

# AVANCES EN MODELOS DE ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE BARRAS DE HORMIGÓN FRENTE A COMBINACIONES DE ESFUERZOS NORMALES Y TANGENTES

Jesús M. Bairán, Antonio R. Marí, Steffen Mohr y Denise Ferreira

Departamento de Ingeniería de la Construcción, ETSECCPB, UPC  
[jesus.miguel.bairan@upc.edu](mailto:jesus.miguel.bairan@upc.edu), [antonio.mari@upc.edu](mailto:antonio.mari@upc.edu), [steffen-mohr@upc.edu](mailto:steffen-mohr@upc.edu),  
[denise.carina.santos@estudiant.upc.edu](mailto:denise.carina.santos@estudiant.upc.edu)

**Palabras Clave:** cortante, hormigón, interacción esfuerzos, elementos barra, acción sísmica

**Resumen:** *A pesar del gran desarrollo de los modelos de barras para el análisis estructural, estos modelos presentan, en general, carencias importantes cuando las estructuras son sensibles a esfuerzos tangenciales (cortante, torsión) o cuando existen estados tridimensionales complejos. Estas solicitaciones, muy comunes en las estructuras de ingeniería civil, son mucho más complejas de analizar en el caso de materiales que presentan comportamiento anisótropo dependiente de la carga, como es el caso del hormigón armado. Se presentan los modelos desarrollados en los últimos años para tener en cuenta este comportamiento satisfactoriamente, facilitando así el análisis de estructuras bajo fuertes combinaciones de esfuerzos normales y tangentes, como pueden darse en estructuras bajo acciones sísmicas.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de barras para el análisis no-lineal de estructuras son muy extendidos tanto en la práctica como en la investigación gracias a la facilidad y rapidez en la construcción de los modelos, interpretación de resultados y su robustez. Sin embargo, en la formulación de estos es necesario aplicar hipótesis cinemáticas –p.e. Navier-Bernoulli o Timoshenko– para describir la distribución de deformaciones en las secciones a partir de los movimientos de las barras que no siempre reproducen satisfactoriamente el comportamiento ante solicitaciones en las que se involucran esfuerzos de cortante, torsión u otros estados multiaxiales.

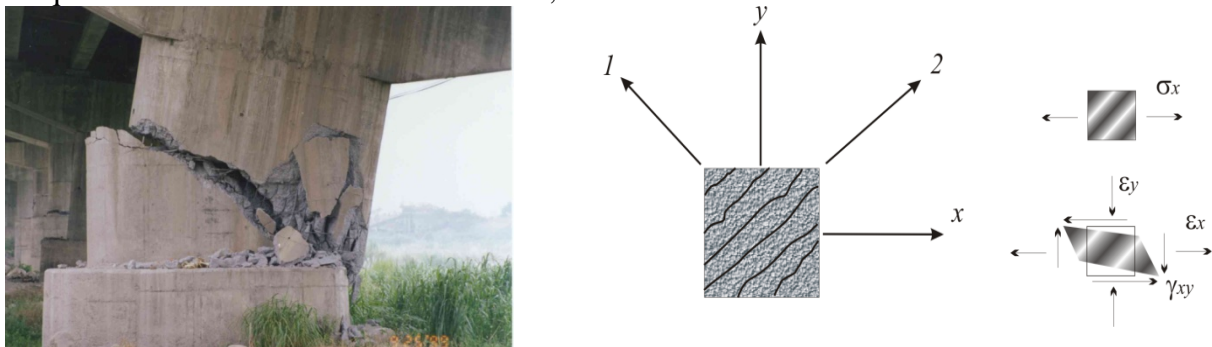


Figura 1. Rotura a cortante por solicitaciones sísmicas y mecanismo anisótropo del hormigón fisurado

Particularmente, el hormigón armado puede presentar ciertos comportamientos anisótropos después de fisurar que son dependientes del estado de fisuración y de las solicitaciones, lo que hace que tanto las distribuciones de tensiones y deformaciones en la sección transversal sean no-lineal y dependientes del estado. Más aún, el mecanismo por el que el hormigón armado resiste esfuerzos de cortante necesita movilizar la distorsión de la

sección transversal para poner en carga las armaduras transversales. Por ello, las hipótesis cinemáticas tradicionales con distribución de deformaciones fijas no son satisfactorias.

