

# Un portal de cálculo para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras aperticadas mediante elementos finitos

Betsy Vera<sup>1</sup>, Maylett Uzcátegui<sup>2</sup>, Mónica Puglisi<sup>3</sup>, Luís Núñez<sup>2</sup>, María Eugenia Marante<sup>4</sup> y Julio Flórez-López<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Matemáticas Aplicadas (CIMA)  
Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes  
Núcleo la Hechicera, Mérida Venezuela  
Tel.: 58 274 2447111; e-mail: betsy@ula.ve

<sup>2</sup> Centro de Cálculo de la Universidad de los Andes (CECALCULA)  
Edif. General Masini, Av. 4, Piso 3, Oficina B-32, Mérida, Venezuela  
Tel.: 58 274 2524192; e-mail: maylett@cecalc.ula.ve; e-mail: nunez@ula.ve

<sup>3</sup> Departamento de Tecnología y Diseño  
Facultad de Arquitectura, Universidad de Los Andes  
Núcleo la Hechicera, Mérida Venezuela  
Tel.: 58 274 2402862; e-mail: mpuglisi@ula.ve

<sup>4</sup> Decanato de Ingeniería Civil, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado  
Prolongación Avenida La Salle, Barquisimeto, Venezuela  
Tel.: 58 251 2592173; e-mail: emarante@ucla.edu.ve

<sup>5</sup> Facultad de Ingeniería, Departamento de Estructuras  
Universidad de los Andes  
Núcleo la Hechicera, Mérida, Venezuela  
Tel.: 58 274 2402867; e-mail: iflorez@ula.ve

## Resumen

En este artículo se presenta la descripción de un portal de cálculo, llamado Portal de Pórticos, que consiste en un programa de elementos finitos para el análisis dinámico, no lineal, de estructuras aperticadas de concreto armado. El programa está basado en la Teoría del Daño Concentrado la cual ha demostrado describir de forma adecuada el comportamiento de este tipo de estructuras. Para acceder al Portal de Pórticos solo es necesario disponer de un computador personal con acceso a Internet a través de cualquier navegador comercial como Mozilla, Firefox o Explorer. Para mostrar las bondades del Portal de Pórticos se presentan simulaciones numéricas de ensayos experimentales.

**Palabras clave:** Portales de cálculo, Elementos finitos, Teoría del Daño Concentrado.

## A COMPUTING PORTAL FOR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FRAMED STRUCTURES

### Summary

This paper describes a computing portal called "Portal de Pórticos" that contain a finite element program for the dynamic, nonlinear analysis of framed reinforced concrete structures. The program is based on Lumped Damage Mechanics which describes the behavior of this type of structure. To access the "Portal de Pórticos" it is only necessary to have a personal computer with Internet connection through a commercial browser (explorer, mozilla firefox, etc.). To show the accuracy in the results of the program Portal de Porticos, some numerical simulations of experimental tests are presented.

**Keywords:** Computing portal, Finite Element, Lumped Damage Mechanics.

## INTRODUCCIÓN

Hace cuarenta años le tomó semanas, quizá meses, a Ted Mainman, reportar a través del correo ordinario la construcción del primer láser de rubí. Hace veinte, la superconductividad a altas temperaturas fue comunicada vía FAX en días. Hoy, a través de INTERNET, toma segundos anunciar observaciones astronómicas recogidas directamente mediante una red de telescopios espaciales.

La utilización intensiva de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) ha ido transformando la actividad científico-técnica, convirtiendo la computación para (y por) usuarios en una disciplina emergente que abre sus propios métodos y soluciones, explora conjeturas y plantea nuevas situaciones teóricas y experimentales. Las TIC se constituyen en el eje central de la nueva “e-ciencia” al permitir el registro, la acumulación y el acceso a datos experimentales, facilitar el modelaje y la simulación de escenarios posibles y promover, dentro de la comunidad académica, una nueva manera de relacionarse para la producción y disseminación del conocimiento científico. Los ambientes colaborativos virtuales permiten la interacción de grupos de investigación geográficamente distribuidos por intermedio de la red a través de la utilización de herramientas de cooperación electrónica.

