

# ELIMINACIÓN DE JUNTAS DE DILATACIÓN EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO. APLICACIÓN DE MODELOS COHESIVOS NO LINEALES

*Suppression of expansion joints in concrete buildings. Application of cohesive non linear models*

## Jacinto RUIZ CARMONA

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Mecanismo / Universidad de Castilla-La Mancha  
Asociado/ Investigador  
[jacinto.ruiz@mecanismo.es](mailto:jacinto.ruiz@mecanismo.es)

## Juan REY REY

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Mecanismo / Universidad Politécnica de Madrid  
Director/ Profesor Asociado  
[Juan.rey@mecanismo.es](mailto:Juan.rey@mecanismo.es)

## Pablo VEGAS GONZÁLEZ

Arquitecto  
Mecanismo  
Asociado  
[Pablo.vegas@mecanismo.es](mailto:Pablo.vegas@mecanismo.es)

## RESUMEN

En el presente trabajo se exponen dos ejemplos de uso de modelos cohesivos para representar el comportamiento en fractura del hormigón. En particular se estudia la eliminación de juntas de dilatación en edificios. La actual normativa (CTE-DB – AE) marca una distancia límite de 40m a partir de los cuales es necesario realizar un análisis termohigrométrico para determinar el comportamiento de la estructura, sin que se den más pautas para realizar el análisis. Se analiza la fisuración en los forjados y reacciones en los pilares que permitirán diseñar éstos en ELU.

## ABSTRACT

This work presents two examples of analysis, using cohesive models, of concrete buildings structures exceeding the length limits established in the codes for expansion joints. In the present Spanish Code, CTE-DB-SE-AE, is necessary to take into account the effect of rheological and thermal effects in the structural design if the length between expansion joints exceeds 40 meters, but the code doesn't give any recommendation of how to do the analysis. Cracking in concrete floors is analyzed and reactions in columns are evaluated to design them in ULS

**PALABRAS CLAVE:** juntas de dilatación, hormigón armado, modelos cohesivos

**KEYWORDS:** Expansion joints, reinforced concrete, cohesive models

## 1. Introducción

Las juntas de dilatación son elementos de separación que dividen la estructura de un edificio con el fin de permitir los desplazamientos de la estructura ante deformaciones de tipo termohigrométrico. Estas juntas ayudan a disipar esfuerzos en pilares y pantallas cuya evaluación es compleja, dado que en un análisis lineal los esfuerzos obtenidos conllevarían, por lo general, unas cuantías de armado inadmisibles. Asimismo las juntas son elementos que suelen generar problemas tanto de proyecto como constructivos y de mantenimiento, por lo que su eliminación suele ser deseable en muchos casos. En la normativa actual, CTE-DB-SE-AE [1], para no tener en cuenta el efecto de las acciones térmicas en el cálculo, la longitud máxima de los elementos estructurales continuos no debe sobrepasar la dimensión de 40 metros. La dificultad para encontrar herramientas comerciales que permitan el análisis de los efectos termohigrométricos (fluencia, retracción y cambios térmicos) junto con la fisuración, conlleva que en muchos casos se estén disponiendo juntas que podrían evitarse con el fin de cumplir los requerimientos prescritos en el CTE.

En los últimos años el desarrollo de técnicas numéricas ha permitido que se pueda realizar el análisis detallado de los elementos estructurales teniendo en cuenta las características no lineales tanto geométricas como de los materiales y sus propiedades en fractura. Este hecho permite el análisis de las estructuras de hormigón armado reproduciendo los procesos de fisuración, evitando las limitaciones anteriormente citadas del cálculo lineal. En la presente ponencia exponemos una introducción al fundamento teórico de estos modelos y mostramos dos ejemplos de análisis de edificios sin junta que superan los límites establecidos en la Normativa vigente para la distancia entre juntas de dilatación. Se analiza la fisuración debido a la retracción en el forjado y las reacciones que generan en los pilares. Estas reacciones serán utilizadas posteriormente para el diseño de los armados de los pilares. Complementariamente se puede evaluar la cuantía necesaria de armado a disponer en los forjados para controlar la apertura de fisura.

