

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE COLUMNAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS MEDIANTE RECRECIDO DE SU SECCIÓN TRANSVERSAL NUMERICAL SIMULATION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS STRENGTHENED WITH INCREASED THEIR CROSS SECTION

Jose R. Yépez

Rosangel Rojas

jose.aguirre@ufrgs.br

rosangel.rojas@ufrgs.br

PhD student, Postgraduate Program in Civil Engineering -UFRGS

Av. Osvaldo Aranha n.99,90035-190, Rio Grande do Sul/Porto Alegre, Brasil.

Americo Campos

americo@ufrgs.br

School of Engineering - Department of Civil Engineering

Av. Osvaldo Aranha n.99,90035-190, Rio Grande do Sul/Porto Alegre, Brasil.

Resumen. El reforzamiento de columnas de concreto armado mediante el recrecido de su sección transversal con un encamisado de concreto armado, es uno de los métodos más usados en la rehabilitación, reparación y/o refuerzo de columnas con este material. Esta técnica se realiza en la mayoría de los casos sin descargar totalmente las columnas durante el proceso de construcción del refuerzo, debido a la dificultad que ello representa. Son escasos aquellos ensayos donde el refuerzo es construido sobre la columna cargada, por lo tanto, es el objetivo principal de este trabajo estudiar de la influencia que tiene la carga en la columna original sobre el comportamiento de la columna reforzada. Se realizó una simulación numérica usando el método de los elementos finitos en una serie de columnas que permanecen cargadas durante el proceso de reforzamiento. Los resultados son comparados con los obtenidos en los ensayos experimentales de la bibliografía consultada.

Palabras-clave: Recrecido, reforzamiento, rehabilitación, reparación.

Abstract. Jacketing in reinforced concrete (enlarging the existing cross section of a column with a new layer of concrete that is reinforced with both longitudinal and transversal bars) is one of the most used techniques in the rehabilitation, repair and/or strengthening of columns of this material. This technique is carried out in most cases without totally discharging the columns during the reinforcement construction process, due to the difficulty that this represent. There is a small amount of test where the reinforcement is built under the action of a load on the column, this is a reason why we still need to delve into the influence of the load on the column during the reinforcement process on the behavior of the strengthening column. A numerical simulation is carried out by the finite element method of a series of reinforced concrete columns strengthening by increasing its cross section, the results are compared with those obtained in the experimental tests.

Keywords: Jacketing, strengthening, rehabilitation, repair.

1 Introducción

Algunas edificaciones necesitan de refuerzo estructural para alcanzar niveles específicos de seguridad y desempeño. Dicho reforzamiento estructural es necesario por tres razones principales: a) Cambio de uso de la edificación, si el mismo produce incremento en los esfuerzos de la estructura o requiere de un mayor nivel de desempeño, b) problemas de calidad en la construcción que disminuyen la seguridad de la estructura tales como, bajas resistencias del concreto, colocación de acero insuficiente, etc., c) Incremento en las exigencias de los códigos (códigos sísmicos, de viento etc.). Para cualquiera de los casos anteriores, se debe realizar una evaluación para determinar si es necesario el refuerzo estructural.

El reforzamiento de elementos de concreto armado mediante el recrecido de su sección transversal, es una de las técnicas más usadas para el reforzamiento estructural de columnas. Esto es debido a sus ventajas comparativas respecto a otros métodos de reforzamiento: (i) bajo costo de los materiales, (ii) menor necesidad de mano de obra altamente especializada y (iii) buen comportamiento estructural sustentado por suficientes pruebas experimentales, Krainskyi et al [1], Vandoros et al. [2], Ersoy et al. [3], Julio et al. [4] y [5], Takeuti et al. [6] y [7], Bett et al. [8] entre otros. Adicionalmente con este método se incrementa la resistencia a flexo compresión, a corte y la rigidez de la columna original.

Aunque existe una cantidad razonable de pruebas experimentales son pocas las que toman en cuenta la carga sobre la columna original durante el proceso de recrecido de la sección transversal, a pesar que este es el modo real en que se realizan los trabajos de reforzamiento en obra. Esto se debe principalmente a la dificultad en laboratorio de mantener una carga constante sobre la columna original mientras se realizan los trabajos de recrecido de su sección transversal. De igual forma en la revisión bibliográfica realizada no fue obtenida información respecto a simulaciones numéricas por elementos finitos en columnas recrecidas que consideren la carga sobre la columna original.

1.1 Objetivo

Realizar el modelaje por elementos finitos de columnas de concreto armado reforzadas mediante recrecido de su sección transversal, tomando en cuenta la aplicación de carga en diferentes etapas de la configuración mecánica de la columna, utilizando el programa ANSYS versión 17.1 [9] y validando los resultados con los obtenidos en el trabajo experimental de Krainskyi et al. [1].

2 Metodología

2.1 Data

El modelaje computacional fue calibrado considerando los datos y resultados del trabajo experimental desarrollado por Krainskyi, et al. [1] como se describe a continuación. Geometría de las columnas y distribución del acero de refuerzo.

En cuanto a las columnas en su configuración original se tiene lo siguiente:

La sección transversal es de forma rectangular, con 180 mm de altura por 140 mm de ancho, la longitud total es de 2200 mm. En ambos extremos de las columnas, la altura de la sección aumenta hasta 300 mm, para permitir la aplicación de la carga con una excentricidad de 150 mm.

El refuerzo longitudinal consiste de 4 barras de acero de 12 mm de diámetro, lo que corresponde a un porcentaje de 1,8%, mientras que para el acero transversal se utilizó estribos cerrados formados por alambre de acero de 6 mm de diámetro, colocados a una separación variable, teniendo la misma un

valor de 200 mm en el centro de la columna y 50 mm en los extremos recreados. En la Figura 1, se aprecia tanto la geometría de la columna en su configuración original como la distribución del acero de refuerzo en la misma.