La computación se hace cada vez más ubicua, de uso intuitivo y en el futuro cercano apunta a desempeñar el papel que hoy juegan los servicios de agua y electricidad. Una trama de sensores recogerá ingentes cantidades de datos del orden de PetaBytes (1 PetaByte = 103 TeraBytes = 106 GigaBytes), los enviarán a redes de centros de acopio, procesamiento y distribución, donde serán almacenados, custodiados y permanecerán disponibles para la comunidad académica a través del WEB. La información será accedida, procesada y consolidada mediante técnicas de representación del conocimiento y minería de datos por intermedio de interfaces WEB semánticas, con agentes y programas de búsqueda cada vez más inteligentes. Estos resultados serán analizados por los equipos de investigadores, geográficamente dispersos, quienes interactuarán a través de la red mediante sistemas de videoconferencias de escritorios y herramientas de colaboración electrónica. Las conclusiones y los resultados serán compartidos con la comunidad académica y disseminados a la sociedad a través de publicaciones electrónicas interactivas, en las cuales estarán disponibles los datos y las aplicaciones que generaron los resultados y el “e-lector” podrá remodelar nuevos escenarios y sacar sus propias conclusiones.

El significativo poder de cómputo para simulaciones y las inmensas bases de datos accesibles a través de INTERNET, transforman la red en el computador, y los recursos de la red se acceden a través del WEB. Adicionalmente, cada vez es menos necesario conocer los detalles de operación de un sistema de computación para poder utilizarlo. Por ello, la tendencia es que las aplicaciones científicas dispongan de una interfaz WEB que permite su manipulación y, sobre todo su ubicuidad de acceso. En un futuro no muy lejano las aplicaciones serán controladas por interfaces WEB accesibles desde una amplia variedad de dispositivos con acceso inalámbrico. Esta facilidad tiene un importante beneficio adicional que es la popularización del uso de sofisticadas aplicaciones científicas.

Los portales son esas interfaces que permiten a las comunidades de usuarios acceder de forma segura, a las aplicaciones, datos y compartir y difundir los conocimientos. La utilidad misma de los portales como herramientas de interacción y producción de conocimiento ha ido cambiando la definición misma de portales y existe una amplia variedad. Los portales de aplicaciones científicas se constituyen en un importante tipo. En la actualidad, a escala internacional, existen varios proyectos que desarrollan y promueven el uso de portales de aplicaciones científicas. Son variadas las disciplinas que se benefician del uso de los portales para compartir recursos de cómputo, aplicaciones y datos. Entre ellas podemos mencionar los portales en Química, en varias ramas de la Física (Altas Energías, la Astronomía, Plasmas, Gravitación, Geofísica Meteorología) Nanociencias y en Biomedicina.

Si bien los portales de aplicaciones científicas poseen algunas características similares a los sitios WEB comerciales (autenticación, personalización del ambiente de trabajo, registro histórico de su actividad y generalidad de uso, por mencionar algunos de los más comunes), son sistemas mucho más sofisticados que van más allá de una mera interfaz WEB. Este tipo de portales debe manejar credenciales de autenticación para enviar procesos a múltiples sistemas de computación de alto rendimiento, de distintas configuraciones y restricciones de acceso. Deben también, garantizar una información permanente del estado de estos procesos en los distintos ambientes a los cuales han sido enviados y muchos de estos portales tiene incorporadas herramientas de visualización y minería de datos.