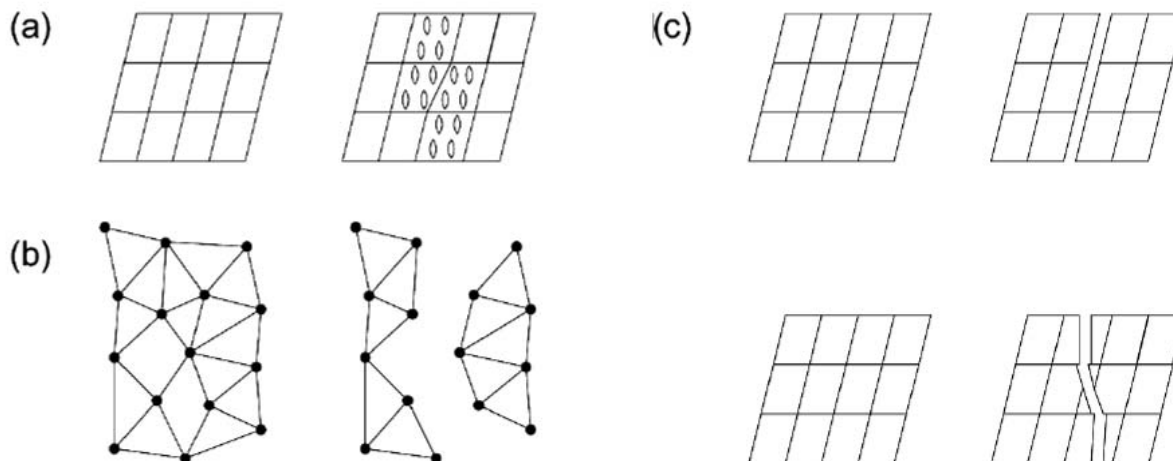
Los cálculos se han llevado a cabo con un modelo de fisuración cohesiva distribuida en banda [2], implantado en el programa comercial ATENA, desarrollado por Červenka Consulting [3]. Los resultados muestran cómo es posible realizar de forma sencilla análisis de estructuras con distancias entre juntas superiores a 40 metros, determinando de forma cuantitativa los sobreesfuerzos en elementos horizontales debidos a acciones termohigrométricas.

## 2. Evolución de los modelos de fisuración en hormigón armado

En el caso particular del hormigón, su carácter heterogéneo y cuasifrágil no ha permitido una evolución tan rápida de los modelos computacionales como en el caso de materiales metálicos. No obstante el desarrollo de modelos basados en técnicas de mecánica de fractura ha permitido que se formulen ecuaciones constitutivas capaces de reproducir el comportamiento del hormigón teniendo en cuenta la pérdida de rigidez al fisurarse.

En la literatura especializada se pueden encontrar actualmente numerosos modelos que reproducen los procesos de fisuración en hormigón. Específicamente dentro del campo de los elementos finitos el modelado del comportamiento del hormigón armado ha estado unido al desarrollo de ecuaciones constitutivas para estudiar el comportamiento de materiales cuasifrágiles. Con carácter general estos modelos los podemos clasificar en tres grupos, modelos de continuo, discretos y modelos mixtos. En los modelos de continuo, véase la Figura 1, la unidad básica es el volumen infinitesimal, describiéndose el comportamiento del material mediante una

relación entre tensiones y deformaciones. En los modelos de fisura discreta, véase la Figura 1b, la ecuación constitutiva establece una relación entre las fuerzas internas en los nudos y los desplazamientos relativos de estos nudos. El tercer grupo lo forman los modelos mixtos que combinan características de los modelos de continuo y modelos discretos [4], Figura 1c.



**Figura 1. Modelos básicos para representar el comportamiento de materiales cuasifrágiles: a) modelos de continuo; b) modelos de fisura discreta y c) modelos mixtos (figura adoptada de la referencia [4]).**

Los primeros modelos en desarrollarse para tratar de representar el comportamiento en fractura del hormigón fueron los de continuo. Estos utilizaban en principio ecuaciones basadas en la ley de Hooke. La mayor desventaja de estos modelos es la dependencia de los resultados del tamaño de la malla, debido a que la energía liberada acaba dependiendo de éste parámetro. Los modelos de continuo evolucionaron a partir de la regla de flujo plástico. Ejemplos de ecuaciones constitutivas basadas en plasticidad encontramos en las referencias [5, 6].

Los modelos de fisura discreta aparecieron como alternativa a los modelos de continuo. La aproximación discreta fue iniciada por Ngo y Scordelis [7], posteriores desarrollos de estos trabajos los encontramos en las referencias [8, 9]. En estos trabajos la localización de las fisuras y sus trayectorias se predefinían y para poder ir reproduciendo el progreso de la fractura se necesitaban frecuentes remallados. Específicamente dentro del hormigón la aparición del modelo de fisura cohesiva propuesto por Hillerborg y colaboradores [10] supuso un salto cualitativo en la modelación de la fractura del hormigón. Basándose en este concepto se han desarrollado diversas formulaciones matemáticas con el fin de implantarlas en modelos de elementos finitos para reproducir el comportamiento del hormigón, con especial atención a los procesos de fisuración y pérdida de rigidez de las estructuras.

En los últimos veinte años han aparecido varias teorías con el fin de solventar los problemas para determinar la trayectoria de las fisuras y su localización. Estas teorías incluyen elementos finitos que pueden introducir discontinuidades en su interior. Esta idea ha sido explotada recientemente y entre los modelos más extendidos encontramos, los de fisura distribuida [2], modelos de fisura embebida [11] y los denominados elementos finitos extendidos (X-FEM) [12].

