

# INFLUENCIA DE LA FISURACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS ZONAS DE ANCLAJE

## *Influence of Cracking on the behavior of Anchoring zones*

Antonio Martínez de la Concha<sup>a</sup>, José David Ríos Jiménez<sup>b</sup> y Héctor Cifuentes Bulté<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Sevilla. Profesor Contratado Doctor. [delaconcha@us.es](mailto:delaconcha@us.es)

<sup>b</sup> Dr. Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Profesor Contratado Doctor. [jdríos@us.es](mailto:jdríos@us.es)

<sup>c</sup> Dr. Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Catedrático de Universidad. [bulte@us.es](mailto:bulte@us.es)

### RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un análisis numérico del comportamiento del hormigón en la zona de anclaje de una pieza de hormigón pretensado con armadura postesa. En el estudio se comparan los resultados de diferentes modelos de elementos finitos. Los primeros mediante análisis elástico lineal obtienen las respuestas que puede encontrarse en la bibliografía y que son la base de los diseños habituales. Los siguientes, mediante análisis no lineal, elasto-plástico, en el que se incluyen las leyes tenso-deformacionales del hormigón a través del modelo “concrete damage plasticity” de Abaqus, permiten racionalizar los armados de estas zonas.

### ABSTRACT

In this work, an analysis is carried out of the behavior of concrete in the anchoring zone of a prestressed concrete piece with post-tensioned reinforcement. The study compares the results of different finite element models. The first ones, through linear elastic analysis, obtain the response that can be found in the bibliography and that are the basis of the usual designs. The following, through non-linear, elastic-plastic analysis, which includes the stress-strain laws of concrete through the Abaqus concrete damage plasticity model, allow the reinforcement of these areas to be rationalized.

**PALABRAS CLAVE:** Anclaje, pretensado, elasto-plástico, abaqus.

**KEYWORDS:** Anchoring, prestressing, elastoplastic, abaqus, cracking

## 1. Introducción

El comportamiento del hormigón en la zona de anclaje de las armaduras postesas es un problema complejo, que involucra grandes compresiones en el hormigón, así como importantes dispersiones de dichas compresiones, que a su vez son causantes de tracciones transversales. Tanto las grandes compresiones, como las tracciones derivadas de la dispersión de las compresiones limitan el uso de los sistemas de

anclaje, condicionan el armado y con ello la ejecución de estas zonas especiales.

El problema ha sido ampliamente analizado a lo largo de la historia, comenzando probablemente con los ensayos experimentales realizados por Mörsh hacia 1924.

La normativa americana [1,2] ha dado respuesta al problema de diseño de estas zonas, primero en base a los estudios y ensayos de Guyon [3] con las aportaciones de Zielinski y Rowe [4] y más

recientemente con los trabajos de Sanders et al [5] y Breen et al. [6].

Por su parte en Europa, mientras que el Eurocódigo 2 1-1 [7] y en España el anejo 19 del Código Estructural [8] proponen métodos de diseño basados en el método de bielas y tirantes [9], para el caso específico de puentes [10,11] abogan por una metodología basada en el prisma de compresiones, que es más parecida a la propuesta americana.

La idea de este trabajo no es tanto mejorar las soluciones sino analizarlas y evaluarlas a través de modelos de elementos finitos que en una etapa posterior servirán de base al análisis del comportamiento de nuevos hormigones UHPFRC como los que se estudian en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla [12–16].

## 2. Metodología

El estudio se realiza en base a modelos de elementos finitos realizados en Abaqus [17].

Se realizan dos tipos de modelos, en régimen elástico y en régimen elastoplástico, con geometrías similares, pero con distinto tipo de comportamiento.

Las geometrías de los modelos se corresponden con el extremo de una viga, del que se modelizan los cinco metros finales, siendo la viga de sección rectangular de 400 mm de ancho y 2000 mm de canto.