Entre los servicios a los cuales se tiene acceso a través de este tipo de interfaces se pueden enumerar:

- Seguridad en el acceso: Los usuarios son autenticados, bien sea a través de claves de acceso o certificados digitales.
- Manejo de Datos: permite el acceso a una estructura de archivos, datos y meta datos, tanto locales como remotos. Igualmente permite la transferencia y sincronización de archivos de datos entre los sistemas remotos y locales.
- Ejecución y seguimiento de procesos: Permite ubicar y reubicar procesos en distintos sistemas computacionales remotos, así como también el seguimiento de estado de su ejecución.
- Servicios de Información: Provee información sobre la disponibilidad de recursos (CPU, almacenamiento, comunicación entre los distintos nodos) disponibles para el usuario.
- Servicios y Herramientas de Colaboración: Algunos portales incorporan herramientas (videoconferencias, chats, voz sobre IP) para que la comunidad pueda interactuar y compartir la información. También pueden ofrecer herramientas para la planificación y seguimiento de proyectos (workflow).
- Servicios de Visualización y análisis de datos: Este tipo de servicios permite a la comunidad vinculada al portal analizar los datos a través de ambientes de visualización, minería de datos y/o análisis estadísticos de datos, compartiendo estos resultados con otros miembros de la comunidad.

Cada vez más y con mayor frecuencia los portales constituyen un ambiente para la interacción de comunidades en las Ciencias e Ingenierías.

En este artículo se describe el primer portal en Ingeniería Estructural con el cual es posible simular el proceso de deterioro y eventual colapso de estructuras aporticadas de concreto armado. Este portal es una interfaz WEB con un programa dinámico no lineal de cálculo estructural por elementos finitos basado en la Teoría del Daño Concentrado<sup>1-5</sup>. Esta teoría se fundamenta en conceptos de la Mecánica de la Fractura, Teoría del Daño Continuo y de la plasticidad concentrada.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la segunda sección se describe el algoritmo general del programa de elementos finitos que constituye el núcleo del portal. A continuación se presentan los conceptos básicos de la TDC que es el modelo físico implementado en el programa de elementos finitos. En la cuarta sección se presenta la descripción de la arquitectura general del sistema. Luego se presentan las herramientas disponibles en el portal y finalmente se muestran algunos resultados numéricos y su validación con resultados experimentales.

## ANÁLISIS NUMÉRICO POR ELEMENTOS FINITOS EN PROBLEMAS DE MECÁNICA DE SÓLIDOS

El método de los elementos finitos es una herramienta numérica muy eficiente para el estudio del comportamiento de sólidos deformables sometidos a solicitaciones externas. Debido a su versatilidad y facilidad de introducir dominios de cálculo complejos es muy adaptable a diversos problemas lo que lo convierte en una alternativa muy práctica y ventajosa para el análisis. En esta sección se describe una formulación general del método de los elementos finitos para el análisis de problemas de mecánica de sólidos.

### Modelos inelásticos en mecánica de los medios continuos y mecánica estructural

La mecánica de sólidos isoterms se expresa mediante tres leyes fundamentales: la ecuación de equilibrio dinámico, la ecuación cinemática y la ley de comportamiento. En el caso general, estas leyes definen un problema no lineal que puede ser expresado mediante ecuaciones variacionales. Si se discretiza el problema mediante el método de los elementos finitos, la ecuación cinemática puede ser escrita de la manera siguiente:

$$\{\varepsilon\}_k = [B]_k \{U\} \quad (1)$$

donde  $\{\varepsilon\}_k$  corresponde a la medida de deformación en el punto de integración  $k$  de la malla de elementos finitos.  $\{U\}$  es la matriz de desplazamientos nodales del sólido discretizado y  $[B]_k$  es la denominada matriz de transformación del punto de integración  $k$ .

La ecuación de equilibrio dinámico (expresada a través del teorema de trabajos virtuales) se puede escribir como:

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k [B]_k^t \{\sigma\}_k + [masa] \{\ddot{U}\} = \{P\} \quad (2)$$

donde  $\{\sigma\}_k$  representa la medida del esfuerzo en el punto de integración  $k$ ,  $\alpha_k$  es el factor de peso del punto de integración,  $[masa]$  es la matriz de masas de la estructura para la discretización escogida,  $\{\ddot{U}\}$  es la matriz de aceleraciones nodales y  $\{P\}$  la matriz de fuerzas nodales.