En la presente ponencia exponemos resultados de la aplicación para la localización del daño del modelo propuesto por Bažant y Oh de fisuración cohesiva distribuida en banda [2] e implantado en el programa comercial ATENA, desarrollado por Červenka Consulting [3]. Con esta ponencia

queremos poner de relieve la disponibilidad que existe en el mercado de herramientas que nos pueden permitir un análisis tanto global como detallado de las estructuras de hormigón estructural.

### 3. Ecuaciones constitutivas

El modelo utiliza una ecuación constitutiva que se encuadra dentro del grupo de modelos mixtos, véase la figura 1, e incluye las siguientes características para el modelado del hormigón:

- Comportamiento no lineal en compresión incluyendo endurecimiento y ablandamiento
- Fractura del hormigón en tracción basada en mecánica de fractura no lineal
- Criterio de fallo por tensiones biaxiales
- Reducción de la resistencia a compresión tras la fisuración (MCF)
- Efecto tension stiffening
- Reducción de la rigidez a cortante tras la fisuración

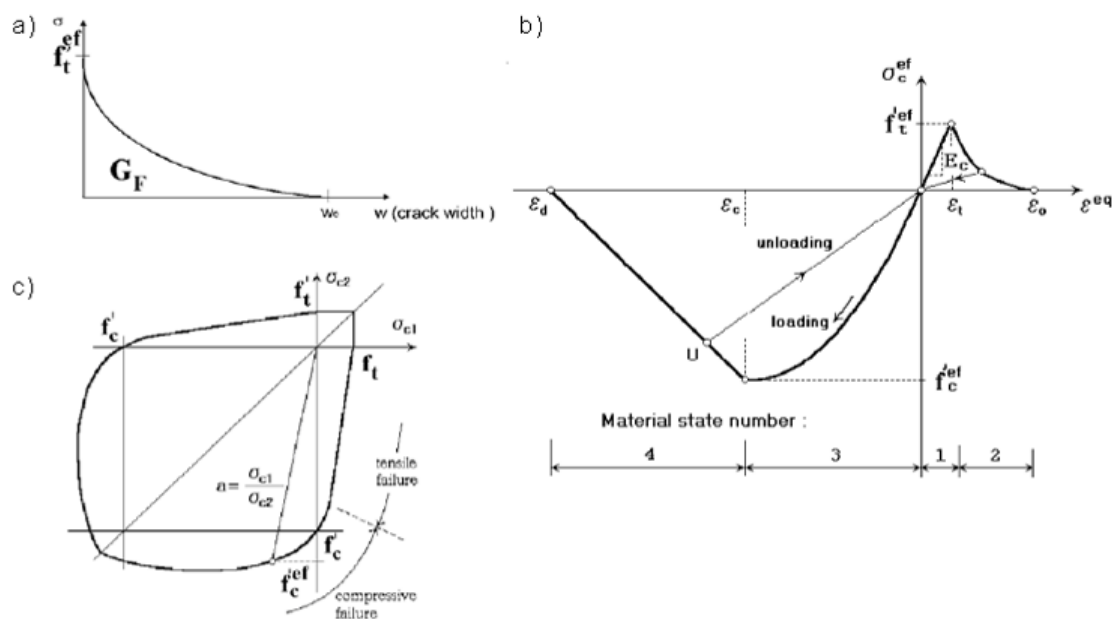
Las ecuaciones constitutivas se basan en la teoría de fisura distribuida en bandas. Esta emplea un criterio tipo Rankine como criterio de fallo. El endurecimiento/ablandamiento plástico en el fallo por compresión es modelado mediante la superficie plástica propuesta por Menetrey-Willan [13]. El fallo por tracción se basa en el modelo cohesivo [10]. La inclusión de la armadura se puede realizar de dos formas definiendo las barras de forma discreta o incluyendo un refuerzo de forma distribuida según una cierta cuantía directamente en la matriz del hormigón.

Las constantes elásticas del material derivan de una función que relaciona las tensiones y deformaciones a partir de una ley uniaxial equivalente, véase la figura 2. Esta aproximación está formulada en base a la teoría de la hipoelasticidad. Este enfoque está basado simplemente en reformular de manera incremental la ecuación constitutiva elástica, con lo que se obtiene un formato semejante al del problema con deformaciones infinitesimales. El modelo considera que la trayectoria de la tensión en el proceso de carga no coincide con la de descarga debido a la disipación de energía causada por el daño en el material. Un detallado tratamiento teórico del tema puede ser encontrado en la referencia [14].

