

Simulación numérica del comportamiento a cortante en fase fisurada y última de vigas de hormigón armado reforzadas con bandas pretensadas de acero inoxidable

Modelling of RC beams retrofitted in shear with pretensioned stainless steel ribbons

Noemí Duarte Gómez^a, Jesús Miguel Bairán^b y Antonino Recupero^c

^a Dra Ingeniera Civil, Universitat Politècnica de Catalunya. Profesora lectora. noemi.duarte@upc.edu

^b Dr Ingeniero de Caminos, Universitat Politècnica de Catalunya. Catedrático. jesus.miguel.bairan@upc.edu

^c Dr Ingeniero Civil, Università di Messina. Catedrático. antonino.recupero@unime.it

RESUMEN

En esta comunicación se estudia el comportamiento de elementos de hormigón armado reforzados a cortante con bandas externas de acero inoxidable pretensas. Para ello se analizan numéricamente dos disposiciones de refuerzo, una en la que se envuelve la sección completa y otra en la que el refuerzo se aplica en una altura parcial. El modelo se valida mediante la comparación con resultados experimentales de diversas vigas ensayadas y sirve para determinar las diferencias principales entre el comportamiento a cortante de elementos reforzados con armadura interior adherida tradicional y refuerzo externo no adherido, cuantificando aquellos aspectos relevantes para el diseño práctico de la rehabilitación a cortante de estructuras existentes, tales como el incremento de tensión en las bandas en la fase post-fisurada y hasta rotura, el inicio de la fisuración, entre otros.

ABSTRACT

In this work the behaviour of reinforced concrete elements strengthened against shear with externally pre-tensioned stainless-steel bands is studied. To his aim, two reinforcement arrangements are modelled and studied numerically: one that wraps the entire section and another with partial wrapping of the cross-section. The analysis is validated through comparison with experimental results from various tested beams and is used to determine the main differences in shear behaviour between elements reinforced with traditional adhered internal reinforcement and externally non-adhered reinforcement. It quantifies relevant aspects for the practical design of shear rehabilitation of existing structures, such as the increase in stress in the bands in the post-cracked stage up to failure, cracking initiation, among others.

PALABRAS CLAVE: Hormigón armado, Refuerzo externo, Cortante, Análisis no lineal

KEYWORDS: Reinforced Concrete, External Strengthening, Shear, Non Linear Analysis

1. Introducción

La necesidad de reforzar estructuras existentes de hormigón, que han sufrido daños por acciones externas, uso o procesos de deterioro como la corrosión, es cada vez más

frecuente. Este tipo de intervenciones debe compatibilizar el efecto del refuerzo para cargas de uso y eventos extraordinarios, como terremotos, así como la constructibilidad. Para

ello, se necesitan metodologías eficientes, simples y económicas para el refuerzo de estructuras que incluyen el encamisado de hormigón mediante laminados de acero, polímeros reforzados con fibra (FRP), entre otros como se recoge en [1]. En este contexto, surgió en Italia la técnica de CAM, acrónimo de “*Confinamiento Attivo de Muratura*”. Esta técnica fue inicialmente concebida para el refuerzo de estructuras de mampostería y fábrica no armada; más recientemente, fue adaptada a construcciones de hormigón. Su característica principal radica en su capacidad para aumentar la resistencia y la ductilidad de los elementos estructurales individuales mediante el uso de bandas de acero inoxidable pretensadas que envuelven total o parcialmente la sección a reforzar, ver Figura 1. Estas bandas se anclan sobre la sección mediante chapas y perfiles angulares previamente dispuestos, hecho que, a su vez, proporcionan un efecto de confinamiento beneficioso sobre la sección. El tesado y cierre de cada banda se ejecuta mediante un sistema de sello o hebilla incorporado en la misma, permitiendo así dar continuidad a las fuerzas de tracción generadas entre los extremos de las bandas, soportando así los esfuerzos de trabajo activo y pasivo del refuerzo. Se trata de una técnica fácil de implementar y que particularmente resulta de interés en aquellos elementos que deban ser reforzados a cortante.



Figura 1. Sistema de refuerzo CAM. Detalle de bandas y pletinas

Si bien, algunos estudios experimentales han demostrado las ventajas en la mejora de la resistencia y ductilidad, el mecanismo resistente

del sistema no está completamente comprendido, particularmente en la transición desde la fisuración hasta la rotura. Por ello, el nivel de tensión a considerar en las bandas en Estado Límite Último (ELU) se define de forma empírica. Es por ello que el principal objetivo de esta investigación es profundizar en la comprensión del comportamiento mecánico de los elementos de hormigón armado reforzados al corte con CAM mediante la simulación numérica detallada de una campaña experimental previa, desarrollada por Colajanni et al. [2], en la que se estudia experimentalmente el comportamiento de elementos de hormigón armado (HA) reforzados con el sistema CAM.