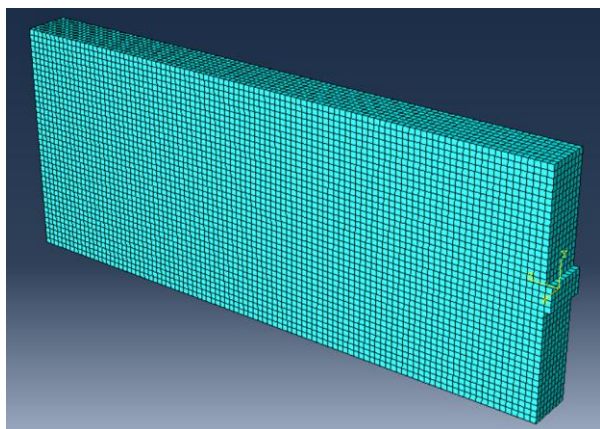


Figura 1. Imagen del modelo.

En el extremo de la viga se coloca una placa metálica de 400 mm de ancho y de 200 mm o 400 mm de alto, según el análisis realizado.

El mallado se realiza con elementos C3D20 de 50 mm de lado, que corresponde a elementos hexaédricos con función de forma cuadrática y 20 puntos de integración.

Las condiciones de contorno se establecen en la sección más alejada del extremo, en donde se impiden todos los grados de libertad, aplicandose las cargas, en forma de presión, en la placa metálica del extremo.

Para el análisis en régimen elastoplástico se sustituye la acción de presión en la placa metálica por un desplazamiento de 10 mm en la dirección longitudinal en el centro de la placa metálica.

Las características de los materiales se toman de trabajos anteriores con este tipo de comportamientos [14,15]. En régimen elástico los materiales se definen a través de su módulo de Young (24874 MPa para el hormigón y 210 GPa para el acero) y su coeficiente de Poison (0.2 para el hormigón y 0.3 para el acero).

Para la definición del comportamiento elastoplástico se mantienen las propiedades del acero, en la hipótesis de infinitamente elástico y para el hormigón se añaden los siguientes parámetros que permiten definir su comportamiento de acuerdo con el modelo “Concrete Damage Plasticity” de Abaqus [17].

Tabla 1. Propiedades plásticas del hormigón.

| Ángulo de dilatación | Excentricidad | $f_{b0}/f_{c0}$ | K     | Coef. de viscosidad |
|----------------------|---------------|-----------------|-------|---------------------|
| 35                   | 0.1           | 1.16            | 0.667 | 0.007985            |

Tabla 2. Comportamiento a compresión del hormigón.

| Tensión (MPa) | Deformación plástica |
|---------------|----------------------|
| 30            | 0                    |
| 60            | 0.000476             |
| 18            | 0.004364             |

Tabla 3. Comportamiento a tracción del hormigón.

| Tensión (MPa) | Deformación plástica |
|---------------|----------------------|
| 7.2           | 0                    |
| 3.9           | 0.000418             |
| 1.0           | 0.002854             |

En algunos modelos se incluye la armadura transversal, con 38 cercos de 3 ramas de diámetro 12 mm de acero cada 85 mm, que han sido modelizados con elementos T3D3 “embebidos” en el modelo de hormigón.

En régimen elástico se han realizado modelos con tamaño de placa 200 x 400 mm y 400 x 400 mm con el ánimo de verificar la influencia del tamaño relativo de la placa en la distribución de tracciones. En ambos casos se aplica una tensión de 25 MPa a la placa, si bien después los resultados se muestran adimensionalizados.

También se ha analizado la influencia de la excentricidad de la acción, posicionando la placa en tres posiciones.

1. Placa en el centro de la sección de la viga.
2. Placa a 400 mm del borde inferior de la viga.
3. Placa a 100 mm del borde inferior de la viga.

En el modelo elastoplástico se han analizado las tensiones en la viga aplicando las cargas de pretensado en las mismas tres posiciones y finalmente se ha analizado el comportamiento de la viga con armadura transversal para la situación de placa centrada.

### 3. Resultados

Los resultados se dividen en función del régimen de trabajo de cada modelo: régimen elástico y régimen elastoplástico.

### 3.1. Régimen elástico

#### 3.1.1. Variación de las tensiones transversales con la relación entre el canto de la placa de postesado y el de la viga

Se analizaron los dos casos de placas metálicas aplicadas en un extremo de la viga de hormigón.