### 4. Ejemplos prácticos

A la hora de realizar los modelos se realizan una serie de simplificaciones de carácter práctico para poder abordar el problema. Estas simplificaciones son:

- Los pilares se modelan con unos muelles cuya rigidez coincide con la rigidez fisurada del soporte. Se podría modelar el soporte con un muelle no lineal para reproducir la pérdida de rigidez del mismo durante el proceso de carga, en todo caso, en la fase de proyecto hemos estimado suficientemente aproximado el considerar el muelle lineal con inercia fisurada.
- La fluencia no se ha tenido en cuenta dado que su efecto se considera local en zonas comprimidas, compensándose entre los diferentes vanos y no afectando a la retracción total de la losa.
- Se considera que la los forjados se han armado para resistir las flexiones. El efecto de la retracción provoca esfuerzos axiales, los cuales se relajan una vez ha fisurado el forjado. El modelo nos sirve para evaluar la magnitud de esta fisuración y evaluar la cuantía de armado para controlarla.



**Figura 2. Ecuaciones constitutivas: a) ley uniaxial tensión-deformación equivalente; b) función de ablandamiento y c) superficie de plastificación.**

Con los modelos que se van a presentar se obtienen unas reacciones en las cabezas de los pilares, las cuales posteriormente servirán para introducir una hipótesis de carga adicional en las combinaciones para el diseño de éstos elementos en ELU. No se han tenido en cuenta cargas de origen térmico al estar analizando plantas que no sufrirán variaciones de temperatura importantes dado que son zonas interiores.

#### 4.1. Edificio de viviendas en zona sísmica

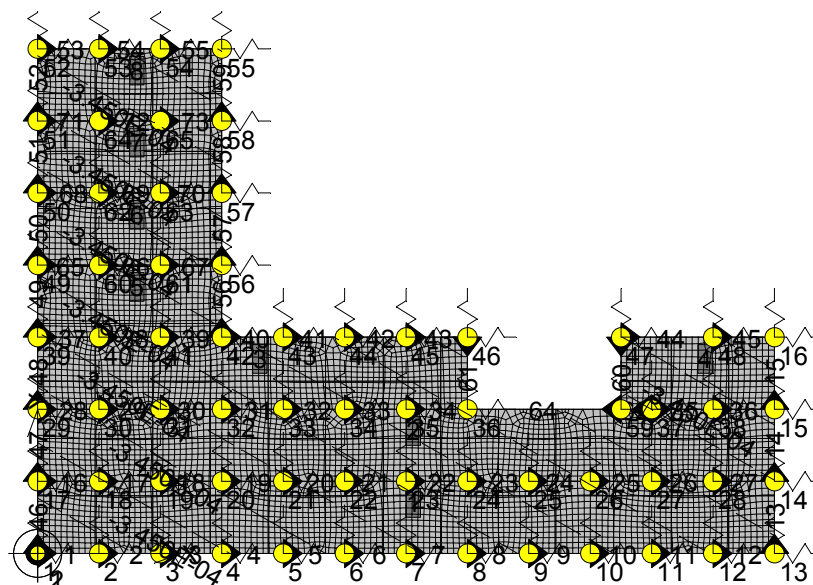
Se trata de un proyecto de un edificio de hasta diez plantas en zona sísmica donde se proponía colocar juntas de dilatación separando en diferentes zonas el edificio ya que su longitud superaba los 40 m. En las juntas de dilatación se optaba por la duplicación de pilares sin disponer pasadores. La separación en la junta de dilatación se limitaba a 3 cm, valor que en zona sísmica y dada la altura del edificio era insuficiente.

Al eliminar las juntas la distancia de hormigonado, en planta, superaba los 40 m, distancia máxima para la que no es necesario realizar un estudio termohigrométrico, por lo que se realizó el estudio complementario según lo expuesto en el CTE DB. Se procedió a modelar la planta baja del inmueble, teniendo en cuenta la rigidez de los pilares y pantallas a través de unos apoyos elásticos. La planta baja del inmueble se modeló con elementos de fisura embebida. Los efectos de la retracción provocan un acortamiento de la estructura que intenta ser coartado por la estructura vertical (pilares y pantallas), lo que provoca un aumento de esfuerzos adicionales en pilares, que deberán ser considerados en su armado.

El efecto de la retracción se manifiesta sobre todo entre plantas en las que las condiciones de contorno cambian de forma significativa. En nuestro caso, afectaba al tramo de pilares entre

planta baja y primera, dado que los desplazamientos longitudinales en la planta baja se encontraban coartados por la contención perimetral y en planta 1ª el borde de los forjados estaba libre. A partir de la planta primera todas las plantas están apoyadas de forma similar por lo que no eran esperables desplazamientos relativos, entre plantas, provocados por la retracción que aumentarían los esfuerzos de flexión y cortante en los pilares.