2. Análisis de los resultados experimentales

La campaña experimental presentada en [2] se compone de vigas de 145 cm de longitud y sección rectangular con un ancho de 15 cm y un canto de 35 cm ensayadas bajo carga cíclica. El armado de la viga se consiste de $3\phi 18$ dispuestos longitudinalmente y de cercos $\phi 6$ dispuesto cada 200 mm. El límite elástico de las armaduras, caracterizado experimentalmente, se situó entre 542-525 MPa, mientras que la resistencia observada fue 625 MPa. El hormigón utilizado fue de baja resistencia, $f_c = 12.4 \text{ MPa}$, con el objetivo de simular la resistencia de hormigón usado en estructuras antiguas.

Se estudiaron dos configuraciones refuerzo exterior. En el primer tipo se aplica un refuerzo total en el que las bandas se disponen envolviendo toda la sección transversal (TG-T-3N-P20), ver Figura 2. El segundo tipo es parcial, en el que sólo se envuelve la parte inferior del elemento, siendo esta configuración usada en algunas vigas con losa de compresión. La campaña experimental consta de un total de 9 vigas, de forma que se tenían tres configuraciones idénticas (A, B y C) para los dos tipos de refuerzo, total y parcial, así como 3

especímenes de referencia sin refuerzo ensayadas hasta rotura con un protocolo de carga cíclica.

En los dos tipos de refuerzo se usan 3 bandas de acero inoxidable superpuestas una sobre la otra y separadas cada 200 mm, disponiéndose de forma intercalada con la posición de los cercos interiores. Cada una de las bandas tiene un ancho de 19 mm y un espesor de 0.9 mm, esto representa un área total de refuerzo transversal de 102.6 mm². Las bandas se tesan al 20% de su límite elástico, esto es una tensión de tesado de 185 MPa [2].

Cilia [3] estudió el efecto del sello sobre la capacidad a tracción de la banda. En ese estudio se observó como la presencia del sello disminuye los valores de la tensión de cedencia y deformación máxima soportada por el sistema banda-sello así como el valor aparente del módulo elástico, ver Figura 2. Mientras la tensión de plastificación de la banda de acero sin sello se sitúa en torno a los 1000 MPa, las bandas ensayadas a tracción con el sello muestran valores de cedencia entre 800-900 MPa. Para considerar el efecto de sello de cierre de la banda, Cilia recomendó usar un valor del límite elástico de 755 MPa, como límite inferior de la tensión de plastificación.

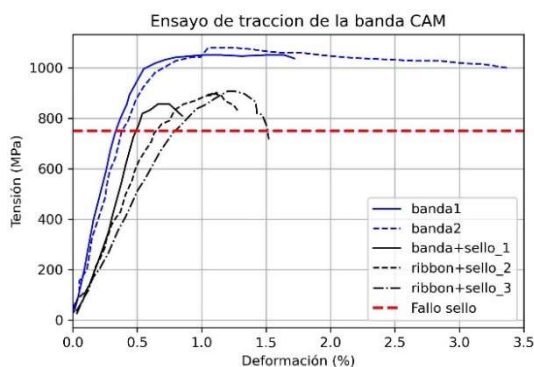


Figura 2. Caracterización a tracción de las bandas

En la Tabla 1 se resumen los valores de carga máxima y desplazamiento en el centro de vano de los diversos ensayos. Todos los especímenes fallaron a cortante con una resistencia inferior a la capacidad teórica a flexión.

Comparando los valores numéricos de la Tabla 1, puede deducirse que la contribución del refuerzo incrementa la resistencia a cortante de los elementos. Para las vigas reforzadas con envoltura total de la sección (I), la resistencia aumentó en torno al 50% mientras que para los elementos reforzados envoltura parcial de la sección (P), el incremento de resistencia se sitúa sobre el 20%.

Tabla 1. Valores máximos de carga y flecha experimental

TG*	A		B		C	
	P _{max} (kN)	δ _u (mm)	P _{max} (kN)	δ _u (mm)	P _{max} (kN)	δ _u (mm)
NR	188.7	21.9	187.6	18.4	188.5	18.3
P	230.2	20	228.7	20	226.7	31.1
T	271.7	14.6	290.8	22.2	268.3	19.2

** TG-3N (3 bandas), 20P (separación bandas 200 mm).

NR:sin refuerzo, P: refuerzo parcial, T: refuerzo total.

La figura 3 muestra las curvas carga-desplazamiento de las vigas ensayadas. Nuevamente se observa cierta variabilidad en algunos valores de desplazamiento y carga máxima pese y a tratarse de elementos nominalmente idénticos.

