

## **EVALUACIÓN NUMÉRICA DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO REFORZADAS CON PLANCHUELAS METÁLICAS.**

**Mauricio S. Schmitz, Raúl D. Benito, Bibiana Luccioni\*, Rodolfo Danesi\*.**

Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán, \*CONICET, Argentina.  
Dirección postal: Av. Roca 1800. S.M. de Tucumán.  
Tel./Fax: 0381-4364087. e-mail: bluccioni@herrera.unt.edu.ar

**Palabras clave:** Estructuras, Refuerzos, Fallas Locales, Peel off, Anclajes.

**Resumen:** *En este trabajo se presenta la evaluación numérica del comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas mediante el pegado de planchuelas metálicas sometidas a flexión. El modelo numérico se realiza mediante un programa de elementos finitos no lineal en tres dimensiones.*

*El objetivo del trabajo es analizar el comportamiento global de este tipo de vigas así reforzadas y específicamente el modo de falla por desprendimiento del refuerzo, debido al arrancamiento del hormigón de recubrimiento de la viga en los extremos del refuerzo. Este modo de falla, también llamado “peel-off”, se produce debido a la concentración de tensiones tangenciales y normales que ocurre en el recubrimiento, cerca de los extremos del refuerzo, debido a la transmisión de esfuerzos que se realiza desde dicho refuerzo hacia la armadura principal.*

*Para alcanzar este objetivo se procede a la modelación de la viga con distintos mallados y en distintas escalas, profundizando principalmente el análisis en la interfase armadura principal-refuerzo mediante modelos materiales plasticidad.*

*Los resultados numéricos se comparan con datos experimentales de tres especímenes de vigas prefisuradas a flexión, reforzadas y reensayadas hasta rotura. Uno de estos especímenes presenta un sistema de anclaje mejorado mediante el agregado de “abrazaderas” metálicas en los extremos, que también fue modelado para analizar las tensiones y deformaciones ocurridas en este caso.*

*Como conclusión de este trabajo se obtiene la distribución de tensiones y deformaciones en vigas reforzadas mediante el pegado de planchuelas metálicas.*

## 1 INTRODUCCIÓN.

En función del gran número de problemas constatados en los últimos años en las obras de ingeniería resueltas con H<sup>o</sup>A<sup>o</sup>, el campo de la patología viene experimentando una expansión continua. Esto ha despertado la atención y dado lugar al surgimiento de innumerables trabajos de investigación sobre los procesos patológicos y al desarrollo de técnicas de reparación y/o refuerzo.

Diversas técnicas fueron desarrolladas para resolver los más variados problemas patológicos, estando muchas de estas dirigidas al refuerzo y recuperación de capacidades de sustento o de carga existente o prevista.

El espectro de problemas existentes es extremadamente variable, pero de acuerdo con Jones et al.<sup>1</sup>, uno de los problemas más comunes es el de vigas de hormigón armado, pre o postesado cuyo comportamiento es inapropiado. Resulta por lo tanto importante contar con una técnica de reparación y/o refuerzo que sea segura, eficiente y económicamente conveniente en estos casos que despiertan mayor interés por sus implicancias económicas<sup>2</sup>.

Hoy en día, el método más económico y usado con mayor frecuencia para la reparación de vigas de hormigón armado o pretensado consiste en el pegado de planchas de acero o material compuesto en la zona de tracción de hormigón<sup>2</sup>.

Esta metodología de refuerzo es muy utilizada debido a su baja relación costo / efectividad y a su alta versatilidad, presentando además, otras importantes ventajas, tales como<sup>3</sup>:

- Rápida y económica aplicación en obra, prácticamente sin cortar las actividades que se realizan normalmente en el ámbito de la misma;
- Mantenimiento de la configuración original de la estructura y;
- Mínima alteración de las alturas de los vanos, ya que el espesor necesario del refuerzo es mínimo.

Al reparar y/o reforzar estructuras, aparecen indefectiblemente nuevos modos de falla de las estructuras resultantes, ya que siempre en estos procesos se agregan elementos externos, que en mayor o menor medida alteran el comportamiento estructural originalmente previsto para dichas estructuras.

En particular, en los elementos tipo vigas o losas, los modos de falla pueden ser divididos de forma general en dos categorías:

- Modos de falla clásicos o flexionales o;
- Modos de falla prematuros o locales.

En los modos de fallas clásicos o flexionales, las vigas llegan a la carga de rotura según lo previsto en los cálculos, es decir presentando los niveles de seguridad requeridos en las normas.

Los modos de fallas locales o prematuros, en cambio, impiden que la viga desarrolle su capacidad última para la cual fue reforzada, lo que se agrava por el hecho de tratarse de modos de rotura sin aviso<sup>4,5</sup>.

Dentro de estos últimos modos de falla, el desgarramiento del recubrimiento de la viga, entre la armadura principal y el refuerzo, también llamado “peel-off”, es considerado como uno de los modos de fallas más frecuentes en estos tipos de refuerzos<sup>6</sup>. Este fenómeno consiste, en el arrancamiento del recubrimiento de hormigón desde el extremo del refuerzo (end peel), cerca de los apoyos, o desde el tramo central de la viga (middle peel), y se da por las altas tensiones tangenciales y normales que se generan en esta interfase entre la armadura longitudinal inferior de la viga y el refuerzo propiamente dicho.

Si bien la gran mayoría de trabajos nombran este problema, son muy pocos los que tratan de resolverlo y no existen soluciones eficientes. Se han encontrado algunos antecedentes de disposiciones de los refuerzos metálicos que permiten un anclaje adecuado<sup>4,7</sup>, pero estos trabajos son generalmente experimentales, y no llegan a describir o fundamentar la solución propuesta.

