

Simulación por ordenador del comportamiento resistente de estructuras: El laboratorio virtual de estructuras

**E. Oñate
A. Hanganu
J. Miquel
B. Suárez**

SIMULACIÓN POR ORDENADOR DEL COMPORTAMIENTO RESISTENTE DE ESTRUCTURAS: EL LABORATORIO VIRTUAL DE ESTRUCTURAS

			
Eugenio Oñate oñate@cimne.upc.es	Alex Hanganu alex@cimne.upc.es	Juan Miquel Canet canet@cimne.upc.es	Benjamín Suárez suarez@cimne.upc.es

*Los autores son doctores ingenieros de caminos de:
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC
Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería,
Edificio C1, Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona*

RESUMEN

Se presenta el concepto de Laboratorio Virtual de Estructuras (LAVE) para evaluar por ordenador la capacidad resistente de estructuras de hormigón y el coeficiente de seguridad al colapso utilizando modelos de cálculo no lineal basados en la teoría del daño y el método de elementos finitos. Se describen diversos ejemplos de aplicación del LAVE al análisis de la resistencia última de estructuras de hormigón en masa y armado.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado diversos modelos de cálculo para estudiar el comportamiento no lineal de estructuras de hormigón y metálicas. En el caso de estructuras de hormigón, dichos modelos predicen con alto grado de fiabilidad la aparición y evolución de las fisuras y la carga de colapso. En estructuras de acero, los modelos predicen la aparición de zonas plastificadas y la carga última por acumulación de zonas (rótulas) plásticas [1-12].

Cada vez es más evidente que dichos modelos de cálculo pueden utilizarse como complemento (y en muchos casos como una alternativa) a los clásicos ensayos de laboratorio. El término laboratorio virtual de estructuras (LAVE) alude a la posibilidad de reproducir el comportamiento de una estructura, dentro de la fase elástica y hasta la ruina total de la estructura, a través de la simulación por ordenador. El LAVE puede utilizarse con fines docentes en clases de cálculo de estructuras, así como para evaluar la capacidad resistente de estructuras existentes, de nuevos elementos estructurales y de nuevas construcciones. Naturalmente, el LAVE es un complemento efectivo de los laboratorios experimentales de estructuras y la comparación entre los resultados del cálculo con los experimentales, en los casos en que sea posible, es de un alto valor para una valoración más fiable de la capacidad resistente de la estructura. La utilidad del LAVE, sin embargo, es más evidente en los casos en que la experimentación no es posible por causas técnicas, de coste o simplemente por motivos de urgencia.

En los apartados siguientes ampliamos el concepto del LAVE para análisis de estructuras de hormigón, utilizando el método de elementos finitos, en conjunción con un modelo de daño isótropo para caracterizar el comportamiento no lineal del hormigón y un modelo elasto-plástico para reproducir el de las armaduras. Se presentan también diversos ejemplos de aplicación del LAVE desarrollado en el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería de Barcelona en colaboración con el Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en Ingeniería de la Escuela de Ingenieros de Caminos de esa ciudad.

CONCEPTO DE LABORATORIO VIRTUAL DE ESTRUCTURAS

Consideremos el cálculo no lineal de la viga de hormigón en masa de la Figura 1 sometida a una fuerza vertical aplicada en el punto medio. La viga tiene una entalla en la parte inferior central como se muestra en la figura. A partir de un cierto nivel de la fuerza denominada por F_1 comenzarán a aparecer las primeras fisuras en el hormigón. En dicha figura se muestra también la curva que relaciona la fuerza aplicada con la flecha en el centro de la viga. Este nivel de carga indica el inicio del comportamiento no lineal de la estructura. El segundo punto de interés en la curva carga-flecha es el correspondiente a la fuerza máxima que resiste la viga (F_c en la Figura 1).