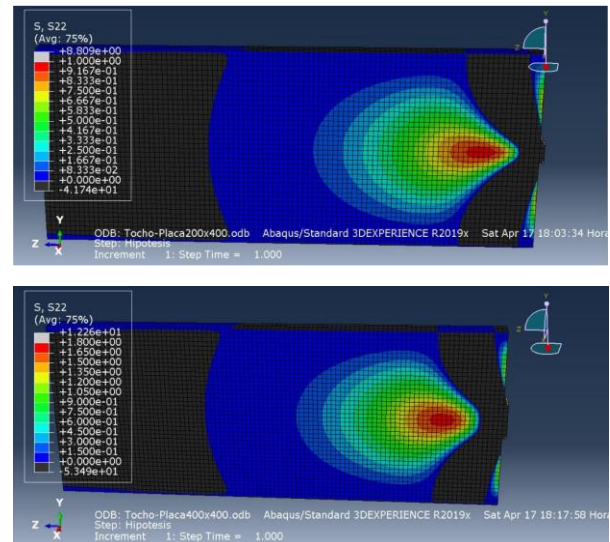
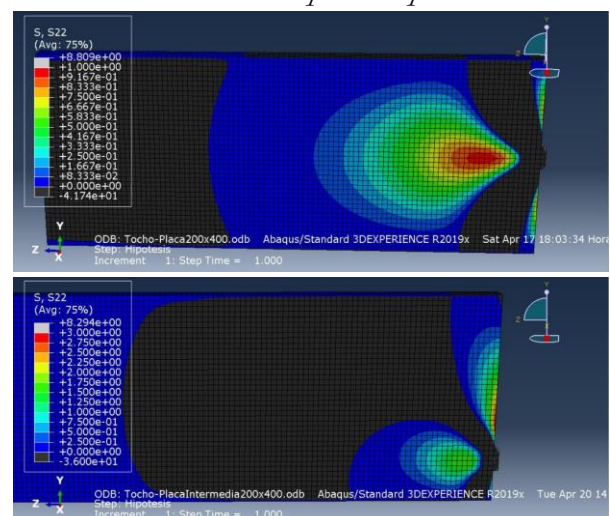
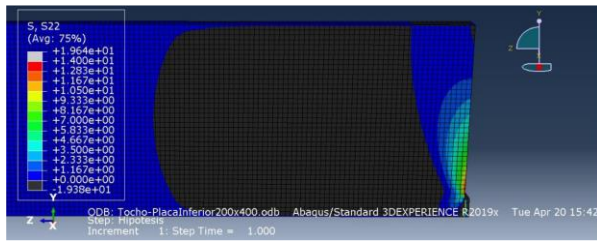


Figura 2. Tensiones transversales (200 x 400 mm arriba, 400 x 400 mm abajo).

De acuerdo con la figura 2, al aumentar el canto de la placa, las tensiones transversales aumentan. Las tensiones de hendimiento y exfoliación aumentan con una mayor superficie de aplicación de la presión.

#### 3.1.2. Variación de las tensiones transversales con el cambio de ubicación de la placa de postesado





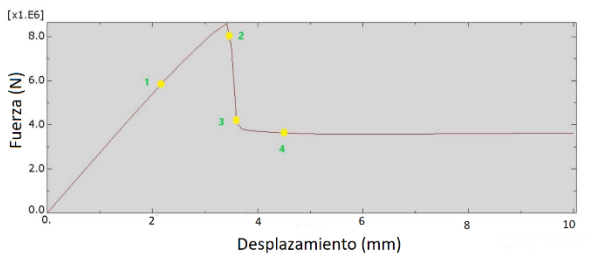
**Figura 3. Tensiones transversales para las tres excentricidades de placa.**

Las tensiones de hendimiento disminuyen y las de exfoliación aumentan al alejar la placa del eje longitudinal de la viga. La excentricidad de la carga aplicada provoca un momento flector que afecta la distribución de tensiones. Véase la figura 3.