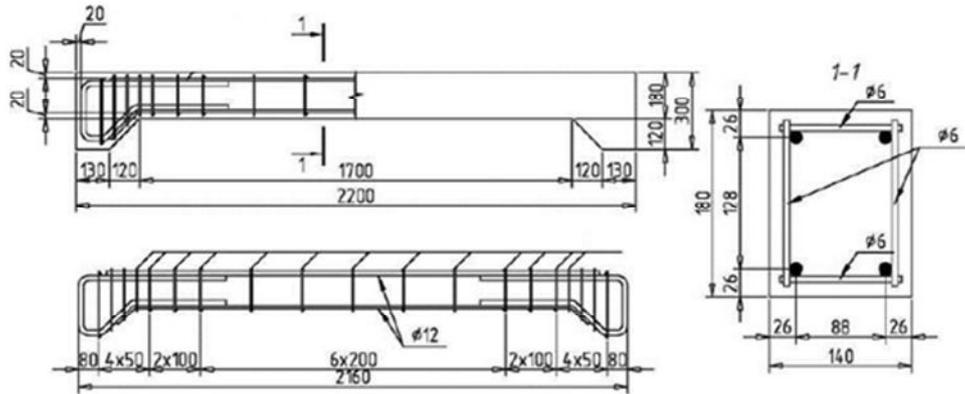


Figura 1 Detalles de la columna original [1]

En cuanto al recrecido de la sección transversal:

La sección rectangular es aumentada a 260 mm de altura por 200 mm de ancho, sobre una longitud de 1700 mm. Para el refuerzo longitudinal se utilizó 4 barras de acero de 10 mm de diámetro, correspondiente a un porcentaje de 1,17% de la sección recrecida. Por su parte el acero transversal consistió de estribos cerrados, realizados con alambre de acero de 6 mm de diámetro y una separación constante de 200 mm. La Figura 2, muestra los detalles de la geometría de la sección recrecida y la distribución del acero de refuerzo en la misma.

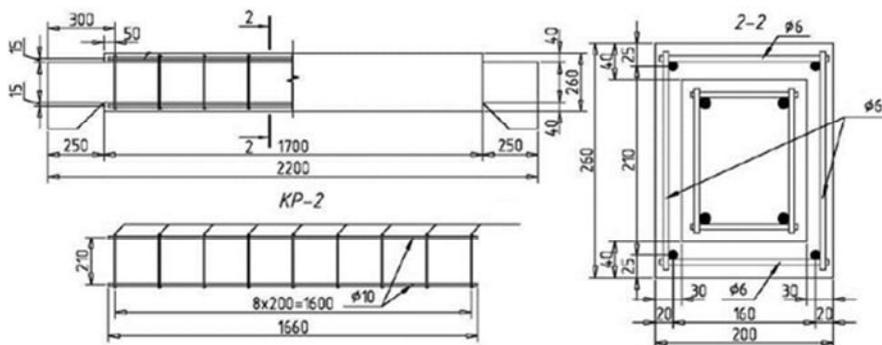


Figura 2 Detalles de la columna Recreada [1]

Propiedades mecánicas de los materiales. Columnas en su configuración original: El concreto utilizado es de una resistencia a la compresión promedio de 37,7 MPa. Por su parte el acero de refuerzo tiene las siguientes características mecánicas, resistencia a la ruptura 722,8 MPa, tensión de fluencia 636,9 MPa y deformación de fluencia 0,3%.

Recrecido de la sección transversal. Para el recrecido de la sección transversal se utilizó un concreto de alta trabajabilidad, con una resistencia a la compresión promedio de 38,9 MPa. Las características mecánicas del acero de refuerzo utilizado son, Resistencia a la ruptura 701,5 MPa, tensión de fluencia 610,7 MPa y deformación de fluencia 0,29%.

Cargas. En todos los ejemplos la carga aplicada sobre las columnas, consistió en una carga axial con una excentricidad de 150 mm, variando la forma de aplicación de la misma como se describe a continuación:

En el primer ejemplo, probetas C-01 y C-02, la carga es aplicada a la configuración original de las columnas de forma monotónica, esto con la finalidad de determinar la resistencia de la columna en su configuración original. En el segundo ejemplo, probetas CS-03-0,0 y CS-04-0,0, nuevamente la carga es aplicada de manera monotónica, pero esta vez sobre la configuración recrecida de la columna.

En el resto de los ejemplos la carga es aplicada en dos tiempos, una primera porción de la carga se aplica sobre la configuración original de la columna, esta es mantenida constante durante el proceso de recrecido de la sección transversal, finalmente se continua el proceso de carga sobre las columnas ya recrecidas hasta obtener la resistencia última. La Tabla 1, muestra en resumen la forma como se aplica la carga en cada uno de los ejemplos.

Tabla 1. Programa de ensayos

Designación de la muestra	Tipo de prueba
C-01	Columnas ensayadas sin recrecido de concreto armado
C-02	
CS-03-0,0	Columnas recrecidas mientras las mismas están descargadas
CS-04-0,0	
CS-05-0,3	Columnas recrecidas bajo la acción de una carga del 30% de la resistencia de la columna original
CS-06-0,3	
CS-07-0,5	Columnas recrecidas bajo la acción de una carga del 50% de la resistencia de la columna original
CS-08-0,5	
CS-09-0,7	Columnas recrecidas bajo la acción de una carga del 70% de la resistencia de la columna original
CS-10-0,7	
CS-11-0,9	Columnas recrecidas bajo la acción de una carga del 90% de la resistencia de la columna original
CS-12-0,9	

Resultados experimentales. De manera de comparar los resultados del modelaje con los valores experimentales, se tomaron los resultados de la carga aplicada versus la deflexión en el medio de la columna, para cada uno de los ejemplos analizados. La Figura 3, muestra la gráfica, carga versus deflexión en el medio de la columna, para la totalidad de los ensayos.