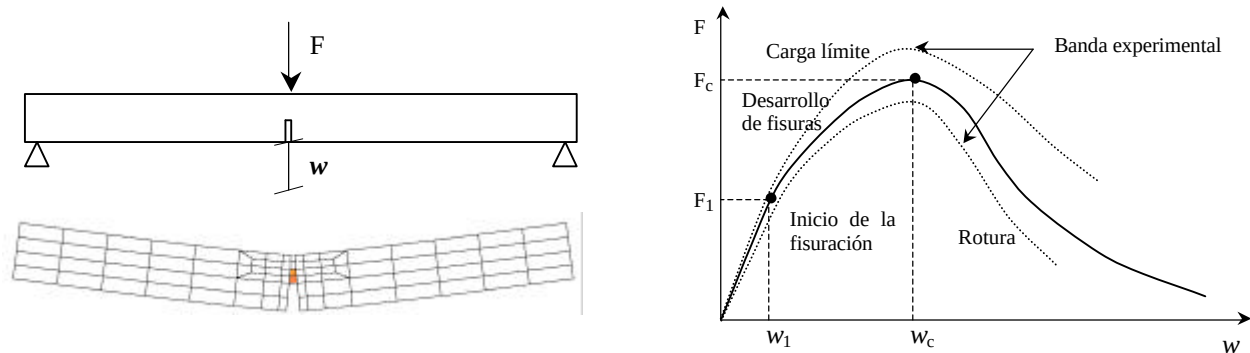


Figura 1: Comportamiento no lineal de una viga de hormigón en masa.

La fuerza F_c es la carga de colapso a partir de la cual se produce la ruina de la estructura, caracterizada por un rápido descenso de la curva (ver Figura 1). Naturalmente a partir de los valores de F_1 y F_c pueden definirse dos coeficientes de seguridad:

Coeficiente de seguridad a la aparición de fisuras: $m_1 = \frac{F}{F_1}$

Coeficiente de seguridad al colapso: $m_c = \frac{F}{F_c}$

Obviamente, valores de m_1 y m_c próximos a la unidad indican situaciones peligrosas para la seguridad de la estructura desde el punto de vista de la existencia de fisuras indeseables o, lo que es más importante, de la proximidad del colapso de la estructura.

En la Figura 2 se muestra un estudio similar aplicado a una estructura de viviendas de hormigón armado modelada como un pórtico bidimensional. En este caso se grafica la evolución de las fuerzas verticales con el desplazamiento horizontal del piso superior. Se aprecia la misma tendencia en la curva: hay un nivel de carga F_1^a para el que aparecen las primeras fisuras y un nivel de carga F_c^a para el cual se produce la ruina estructural, debida en este caso a una combinación de la fisuración del hormigón y la plastificación de algunas armaduras.

Los dos problemas anteriores aunque no similares sí presentan una diferencia radical. El problema de la viga puede reproducirse exactamente mediante una prueba experimental en laboratorio (en la Figura 1 se muestra la concordancia de los resultados numéricos con los experimentales), mientras que la reproducción experimental a escala real del problema de la estructura completa es materialmente imposible.

Es aquí donde se puede apreciar las posibilidades del LAVE, ya que puede utilizarse tanto para predecir el comportamiento de una sencilla pieza o de una compleja estructura. La única diferencia entre ambos tipos de estudios surge del mayor o menor esfuerzo en la modelización de una u otra estructura y en el coste de cálculo asociado.

La potencia del LAVE se manifiesta de forma más clara en su aplicación al diseño de nuevas tipologías estructurales, o en la rehabilitación de estructuras con la intención de mejorar su capacidad resistente. Como ejemplo de una aplicación de este tipo, consideremos la estructura de la Figura 2 en la que se han reforzado las plantas inferiores mediante piezas en equis. La aplicación del LAVE al estudio de la capacidad resistente de la nueva estructura reforzada dará como resultado valores más elevados de la fuerza de inicio de la fisuración y de la carga de colapso (F_1^b y F_c^b en la Figura 2), lo que redunda en una mejora en los coeficientes de seguridad de la estructura.