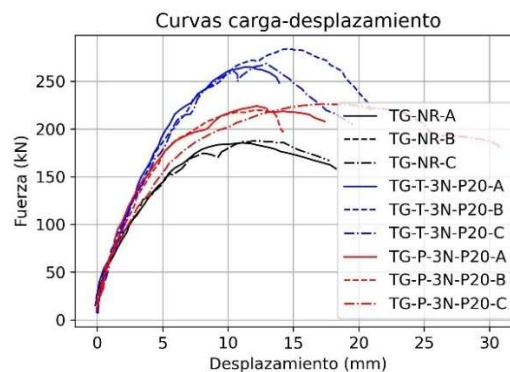


Figura 3. Curvas carga-desplazamiento experimentales

3. Mecanismo resistente a cortante observado del sistema de refuerzo CAM.

Todas las vigas se reforzaron usando tres capas superpuestas de CAM, cada una con su

propio sello o hebilla. Tras la instalación y pretensado de las tres bandas se dispusieron galgas extensométricas sobre la banda exterior con la finalidad de estudiar el comportamiento del refuerzo durante el proceso de carga, analizando también la posible influencia del sello en la respuesta de las vigas. Las galgas se colocaron sobre las bandas exteriores cerca de la posición de sello en la viga TG-T-N-20P/A y en la cara sin sello en los especímenes TG-T-N-20P/B-C. No se dispuso instrumentación sobre las armaduras internas de las vigas.

Las figuras 4 y 5 describen el patrón de fisuración en rotura y la nomenclatura de las galgas dispuestas sobre la cara de la banda CAM opuesta a su sello. Las galgas #2 y #8 coinciden con la posición #3 y #6 en las dos tipologías de refuerzo planteadas, pero situándose en la cara opuesta, cerca del sello de anclaje, de esta manera se puede monitorizar el comportamiento de la banda en el lado donde se sitúa la hebilla de cierre y en su opuesto.

En la figura 4 se observa como la fisuración diagonal afecta principalmente a las bandas CAM #3 y #6, con ángulos entre 45-50°, la banda #1 queda también afectada por la fisuración en su parte inferior. El patrón observado en el espécimen TG-T/B es similar al de todas las vigas reforzadas en toda la sección.

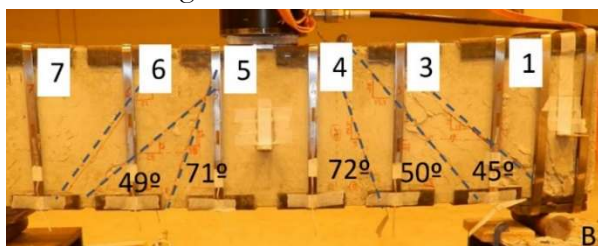


Figura 4. Fisuración diagonal en rotura y nomenclatura de las bandas. Viga TG-T-N-20P/B

La presencia de los orificios intermedios modifica el patrón de fisuración en los elementos parcialmente reforzados, ver figura 5. En estos se observa como el campo de fisuración diagonal queda modificado por la presencia de los puntos de anclaje del sistema CAM.

La figura 6 muestran la evolución de la tensión de tracción registrada por las galgas #3,6

y la #1 del elemento TG-T/B (elemento con mayor carga máxima). Las galgas se instalaron posteriormente al tesado y por ello la deformación medida fue la generada por la carga exterior aplicada.

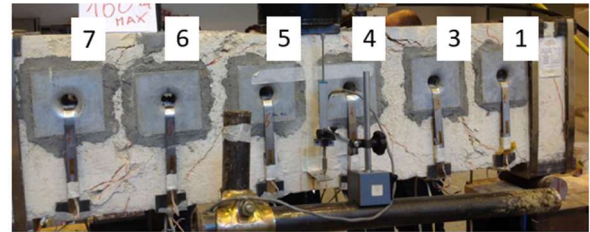


Figura 5. Fisuración diagonal en rotura y nomenclatura de las bandas. Viga TG-P-N-20P/A

En la Fig. 6 se puede observar cómo las bandas afectadas por las fisuras (#3 y #6) presentan una mayor deformación que la banda #1, esto evidencia una fuerte dependencia entre la deformación de la banda de refuerzo y el desarrollo del daño por fisuración diagonal. La deformación máxima medida por las galgas extensométricas es ligeramente superior a 3600 $\mu\text{mm/mm}$. Si a este valor se suma la deformación introducida durante el tesado de la banda (estimada 950 $\mu\text{mm/mm}$), se puede inferir que las bandas #3 y #6 superan el valor de cedencia planteado por Cilia en [3] para el caso de banda con sello.

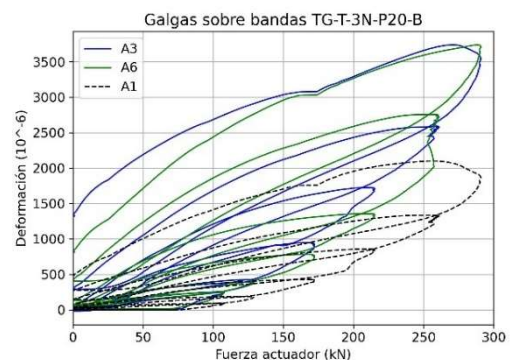


Figura 6. Deformación experimental de las galgas #6,3,1 en el vano de cortante del elemento TG-T-3N-20P/B.

En la figura 7 se observa como la deformación experimental de la galga extensométrica #2, la cual estaba situada en la cara opuesta a la #3, cerca del sello. Se aprecia que la deformación en esta zona es inferior a la

de la de la cara sin sello, galga #3. La diferencia de tensión entre caras es mas notable en aquellos elementos en los que las bandas alcanzan deformaciones altas próximas al límite elástico de las mismas.