Es necesario, entonces, realizar estudios teóricos-experimentales que permitan formular una técnica de anclaje adecuado, para posteriormente llevar esto al campo de la aplicación profesional.

En este trabajo se presenta un estudio experimental y numérico del mencionado problema.

## **2 ENSAYOS EXPERIMENTALES.**

Se realizaron ensayos experimentales en una serie de tres vigas de hormigón armado convencional, todas con idénticas dimensiones, calidad de hormigón y armaduras.

La viga denominada VIP, es la viga patrón o de referencia con la cual se comparan las demás vigas. La viga V2RN fue reforzada con una planchuela metálica, con la metodología de refuerzo normal o clásica para este tipo de vigas, que consiste en el pegado de las planchuelas con un pegamento epoxi, sin ningún tipo de anclaje en los extremos del refuerzo.

La viga V3RMAE fue reforzada con una planchuela de idénticas dimensiones a la utilizada en la viga V2RN, pero con un sistema de anclaje especial.

El anclaje, se materializó mediante dos perfiles metálicos “L” dispuestos a cada lado de la viga a manera de cantoneras, soldados a las planchuelas longitudinales de refuerzo en las zonas cercanas a los apoyos, los cuales fueron soldados a las planchuelas longitudinales de refuerzo. Estos perfiles fueron además pegados a la viga mediante la misma resina epoxi usada para el refuerzo inferior.

Las tres vigas fueron ensayadas a flexión hasta rotura mediante dos cargas ubicadas en los tercio de la luz. Las Figuras 1 a 3 ilustran las tres vigas con las condiciones de apoyo y carga.

### 3 MATERIALES

#### 3.1 Hormigón.

Junto con el hormigonado de las vigas se confeccionaron ocho probetas circulares de 20 cm. de altura y 10 cm. de diámetro. La resistencia a la compresión promedio de las mismas fue de 10.81 MPa.

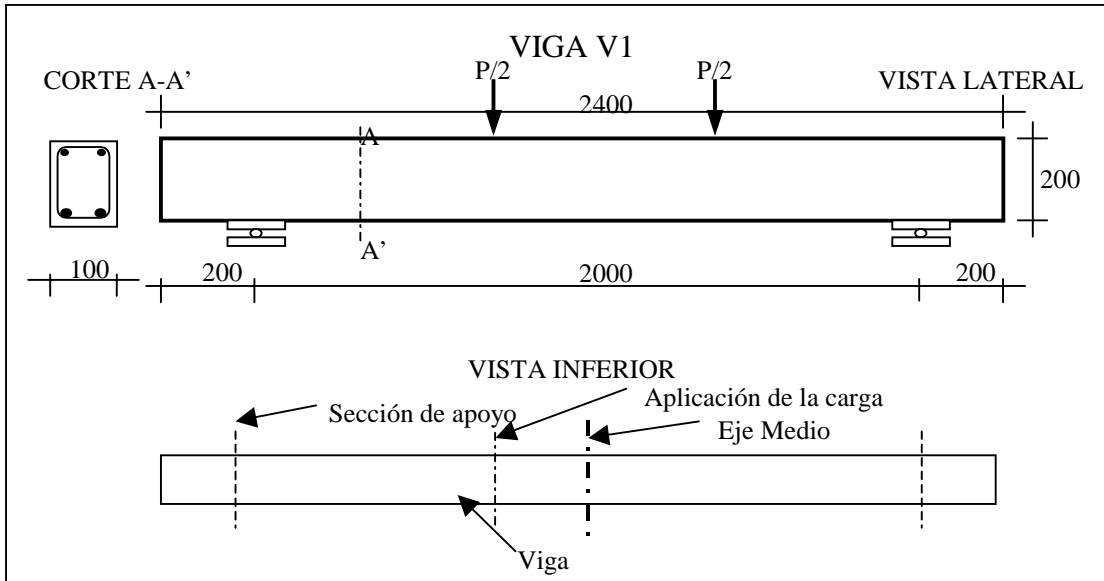


Figura 1. Viga V1 [mm]

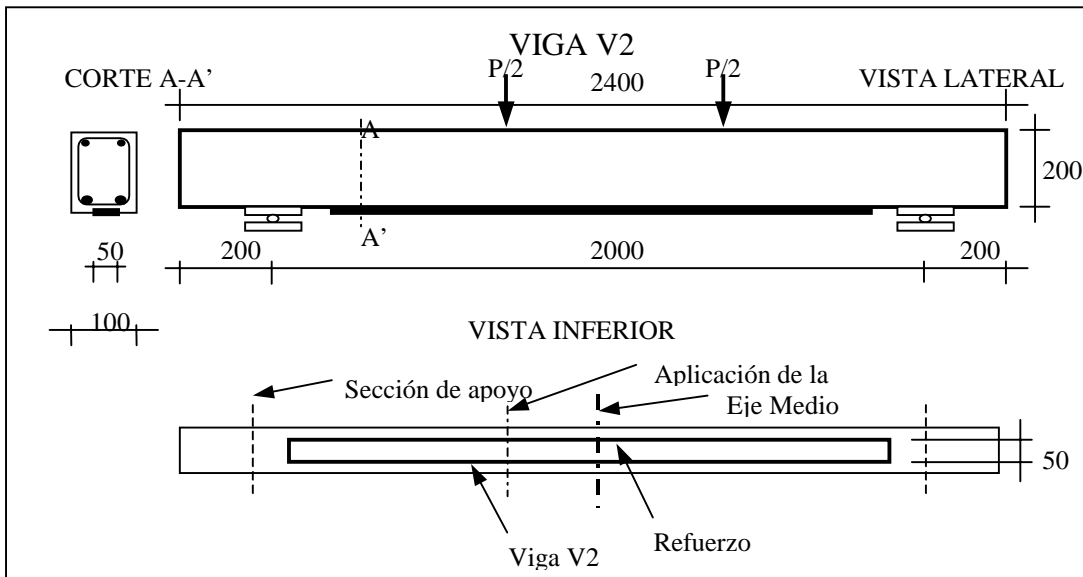


Figura 2. Viga V2 [mm]