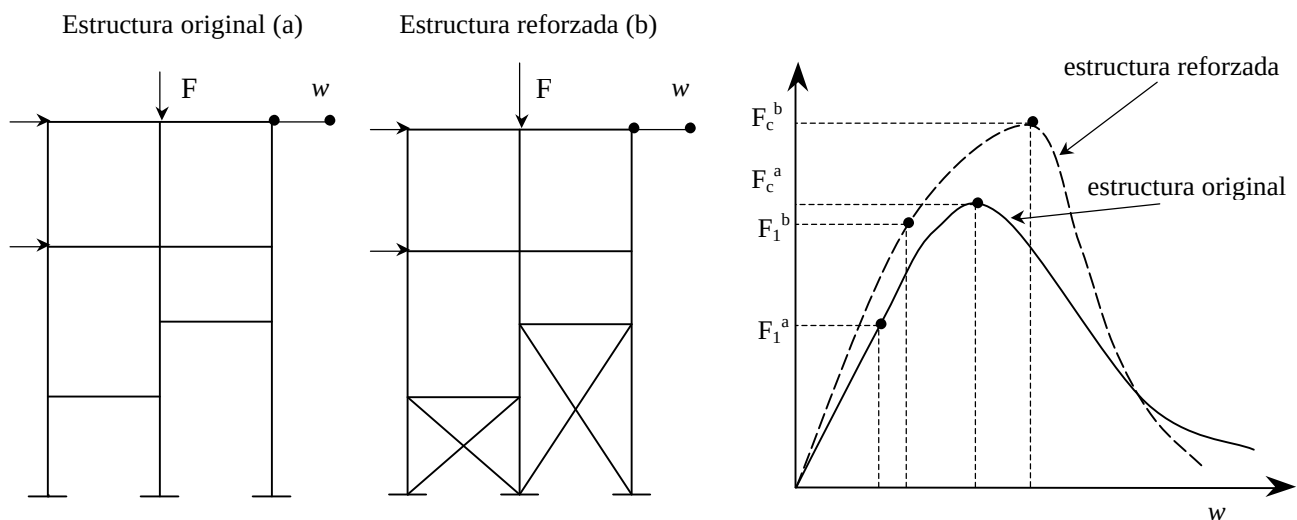


Figura 2: Evaluación de la intervención de restauración sobre un pórtico plano.

Este sencillo ejemplo ilustra las posibilidades del LAVE para evaluar la resistencia de elementos estructurales, estructuras construidas y nuevas estructuras. Mediante el análisis de diferentes diseños de la estructura bajo un conjunto de cargas determinado, pueden encontrarse las dimensiones y tipologías óptimas de la estructura desde el punto de vista de la seguridad.

ANÁLISIS NO LINEAL DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN CON UN MODELO DE DAÑO ISÓTROP

Entre los diversos modelos para simular el comportamiento no lineal del hormigón destaca por su simplicidad el basado en la teoría de daño. Dicho modelo tiene en cuenta todos los aspectos importantes que deben considerarse en el análisis no lineal de estructuras de hormigón y mampostería, tales como la diferencia de comportamiento a tracción y compresión y el efecto de la rigidez debido a causas mecánicas o medio-ambientales, entre otras [1-8].

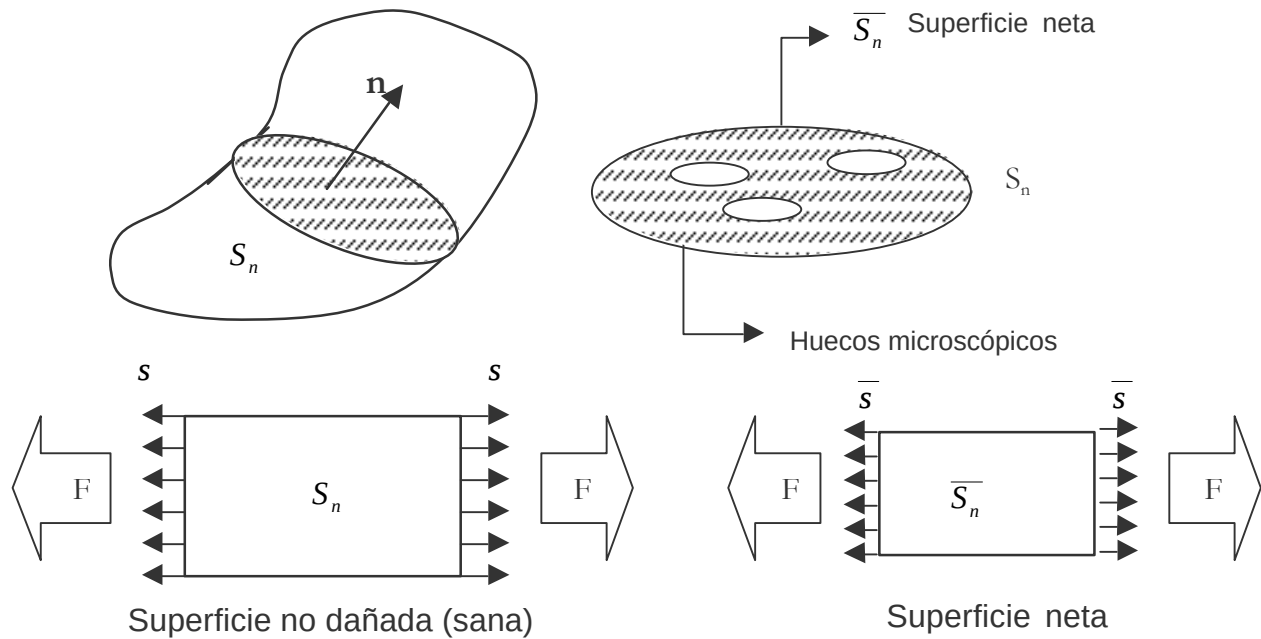


Figura 3: El concepto de daño estructural.