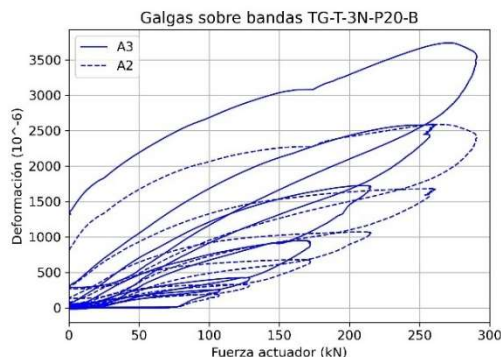


Figura 7. Deformación experimental de las galgas #3,2 en el vano de cortante del elemento TG-T-N-20P/B.

Finalmente, en la figura 7 se representa la deformación de las galgas #6 y #8 (galgas sobre la misma banda, pero en caras opuestas) en el espécimen TG-P/A. En los elementos con refuerzo parcial se observa que las bandas presentan menor deformación, manteniéndose siempre en rango elástico y un comportamiento más simétrico entre las galgas de las dos caras.

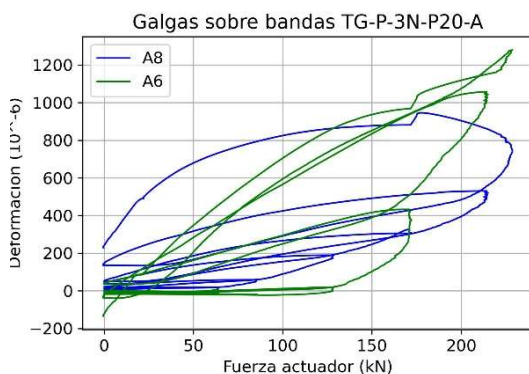


Figura 8. Deformación experimental de las galgas #3,2 en el vano de cortante del elemento TG-P-3N-20P/A.

A partir de la instrumentación dispuesta y de los valores de carga-desplazamiento registrados durante el ensayo, se analiza el comportamiento estructural del refuerzo a cortante mediante el sistema CAM observándose 3 etapas claramente diferenciadas y que quedan

descritas en la figura 9. Las tres fases se pueden resumir en:

-Fase 1: Fase de deformación elástica que se desarrolla entre el inicio de carga exterior y el punto A. En esta fase la banda no registra incremento de deformación con el incremento de carga exterior. El punto A se sitúa en valores de carga similares en todos los elementos y está relacionado con el inicio de la fisuración diagonal del vano de cortante.

-Fase 2: Fase comprendida entre los puntos A y B. En esta fase la banda presenta una deformación elástica, con incrementos de deformación casi lineales con el nivel de carga. En esta fase se contempla una recuperación total de las deformaciones durante los ciclos de carga y descarga. La pendiente de esta segunda fase varía entre bandas y depende de cómo el campo de fisuración diagonal afecta a la banda de refuerzo.

-Fase 3: La pendiente de esta tercera fase es mayor a la anterior, es decir la banda de refuerzo incrementa notablemente las deformaciones con la carga exterior. En esta fase se observan deformaciones plásticas tras las descargas. Estas deformaciones plásticas se incrementan a medida que la banda incrementa su tracción acercándose a valores de tensión próximos a su límite elástico.

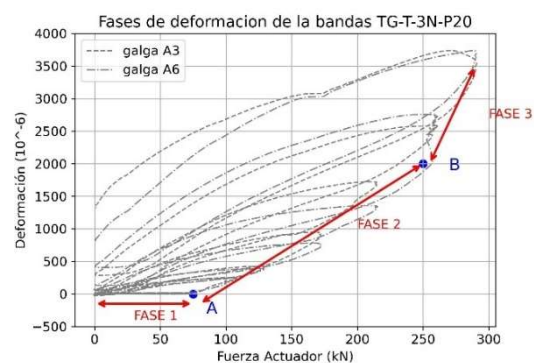


Figura 9. Fases de deformación de las bandas de refuerzo CAM observadas experimentalmente.

En aras de analizar los mecanismos resistentes del refuerzo que definen cada una de las tres fases descritas, se plantea un análisis numérico de los elementos ensayados con el que

mejorar la compresión de los parámetros que gobiernan el problema.

4. Modelización numérica y análisis del sistema de refuerzo

4.1 Descripción del modelo

Se realizó un modelo no-lineal de los elementos de la campaña experimental para estudiar en detalle el mecanismo descrito en las fases observadas, se modelizan las diversas vigas ensayadas con y sin refuerzo mediante el programa comercial DIANA 10.7 [4] con el que capturar la envolvente experimental de los ciclos de carga. Para ello, se realiza un estudio numérico usando una malla fina de elementos rectangulares de segundo orden tipo membrana de 5mm (CQ16M). Las armaduras pasivas internas de las vigas se modelizan usando elementos embebidos en la matriz de elementos 2D asumiendo adherencia perfecta. El refuerzo de bandas CAM se simula mediante elementos 1D tipo TRUSS conectados a la viga en las pletinas de anclaje también incluidas en el modelo.