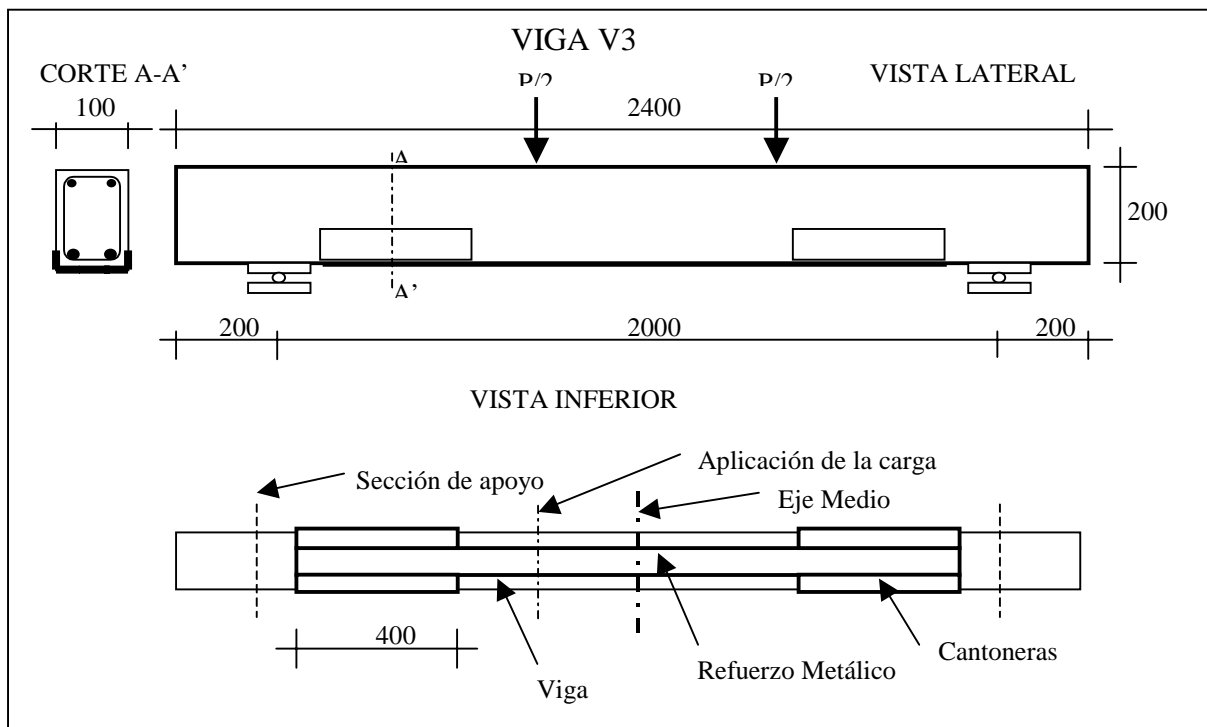


Figura 3. Viga V3 [mm]

### 3.2 Armadura.

Se utilizaron barras acero AND-420, de 6 y 10 mm de diámetro. Se realizaron ensayos de tracción de las barras a utilizar. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de los Aceros Utilizados en las Vigas

	Modulo de Elasticidad [Mpa]	Tensión de Fluencia [Mpa]
Acero para Estribos y Perchas	233.440	499,5
Acero para Armadura Principal	221.920	571
Acero para Refuerzo	214.070	428

La disposición de la armadura en la sección transversal puede verse en la Figura 4.

### 3.3 Adhesivo epoxi.

El adhesivo usado en esta serie experimental para el pegado de las planchuelas metálicas fue un adhesivo epoxi tixotrópico, libre de solventes.

Específicamente en este caso se utilizó el producto comercial SIKADUR 31, que es un adhesivo de dos componentes basado en resinas epoxídicas modificadas, que endurecen rápidamente.

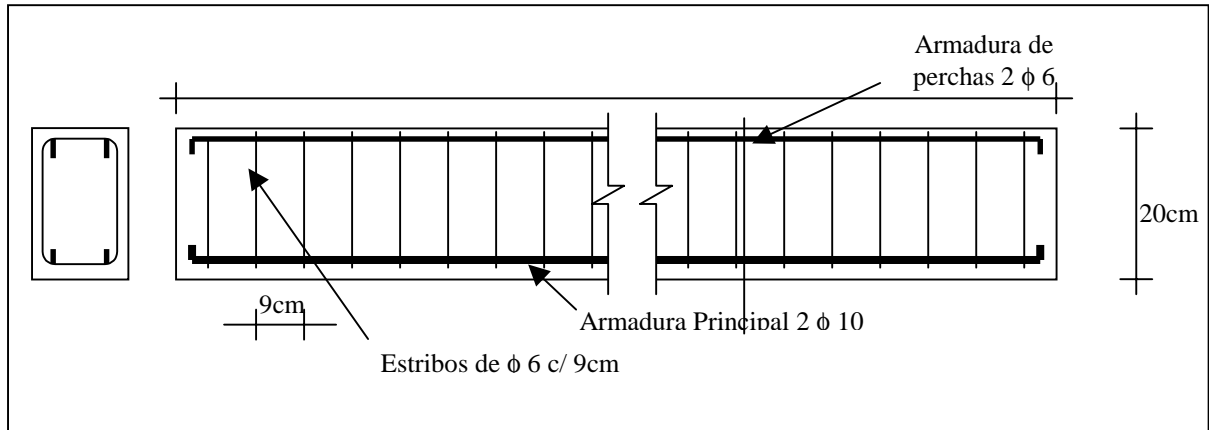


Figura 4. Disposición de la armadura en las vigas ensayadas.