Para aclarar mejor el concepto de daño estructural, se considera una superficie elemental en un volumen de material degradado. Dicha superficie es suficientemente grande para tener un número representativo de defectos, pero al mismo tiempo puede todavía considerarse como perteneciente a un punto material específico. En la Figura 3, S_n es el área de toda la sección, $\bar{S}_n$ el área resistente efectiva (siendo el área ocupada por los huecos $S_n - \bar{S}_n$) y, como consecuencia, la variable de daño d_n asociada a esta superficie es

$$d_n = \frac{S_n - \bar{S}_n}{S_n} = 1 - \frac{\bar{S}_n}{S_n} \quad (1)$$

En la relación anterior d_n representa la densidad de los defectos del material y tendrá el valor cero en el estado inicial no dañado. A medida que la fisuración avanza d_n tenderá hacia un valor crítico cercano a la unidad que corresponde a la completa desaparición del área resistente $\bar{S}_n$. En la mayoría de los casos es suficiente una representación escalar del daño ($d_n = d$) para asegurar la modelización realista del material. En este caso las microfisuras no tienen una dirección particular y la fisura macroscópica se define posteriormente como el lugar geométrico de los puntos dañados.

Un concepto útil para entender el efecto del daño es el de tensión efectiva. La relación de equilibrio entre la tensión de Cauchy estándar σ y la tensión efectiva $\bar{\sigma}$ en el caso de la probeta dañada de la Figura 3 es

$$sS = \bar{s}\bar{S} \quad (2)$$

y utilizando (1) y (2) se obtiene

$$s = (1-d)\bar{s} = (1-d)Ee \quad (3)$$

Durante un proceso de degradación, es el área efectiva la que soporta la carga exterior y, por este motivo, $\bar{s}$ es un parámetro más representativo físicamente que σ .

La ecuación (3) puede extenderse al caso tridimensional como

$$\mathbf{s} = (1-d)\bar{\mathbf{s}} = (1-d)\mathbf{D}\mathbf{e} \quad (4)$$

donde $\mathbf{D}$ es la matriz constitutiva elástica y $\mathbf{s}$ y $\mathbf{e}$ son los vectores de tensión y deformación usuales.

La incorporación de la ecuación constitutiva (4) en las de un modelo de cálculo de estructuras de barras por métodos matriciales o por el método de elementos finitos, conduce a un sistema de ecuaciones algebraicas que puede escribirse en la forma [10]

$$\mathbf{K} \mathbf{a} = \mathbf{f} \quad (5)$$

En la ec.(5) $\mathbf{a}$ y $\mathbf{f}$ son los vectores que respectivamente contienen los desplazamientos incógnitas en una serie de puntos de la estructura (ej. los nudos en una estructura de barras) y las fuerzas exteriores aplicadas en dichos puntos; $\mathbf{K}$ es la matriz de rigidez del modelo estructural que depende de la geometría de la estructura, de las propiedades mecánicas del material y, por tanto, del parámetro de daño d en cada punto. Así, pues, al evolucionar dicho parámetro de un valor inicial nulo a la unidad debido al deterioro del material, se produce la disminución correspondiente del módulo de rigidez y de la rigidez global de la estructura. Esto se traduce en un incremento progresivo de los desplazamientos al aumentar la carga hasta el colapso total.

El modelo de daño requiere el conocimiento del parámetro de daño d en cada instante de tiempo. Existen técnicas para estimar la evolución de d en función de la energía de deformación del punto dañado y de parámetros del material obtenidos a través de sencillos ensayos de rotura de probetas por tracción. Para más detalles se sugiere consultar las referencias [1-8].

Obsérvese que el efecto del parámetro de daño d en las ecs. (3) y (4) es el de *reducir* el módulo de rigidez del material desde el valor inicial (material sano), hasta un valor nulo cuando el material ha perdido toda la rigidez y el valor de d se acerca a la unidad.

Una de las ventajas del modelo de daño isótropo arriba presentado es su fácil implementación en programas de cálculo de estructuras utilizando técnicas matriciales y elementos de barra tradicionales, o elementos finitos que permiten modelar con detalle la geometría de estructuras donde se combinan piezas prismáticas con elementos resistentes sólidos tridimensionales. Los detalles de la implementación del modelo de daño en un programa de elementos finitos estándar pueden consultarse en las referencias [1, 2, 10].

EL CONCEPTO DE DAÑO GLOBAL

El parámetro de daño d puede interpretarse como una medida de la degradación (pérdida de rigidez) de cada punto de la estructura. Obviamente, si se acumula el daño en una serie de puntos se produce lo que generalmente se denomina *una fisura*, que puede interpretarse en este contexto como el lugar geométrico de una serie de puntos dañados.