La geometría del modelo numérico para la solución de refuerzo a sección completa del sistema CAM se muestra en la figura 10, en la que se aprecia como el refuerzo se sitúa al tresbolillo de los cercos interiores de la viga. La figura 11 a su vez muestra la geometría del modelo numérico con el que se realiza la simulación e las vigas reforzadas parcialmente. En la solución de refuerzo parcial se simulaban las oberturas realizadas sobre el alma de la sección sobre la que se realiza el anclaje de las bandas.

La no linealidad del hormigón se simula mediante un modelo de fisuración distribuida [5] reproduciendo el comportamiento a tracción mediante una curva de Thorenfeld con un valor de energía de fractura de valor ($G_f = 0.05$ N/mm), propio de hormigones de bajo resistencia. Para reproducir el modo de fallo por

cortante, se consideró el efecto del campo de tracciones diagonales mediante un modelo de reblandecimiento basado en el modelo de Vecchio-Collins. Se realizaron simulaciones utilizando las versiones del modelo Vecchio & Collins MP (1986) [6] y Vecchio & Collins MP (1993) [7], con un valor límite $\beta=0.6$, con el fin de estudiar la sensibilidad de la respuesta numérica. En lo que sigue, nos referiremos a estos modelos como VC86 y VC93, respectivamente. Todos los elementos de acero, es decir, el refuerzo interno de acero, las bandas CAM y las placas de acero, fueron modelados utilizando un material elastoplástico con criterio de fluencia de von Mises, considerando los valores de límite elástico experimentales obtenidos para el acero pasivo y aplicando la limitación propuesta por Cilia para las bandas de refuerzo.

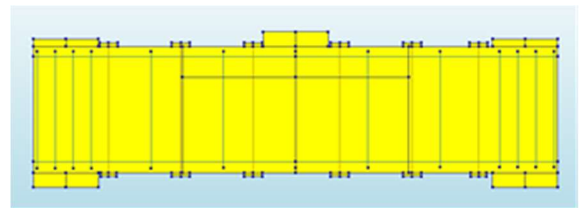


Figura 10. Geometría del modelo numérico de viga reforzada totalmente. Elementos tipo TG-T.

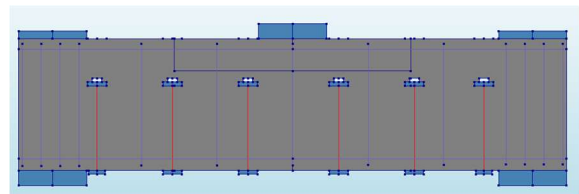


Figura 11. Geometría del modelo numérico de viga reforzada totalmente. Elementos tipo TG-P.

Se realizaron una serie de análisis preliminares de las vigas no reforzadas (TG-NR), con los que se calibraron algunos parámetros de los materiales no detallados en la campaña de Colajanni [2], como la resistencia a la tracción y la energía de fractura del tipo específico de hormigón utilizado, así como se determinó la flexibilidad de los soportes de los especímenes. La flexibilidad de los soportes se estimó en 37 kN/mm, mediante comparación de la rigidez inicial del modelo y del elemento sobre el montaje estructural, se observó que esta

rigidez ajustaba adecuadamente la relación flecha-carga numérica con la experimental en todos los ensayos tanto en fase elástica como en rotura, ver figura 12.

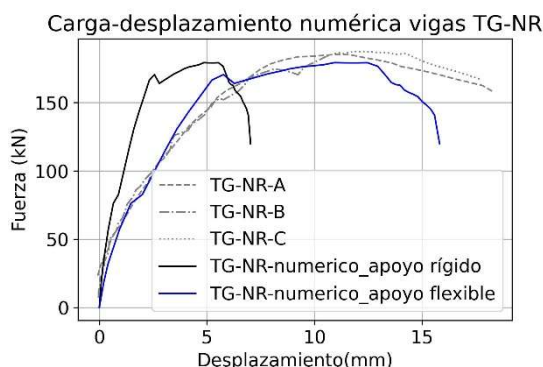


Figura 12. Efecto de la rigidez de los apoyos en la simulación numérica de las vigas no reforzadas

El modo de rotura observado en el modelo numérico de referencia (sin refuerzo) fue de cortante, en que las barras longitudinales permanecen elásticas y se produce la plastificación de los estribos (ver figura 13). En la fase de rotura se observó aplastamiento del hormigón y un patrón de fisuración inclinadas en el alma con aberturas de fisuras similares a las observadas experimentalmente (ver figura 14).