2.2 Modelaje numérico

Considerando el trabajo experimental desarrollado por Krainskyi, et al. [1] y explicado en los párrafos anteriores, se procedió a efectuar el modelaje numérico, el cual consistió en un análisis no lineal por elementos finitos tridimensional tomando en cuenta grandes desplazamientos, reproduciendo con precisión las propiedades físicas de los especímenes y la configuración de carga descritos en párrafos anteriores.

Para la simulación del concreto se utilizó el elemento volumétrico 185, el cual permite el uso de una ley de comportamiento para el concreto personalizado, así como también admite la incorporación de refuerzo discreto por medio del elemento REINF 264.

Para realizar este análisis computacional, fue necesario utilizar la herramienta UPF (User Programmable Features) de personalización del ANSYS. Esta herramienta permitió la implementación de nuevos modelos constitutivos para los materiales, conforme Lazzari et al. [10].

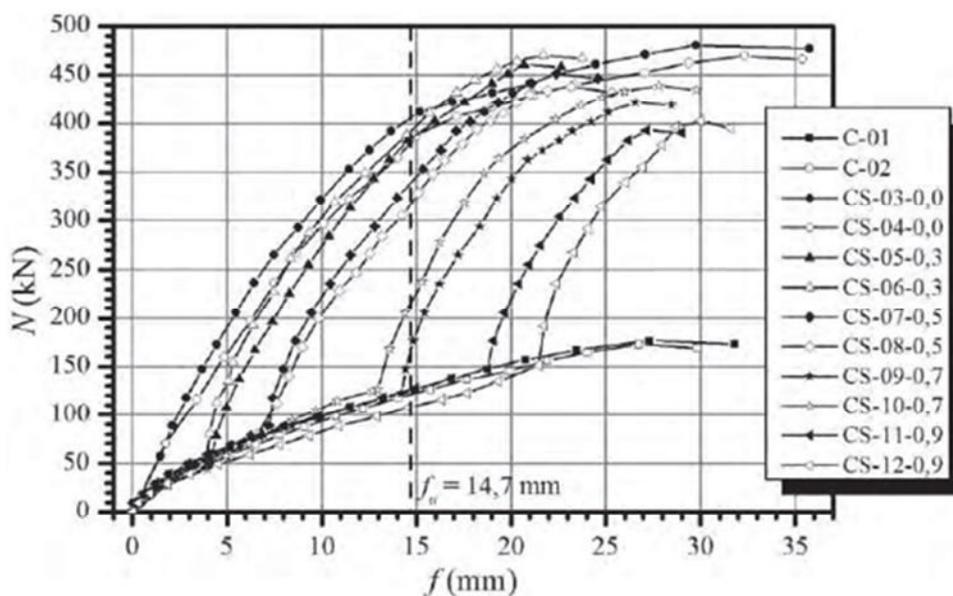


Figura 3. Gráficas experimentales, carga vs. deflexión en el medio de las columnas. [1]

La ley de comportamiento del concreto utilizada en este trabajo se resume a continuación. Para el concreto comprimido se adoptó un modelo elastoplástico con endurecimiento, el cual está compuesto por un criterio de ruptura, un criterio de plastificación y una regla de endurecimiento. El criterio de ruptura es el propuesto por Ottosen [11] el cual es adoptado por el Código Modelo fib 2010 [12], en cuanto al criterio de plastificación asumido, se considera que el concreto comprimido tiene endurecimiento isotrópico y que las superficies de plastificación tenga la misma forma de las superficies de ruptura, por otra parte la regla de endurecimiento, la cual define como las superficies de plastificación se desplazan durante la deformación plástica, es determinada por la relación tensión-deformación plástica efectiva, en este trabajo se usó el diagrama tensión-deformación que representa el concreto comprimido propuesto por el Código Modelo fib 2010 [12].

Para el comportamiento a tracción del concreto se utilizó un comportamiento elástico-lineal hasta la ruptura, a partir del cual se considera un modelo de contribución entre fisuras. El modelo de fisuración utilizada es basado en la formulación presentada por Hinton et al. [13] y modificado por Martinelli [14].

Los valores considerados para la resistencia a la compresión en los casos donde no hay precarga del núcleo fueron 37,7 MPa y 38,9 MPa para la columna original y para el recrecido respectivamente, las cuales corresponden al 100% de la resistencia a la compresión promedio reflejado en la data experimental de referencia. Ya en los casos donde existe una precarga en el núcleo y la misma es mantenida durante el proceso de construcción del recrecido, se mantiene la misma resistencia de 38,9 MPa para el recrecido pero se disminuye la resistencia del núcleo a 32,05 MPa, lo cual corresponden al 85% de su resistencia, esto con la finalidad de tomar en cuenta la disminución de la resistencia del concreto sometida a una carga prolongada.

El acero de refuerzo de la columna original fue simulado utilizando un modelo elasto - plástico perfecto, con un esfuerzo de fluencia de 636,9 MPa. El refuerzo del recrecido también fue simulado con un modelo similar, usando un esfuerzo de fluencia de 610,7 MPa, tal como se refleja en la data experimental de referencia.

En los modelajes matemáticos de todas las probetas se aprovechó la simetría tanto de la geometría como de la carga para trabajar con la mitad de la columna, restringiendo todos los nodos de la sección media de la columna en el sentido longitudinal, lo cual equivale a un empotramiento móvil, representando así las condiciones de contorno de la mitad de la columna.

En el extremo libre de la columna, extremo acartelado, se impuso un desplazamiento en la dirección longitudinal de la columna, en aquellos nodos localizados a una excentricidad de 150 mm medidos desde el centroide de la sección original de la columna, simulando de esa forma la carga excéntrica aplicada.