Asimismo, si la acumulación de puntos dañados es grande, se producirá la *ruina global* de la estructura. La proximidad de la situación de ruina puede cuantificarse mediante un parámetro de *daño global* (definido como D).

Una sencilla definición de este parámetro es

$$D = 1 - \frac{U}{\bar{U}} \quad (6)$$

donde U y $\bar{U}$ son las energías de deformación de la estructura dañada y la estructura intacta, respectivamente. Obviamente, en el inicio de la carga $U = \bar{U}$ y $D = 0$.

Al progresar el daño en la estructura, ésta tiende a deformarse, consumiendo progresivamente menos energía de deformación. En el límite, al producirse el colapso, la estructura se deforma como un mecanismo sin consumir energía. En ese instante $\bar{U} = 0$ y $D = 1$.

Así, pues, los valores, del parámetro de daño global D oscilan entre 0 (estructura intacta) y 1 (colapso estructural).

Es importante advertir que el valor de $D = 1$ se alcanza cuando se produce una pérdida de rigidez en una zona o zonas de la estructura por acumulación de daño local, de manera que se produce el colapso de esa zona (que puede coincidir o no con toda la estructura) a través de un mecanismo de rotura que absorbe toda la deformación de la estructura. Es interesante destacar que el parámetro de daño global puede calcularse para una parte de la estructura (una planta, un conjunto de pilares, etc.) así como para la estructura completa. De esta forma puede evaluarse la influencia de dicha parte en el comportamiento no lineal de toda la estructura [1,2,3,8].

INCLUSIÓN DEL EFECTO DE LAS ARMADURAS

Para el acero de las armaduras se acepta un comportamiento elasto-plástico clásico con una ley de endurecimiento obtenida de ensayos experimentales. Si se utiliza un modelo estructural de lámina, el efecto de las armaduras puede incluirse a través de una formulación de capas en la que a cada capa que discretiza el espesor se le asignan las propiedades del hormigón o del acero, como si se tratara de un material compuesto laminado. El modelo de capas es también aplicable en piezas prismáticas, si bien en este caso es más exacto utilizar un modelo de celdas para discretizar la sección transversal de la pieza. Si se utilizan sólidos tridimensionales el efecto del acero se incluye también a través de capas con la cuantía de acero equivalente. Dichas capas se asignan a superficies interiores al elemento sobre las que se efectúa integración numérica dentro del proceso del cálculo de la matriz de rigidez sobre el volumen del elemento. Para más detalles consultar las referencias [2,11,12].

APLICACIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL DE ESTRUCTURAS

La aplicación del LAVE es sencilla. Los pasos esenciales en su utilización al estudio de la capacidad resistente de una estructura son:

- a) Modelado geométrico de la estructura a analizar en función de parámetros de geometría, tales como coordenadas de puntos, secciones, etc.
- b) Conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales, incluyendo detalles de la evolución del parámetro de daño local a partir de ensayos de laboratorio.
- c) Discretización del modelo geométrico de la estructura (en barras, en elementos finitos bi o tridimensionales, láminas, etc.) y asignación de materiales, cargas y condiciones de contorno.
- d) Aplicación del programa de cálculo por ordenador.
- e) Representación gráfica de los resultados del cálculo: desplazamientos, tensiones y deformaciones y parámetro de daño local en una serie de puntos seleccionados, parámetro de daño global, coeficientes de seguridad, etc.

Una de las ventajas del LAVE es que, una vez instalado en un ordenador que actúe como servidor de cálculo, puede utilizarse remotamente utilizando tecnología de cálculo por Internet. Ello permite que estudiantes y profesionales puedan realizar análisis y experimentos virtuales sobre la resistencia última de estructuras a distancia (desde casa o puestos de trabajo remotos), lo que abre una nueva perspectiva en los métodos de cálculo y diseño de estructuras.

LIMITES DEL LAVE

El LAVE es de hecho una extensión de los métodos tradicionales de cálculo de estructuras por ordenador, combinados con las facilidades que ofrece Internet para compartir información a través de páginas “web” de cálculo a distancia que contengan también información (bases de datos) sobre resultados de cálculos y de ensayos experimentales.

La utilización del LAVE con fines docentes es ilimitada. Mediante el LAVE los alumnos podrán analizar hasta la rotura una pieza o una estructura para la que se disponga de resultados experimentales. Adicionalmente, los grupos especializados en ensayos de laboratorio sobre estructuras podrán archivar los resultados de las mismos, creando una base de conocimientos experimentales que será muy útil para los futuros usuarios de LAVE.

Obviamente, el LAVE puede utilizarse también en casos en que los resultados experimentales no estén disponibles, siendo ahora el resultado del cálculo la única información sobre el comportamiento resistente de la estructura.