#### 4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.

En la Figura 5 se muestran los resultados de los ensayos experimentales descritos anteriormente.

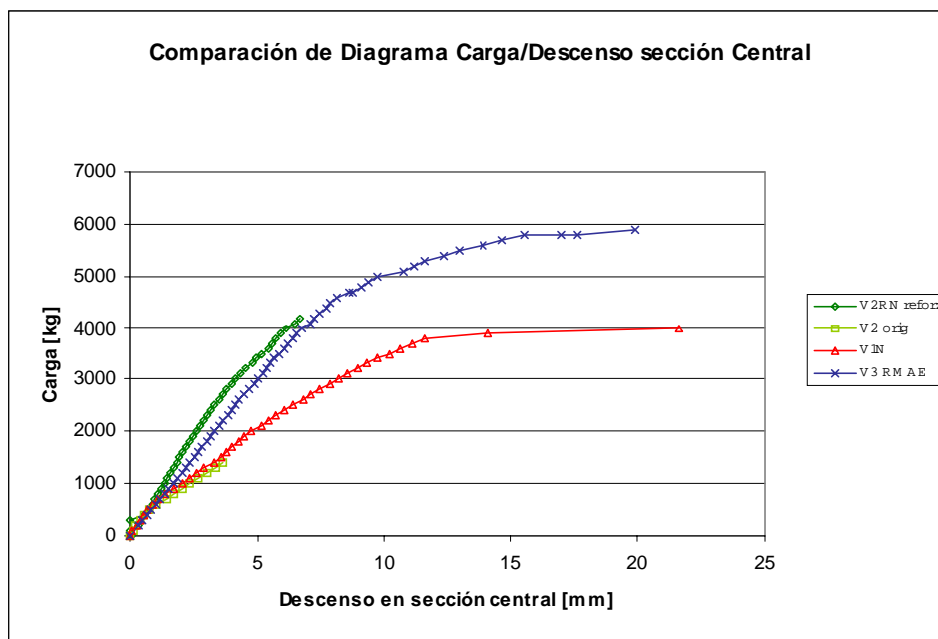


Figura 5. Comportamiento global de las tres vigas ensayadas.

La viga V1, al no estar reforzada y haber sido diseñada bajo los códigos convencionales, exhibió el comportamiento esperado. Luego de la rotura del hormigón en tracción para una carga de 6870 N., presentó un comportamiento prácticamente

lineal, hasta que la armadura comenzó a entrar en fluencia. La rotura de dicha viga se dio por fluencia de la armadura principal a los 39240 N. de carga, con un descenso en la sección central de  $2.16E-02$  m., con un cuadro de fisuración muy marcado, lo cual es muy recomendable en cuanto al aviso previo a la falla del espécimen.

El ensayo de la viga V2, se llevó a cabo en dos etapas, primeramente se procedió a pre-fisurarla cargándola hasta 13730 N. Esta primera carga se muestra en el gráfico anterior como la línea verde claro, que copia casi perfectamente a la primer parte del ensayo de la viga V1. Luego de ser reforzada, se procedió a cargarla nuevamente hasta la rotura. La viga aumentó su rigidez considerablemente presentando un comportamiento cuasi lineal hasta la falla. Esta viga, reforzada sin anclaje especial en sus extremos, rompió a los 42180 N., inmediatamente después de un despegue muy brusco del refuerzo a través del hormigón de recubrimiento. Todo el proceso de despegue se desarrolló estando el espécimen bajo carga estable, en alrededor de unos 3 o 4 segundos y sin aviso. La carga de rotura prevista en alrededor de 57880 N., no fue alcanzada, lográndose solamente el 73% de la misma. Esta carga fue estimada según la teoría convencional de vigas, y modificada para tener en cuenta el refuerzo metálico y en donde se considera que la falla es flexional, con una unión monolítica entre viga y refuerzo. El estado de fisuración en el momento de la rotura era incipiente y mucho menos marcado que el de la viga V1 para cargas bastantes menores.

El comportamiento global de la viga V3 fue satisfactorio, alcanzando la carga última estimada (57880 N.), comportándose de una manera dúctil, llegando a un descenso central de unos  $1.82E-02$  m., y mostrando un cuadro de fisuración bastante marcado. Cabe notar que, aún cuando la abertura de las fisuras en el extremo del refuerzo de esta viga, fue superior al milímetro, la falla no se dio por peel off, y las cantoneras diseñadas lograron brindar el anclaje necesario para que el refuerzo permaneciera hasta la rotura flexional de la viga. La misma, rompió finalmente por aplastamiento del hormigón, con pequeñas deformaciones plásticas en el refuerzo, en la sección central, ya que al descargarla, el mismo quedó parcialmente deformado.

## **5 MODELOS NUMÉRICOS DESARROLLADOS.**

### **5.1 Introducción**

Con el fin de tener una herramienta capaz de predecir adecuadamente el comportamiento de vigas de hormigón armado reforzados con planchuelas metálicas se analizó las vigas ensayadas con un programa de elementos finitos.

Se utilizó el programa Abaqus con el objeto de realizar una representación 3D del problema y poder analizar en detalle el comportamiento del sistema de anclaje con cantoneras como técnica de mejora del anclaje.

Por razones de tamaño del modelo, se recurrió a modelar un cuarto de la viga. Esto se pudo hacer ya que la geometría, las condiciones de borde y las cargas presentan una doble simetría respecto a la sección transversal y al plano vertical longitudinal de la viga.

## 5.2 Malla de Elementos Finitos

Se realizaron una gran cantidad de mallas, hasta llegar al modelo más conveniente para medir los parámetros que interesan en el estudio del problema descrito. La malla base final es la misma para modelar la viga con refuerzo convencional o normalmente reforzada (V2 RN) y la viga con refuerzo y mejoras de anclaje (V3 RMAE).