### 3.2. Régimen elastoplástico

#### 3.2.1. Tensiones transversales de postesado con la placa ubicada en el centro de la sección de la viga

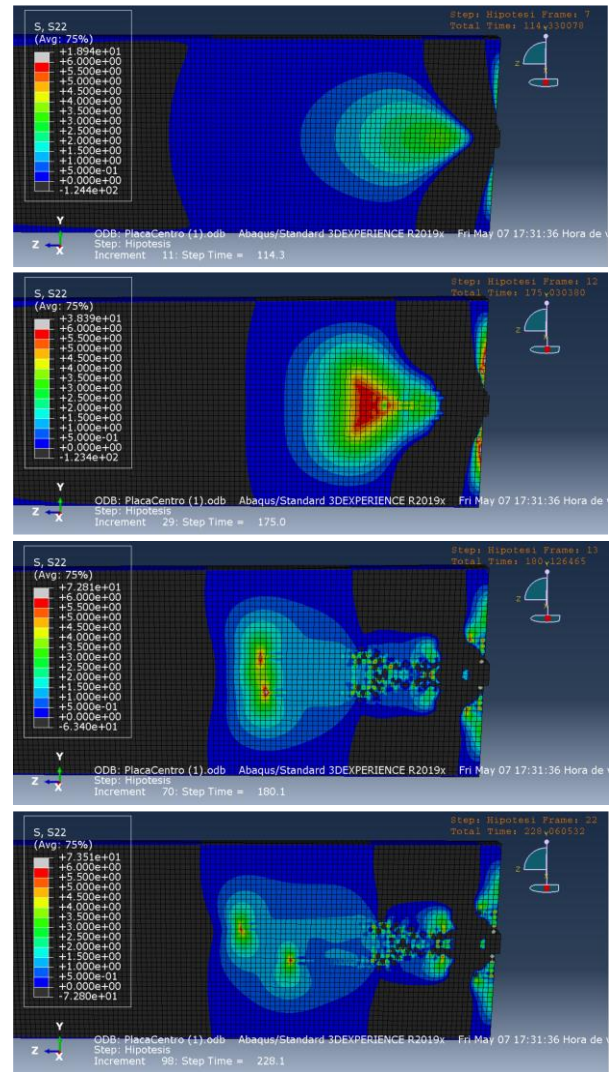
En primer lugar, se observó la evolución de la carga aplicada en función del desplazamiento introducido, con el resultado que se incluye en la figura 4, para el caso de la placa centrada en la viga.



**Figura 4. Curva carga - desplazamiento.**

Se observa una clara pérdida de rigidez a partir del instante en el que aparecen las primeras fisuras.

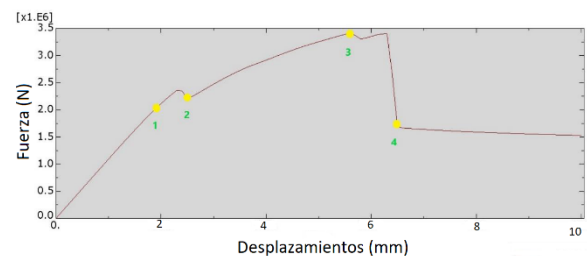
Se analizaron las tensiones transversales en cuatro puntos distintos del proceso, ver figura 5, observando cómo las tensiones aumentan y se distorsionan a lo largo de la viga. Se identificaron regiones de comportamiento elástico, incremento de resistencia, fisuración y deformación a carga constante.



**Figura 5. Tensiones transversales a 2.3 mm (1ª imagen), 3.5 mm (2ª imagen), 3.6 mm (3ª imagen) y 4.6 mm (4ª imagen).**

#### 3.2.2. Tensiones transversales de postesado con la placa ubicada en el extremo inferior de la viga

Se realizó el mismo proceso en el modelo de mayor excentricidad. En la figura 6 se puede observar la curva carga desplazamiento, donde se aprecian claras diferencias en los cambios de rigidez asociadas al cambio de la evolución de las tensiones de tracción y su influencia en los mecanismo de redistribución de tensiones.



**Figura 6. Curva carga - desplazamiento.**

Como en el caso anterior se han elegido cuatro instantes significativos del proceso de fisuración cuyos estados tensionales se muestran en la figura 7.