La geometría de todos los modelos matemáticos es exactamente la misma, excepto para la simulación de las probetas C-01 y C-02, ver Figura 4, en la cual no se realizó el recrecido de la sección. En los modelos que contemplan recrecido de la sección varía solamente la forma de aplicación de la carga tal como se indica en la Tabla 1.

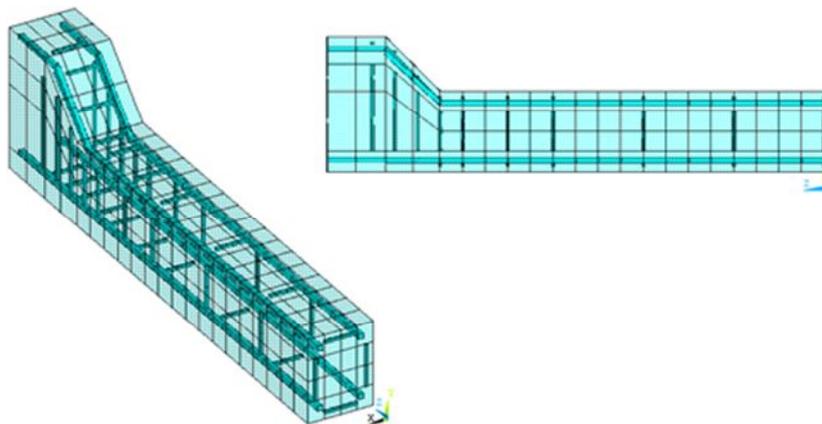


Figura 4. Modelo matemático de las probetas sin recrecido.

En aquellos análisis donde existe más de una etapa de carga, ANSYS no permite la modificación de la geometría del modelo una vez que ha sido analizada la primera etapa de carga. Por lo tanto, la simulación del proceso de carga a dos tiempos fue realizado usando la opción de elementos “Birth and Death”, la cual admite la activación o desactivación de los elementos seleccionados. En nuestra data experimental esa opción es usada en los casos donde el recrecido es realizado mientras la columna original está bajo la acción de una carga, como ocurren en las probetas: (i) CS-05-0,3; CS-06-0,3; (ii) CS-07-0,5; CS-08-0,5; (iii) CS-09-0,7; CS-10-0,7 y (iv) CS-11-0,9; CS-12-0,9.

Para el uso de la opción “Birth and Death”, previo a la aplicación de la primera etapa de carga se construye el modelo de elementos finitos completo, incluyendo aquellas partes que no estarán presente en esa etapa de carga (recrecido de la sección transversal). Los elementos del recrecido son seleccionados y afectados por el comando EKILL, lo que desactiva dichos elementos en esta etapa de carga, éste comando multiplica la matriz de rigidez del elemento por un factor muy pequeño, 1×10^{-6} es el valor por defecto de éste factor, despreciando la contribución de dichos elementos a la matriz de rigidez de la estructura.

Los grados de libertad de los nodos, que sólo forman parte de los elementos desactivados, deben restringirse para evitar errores numéricos en la solución del sistema de ecuaciones. Una vez obtenida la solución para esta etapa, los elementos antes desactivados se vuelven a seleccionar para reactivarlos por medio del comando EALIVE, este comando deshabilita el factor de disminución de rigidez aplicado en la etapa anterior permitiendo la colaboración de tales elementos a la matriz de rigidez total de la estructura. Adicionalmente se deben liberar los grados de libertad correspondientes a los nodos que sólo pertenecen a los elementos reactivados, los cuales se habían restringido en la etapa de carga anterior.

Es importante señalar que los elementos que se desactivaron en la primera etapa y luego fueron reactivados en la etapa de carga subsiguiente no acumulan deformaciones mientras están desactivados y por lo tanto tampoco acumulan tensiones, su proceso de deformación y carga comienza después que son reactivados, simulando adecuadamente el comportamiento real de los elementos de refuerzo por recrecido los cuales sólo comienzan a colaborar con la resistencia de la columna en aquellas etapas de cargas posteriores a la construcción de los mismos.

3 Resultados y discusiones

A continuación, se describen cada una de las simulaciones realizadas.

3.1 Columna original sin recrecido (probetas C-01 y C-02)

La simulación numérica de los ensayos experimentales C-01 y C-02 fue realizada mediante la aplicación de la carga continua sobre la configuración original de la columna. La Figura 4 muestra el modelo matemático de las probetas sin recrecido de su sección transversal. La Figura 5 muestra la gráfica de la carga excéntrica versus deflexión en el medio de la columna, tanto del ensayo experimental como del modelo matemático de las probetas C-01 y C-02.

La resistencia de la columna según el modelo numérico fue de 173 kN, mientras que para los ensayos experimentales fue de 176 kN para la probeta C-01 y 172 kN para C-02, representado una diferencia de -1,7% respecto a C-01 y +0,6% respecto a C-02.