Esta última situación será la usual en la aplicación del LAVE al estudio de estructuras existentes o al diseño de estructuras en los que, obviamente, no es posible realizar pruebas hasta la rotura en estos casos. El técnico que utilice el LAVE deberá conocer en detalle las características geométricas de la estructura, las propiedades de los materiales y las cargas actuantes. Con esa información el LAVE se convertirá en una herramienta imprescindible para evaluar en detalle la capacidad resistente última de la estructura y calcular con precisión los coeficientes de seguridad de la estructura al inicio de la fisuración y al colapso.

EJEMPLOS

Viga entallada sometida simultáneamente a flexión y corte

El LAVE puede simular perfectamente un ensayo de laboratorio como el clásico experimento de modo mixto de rotura de una viga, realizado por Arrea y Ingraffea [13] y que sigue siendo una prueba difícil de superar para los modelos constitutivos más sofisticados. En la Figura 5 pueden verse los resultados obtenidos por el LAVE, que coinciden perfectamente con el ensayo real, tanto en lo que respecta la localización del daño como la curva que representa la fuerza aplicada versus el desplazamiento vertical de los labios de la entalla (δ) de la viga.

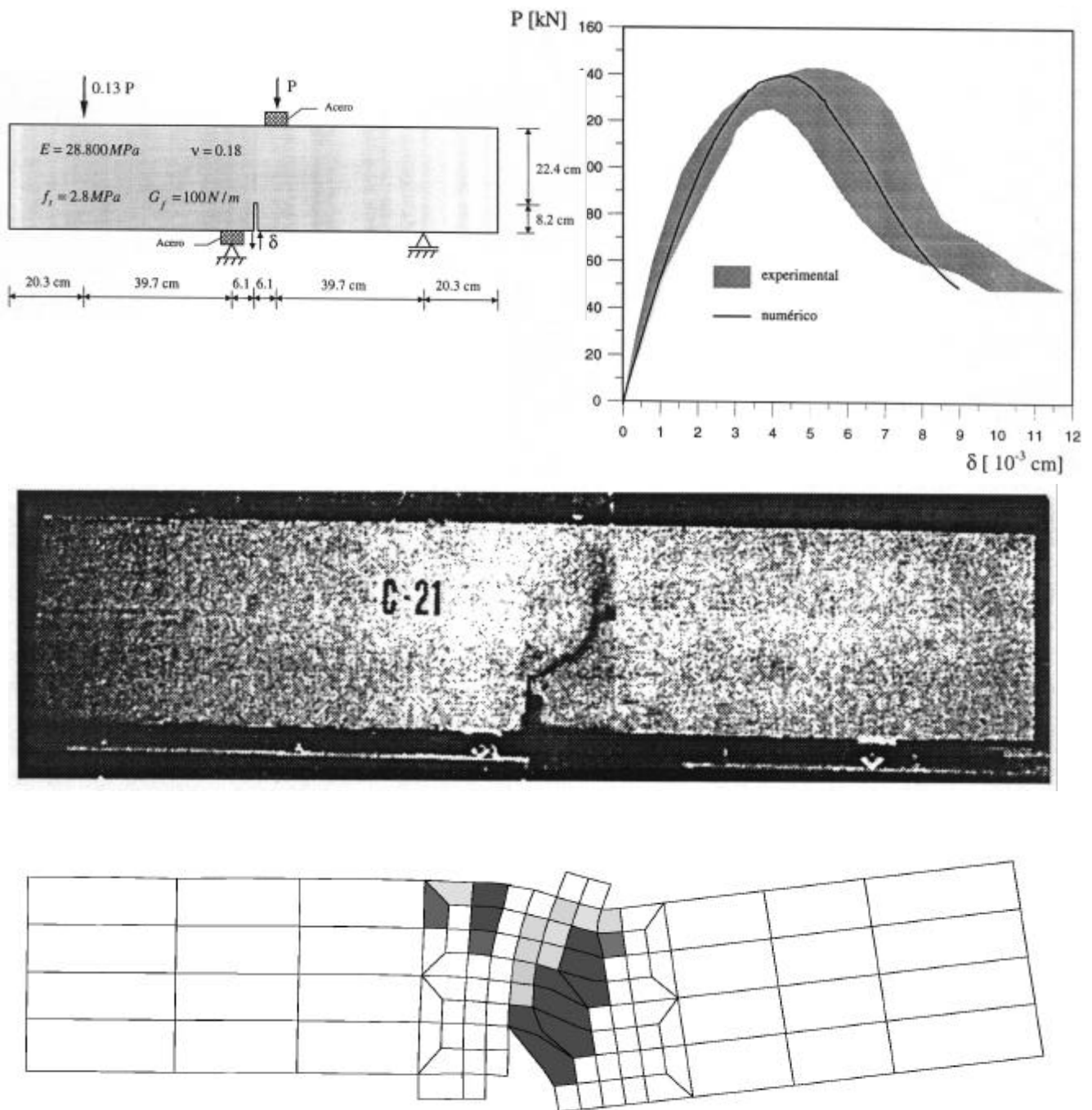


Figura 5: Viga de hormigón en masa con entalla inferior; Curva fuerza versus desplazamiento de la entalla contrastada con los datos experimentales; Localización del daño experimental y numérico.

Estudio de comportamiento estructural de un pórtico plano

En la Figura 6a puede verse la malla deformada de elementos finitos de un pórtico plano de hormigón sometido a la acción de una fuerza horizontal, variable en el tiempo, en su extremo superior izquierdo. Sobre la figura se representan también las zonas dañadas. Esta configuración corresponde al momento del colapso estructural. La evolución de la respuesta de la estructura se presenta en la Figura 6c (curva marcada “sin diagonales”) mientras la Figura 6d muestra la evolución del índice global de daño D a lo largo del proceso de carga.

Se ha modificado la estructura añadiendo unas piezas en diagonal. La correspondiente rigidización aparece reflejada en la curva de puntos (Figura 6c) con el consiguiente cambio de mecanismo de rotura representado en la Figura 6b. Puede observarse la esperada disminución de la ductilidad estructural que es el precio pagado por el aumento de rigidez (Figuras 6c y 6d).

Este tipo de simulaciones en el LAVE pueden reemplazar o complementar con éxito ensayos reales de laboratorio, mejorando el entendimiento del comportamiento detallado de las estructuras no sólo en el rango lineal de comportamiento sino hasta el mismo colapso. Ello contribuirá a mejorar el diseño estructural, puesto que se podrán tener en cuenta aspectos relacionados con el comportamiento no lineal con costes comparables a los análisis lineales tradicionales.