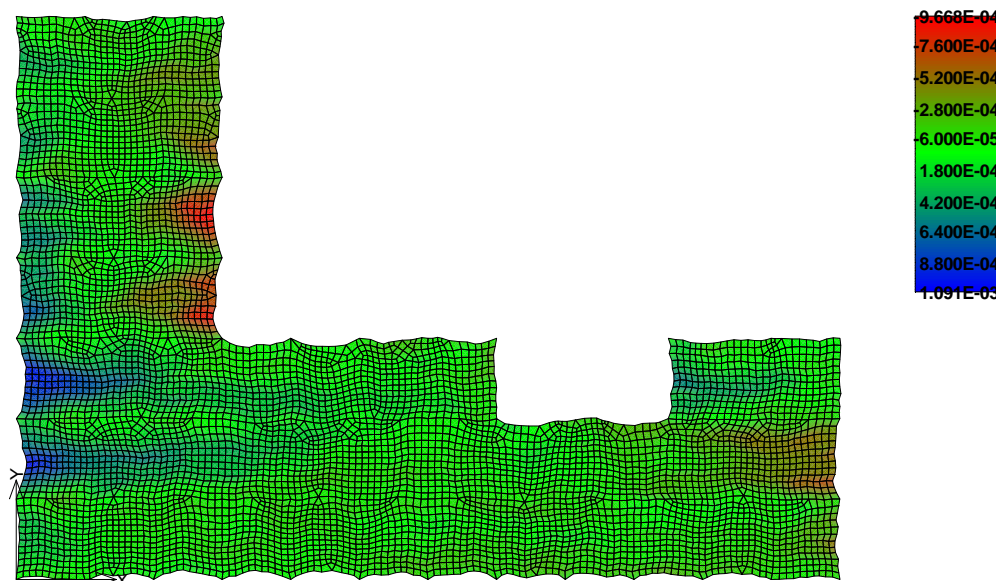
En nuestro caso, teniendo en cuenta las características del forjado y materiales que lo forman se ha evaluado que la retracción vendrá dada por una deformación impuesta en la planta igual a -345 microdeformaciones.



**Figura 3. Geometría del modelo**

Con el modelo se han evaluado tanto los desplazamientos en planta como las reacciones en los apoyos elásticos que reproducen los pilares. También se evalúa la apertura de fisura en la planta, lo que permite establecer refuerzos en ésta para controlar la misma. En las siguientes imágenes mostramos los desplazamientos en la planta tras la aplicación de la carga de retracción.

Step 10, Estudio retraccion  
Scalars:rendering, Basic material, in nodes, Displacements, x(1), <-9.668E-04;1.091E-03>[m]