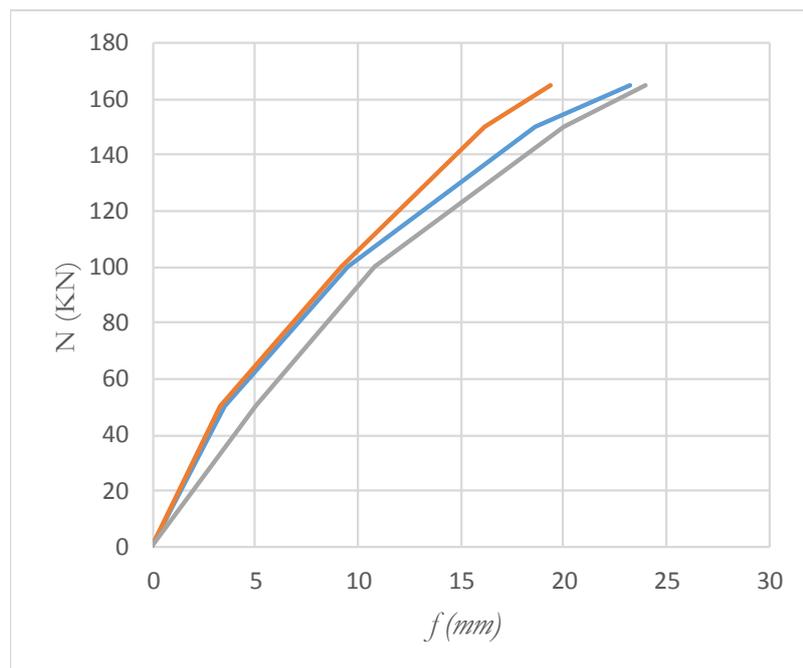


Figura 5. Carga vs. Deflexión en el medio de la columna.
Curvas experimentales C-01(azul), C-02(gris) y curva del modelo (roja)

3.2 Columna con recrecido sin precarga del núcleo (probetas CS-03-0,0 y CS-04-0,0)

La simulación numérica de los ensayos experimentales CS-03-0,0 y CS-04-0,0 fue realizada mediante la aplicación de la carga continua sobre la configuración recrecida. La Figura 6 muestra el modelo matemático de las probetas con recrecido de su sección transversal.

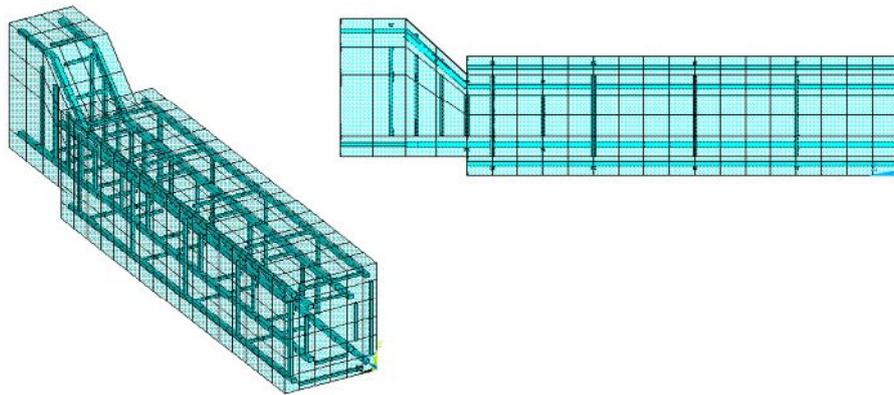


Figura 6. Modelo matemático de las probetas con sección transversal recrecida.

La Figura 7 muestra la gráfica de la carga excéntrica versus deflexión en el medio de la columna, tanto del ensayo experimental como del modelo matemático de las probetas CS-03-0,0 y CS-04-0,0.

La resistencia de la columna según el modelo numérico fue de 480 kN, mientras que para los ensayos experimentales fue de 480 kN para la probeta CS-03-0,0 y 470 kN para CS-04-0,0 representado una diferencia de 0% con respecto a CS-03-0,0 y de +2,1% respecto a CS-04-0,0.

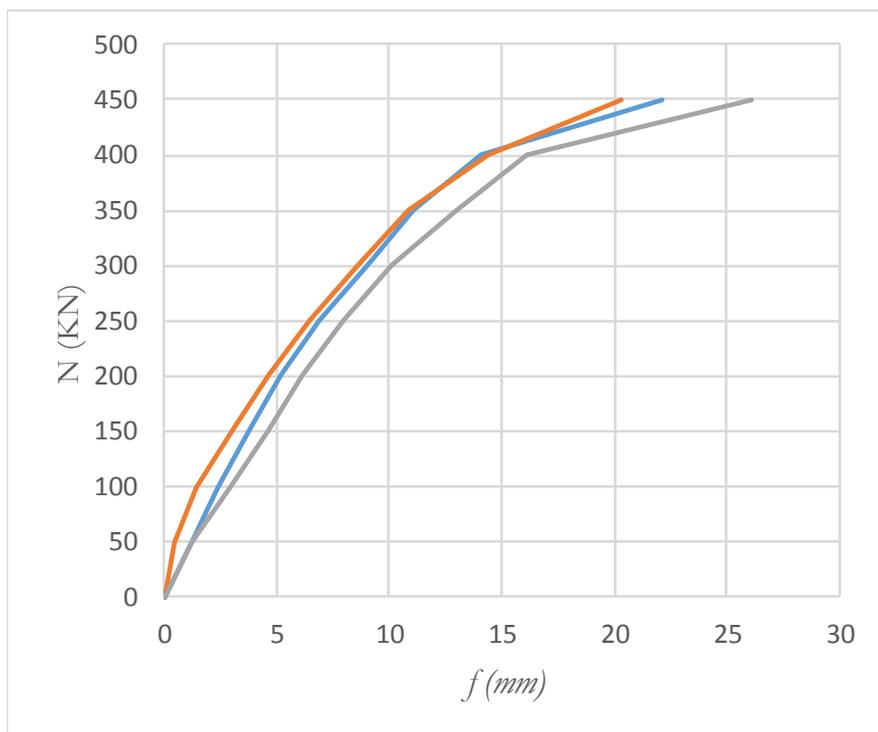


Figura 7. Carga vs. deflexión en el medio de la columna.

Curvas experimentales CS-03-0,0 (azul), CS-04-0,0 (gris) y curva del modelo (roja).