El modelo mas completo, es decir el de la viga V3, requirió un total de 62931 elementos, con un total de 64278 nodos.

La malla base de elementos finitos para ambas vigas se ilustra en la Figura 6.

A dicho modelo se le agregó luego el refuerzo con el adhesivo correspondiente a la viga V2 RN, ver Figura 7.

Por último se incorporó la cantonera para modelar la viga V3, la malla de elementos finitos correspondiente esta viga se presenta en la Figura 8.

En todas las mallas se utilizó una combinación de elementos cúbicos y tetraédricos, estos últimos para hacer transiciones entre dos tamaños de malla.

Se utilizaron elementos finitos cúbicos C3D8R de 8 nodos, aproximación lineal e integración reducida y los elementos tetraédricos fueron elementos finitos C3D4 de cuatro nodos, también de aproximación lineal e integración reducida.

## 5.3. Modelos y propiedades mecánicas de los materiales

Se utilizaron cuatro materiales distintos, hormigón, acero de armadura a compresión y refuerzo, acero para armadura a tracción y adhesivo epoxi.

### Hormigón

Debido a que el modelo requerido para poder representar correctamente cada parte de la viga V3, constaba de una cantidad muy grande de elementos, se utilizó un modelo constitutivo simple para el hormigón. Es por ello que, se utilizó un modelo elasto-plástico perfecto tanto en compresión como en tracción, con un límite de plasticidad en compresión, 10 veces superior al límite a tracción. La tensión de aplastamiento en compresión del hormigón se tomó igual a 10.81 MPa con un modulo de elasticidad de 21.410 MPa.



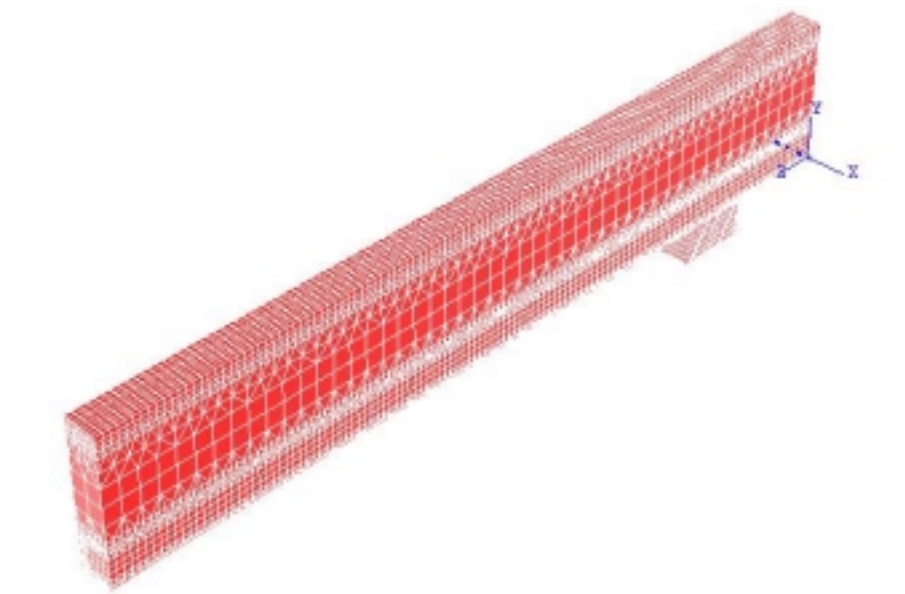


Figura 6. Perspectiva del modelo base

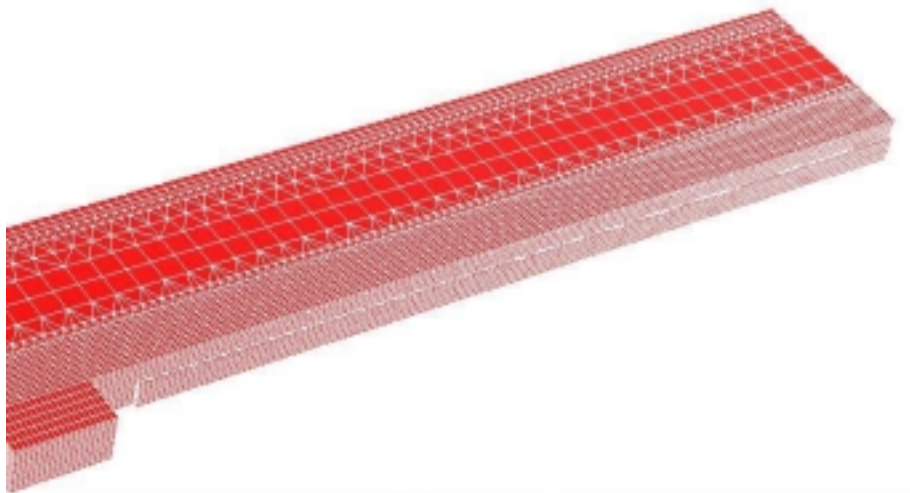


Figura 7. Perspectiva del modelo de la viga V2 con refuerzo

### **Acero**

En el caso del acero se utilizó también un modelo elastoplástico perfecto. Con este modelo constitutivo se definieron tres tipos de acero, debido a los distintos resultados que arrojaron los ensayos realizados sobre los mismos, las propiedades de cada uno de ellos se exponen en la Tabla 1.