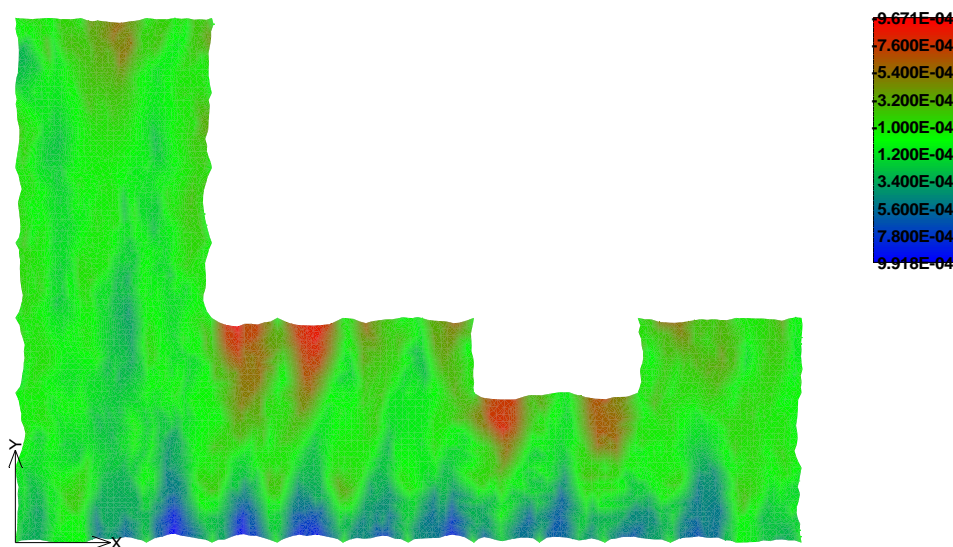


**Figura 4. Desplazamientos en la dirección x**

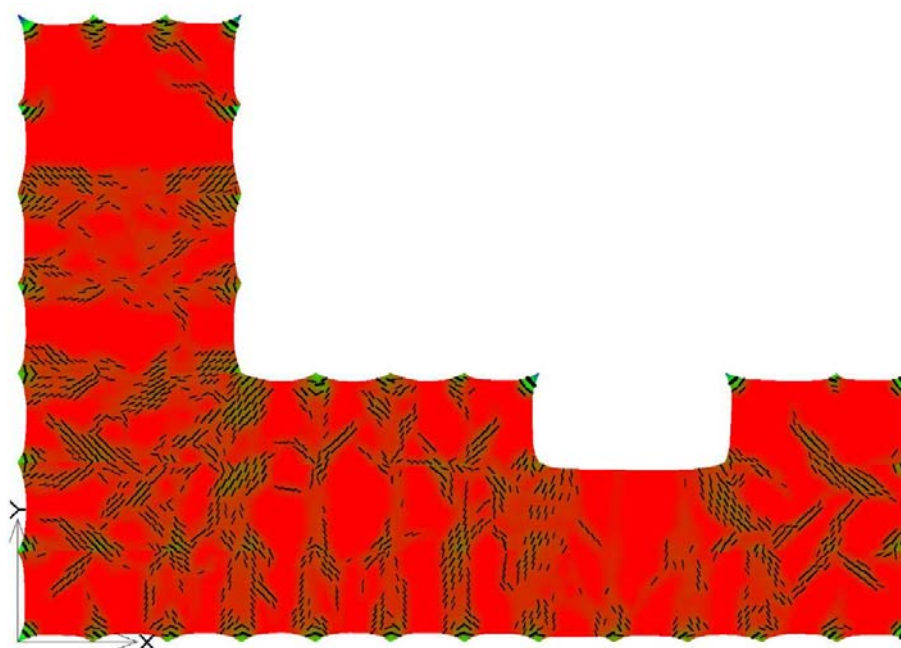


Step 10, Estudio retraccion

Scalars:rendering, Basic material, in nodes, Displacements, x(2), &lt;-9.671E-04;9.918E-04&gt;[m]

**Figura 5. Desplazamientos en la dirección y**

Durante el proceso de aplicación de la retracción los pilares estarán sometidos a un cortante en su cabeza, el cual irá variando según vaya fisurándose el forjado. Con el cálculo realizado se ha evaluado que el valor máximo de este cortante en la dirección x e y es aproximadamente igual a 100 kN en los pilares extremos. En base a esta reacción se ha evaluado un refuerzo adicional necesario a flexión y cortante en los pilares en el tramo planta baja a primera. Otro aspecto, como hemos indicado, era la posibilidad de analizar el patrón de fisuración y la apertura de fisura y con ello establecer refuerzos en el forjado para controlar la misma. En la siguiente imagen mostramos el patrón de fisuración obtenido tras la aplicación de la carga de retracción.

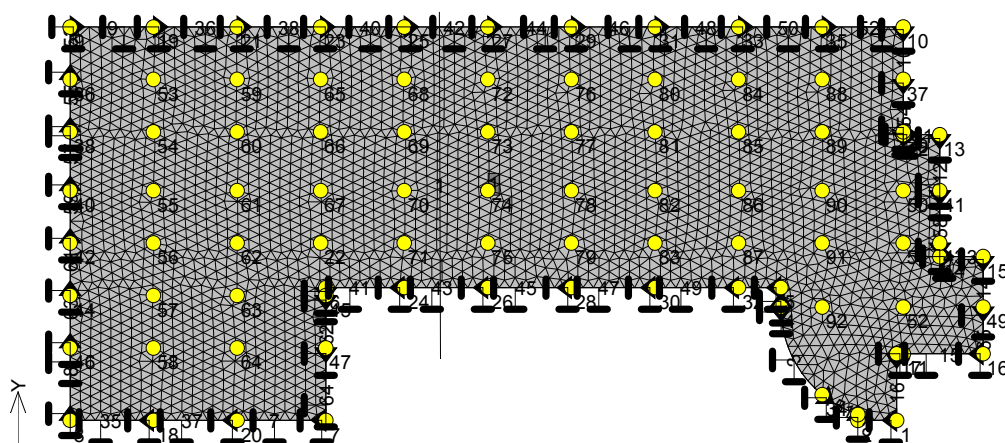
**Figura 6. Patrón de fisuración en planta**

#### 4.2. Planta baja de edificio sin juntas

En este caso, el edificio en sí tenía unas dimensiones inferiores a 40 metros pero la planta baja del edificio al tener una superficie mayor superaba el límite de 40 m. Por ello, el Organismo de Control Técnico exigió una evaluación cuantitativa de los esfuerzos debidos a retracción sobre la geometría de la planta baja del edificio. Se realizaron dos análisis diferentes, uno mediante un modelo elástico lineal aplicando un decremento de temperatura, y otro mediante un modelo no lineal aplicando la deformación por retracción.