3.3 Columna recrecida con precarga del Núcleo de 30% de su resistencia (probetas CS-05-0,3 y CS-06-0,3)

La simulación numérica de los ensayos experimentales CS-05-0,3 y CS-06-0,3 fue realizada mediante la aplicación de la carga en dos etapas, en la primera etapa los elementos que conforman el recrecido de la sección se desactivan, quedando la configuración como se muestra en la Figura 4, en esta etapa se aplica una carga de 51 kN, correspondiente al 30% de la resistencia de la columna original, luego en la segunda etapa se reactivan los elementos que forman el recrecido de la sección

transversal quedando la configuración como se muestra en la Figura 6, para continuar con la aplicación de la carga hasta la falla de la columna.

La Figura 8 muestra la gráfica carga excéntrica versus deflexión en el medio de la columna, tanto del ensayo experimental como del modelo matemático de las probetas CS-05-0,3 y CS-06-0,3.

La resistencia de la columna según el modelo numérico fue de 470 kN, mientras que para los ensayos experimentales fue de 460 kN para la probeta CS-05-0,3 y 468 kN para CS-06-0,3 representado una diferencia de +2,2% con respecto a CS-05-0,3 y +0,4% respecto a CS-06-0,3.

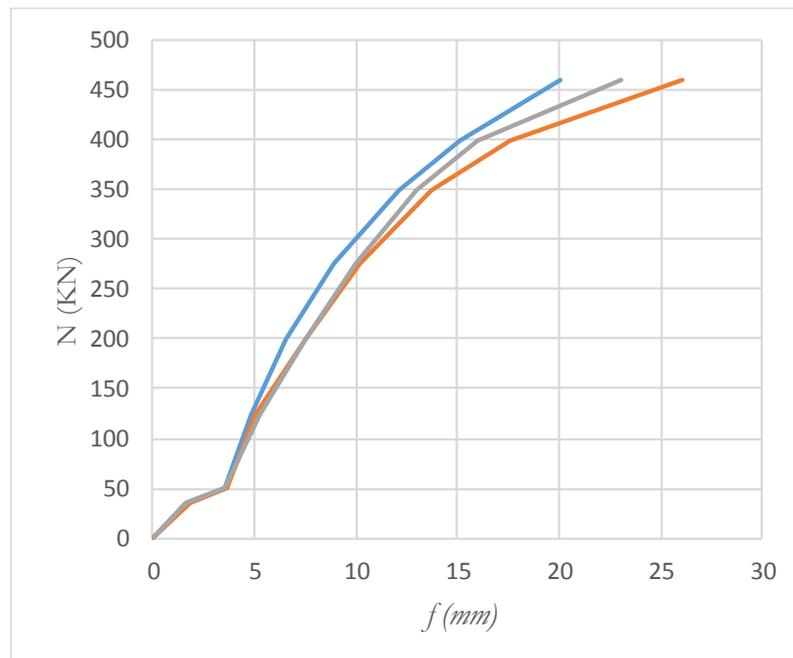


Figura 8. Carga vs. deflexión en el medio de la columna.
Curvas experimentales CS-05-0,3 (gris), CS-06-0,3 (azul) y curva del modelo (roja)

En la Figura 8 se puede apreciar el aumento en la rigidez de la columna en la segunda etapa de carga, posterior a la aplicación de los 51 kN, debido al recrecio de la sección de la columna.

3.4 Columna recrecida, con precarga del Núcleo de 50% de su resistencia (probetas CS-07-0,5 y CS-08-0,5)

La simulación numérica de los ensayos experimentales CS-07-0,5 y CS-08-0,5 fue realizada mediante la aplicación de la carga en dos etapas, en la primera etapa los elementos que conforman el recrecio de la sección se desactivan quedando la configuración como se muestra en la Figura 4, en esta etapa se aplica una carga de 88 kN correspondiente al 50% de la resistencia de la columna original, luego en la segunda etapa se reactivan los elementos que forman el recrecio de la sección transversal quedando la configuración como se muestra en la Figura 6 y se continúa con la aplicación de la carga hasta la falla de la columna. La Figura 9 muestra la gráfica carga excéntrica versus deflexión en el medio de la columna, tanto del ensayo experimental como del modelo matemático de las probetas CS-07-0,5 y CS-08-0,5.

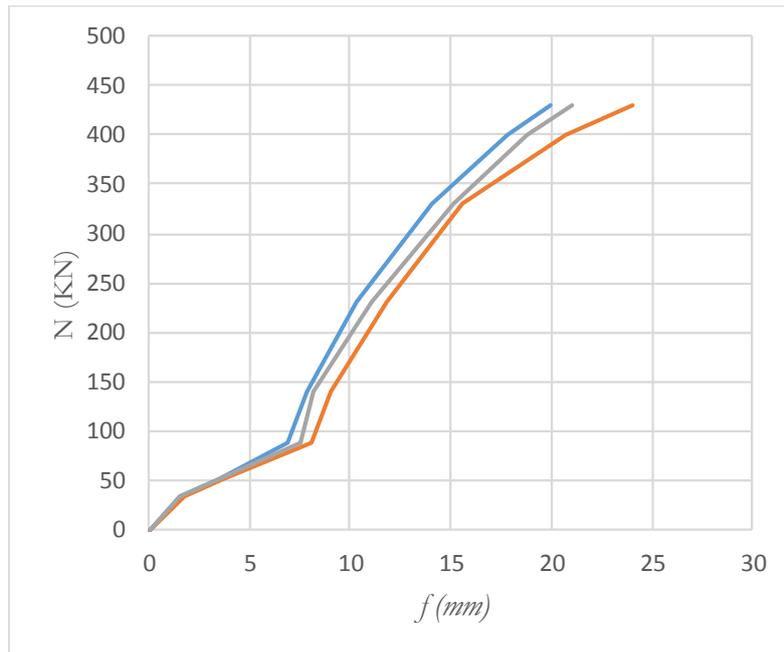


Figura 9. Carga vs. deflexión en el medio de la columna.
Curvas experimentales CS-07-0,5 (azul), CS-08-0,5 (gris) y curva del modelo (roja)

La resistencia de la columna según el modelo numérico fue de 458 kN, mientras que para los ensayos experimentales fue de 444 kN para la probeta CS-07-0,5 y 438 kN para CS-08-0,5 representado una diferencia de +3,2% con respecto a CS-07-0,5 y de +4,6% respecto a CS-08-0,5.