## 2. MODELO SECCIONAL DE INTERACCIÓN COMPLETA

En el grupo de investigación se desarrolló un modelo seccional que considera la distorsión y el alabeo de la sección transversal para reproducir estados tensionales tridimensionales mediante análisis seccional [1] llamado TINSA (“*Total Interaction Nonlinear Sectional Analysis*”). Este incluye explícitamente el equilibrio interno entre las fibras de la sección (Fig. 2) y el comportamiento anisótropo del material por lo que es aplicable tanto al hormigón armado con fisuración inclinada como a otros tipos de materiales anisótropos (Figs. 3 y 4).

El modelo ha sido aplicado con éxito al análisis no-lineal, durante todo el rango de cargas hasta rotura, de secciones de geometría arbitraria sometidas a cualquier combinación de esfuerzos axial, flexión esviada, cortante esviado y torsión ( $N-M_{yz}-V_{yz}-T$ ), siendo, hasta la fecha, el único modelo seccional con estas características.

A modo de ejemplo, en la Fig. 4 se muestra la distribución de tensiones principales de compresión y el alabeo en una sección de hormigón armado antes y después de fisurar. Se observa como el modelo predice adecuadamente la formación de una sección tubular equivalente de forma natural y en función de la disposición de armaduras y la sollicitación. El la distorsión y alabeo de la sección transversal se muestra esencial para captar al respuesta después de la fisuración. El modelo ha sido igualmente aplicado a otras situaciones, como, confinamiento de secciones mediante armadura transversal y encamisados con CFRP y acero.

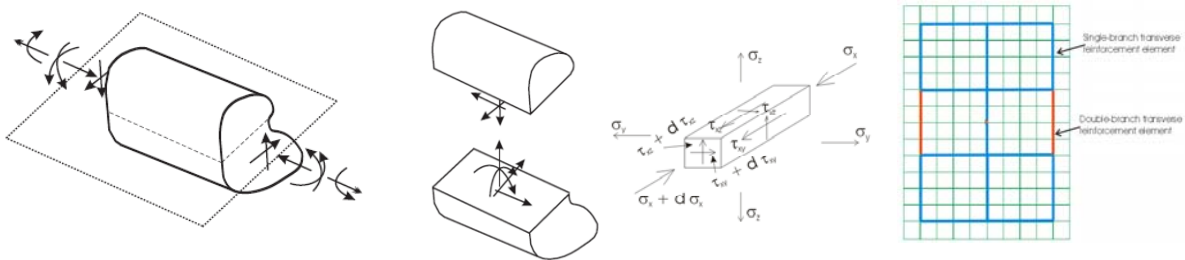


Figura 2. Equilibrio dual a nivel elemento y a nivel sección y representación de armaduras transversales

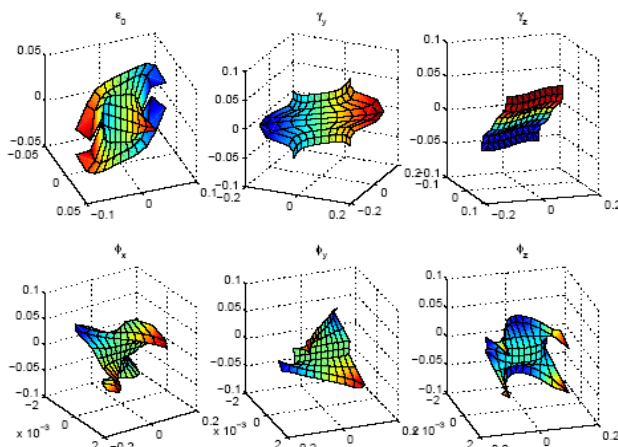


Figura 3. Modos de alabeo –distorsión de sección laminada de materiales compuestos anisótropos (CFRP)

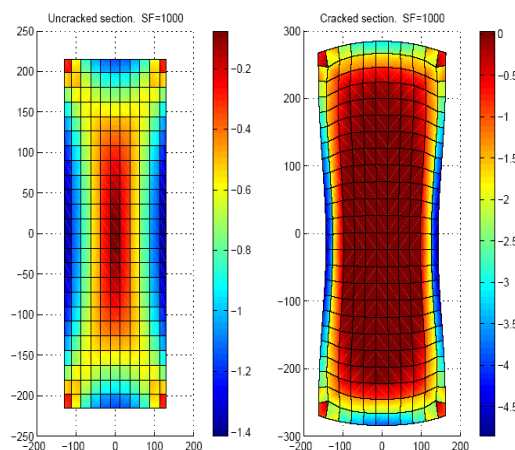


Figura 4. Tensiones principales y alabeo de una sección a torsión antes y después de fisurar

Esta formulación acerca el comportamiento tridimensional completo a los modelos de barra, ampliando su campo de aplicación a otros problemas que tradicionalmente sólo podían ser contemplados mediante análisis sólidos más costosos.