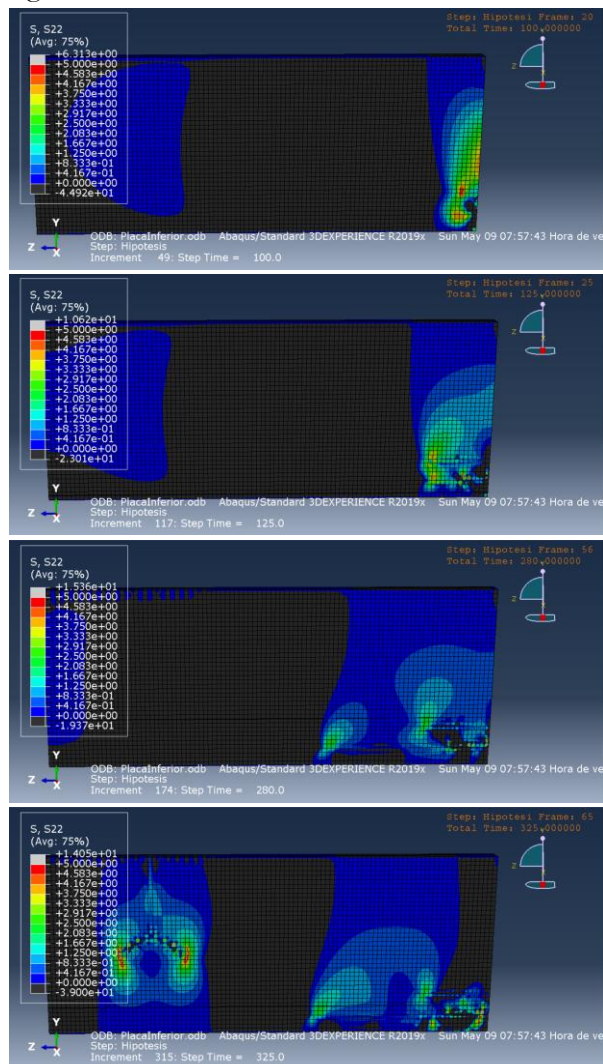


Figura 7. Tensiones transversales a 2.0 mm (1ª imagen), 2.5 mm (2ª imagen), 5.6 mm (3ª imagen) y 6.5 mm (4ª imagen).

### 3.2.3. Tensiones transversales de postesado con la viga armada transversalmente y la placa ubicada en el centro de la sección de la viga

Siguiendo el mismo esquema que en los análisis anteriores, en la figura 8 se representa la curva carga desplazamiento para el caso de la viga armada transversalmente.

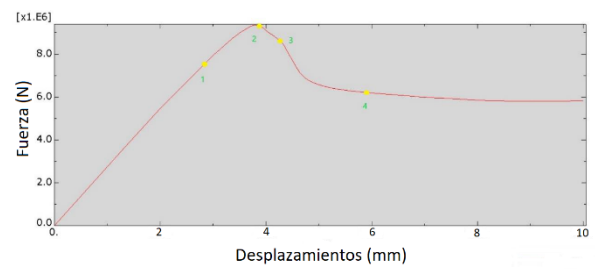


Figura 8. Curva carga - desplazamiento.

Asimismo, se han elegido cuatro instantes significativos del proceso de fisuración cuyos estados tensionales se muestran en la figura 9.