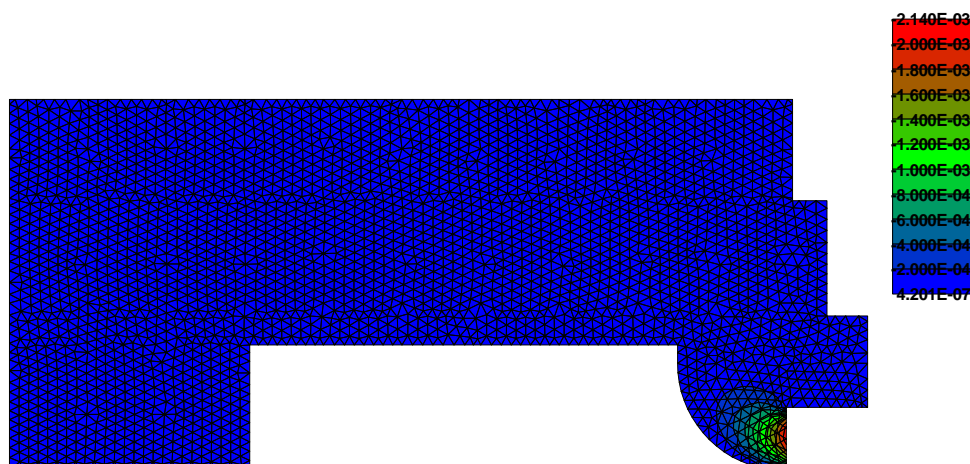
La retracción considerada de acuerdo a la Normativa EHE-08 en este caso fue igual a -340 microdeformaciones. Teniendo en cuenta el coeficiente térmico del hormigón,  $1e-5$ , el decremento de temperatura equivalente es de  $34^{\circ}\text{C}$ .

En la planta baja se encontraban coaccionados los desplazamientos por los muros perimetrales, con la excepción de la zona de la rampa. En las siguientes imágenes mostramos la geometría del modelo y los desplazamientos obtenidos con el modelo elástico lineal.



**Figura 7. Modelo de cálculo planta baja**

Step 2, analisis retraccion palnta baja  
Scalars:iso-areas, Basic material, in nodes, Displacements, x(1), <-2.140E-03;4.201E-07>[m]