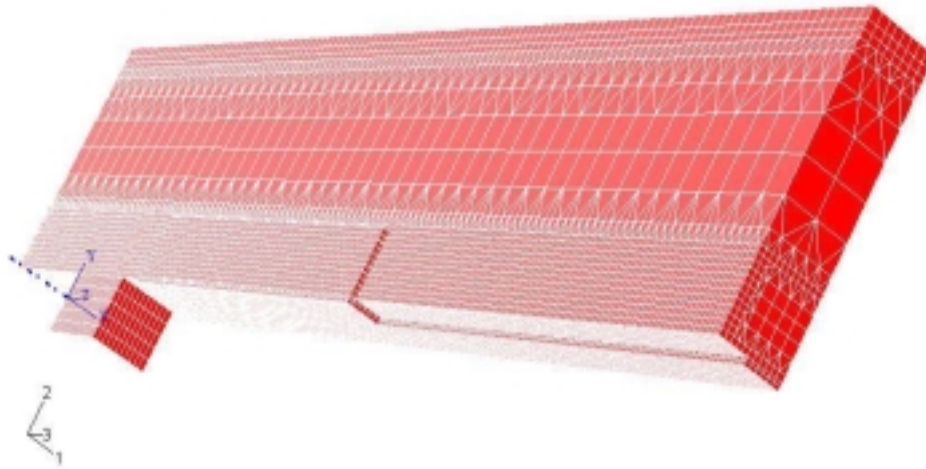


Figura 8. Malla de elementos finitos correspondiente a la viga V3 con refuerzo y cantoneras

### **Adhesivo Epoxi**

En el caso del pegamento se recurrió a un modelo elástico con un modulo de elasticidad de 4.380 MPa.

### **5.4 Condiciones de Borde**

Para reproducir las condiciones de borde del ensayo, se modelaron también los apoyos metálicos. En la base de estos, en su eje medio central, se restringieron los desplazamientos verticales y horizontales, ver Figura 9. Para tener en cuenta las condiciones de simetría se restringieron los desplazamientos perpendiculares al plano de los nodos correspondientes a la sección transversal media y a la sección longitudinal media

### **5.5 Carga**

Se representó la carga de los ensayos con una carga distribuida en una pequeña superficie de la viga, que corresponde a la zona de apoyo del sistema de transmisión de carga empleado en el modelo experimental, ver Figura 9.

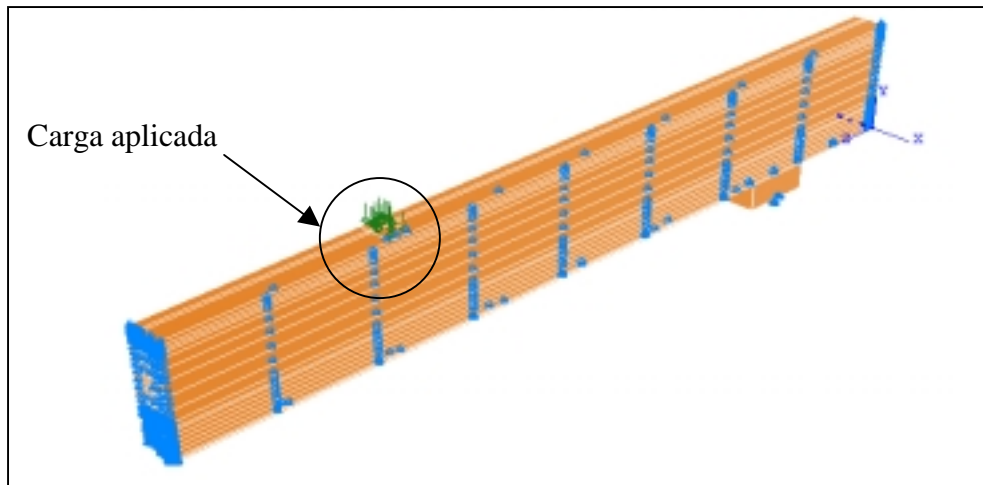


Figura 9. Perspectiva de la viga modelo con las condiciones de borde y la carga aplicada

## 6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON RESULTADOS NUMERICOS.

### 6.1 Viga V2

La Figura 10 ilustra las curvas carga / flecha obtenidas con el programa Abaqus y su comparación con los resultados experimentales.

En dicho modelo, la falla se da por peel off, ya que las tensiones en el hormigón al borde del extremo del refuerzo superan los 0.93 MPa., para una carga de 37.280 N. y un descenso en la sección central de 5.5E-03 m.

El comportamiento obtenido numéricamente aproxima bien la rigidez de la viga presentando algunas diferencias en la carga última.

La distinción entre el modelo con peel off y sin peel off, hace referencia a que el modelo numérico, sigue tomando cargas por encima de los 37.280 N., pero se deja de considerar válido este comportamiento por cuanto, como se dijo anteriormente, para esta carga ocurre el peel off.

La Tabla 2 resume los valores de carga última obtenidos numérica y experimentalmente.

### 6.2 Viga V3

La Figura 11 ilustra la curva carga / flecha obtenida con el programa Abaqus y su comparación con los resultados experimentales, observándose una buena aproximación en la estimación de la carga última.

La aproximación que se obtiene con el modelo realizado en Abaqus es satisfactoria en cuanto a valores de carga última, presentando una diferencia respecto de la viga

experimental de un 6.8%. En cambio, presenta una diferencia un poco mayor en cuanto a la rigidez inicial (15%).

Tabla 2. Comparación de resultados de ensayos experimentales con modelos numéricos.