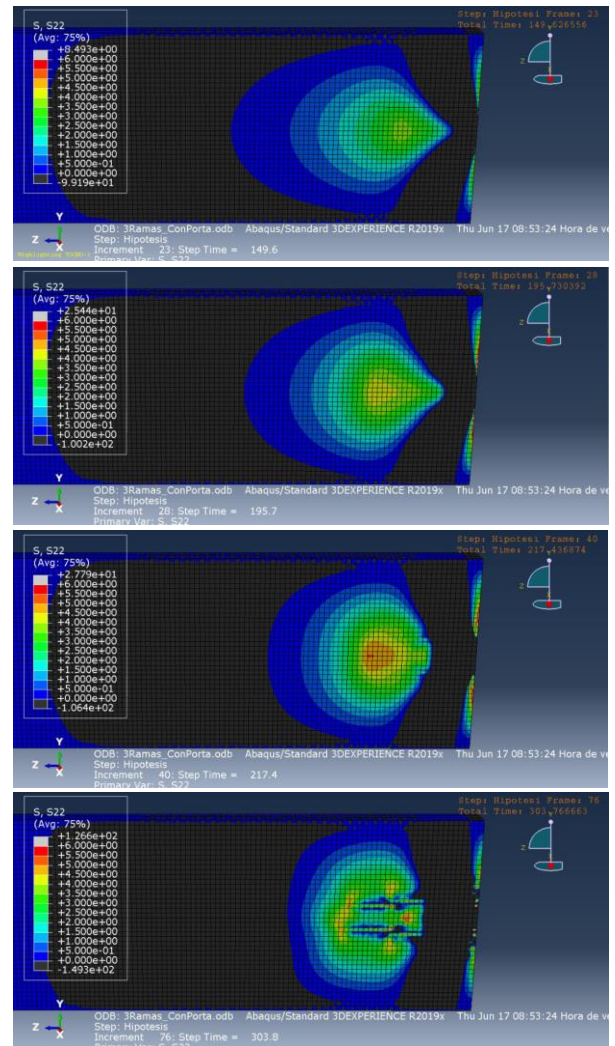


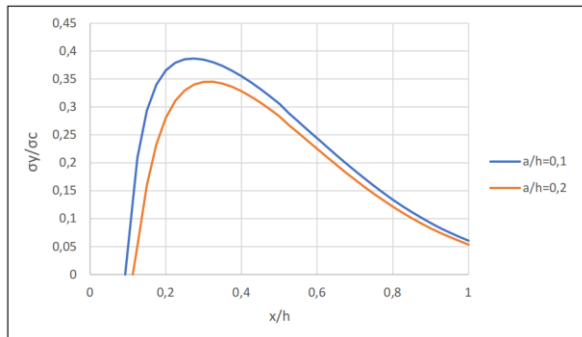
Figura 9. Tensiones transversales a 3.0 mm (1ª imagen), 3.9 mm (2ª imagen), 4.3 mm (3ª imagen) y 6.1 mm (4ª imagen).

## 4. Análisis de los Resultados

Este capítulo compara los modelos realizados para extraer conclusiones sobre el comportamiento elastoplástico del hormigón

pretensado. Se divide en tres apartados: régimen elástico, régimen plástico y la aportación de la armadura a las tensiones transversales.

#### 4.1 Régimen elástico



**Figura 10. Tracciones transversales adimensionalizadas para dos cantos de placa.**

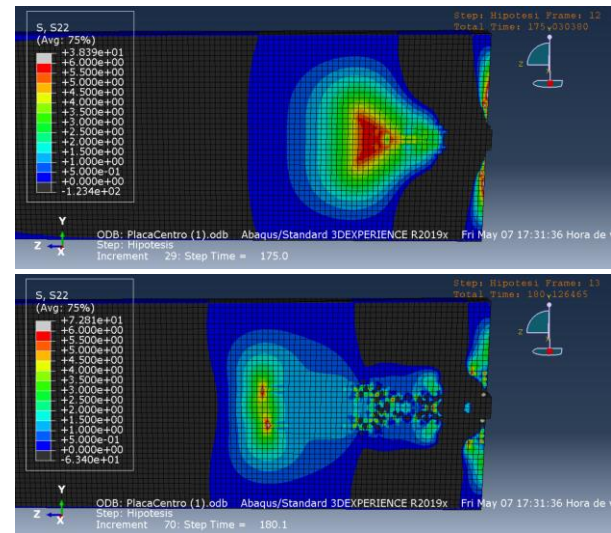
En la figura 10 se representan las tracciones en el centro de la viga, de forma adimensionalizada, para los dos casos de ancho de placa analizados, de forma similar a la que se puede encontrar en la bibliografía[18]. Las tracciones se adimensionalizan con la tensión de compresión lejos del anclaje, es decir,  $\sigma_c$  es la fuerza de pretensado dividida por el área de la viga. Por su parte la distancia al extremo se adimensionaliza con el canto de la viga. En este caso 2000 mm. Se han observado cambios en el comportamiento de las piezas pretensadas con armadura postesa, observando lo siguiente:

- La relación entre el canto de la viga y la superficie de la placa de postesado influye en la magnitud de las tracciones. A mayor relación, menores tracciones. Véase figura 10.
- Las tracciones máximas se desplazan hacia el centro de la viga conforme aumenta la anchura de la placa, alejándose del extremo de la viga.
- La longitud de la región de tracciones transversales disminuye con el aumento de la fuerza de pretensado, compactándose la región traccionada.
- La excentricidad de la carga de pretensado afecta a la distribución de tracciones transversales, aumentando las

tensiones de exfoliación y disminuyendo las de hendimiento.

Los resultados se asemejan a los que se pueden encontrar en la bibliografía [19,20]

#### 4.2. Régimen plástico



**Figura 11. Tensiones transversales en instantes sucesivos.**

El análisis en régimen elastoplástico, ver figura 11, muestra que el aumento de cargas más allá de la resistencia a tracción provoca distorsiones significativas en los diagramas de tensiones transversales y desplazamiento de la zona tensionada. Las principales observaciones son:

- La transición entre régimen elástico y plástico causa grandes cambios en las tracciones debido a la fisuración del hormigón.
- En régimen elastoplástico, aparece una nueva región de tracciones (con forma de "mariposa") que no se observa en régimen elástico.
- La excentricidad de la carga de pretensado provoca una mayor dispersión de tensiones y fisuras en régimen plástico.
- Las tensiones transversales se compactan y se desplazan hacia el centro de la viga conforme aumenta la carga de pretensado.

En general, un aumento de las tensiones tanto en régimen plástico como en régimen elástico

provoca una compactación de la región de tracciones transversales, desplazándola hacia el centro de la viga y disminuyendo la distancia de actuación de las tensiones.

### 4.3. Aportación de la armadura a las tensiones transversales de la viga postesada

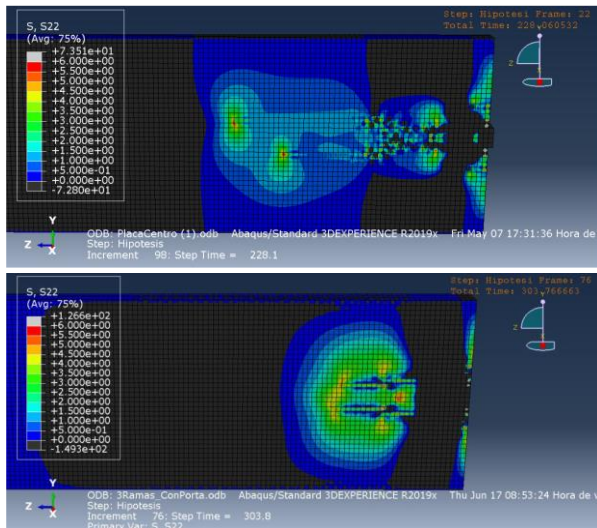


Figura 12. Tensiones transversales sin armadura (superior) con armadura (inferior).

La armadura mejora significativamente el comportamiento de la viga postesada, comparando las tensiones antes y después de su introducción:

- La armadura provoca una mayor compactación de las tensiones transversales, evitando su expansión. Ver figura 12.
- Se necesita una mayor carga aplicada para un mismo desplazamiento, aumentando la resistencia de la viga.
- La armadura suaviza el escalón de cedencia en régimen elastoplástico, reduciendo la brusquedad y mejorando la resistencia.
- Aumenta la resistencia residual tras el proceso de fisuración.

Las tensiones se uniformizan y se concentran en una región más corta, evitando picos de tensiones elevados y aleatorios que pueden causar fisuras.