### 3. SIMPLIFICACIONES PARA PROBLEMAS PLANOS

El coste computacional del modelo totalmente tridimensional puede reducirse más a partir de simplificaciones que siguen permitiendo un gran número de aplicaciones. Así pues, se han planteado dos niveles de simplificación para los problemas planos, ambas con muy buenos resultados en cuanto a la interacción axil-momento-cortante (N-M-V) en el hormigón armado.

El primer modelo planteado [2] mantiene las mismas ecuaciones fundamentales del modelo anterior, aplicadas al caso bidimensional, y se aproxima la distribución de alabeo y distorsión mediante series polinómicas (Fig. 5). Se ha determinado que con unos pocos polinomios (entre 3 y 6) es posible captar todo el rango de cargas hasta la rotura de forma muy satisfactoria apreciándose mejoras muy significativas entre otros modelos con otras teorías de viga o inclusive modelos de sólidos (Fig. 7). Este modelo ha sido implementado en elementos barra basados en flexibilidad y aplicado al estudio no-lineal de estructuras hormigón ante solicitaciones estáticas, dinámicas y sísmicas.

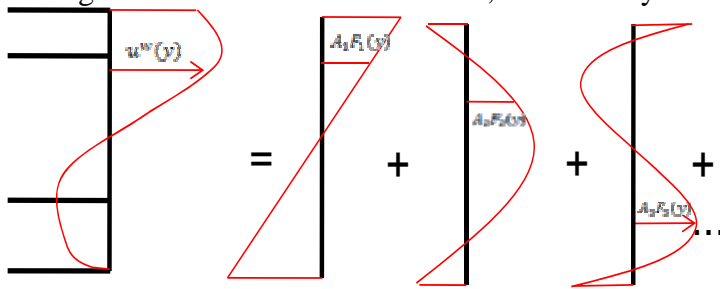


Figura 5. Simplificación 1: series polinómicas

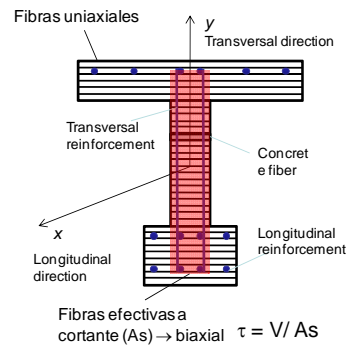


Figura 6. Simplificación 1: modelo seccional híbrido con patrón de tensiones cortante fijo

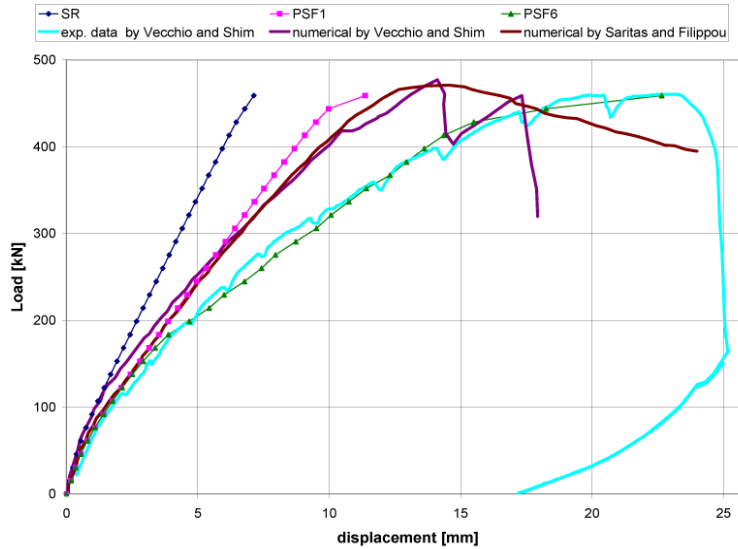


Figura 7. Comparación resultados modelo contra resultados experimentales y otros modelos numéricos

Se ha demostrado que las metodologías con patrones de distribución de deformaciones cortantes fijas no son adecuadas para el hormigón armado fisurado ya que no captan correctamente la respuesta global y los modos de rotura. Sin embargo, el uso de patrones de distribución híbridos, que combinen las distribución de deformaciones longitudinales ( $\epsilon_x$ ) con

patrones de tensiones de cortante predefinidas ( $\tau$ ) produce resultados adecuados. El segundo modelo planteado [3] consiste en el uso de hipótesis seccionales híbridas que combinen hipótesis cinemáticas y de tensiones (Fig. 6). El equilibrio interno se investiga solo en el sentido transversal lo cual pone en carga las armaduras transversales y activa la interacción (N-M-V).