RESULTADO	CARGA ULTIMA [N]	ERROR [%]
Experimental V2	42.180	---
Abaqus	37.280	13.15

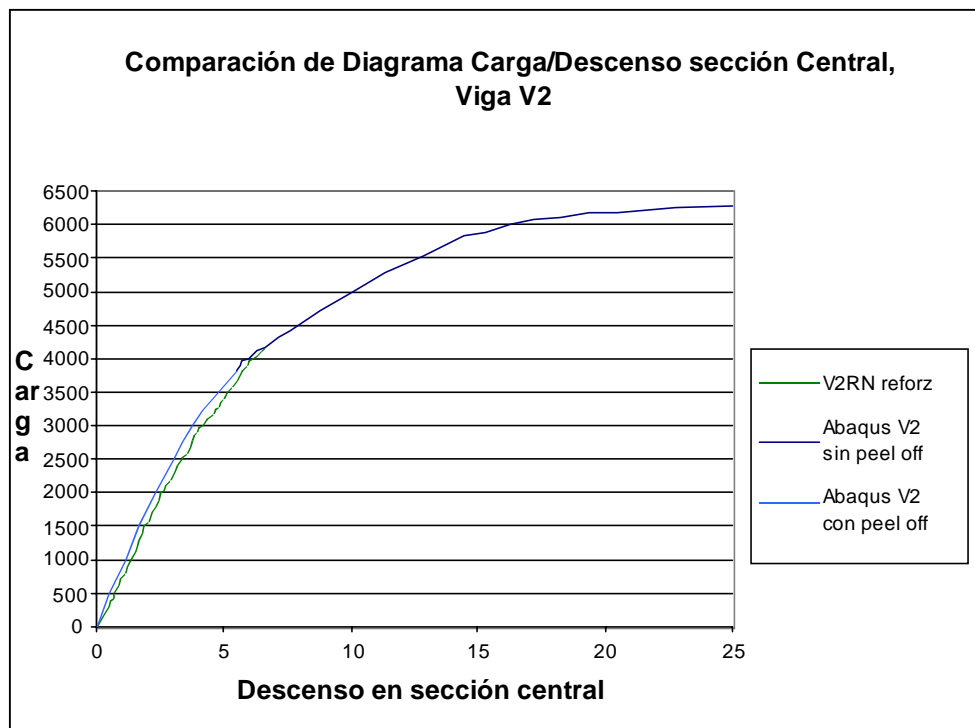


Figura 10. Comparación de resultados numéricos y experimentales de la viga V2

### 6.3 Concentración de Tensiones en el Extremo del Refuerzo

La concentración de tensiones en el extremo del refuerzo para la viga V2 se puede ver en la Figura 12, en donde se muestra una vista inferior de la viga.

Como vemos el valor alcanzado en el extremo del refuerzo, para esta carga de 37280 N., supera los 0.93 MPa, que es el límite de la tensión de adherencia para el hormigón de las vigas de estos ensayos.

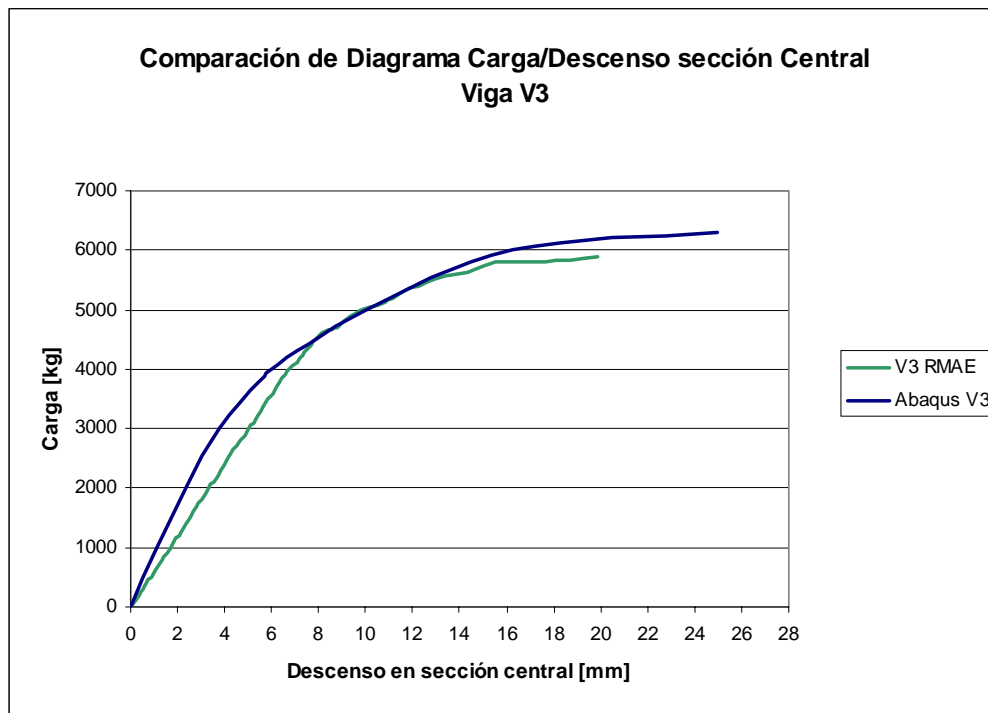


Figura 11. Comparación entre el comportamiento de la viga V2 y el modelo en Abaqus.

En la viga V3, las tensiones del hormigón en el extremo del refuerzo son del orden de la tercera parte de las mismas tensiones en la viga V2.

