocho días, se encuentra en un rango de 24 y 28 GPa, según indicación del fabricante.

3.2 Capacidad resistente de los prototipos

Los resultados de los ensayos de rotura de las 8 columnas son mostrados en la tabla 4. Estos valores de carga de rotura son comparados con la carga de diseño y con la carga de rotura de las columnas de referencia.

Tabla 4. Carga de rotura de las columnas ensayadas

Grupo 1			Grupo 2		
Columnas	Condición	Carga de Rotura (kN)	Columnas	Condición	Carga de Rotura (kN)
1	reparada	758,42	5	reparada	712,35
2	referencia	564,32	6	referencia	732,86
3	reparada	700,00	7	reparada	680,00
4	reparada	701,00	8	reparada	680,00

Tabla 5. Desempeño de las columnas reparadas

Columnas	P_{sk} (kN)	P_{st} (kN)	P_{ref} (kN)	P_{exp} (kN)	Desempeño (%)		
					$(P_{exp}-P_{sk})/P_{sk}$	$(P_{exp}-P_{st})/P_{st}$	$(P_{exp}-P_{ref})/P_{ref}$
1	319,1	768,0	732,9	758,4	137,7	-1,3	3,5
3				700,0	119,4	-8,9	-4,5
4				701,0	119,7	-8,7	-4,3
5				712,4	123,3	-7,2	-2,8
7				680,0	113,1	-11,5	-7,2
8				680,0	113,1	-11,5	-7,2

La columna de referencia n° 2 fue rechazada debido a la gran diferencia con las otras. Esto fue debido a problemas en la aplicación de carga.

En la tabla 5 es mostrada una comparación de las columnas reparadas en cuanto a: carga de rotura, característica según la norma brasileña (ABNT, 1978) (P_{sk}), cargas de rotura teórica (P_{st}), y la carga de rotura experimental de la columna de referencia (P_{exp}).

Los valores presentados en la tabla 5 indican un comportamiento homogéneo de todas las columnas reparadas en relación al ejemplar de referencia, P6. Estos resultados demuestran el buen desempeño de la reparación ejecutada con estos tipos de morteros, puesto que, son capaces de ofrecer seguridad en relación a la carga de diseño (P_{sk}).

3.3 Modos de rotura

Todas las columnas ensayadas rompieron por compresión del hormigón en las regiones superiores. Esto ocurrió debido a la no regularidad en las superficies, llevando a una concentración de tensiones en esa área de la columna.

Las fisuras verticales se tornaron visibles a medida que la carga aplicada se acercaba a la de rotura, normalmente superiores a un 90% de la carga de rotura.

Primeramente la rotura ocurrió en el hormigón por compresión, seguido del pandeo de las barras longitudinales entre estribos. En la figura 4 se puede verificar la forma de rotura de las columnas, que fue semejante en los dos grupos.



Figura 4. Forma de rotura de las columnas reparadas

3.4 Análisis de las deformaciones

En la Figura 5 son mostradas las curvas carga-deformación de la columna de referencia y la columna 8 reparada. Las referidas curvas representan las deformaciones medidas por los transductores localizados en el concreto, acero y material de reparo, según las posiciones especificadas en el apartado 2.3.

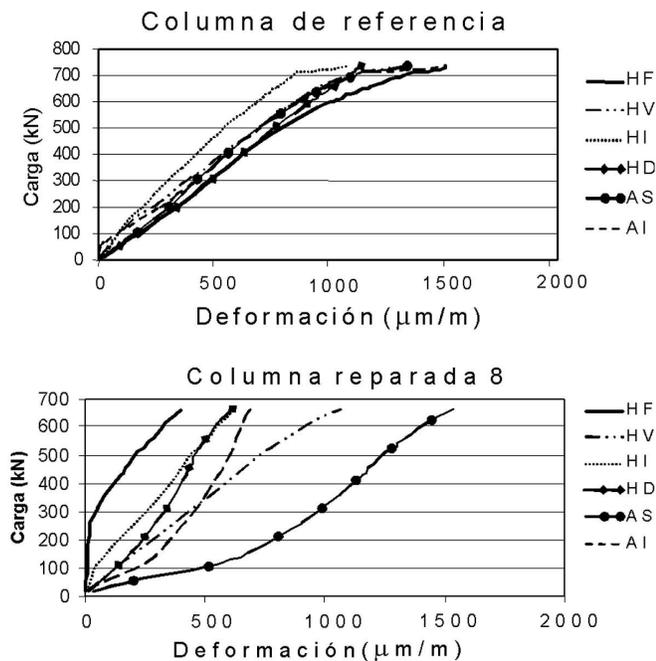


Figura 5. Curvas carga-deformación del prototipo de referencia y de la columna reparada 8