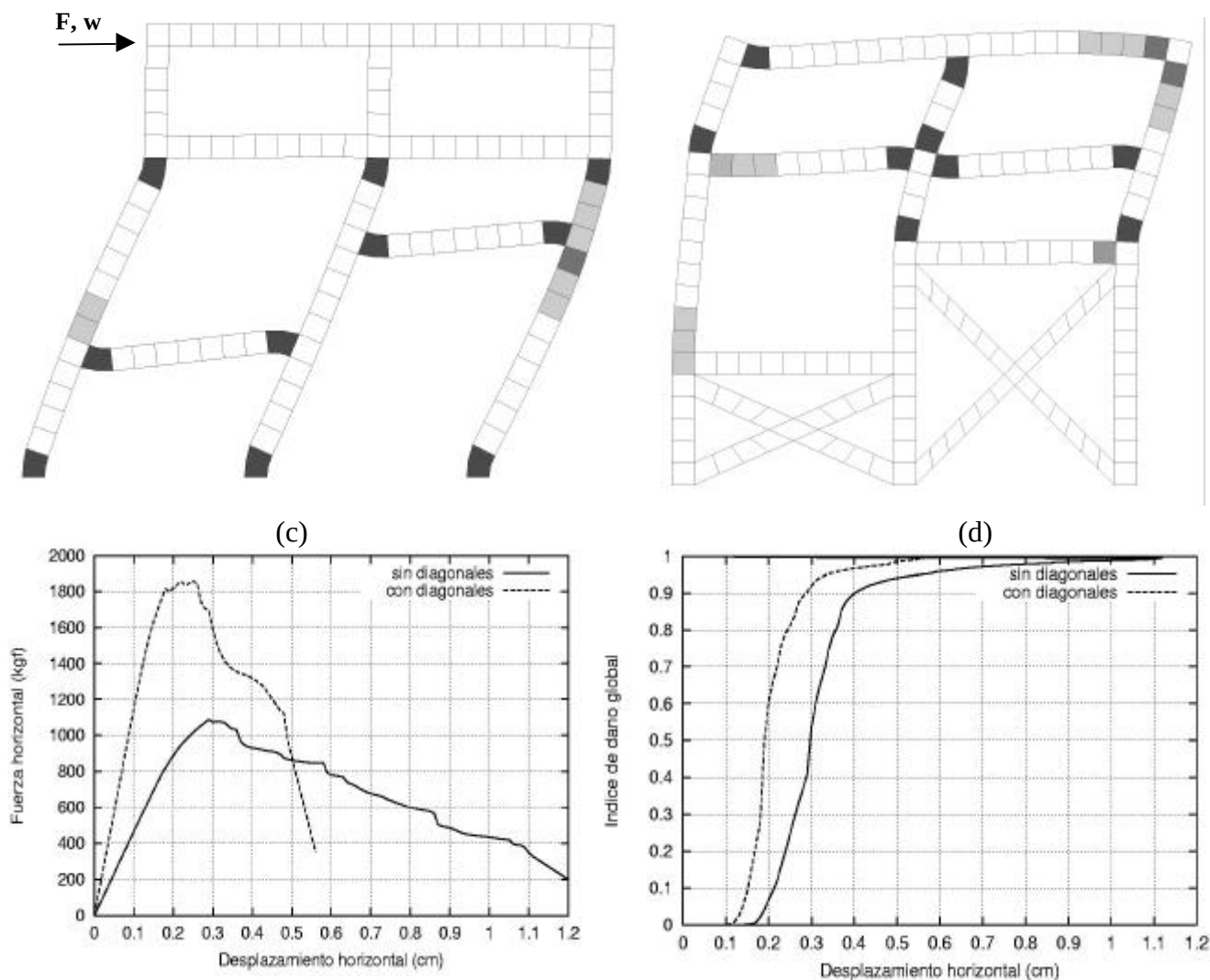


Figura 6: a) Deformada y localización del daño para el pórtico inicial; b) Deformada y localización del daño para el pórtico modificado; c) Curvas fuerza-flecha para los dos pórticos; d) Evolución del daño global D .

REFERENCIAS

- [1] **E. Oñate y A. Hanganu.** *Métodos avanzados para el cálculo de la resistencia última de estructuras de hormigón.* Publicación **CIMNE**, nº-176, Barcelona, 1999.
- [2] **A. Hanganu, A. Barbat y E. Oñate.** *Metodología de evaluación del deterioro en estructuras de hormigón armado.* Monografía **CIMNE**, nº-39, Barcelona, 1997.
- [3] **A. Hanganu, S. Oller, E. Oñate y A. Barbat.** “Evaluación del daño sísmico en modelos 3D de edificios de hormigón armado”, *Métodos numéricos en ingeniería.* **SEMNI**, Barcelona, 1993.
- [4] **R. Faria y J. Oliver.** *A rate dependent plastic-damage constitutive model for large scale computation in concrete structures.* Monografía **CIMNE** nº-17, Barcelona, 1993.
- [5] **M. Galindo, J. Oliver y M. Cervera.** *Simulación numérica de presas de hormigón frente a acciones sísmicas,* Monografía **CIMNE** IS-3, Barcelona, 1993.
- [6] **M. Cervera, J. Oliver, E. Herrero y E. Oñate.** “A computational model for progressive cracking in large dams due to the swelling of concrete”, **Engng. Fracture Mechanics**, 35, 1990.