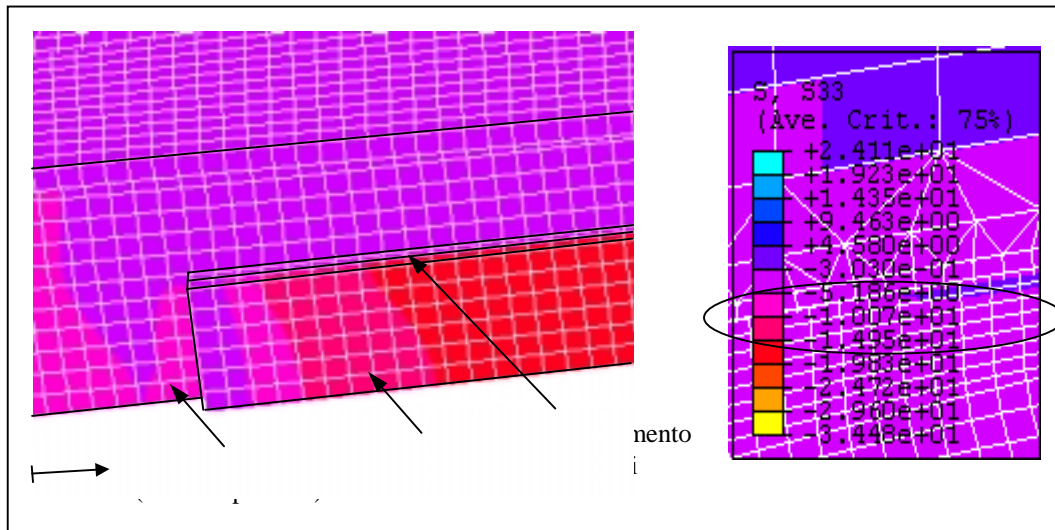


Figura 12. Distribución de tensiones en el extremo del refuerzo en viga V2 [kg/cm<sup>2</sup>].

Esto se puede observar en la Figura 13, en donde también se muestra una vista inferior de la Viga V3.

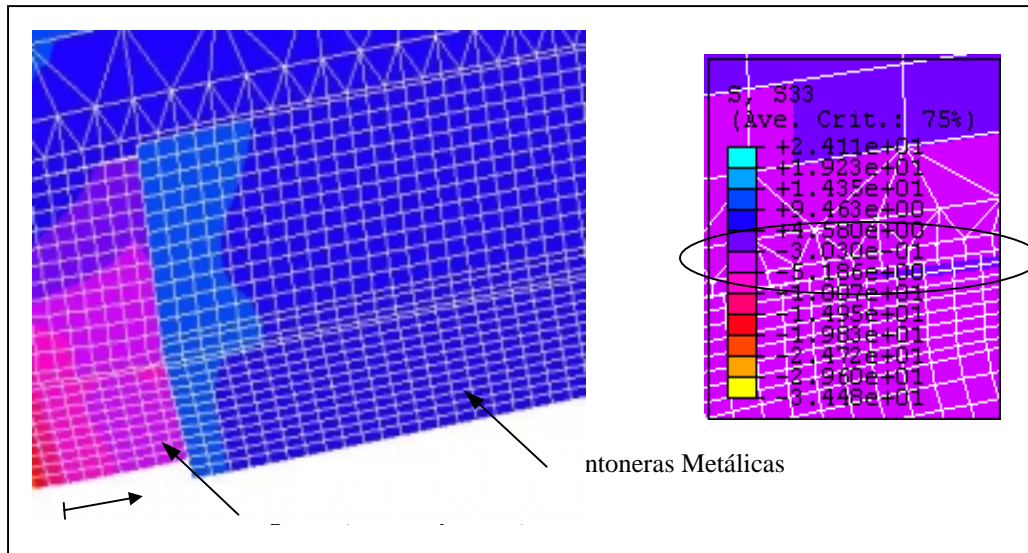


Figura 13. Distribución de tensiones en el extremo del refuerzo en viga V3 [kg/cm<sup>2</sup>].

## 7 CONCLUSIONES

- En elementos estructurales reforzados, generalmente son los modos de falla locales los que fijan la carga última de los mismos.
- La falla por peel off o desgarramiento del refuerzo a través del recubrimiento de hormigón, en vigas de hormigón armado reforzadas con planchuelas metálicas o de material compuesto, es la más frecuente en estos tipos de refuerzos.
- Los ensayos experimentales muestran claramente la necesidad de asegurar el anclaje del refuerzo y se propone esta técnica de cantonerías como una de las formas para lograrlo.
- Los modelos numéricos desarrollados predicen con bastante precisión la carga de rotura del elemento reforzado. Permiten, a su vez, analizar la distribución de tensiones y controlar las tensiones máximas de desgarro en el extremo del refuerzo constituyendo una herramienta útil para el diseño del sistema de anclaje.

## 8 REFERENCIAS

- [1] Jones, R., Swamy, R.N., Bloxham, J. And Bourderbalah, A. , "Composite behaviour of concrete beams with epoxy bonded external reinforced". Int. J. Cem. Comp. 2/2. 91-107.(1980).

- [2] Almakt, M.M., Balázs, G.L. and Pilakoutas, K. , "Strengthening of RC elements by CFRP plates local failure". 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering 1998 Budapest.(1998)
- [3] Chadon Lee, Yong-Soo Shin, And Hak-Ju Lee, "Parametric Studies on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened at Different Loading Stages". Chung Ang University, Lab. RECSA, Korean.(2000).
- [4] Campagnolo, J.L., Campos Filho, A., and Pinto da Silva Filho, L.C., "Procedimentos para determinação da carga de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas com chapas de aço coladas.". Memorias XIV Jornadas Argentinas de Ing. Estructural – Tomo I – Pg. 155-169.(1998).
- [5] Miller, B., Nanni, A., and Bakis, C. E., "Analytical Model for CFRP Sheets Bonded to Concrete". Proc. 8th Inti Structural Faults and Repair Conf. , M.C. Forde, Ed., Engineering Technics Press, Edinburgh, Scotland, 1999, 10 pp. CD-ROM version.(1999).
- [6] El-Refaie, Ashour, Garrity, "Premature Failure of RC continuous beams strengthened with CFRP laminates". Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction Conference, 15-17 Abril, 2002, Southampton, UK, pp 165-175.(2002).
- [7] Guedes, Moreno, Lopes, "Comportamento à flexão de vigas danificadas de concreto reforçadas com chapas de aço". CONPAT 99, Tomo 2, Pag.721 a 729.(1999).