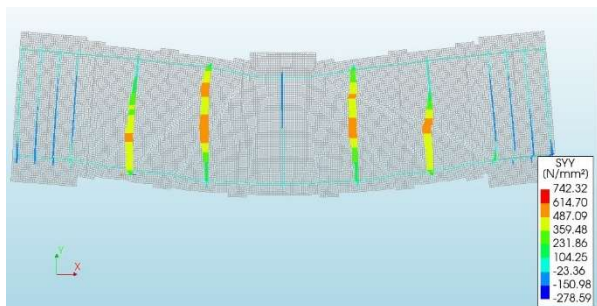


Figura 13. Tensiones de tracción en armadura transversal interna en las vigas no reforzadas (TG-NR)

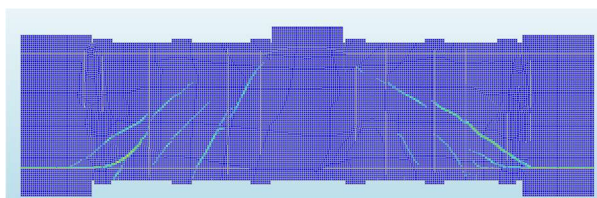


Figura 14. Fisuración diagonal en rotura de las vigas no reforzadas (TG-NR)

4.2 Análisis numérico de las vigas con refuerzo total

La contribución activa del sistema CAM se simuló aplicando simultáneamente una tensión inicial de 185 MPa a cada una de las tres bandas que conforman el refuerzo. Es decir, como simplificación, en esta fase del estudio no se simularon las fases de aplicación del pretensado en cada banda. Al aplicar dicha tensión se obtuvieron cargas de pretensado 17.9 kN. Esta fuerza es menor a la aplicada durante el tesado de 19 kN, lo cual puede explicarse por el efecto del acortamiento elástico durante el tesado simultaneo de las bandas, el cual es menor que si se hubiera aplicado por fases, ver figura 15.

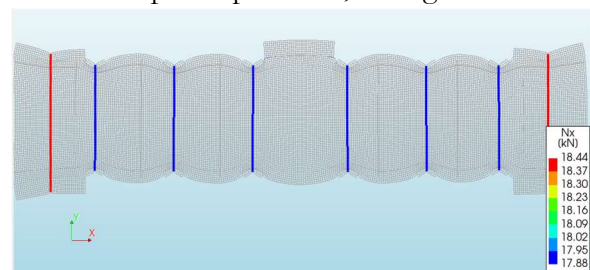


Figura 15. Efecto de la rigidez de los apoyos en la simulación numérica de las vigas no reforzadas

En la simulación numérica se observó cómo los modelos de reblandecimiento a compresión anteriormente descritos, VC93 y VC86, ofrecen una cota inferior y superior de la respuesta experimental observada.

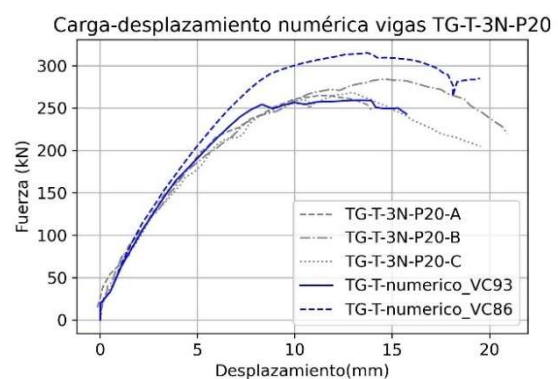


Figura 16. Curvas Carga-desplazamiento numérica y experimental de las vigas TG-T

El modelo VC93 es el que más se acerca a la respuesta de los elementos tipo A y B, mientras que el VC86 produce una respuesta

más próxima al elemento tipo C, viga en la que se alcanzó una carga de rotura superior tal y como se describe en la figura 16.

Considerando una deformación previa de tesado de las bandas del 20% de su límite elástico, descrita en [2], en la figura 17 se compara la deformación numérica y experimental de las galgas #3/6, galgas con mayor deformación de las vigas totalmente reforzadas A y C, elementos presentan una respuesta muy similar. Para estos elementos el modelo de VC93 es representativo de la respuesta de la banda. Se observa como la deformación numérica de la banda de CAM reproduce lo observado durante el ensayo a través de las galgas extensométricas. El modelo numérico captura el inicio de la fisuración de la viga, esto es la posición del punto A, y permite relacionar el final de la segunda fase, con la plastificación de los cercos interiores. Es decir, se puede establecer que el cambio de fases 2-3 está determinado por la plastificación de la armadura transversal interior.

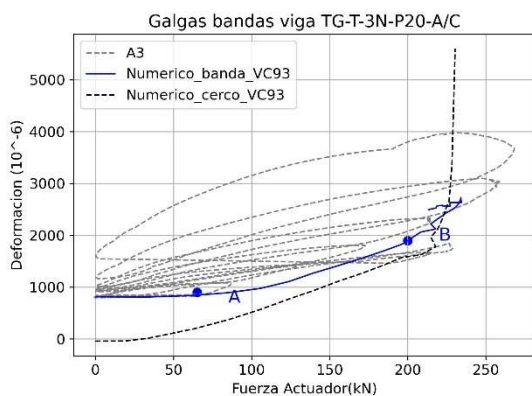


Figura 17. Deformación experimental y numérica de las bandas y cercos versus carga externa en las vigas TG-T-3N-P20-A/C

Finalmente, en la figura 18 se comparan la deformación numérica y experimental de las galgas con mayor deformación, galgas #3/6 de las vigas totalmente reforzadas. Para esta viga que presenta casi 10% más de carga que las anteriores las galgas dispuestas muestran una posible plastificación de las bandas #3/6. Este comportamiento se captura mediante un modelo de VC86, modelo con un reblandecimiento

menor a compresión. Nuevamente el modelo es consistente, el modelo numérico captura el inicio de la fisuración de la viga, esto es la posición del punto A, y permite relacionar el final de la segunda fase, con la plastificación de los cercos interiores, posición del punto B.