En la Figura 9 se puede apreciar el aumento en la rigidez de la columna en la segunda etapa de carga, posterior a la aplicación de los 88 kN, debido al recrecido de la sección de la columna.

3.5 Columna recrecida, con precarga del Núcleo de 70% de su resistencia (probetas CS-09-0,7 y CS-10-0,7)

La simulación numérica de los ensayos experimentales CS-09-0,7; CS-10-0,7 fue realizada mediante la aplicación de la carga en dos etapas, en una primera etapa los elementos que conforman el recrecido de la sección se desactivan, quedando la configuración como se muestra en la Figura 4, en esta etapa se aplica una carga de 122 kN correspondiente al 70% de la resistencia de la columna original, posteriormente se reactivan los elementos que forman el recrecido de la sección transversal quedando la configuración como se muestra en la Figura 6 y se continúa con la aplicación de la carga hasta la falla de la columna.

La Figura 10 muestra la gráfica carga excéntrica versus desplazamiento vertical del medio de la columna tanto del ensayo experimental como del modelo matemático de las probetas CS-09-0,7 y CS-10-0,7.

La resistencia de la columna según el modelo numérico fue de 443 kN, mientras que para los ensayos experimentales fue de 420 kN para la probeta CS-09-0,7 y 440 kN para CS-10-0,7 representado una diferencia de +5,5% con respecto a CS-09-0,7 y de +0,7% respecto a CS-10-0,7.

Se puede apreciar en la Figura 10 el aumento en la rigidez de la columna en la segunda etapa de carga, posterior a la carga de 122 kN, debido al recrecido de la sección de la columna.

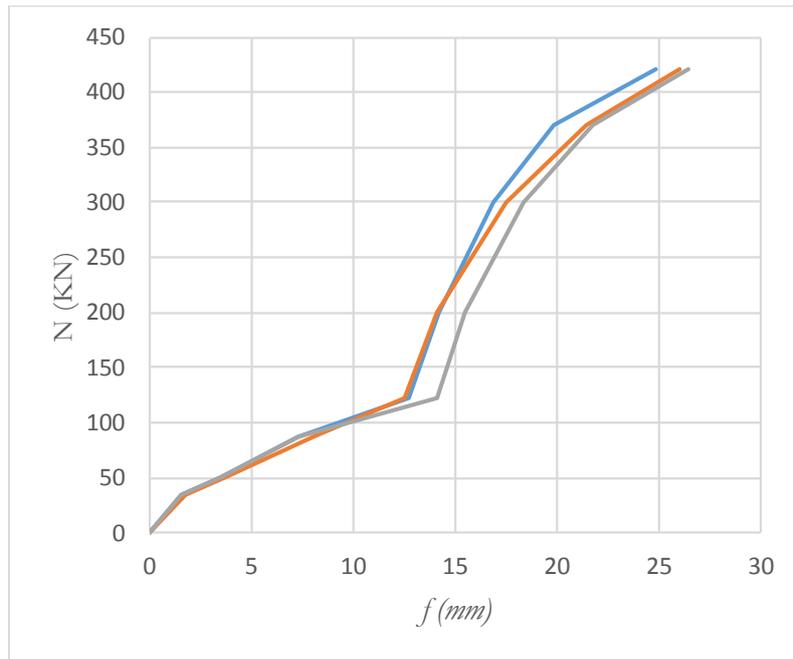


Figura 10. Carga vs. Deflexión en medio de la columna.

Curvas experimentales CS-09-0,7 (gris), CS-10-0,7 (azul) y curva del modelo (roja)

3.6 Columna Reforzada con precarga del Núcleo de 90% de su resistencia (probetas CS-11-0,9 y CS-12-0,9)

La simulación numérica de los ensayos experimentales CS-11-0,9 y CS-12-0,9 fue realizada mediante la aplicación de la carga en dos etapas, en una primera etapa los elementos que conforman el recrecido de la sección se desactivan quedando la configuración como se muestra en la Figura 4, en esta etapa se aplica una carga de 147 kN, correspondiente al 90% de la resistencia de la columna original, posteriormente se reactivan los elementos que forman el recrecido de la sección transversal quedando la configuración como se muestra en la Figura 6 y se continua con la aplicación de la carga hasta la falla de la columna.

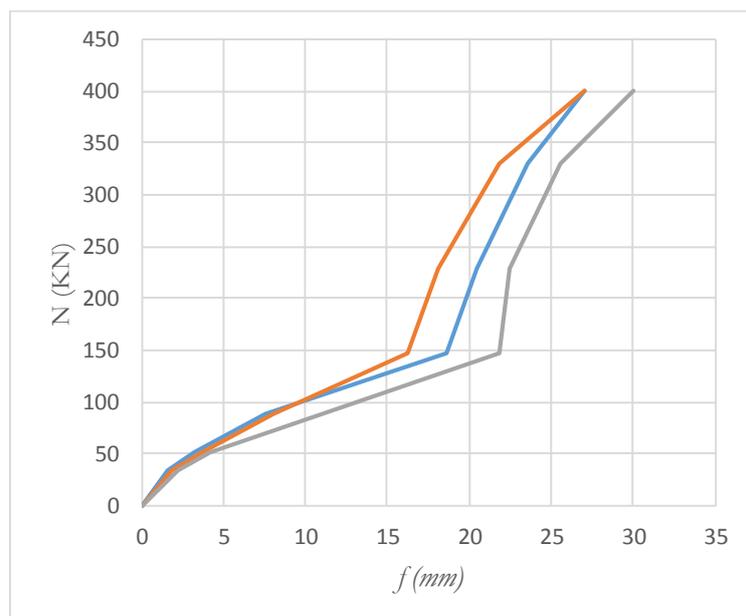


Figura 11. Carga vs. Deflexión en medio de la columna.