- [7] **E. Oñate.** *Reliability analysis of concrete structures. Numerical and experimental studies.* Publicación **CIMNE** nº-107, Barcelona, 1997.
- [8] **E. Oñate, A. Hanganu, A. H. Barbat, S. Oller, R. Vitaliani, A. Saetta y R. Scotta.** *Structural analysis and durability assessment of historical constructions using a finite element damage model,* en “Structural analysis of historical constructions: possibilities of numerical and experimental techniques”, Editores P. Roca, J. L. González, A. R. Martí y E. Oñate, **CIMNE**, Barcelona, 1997.
- [9] **E. Oñate.** *Cálculo de estructuras por el método de los elementos finitos: Análisis estático lineal*, 2ª edición, **CIMNE**, Barcelona, 1995.
- [10] **E. Oñate.** *Lectures on non linear analysis of concrete shells,* Monografía **CIMNE** nº-7, Barcelona, 1992.
- [11] **M. Cervera, A. H. Barbat, A. Hanganu, E. Oñate y C. Cirauqui.** “Evaluación de la presión de fallo del edificio de contención de una central nuclear tipo PWR-W tres lazos. Parte I: Metodología”, **RIMNE** 11(2), Barcelona, 1995.
- [12] **A. H. Barbat, M. Cervera, C. Cirauqui, A. Hanganu y E. Oñate.** “Evaluación de la presión de fallo del edificio de contención de una central nuclear tipo PWR-W tres lazos. Parte II: Simulación numérica”, **RIMNE** 11(3), Barcelona, 1995.
- [13] **M. Arrea y A. R. Ingraffea.** “Mixed mode crack propagation in mortar and concrete”, Cornell Univ., Dept. Struct. Engng. Report 81-13, Ithaka, New York, 1981.