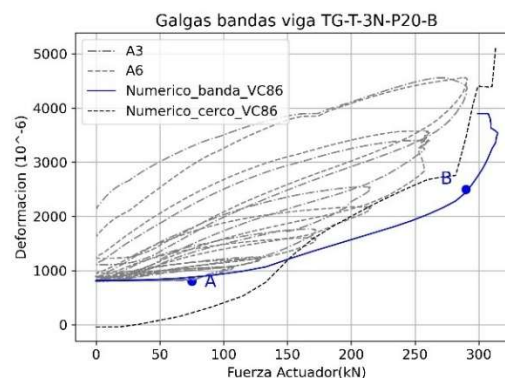


Figura 18. Deformación experimental y numérica de las bandas y cercos versus carga externa en las vigas TG-T-3N-P20-B

4.3 Análisis numérico de las vigas con refuerzo parcial

En la Figura 10 se compara la respuesta experimental de los especímenes tipo TG-P-3N-P20, en los que el refuerzo envuelve parcialmente la sección transversal. En este caso, se observa dispersión en el valor de la carga máxima alcanzada en los 3 especímenes, si bien existen diferencias en la deformación última medida.

Nuevamente se comprueba que, considerando las mismas tensiones de tesado sobre la banda que en análisis anterior, el modelo VC93 permite captar las fases de la banda descritas en el apartado 2. Tal y como se aprecia en la figura 20 la plastificación del cerco determina el cambio de comportamiento de la banda. En estos elementos sin embargo la rotura se alcanza con una deformación inferior del refuerzo, es decir, el refuerzo es menos efectivo tal y como se observa con los menores valores de carga obtenidos experimentalmente.

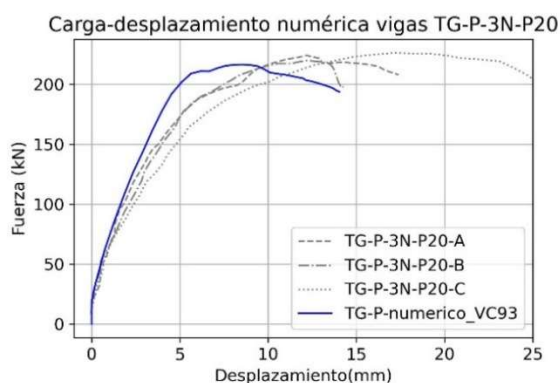


Figura 19. Curvas Carga-desplazamiento numérica y experimental de las vigas TG-P

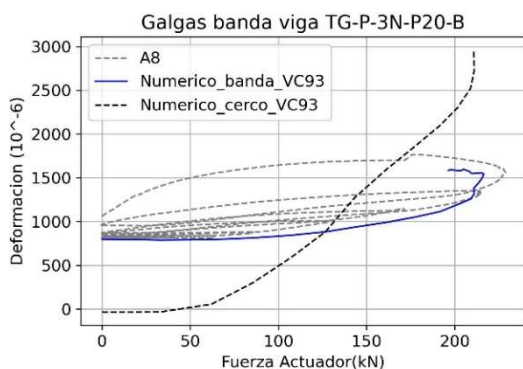


Figura 20. Deformación experimental y numérica de las bandas y cercos versus carga externa en las vigas TG-P-3N-P20-B

En [8], Cladera et al analizan la contribución de la cabeza de compresión sobre la resistencia a cortante. Mientras que en el refuerzo total las bandas de CAM contribuyen a confinar la cabeza comprimida, en la solución con refuerzo parcial el anclaje se sitúa por debajo de la misma no contribuyendo a mejorar su resistencia a compresión. En los elementos ensayados la posición de la fibra neutra se sitúa a 200 mm de la fibra más comprimida; es decir, para el caso del refuerzo parcial, el refuerzo no llega a anclarse dentro de la cabeza de compresión.

Adicionalmente, la perforación necesaria para poder instalar el sistema CAM genera zonas de debilidad entorno a la posición de la fibra neutra, donde el valor del esfuerzo cortante es alto. En la figura 21 se representa el daño capturado numéricamente en la zona del anclaje del refuerzo. En la figura se aprecia como el anclaje de las bandas genera un daño previo que

incrementa con el nivel de carga. Como resultado la cabeza de compresiones se debilita, ver figura 22, y falla a compresión. Esto contribuye a reducir la eficacia del refuerzo parcial alcanzándose cargas menores. El uso de refuerzos parciales debe ser analizado con mayor detalle en estudios futuros para mejorar la respuesta de la contribución del sistema CAM en estos casos.