## 5. Conclusiones

Como resumen de lo anteriormente expuesto podemos destacar:

- Una menor relación entre el canto de la placa de postesado y el canto de la viga genera mayores tracciones internas en el hormigón, provocando más tensiones transversales.
- La fisuración en el hormigón reduce considerablemente la rigidez de la viga, causando grandes deformaciones con incrementos de tensión relativamente bajos.
- Existen diferencias significativas entre el comportamiento del hormigón en régimen elástico y elastoplástico, con zonas de tracciones que no aparecen en régimen lineal.
- El análisis elastoplástico de piezas sin armadura transversal muestra una redistribución de las tracciones hacia el centro de la viga y una disminución cerca del anclaje debido a la fisuración.
- El análisis elastoplástico de piezas con armadura transversal muestra una contención de la zona traccionada cerca del anclaje, evitando la progresión de la fisuración.

## Agradecimientos

Queremos agradecer la colaboración de Marcos López Martín de Oliva, por su ayuda durante la elaboración de su Trabajo Fin de Grado[21] en la confección de modelos.

## Referencias

- [1] AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, US, 2017. <https://doi.org/10.1201/b15616>.
- [2] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete, US, 2014.
- [3] Y. Guyon, Prestressed Concrete, New York, NY, 1953.

- [4] J. Zielinski, R.E. Rowe, An investigation of the stress distribution in the anchorage zones of post-tensioned concrete members, *Cem. Concr. Assoc.* (1960).
- [5] D.H. Sanders, Design and behavior of post-tensioned concrete anchorage zones, (1990).
- [6] B. Breen, J. E.; Burdet, O.; Roberts, C.; Sanders, D.; Wollmann, G.; and Falconer, Anchorage zone reinforcement for post-tensioned concrete girders, *Transportation Research Board*, 1994.
- [7] C.E. de N. CEN, Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, 2013.
- [8] Comisión Permanente del Hormigón, Código Estructural. Anejo 19. Proyecto de estructuras de hormigón. Reglas generales y reglas para edificación., 2021.
- [9] C. 1 ACHE, Monografía M-6: Método de Bielas y Tirantes, 2003.
- [10] C.E. de N. CEN, Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón Parte 2: Puentes de hormigón, 2013.
- [11] Comisión Permanente del Hormigón, Código Estructural. Anejo 21. Proyecto de estructuras de hormigón. Reglas de proyecto en puentes de hormigón, Centro de Publicaciones Ministerio de Transporte Movilidad y Agencia Urbana, 2021.
- [12] D. Suescum-Morales, J.D. Ríos, A.M. De La Concha, H. Cifuentes, J.R. Jiménez, J.M. Fernández, Effect of moderate temperatures on compressive strength of ultra-high-performance concrete: A microstructural analysis, *Cem. Concr. Res.* 140 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106303>.
- [13] H. Cifuentes Bulté, J.D. Ríos Jiménez, A. Martínez de la Concha, Analysis of the Behavior of Very High Strength Concrete Subjected to Thermal Shock Loading, *Hormig. y Acero.* 73 (2022) 73–79. <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2284>.
- [14] A. Martínez-de la Concha, J.D. Ríos, H. Cifuentes, Numerical Study of the Shear Behavior of Ultra-High-Performance Concrete Beams, *Hormig. y Acero.* 75 (2024) 157–162. <https://doi.org/10.33586/hya.2023.3119>.
- [15] H. Cifuentes, J.D. Ríos, E.J. Gómez, Effect of mix design on the size-independent fracture energy of normal-And high-strength self-compacting concrete, *Mater. Constr.* 68 (2018) 1–11. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.00717>.
- [16] J.D. Ríos, H. Cifuentes, S. Blasón, M. López-Aenlle, A. Martínez-De La Concha, Flexural fatigue behaviour of a heated ultra-high-performance fibre-reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 276 (2021) 36–38. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122209>.
- [17] Dassault Systèmes Simulia Corp., Abaqus, (2011).
- [18] K.T.S.R. Iyengar, Two-dimensional theories of anchorage zone stresses in post-tensioned prestressed beams, in: *J. Proc.*, 1962: pp. 1443–1466.
- [19] J.C. Ruiz, J. Calavera Ruiz, Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón, Intemac, 1999.
- [20] M.P. Collins, D. Mitchell, Prestressed concrete structures, Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [21] M. López Martín de Oliva, A. Martínez-de-la-Concha, Comportamiento elastoplástico del hormigón pretensado en la zona de los anclajes, 2021.