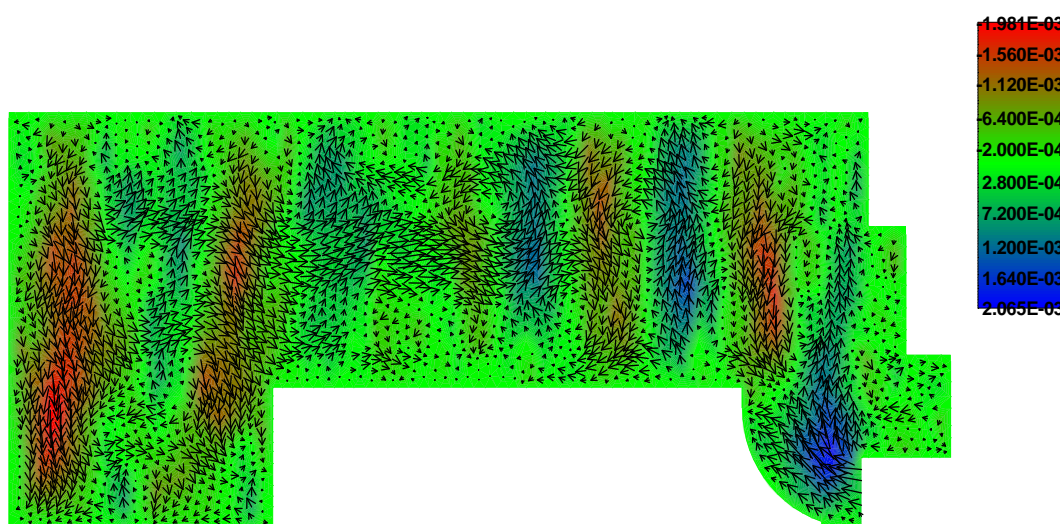


**Figura 8. Desplazamientos obtenidos con el modelo elastico lineal**

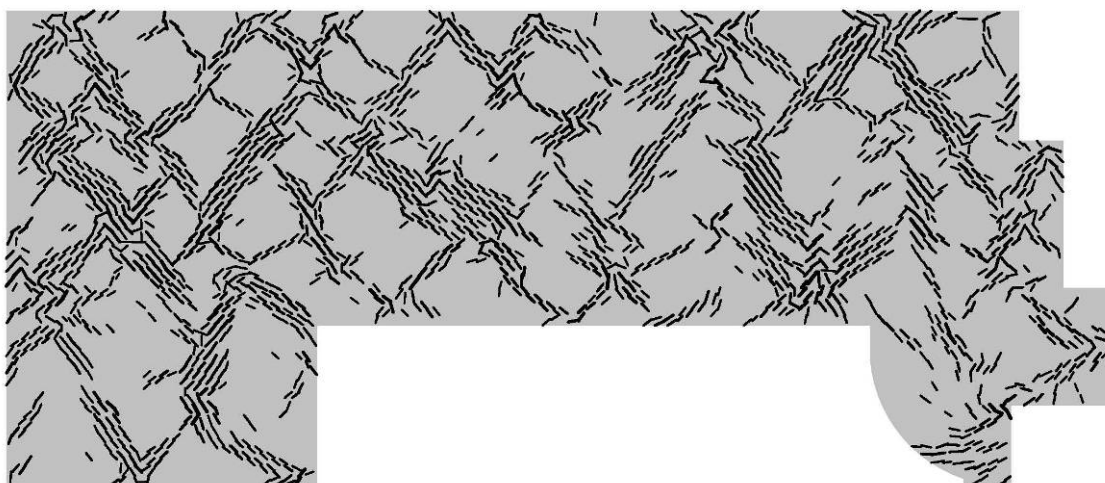


Los desplazamientos en los pilares, en general, no llegaban al milímetro por lo que estimamos que el efecto de la retracción no implicaba un aumento significativo de los esfuerzos en los mismos. En todo caso se producía una concentración de tensiones en una zona del modelo que provocaba que en esa zona los valores de las reacciones en pilares tuvieran valores anormalmente altos.

Se realizó un segundo modelo introduciendo un comportamiento no lineal en el hormigón con el fin de estimar nuevamente los desplazamientos teniendo en cuenta el proceso de fisuración, cálculo que con el modelo elástico no se puede realizar. En los resultados obtenidos se observa cómo la fisuración relaja las tensiones en el hormigón y hace aumentar los desplazamientos en los pilares, llegando estos a los 2-3 mm como máximo. En todo caso la zona de concentración de tensiones desaparece. En base a este segundo modelo se estimó que el desplazamiento de los pilares ocasiona, en un pilar de 40x40cm, un momento adicional de 14,4kNm, el cual, dadas las cuantías de armado y dimensiones de los pilares, era resistido por los armados ya dispuestos.



**Figura 9. Desplazamientos en la losa de planta baja obtenidos con el modelo no lineal**



**Figura 10. Patrón de fisuración tras retracción en planta baja**

## 5. Conclusiones

En el trabajo presentado se exponen dos ejemplos de aplicación de modelos cohesivos para el estudio del comportamiento de forjado de hormigón en las que se han eliminado las juntas de dilatación, sobrepasando los límites prescritos en la Normativa española. Los modelos son resueltos con el programa ATENA desarrollado por Červenka Consulting. A partir de los resultados se pueden determinar los esfuerzos adicionales que se generan en soportes debido al efecto de la retracción, y de esta forma diseñar los refuerzos necesarios para evitar la aparición de patologías. También se pueden evaluar los refuerzos en planta para evitar aperturas de fisura excesivas. La principal ventaja de estos modelos, frente a la aplicación de la retracción como un decremento de temperatura en un modelo elástico, es la posibilidad de tener en cuenta la relajación que, en el valor de las reacciones, provoca la fisuración del forjado. De esta forma se evitan valores excesivamente altos de las citadas reacciones en apoyos debidos a concentraciones de tensiones y se permite la redistribución de reacciones entre apoyos.

## Referencias

- [1] CTE-DB-SE-AE. Código Técnico de la Edificación - Documento Básico de Seguridad Estructural - Acciones en la Edificación. Ministerio de Fomento.
- [2] Z. P. Bažant and B.H. Oh Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials and Structures, RILEM, Vol. 16, (1983) 155-177
- [3] J. Červenka. Crack Modeling in Concrete Structures. Ph.D. thesis, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1994.
- [4] M. Jirasek. Modeling of Localized Inelastic Deformation. Lecture notes. Short course at the Czech Technical University, Prague 13-17 September, 2004.
- [5] K. J. Willan and E. P. Warnke. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. In Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses (Zurich, 1974), vol. 19, International Association of Bridge and Structural Engineers, pp. 1-30
- [6] P. H. Feenstra and R.A. de Borst. Composite plasticity model for concrete International Journal of Solids and Structures 33 (1996), 707-730.
- [7] D. Ngo and A. C. Scordelis. Finite element analysis of reinforced concrete beams. ACI Journal Proceedings 64, 3 (1967), 152-163.
- [8] M. Jirasek. Comparative study on finite elements with embedded discontinuities. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 118, 1-3 (2000), 307-330.
- [9] V. E. Saouma. Interactive finite elements analysis of reinforced concrete: A fracture mechanics approach. Ph.D. thesis, Cornell University, Ithaca, New York, 1981.
- [10] G. A. Hillerborg, M. Modeer and, P. E. Petersson. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research, 6 (1976), 773-782 .
- [11] J. Oliver. Modelling strong discontinuities in solids mechanics via strain softening constitutive equations. Part 1. International Journal for Numerical Methods in Engineering 39 (1996), 3575-3642.
- [12] N. Moes, J. Dolbow and T. Belytschko. A Finite element method for crack growth without remeshing. International Journal for Numerical Methods in Engineering 46 (1999), 131-150.
- [13] P. Menetrey and K.J. Willam. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization. ACI, Structural Journal, 1995, 92(3), 311-318.
- [14] W.F. Chen and A.F. Saleeb (1982). Constitutive Equations For Engineering Materials, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-09149-9.