Curvas experimentales CS-11-0,9 (azul), CS-12-0,9 (gris) y curva del modelo (roja)

La Figura 11 muestra la gráfica carga excéntrica versus desplazamiento vertical del medio de la columna tanto del ensayo experimental como del modelo matemático de las probetas CS-11-0,9 y CS-12-0,9.

La resistencia de la columna según el modelo numérico fue de 435 kN, mientras que para los ensayos experimentales fue de 399 kN para la probeta CS-11-0,9 y 407 kN para CS-12-0,9 representado una diferencia de +9,0% con respecto a CS-11-0,9 y de +6,9% respecto a CS-12-0,9. En la Figura 14 se puede apreciar el aumento en la rigidez de la columna en la segunda etapa de carga, posterior a la carga de 147 kN, debido al recrecido de la sección de la columna.

4 Conclusiones

Como puede observarse en las Figuras 5, 7, 8, 9, 10 y 11, existe una buena correlación entre los valores experimentales y los valores analíticos obtenidos del modelaje por elementos finitos. De igual manera, los valores de resistencia de la columna en los diferentes ejemplos muestran una buena aproximación entre los valores experimentales y los analíticos, presentando una diferencia máxima por el orden del 9 % para el caso de la probeta CS-11-0,9.

Con la finalidad de tener una visión global de las resistencias obtenidas en los modelajes y su diferencia con los ensayos experimentales, se muestra la Tabla 2, donde se indican las resistencias de la primera y segunda probeta, el promedio de ambas probetas, la resistencia del modelo matemático y su diferencia porcentual tanto con cada una de las probetas como con su valor promedio, para cada uno de los casos de carga estudiados.

Como a cada caso experimental corresponden dos probetas, ejemplos: caso 1 probetas C-01 y C-02; caso 2 probetas CS-03-0,0 y CS-04-0,0 y así sucesivamente, en la Tabla 2, la probeta No 1 indica el número impar para el caso de carga dado, ejemplos: caso 1 C-01; caso 2 CS-03-0,0 mientras que la probeta No 2 indica el número par del caso mencionado, ejemplos: caso 1 C-02; caso 2 CS-04-0,0.

Tabla 2. Resumen de las resistencias y diferencias obtenidas entre los valores experimentales y el modelo matemático

Caso de carga	Resistencia en kN			Diferencia del modelo matemático en % con respecto a			
	Probeta No 1	Probeta No 2	Valor promedio	Modelo matemático	Probeta No1	Probeta No 2	Valor promedio
1	176	172	174	173	-1,7	+0,6	-0,6
2	480	470	475	480	0	+2,1	+1,1
3	460	468	464	470	+2,2	+0,4	+1,3
4	444	438	441	458	+3,2	+4,6	+3,9
5	420	440	430	443	+5,5	+0,7	+3,1
6	399	407	403	435	+9,0	+6,9	+7,9

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo a la CAPES - Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior, al CNPq - Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico y a CEMACOM-Centro de Mecánica Aplicada Computacional de la UFRGS.

Referencias bibliográficas

- [1] Krainyskiy, P.; Blikharskiy, Z.; Khmil, R. Experimental investigation of reinforced concrete columns strengthened by jacketing. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)* Vol. 2 Issue 7, July – 2015
- [2] Vandoros, K.; Dritsos, S. Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. *Construction and Building Materials*, n.22, 2008; p.264–276
- [3] Ersoy, U.; Tankut, A.; Suleiman, R. Behavior of jacketed columns. *ACI Structural Journal*, V. 90, No.3, May-June 1993. Title no. 90-S30.
- [4] Júlio, E.; Branco, F.; Silva, V.. Reinforced concrete jacketing—interface influence on monotonic loading response. *ACI Structural Journal*, V. 102, No. 2, March-April 2005.
- [5] Júlio, E.; Branco, F. Reinforced concrete jacketing—interface influence on Cyclic Loading Response. *ACI Structural Journal*, V. 105, No. 4, July-August 2008.
- [6] Takeuti, A.; Hanai, J.; Mirmiran, A. Preloaded RC columns strengthened with high-strength concrete jackets under uniaxial compression. *Materials and Structures*, no. 41, 2008; p. 1251–1262
- [7] Takeuti, A.; Hanai, J. Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho. Tese Doutorado- Universidade de São Paulo, 2003.
- [8] Bett, B.; Klingner, R.; Jirsa, J. Lateral load response of strengthened and repaired reinforced concrete. *ACI Structural Journal*, Mar. 1989.
- [9] ANSYS, Inc. Theory reference (Version 17.1), 2016.
- [10] Lazzari, P.M., Campos Filho, A, Lazzari, B.M., Pacheco, A.R., Gomes, R.R.S. Numerical simulation of the constructive steps of a cable-stayed bridge using ANSYS. *Structural Engineering and Mechanics*, v. 69, n. 3, p. 269-281. 2019.
- [11] Ottosen, N. S. A failure criterion for concrete. *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, v. 103, n.4, p.527-535, 1977.
- [12] Comité Euro-International du Béton. CEB-FIP Model code 2010. Bulletin No 65, 2012.
- [13] Hinton, E.; Owen, D. R. J.;. *Finite Elements in plasticity: theory and practice*. Swansea: Pineridge Press Limited, 1980.
- [14] Martineli, M. Modelagem de situações de punção em lajes de concreto armado através do Método dos Elementos Finitos. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.