Este modelo ha sido implementado en el programa CONS [4] de análisis no-lineal de estructuras de hormigón que tiene en cuenta efectos del tiempo y construcción evolutiva, para lo que ha sido necesario introducir un elemento finito con deformación de cortante. En la Fig. 8 se observan los resultados de la simulación de una campaña experimental de elementos con rotura a cortante, donde la interacción N-M-V se manifiesta claramente a partir de los incrementos de tensión en las armaduras longitudinales y las variaciones de tensiones en las armaduras transversales a lo largo del elemento.

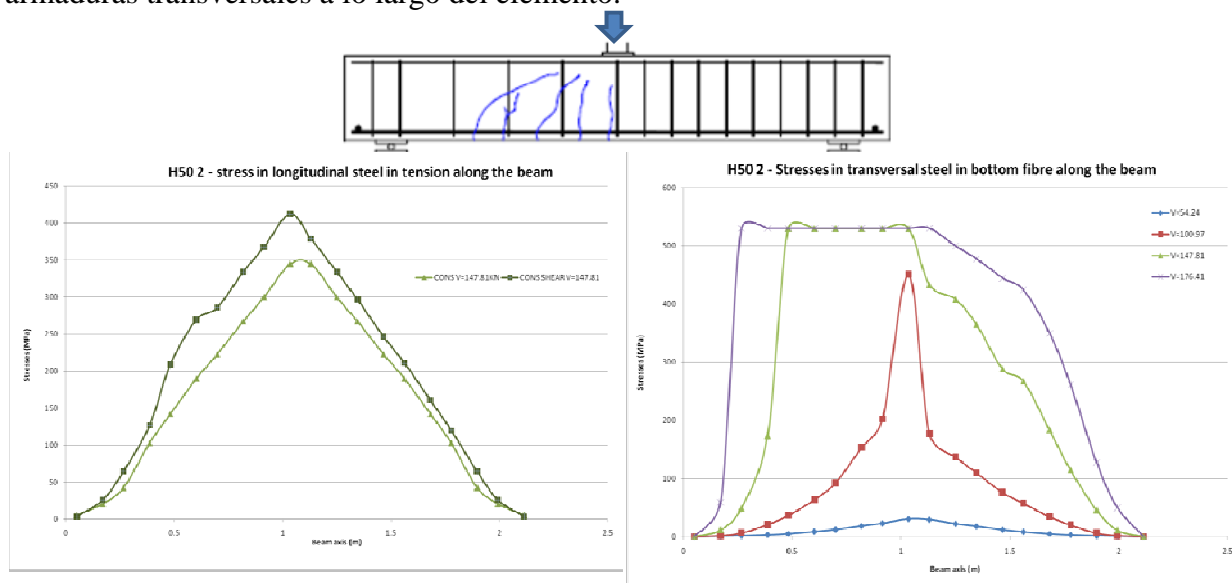


Figura 8. Predicción tensiones armaduras longitudinales y transversales

#### 4. APLICACIONES

Los modelos presentados tienen un gran abanico de aplicaciones prácticas que van desde los estudios dirigidos a la comprensión de los mecanismos resistentes a cortante y torsión y desarrollo de formulaciones de cálculo y diseño al estudio de estructuras sensibles a esfuerzos cortantes en zonas sísmicas, redistribuciones de esfuerzos y comportamiento en rotura, entre otras. Algunas de estas aplicaciones se han llevado a cabo a lo largo de varios proyectos de investigación durante los últimos años. Actualmente, se están aplicando este tipo de modelos al estudio de estructuras de hormigón que sufren procesos de deterioro o que son reforzadas.

#### REFERENCIAS

- [1] Bairán, JM, Marí AR (2007), "Shear-Bending-Torsion Interaction in Structural Concrete Members: A Nonlinear Coupled Sectional Approach", *Arch. Comput. Methods Eng.*, 14: 249-278.
- [2] Mohr S, Bairán JM, Marí AR (2010), "A frame element model for the analysis of reinforced concrete structures under shear and bending", *Eng. Structures*, 32: 3936-3954.
- [3] Ferreira D, Bairán JM, Marí AR (2011), "Análisis no lineal simplificado de vigas de hormigón armado sometidas a cortante: Modelo numérico y validación experimental", *V Congreso de ACHE*, Barcelona, 25-27 Oct.
- [4] Marí A. (2000), "Numerical Simulation of the Segmental Construction of Three Dimensional Concrete Frames", *Engineering Structures*, 22: 585-596.