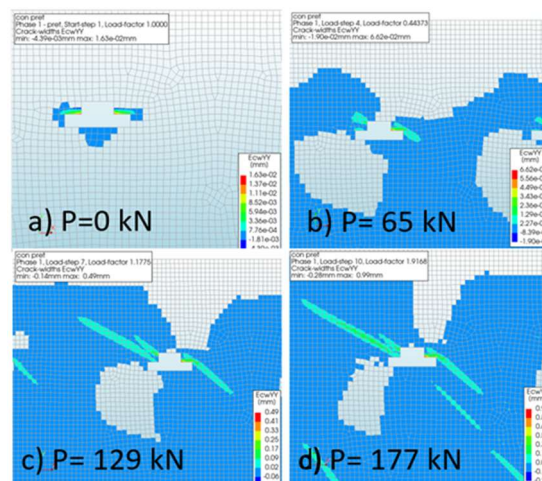


Figura 21. Evolución de las fisuras en el anclaje de la banda con el incremento de la carga

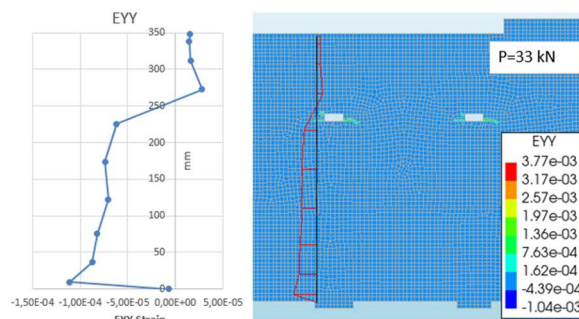


Figura 22. Deformaciones ε_{yy} en la zona próxima al anclaje

5. Conclusiones

Se ha investigado el comportamiento mecánico de vigas de hormigón reforzadas al cortante con bandas de acero inoxidable pretensadas a través del sistema CAM. Para ello se analiza numéricamente la campaña experimental descrita en [2] modelizándose dos tipos de refuerzos con CAM, un refuerzo total en el que las bandas envuelven toda la sección y

otro de tipo parcial en el que el refuerzo abraza la sección por debajo de su fibra neutra. El modelo numérico permitió obtener información complementaria y una explicación física del comportamiento estructural.

Ambas configuraciones de refuerzo investigadas mostraron tres fases distintivas en el comportamiento mecánico de las bandas. La primera fase termina con la iniciación de las fisuras, lo que provoca incrementos en las deformaciones de las bandas. El límite entre la segunda y tercera fases se identificó con la plastificación del refuerzo transversal interior. Después de esta etapa, las deformaciones en las bandas aumentan drásticamente.

Se observó una menor eficiencia en los especímenes parcialmente envueltos debido a dos aspectos principales, el anclaje del refuerzo se sitúa por debajo de la fibra neutra y por tanto no contribuye a confinar la cabeza de compresiones y a su vez, la presencia de la placa de anclaje intermedia induce concentraciones de tensión y fisuración desde la etapa inicial.

Las investigaciones futuras se centrarán en el desarrollo de un modelo mecánico conceptual y recomendaciones para fines de diseño, así como en el análisis detallado de las pérdidas de pretensado durante la aplicación del refuerzo.

Agradecimientos

Este estudio se desarrolló en el marco de los proyectos de investigación PID2021-123701OB-C21, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER) “A way to make Europe”, y TED2021-130272B-C21 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 “Unión Europea NextGenerationEU/PRTR”. Los autores también expresan su agradecimiento al Consejo Superior de Obras Públicas de Italia (CC.SS.LL.PP.) y a la Red de Laboratorios Universitarios de Ingeniería Sísmica (ReLUIIS).

Referencias

- [1] UNE-EN 1998-1:8 Eurocódigo 8: Proyectos de estructuras sismoresistentes. Parte 1. Reglas Generales.
- [2] Colajanni P., Recupero A., Spinella N. Increasing the shear capacity of reinforced concrete beams using pretensioned stainless steel ribbons. *Structural Concrete*;2017;18(3):444-453.
- [3] Cilia, M. & Marnetto, R. Report di prova delle travi e analisi risulti. INnovazione del CAM Mediante Impiego di Nuove Opzioni di processo.
- [4] DIANA FEA BV, 2023, DIANA Documentation Release 10.7. Thijssseweg 11, 2629 JA Delft, The Netherlands.
- [5] Rots, JG, Cracks models for concrete: discrete or smeared, Heron, Vol. 34,1989.
- [6] Vecchio F.J. & Collins MP, 1986, “The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear”, *ACI-Journal*, Vol. 83, N° 2, 219-223.
- [7] Vecchio F.J. & Collins MP “Compression Response of Cracked Reinforced Concrete”, *ASCE J. Structural Engineering*, Vol 119, N° 12, 3590-3610.
- [8] Cladera A., Marí A., Bairán J.M., Ribas C, Oller E, Duarte, N. (2016), The compression chord capacity model for the shear design and assessment of reinforced and prestressed concrete beams. *Structural Concrete*, 17: 1017-1032.
<https://doi.org/10.1002/suco.201500214>