Las principales observaciones del ensayo de rotura y las extraídas de la figura 5 son las siguientes:

- La columna de referencia se mantuvo íntegra hasta el instante de su rotura, mostrando comportamiento lineal.
- Las columnas reparadas mostraron inicialmente bajas deformaciones en la región de la reparación (HF), indicando la inexistencia de esfuerzos hasta un valor de carga de aproximadamente, 280 kN, este último coincide con la carga aplicada en el instante de realización del reparo, lo que justifica que solo después de actuar esta carga existe una distribución de tensiones en la región del reparo.
- Las deformaciones medidas en el hormigón en las fases laterales (en relación a la fase del reparo), izquierda (HI) y derecha (HD), no fueron semejantes, debido a la no-existencia de paralelismo de las fases. La fase opuesta al reparo (HV) siempre se deformó más que la región de la reparación, confirmando que esta tuvo mayor concentración de tensiones.
- Con los datos obtenidos, no ha sido posible hacer un análisis de tendencias sobre las deformaciones en el acero (AS y AI), pues no presentaron deformaciones compatibles durante el proceso de rotura de las

columnas, debido a un contacto diferenciado de la chapa de transmisión de cargas con determinada barra.

4. Conclusiones

En este trabajo se estudió el comportamiento de columnas de hormigón durante el proceso de reparación con vistas a contribuir para la seguridad de los edificios cuando da ejecución del reparo. Los experimentos realizados por otros investigadores han sido más con refuerzo o reparación con encamisados de hormigón.

En el proceso estudiado, fue retirada solamente veinte por ciento de la sección del hormigón en una región con veinte centímetros de largo. Este porcentaje debe ser estudiado para cada situación teniéndose en cuenta que la capacidad residual de la sección sea superior a carga existente mantenido un nivel de seguridad aceptable.

En este trabajo, los ensayos realizados comprueban que, durante un proceso de reparación estructural, realizada con mortero (con base de cemento, modificado con polímero y fibras sintéticas), a pesar del material de reparación resistir a una parte de la carga, hay también una redistribución de la carga para las otras regiones del hormigón.

En la comparación entre las columnas, considerando los valores de las cargas de rotura experimentales, se ha observado un buen desempeño de todas las columnas reparadas en relación a la columna de referencia, siendo que las cargas de rotura de columnas reparadas han tenido una reducción máxima de un 7%. Estos resultados demuestran que las columnas, reparadas con un mortero de resistencia más grande que el hormigón, no tuvieron alteraciones significativas en los valores de las capacidades portantes.

En relación a las cargas de diseño, los resultados comprueban el buen desempeño de la reparación ejecutada pues fue capaz de ofrecer un margen de seguridad alrededor de 110%, o sea, la carga de rotura fue más del doble de la carga de diseño.

El análisis de las deformaciones en las fases y en las barras de acero no tuvo el éxito esperado debido a no linealidad de las superficies de aplicación de cargas. Para valores de carga cerca de la rotura este problema disminuye por la plastificación del hormigón. El contacto distinto de las barras con la aplicación de carga también puede conducir a lecturas diferentes de columnas reales.

Para avanzar en este estudio será necesario realizar experimentos con una mayor cantidad de

transductores, principalmente en el acero, y emplear mejores formas de contacto con la aplicación de cargas.

Los aportes de esta investigación pueden resultar en un mejor entendimiento de la variación de tensiones y de la efectividad de la reparación estructural frente a la capacidad portante de una columna sometida a una intervención realizada con ese tipo de mortero.

5. Reconocimientos

A Capes por la beca de estudios; a Master Builders Tech. y a Representações Gonzaga Ltda, por el aporte de los materiales; a Ladrilhos Leão Indústria Ltda, por el apoyo.

6. Referencias

- ABNT (1978), ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6118: Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT (1998), ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, Brasil.
- Canovas M. F. (1994), Patología y terapéutica del hormigón armado, Madrid, España, Colegio de Ing. Caminos Canales y Puertos, p. 488.
- Emmons P. H. (1994), Concrete Repair and Maintenance. Kingston, R. S. Means Company, Inc. p. 295.
- Emmons P. H.; Vaysburd A. M. (1996), System concept in desing and construction of durable concrete repairs. Construction and Building Materials, 10, 1,; pp. 69-75.
- Evangelista W. L. (2004), Estudo da redistribuição de tensões em seções de pilares curtos de concreto armado com recuperação parcial, Tesis de Maestría, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, MG, p. 123.
- Helene P. R. L., y Pereira F. (2003), Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección, SP, Brasil, p. 775.
- Souza V.C.M. y Ripper T. (1998), Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo, Pini, p. 255.
- Vanderlei E. (1996), Reparos de Pilares de Concreto Armado com Remoldagem da Seção Transversal. Tesis de Maestría, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 168.