La ley de comportamiento describe la relación existente entre el valor del esfuerzo  $\{\sigma\}_k$  y la historia de deformaciones en el mismo punto de integración. Cuando el método del estado local es utilizado para expresar esta relación, la ley de comportamiento puede presentarse mediante una ley de estado y un conjunto de leyes de evolución. La primera puede escribirse en términos generales de la manera siguiente:

$$\{R(\sigma_k, \varepsilon_k, A_k, V_k)\} = 0 \quad (3)$$

La expresión (3) describe una relación entre el esfuerzo en el punto de integración  $k$ , las deformaciones en el mismo punto y un cierto número de variables de estado que serán agrupadas en las matrices  $\{A\}_k$  y  $\{V\}_k$ . Las variables en la matriz  $\{V\}_k$  están asociadas a funciones de fluencia o inelásticas. El conjunto de estas funciones de fluencia se introduce de la manera siguiente:

$$\{f(\sigma_k, \varepsilon_k, A_k, V_k)\} \leq 0 \quad (4)$$

por lo tanto, las leyes de evolución del  $l$ -ésimo elemento de la matriz  $\{V\}_k$  se escribe como se indica a continuación:

$$\begin{cases} \dot{v}_l = 0 & \text{si } f_l < 0 & \text{o } \dot{f}_l < 0 \\ \dot{v}_l > 0 & \text{si } f_l = 0 & \text{y } \dot{f}_l = 0 \end{cases} \quad (5)$$

El último conjunto de ecuaciones, el asociado a las variables en  $\{A\}_k$ , puede describirse de la forma:

$$\{T(\sigma_k, \varepsilon_k, A_k, V_k)\} = 0 \quad (6)$$

Un gran número de modelos de la mecánica de los medios continuos y de la mecánica estructural pueden describirse mediante las ecuaciones (3-6).

### Implementación numérica de los modelos inelásticos

La ecuación cinemática y la ley de comportamiento definen de manera implícita una relación entre los esfuerzos, en el punto de integración (o en el elemento)  $k$ , y la matriz de desplazamientos. Las aceleraciones nodales también pueden ser expresadas en función de los desplazamientos después de una discretización temporal por diferencias finitas, y el empleo del método de Newmark u otro algoritmo de integración temporal adecuado. El intervalo de tiempo  $[0, T]$  durante el cual se desea calcular el estado de la estructura es substituido por un conjunto discreto de instantes  $(0, t_1, t_2, \dots, T)$ . El sólido es calculado solamente en los instantes considerados y no para el intervalo completo. La diferencia en tiempo entre dos instantes consecutivos ( $\Delta t = t_1 - t_2$ ) es llamada "paso del problema global". La ecuación de equilibrio (2) en uno de estos instantes dados puede entonces expresarse en función de una única incógnita  $\{U\}$ :

$$\{L(U)\} = \sum_{i=1}^n \alpha_k [B]_k^t \{\sigma(U)\}_k + [masa] \{\ddot{U}(U)\} - \{P\} = 0 \quad (7)$$

La ecuación (7) junto con las condiciones de contorno en desplazamientos define un problema denominado "problema global". Este problema es habitualmente resuelto por el método de Newton. Cada iteración del método de Newton requiere la solución del siguiente problema lineal:

$$\{L(U)\} \cong \{L(U_0)\} + \left[ \frac{\partial L}{\partial U} \right]_{\{U\}=\{U_0\}} \{U - U_0\} = 0 \quad (8)$$

donde  $\{U_0\}$  representa la matriz de desplazamientos en el instante considerado y en la iteración precedente. Para calcular la matriz de desplazamientos en la iteración actual es necesario determinar todas las matrices de esfuerzo  $\{\sigma(U_0)\}_k$  así como sus jacobianos puesto que ellos son necesarios para el cálculo de  $\{L(U_0)\}$  y de su derivada. Este cálculo es denominado "problema local". Puede constatarse observando las ecuaciones (3-6) que este problema local es en general no lineal lo que implica el empleo del método de Newton para resolver cada uno de los  $n$  problemas locales. El procedimiento aquí descrito es el método estándar para la resolución de este tipo de problemas (Benallal *et al.*<sup>6</sup>). La convergencia del método de Newton depende de que tan "cerca" esté la matriz de desplazamientos utilizada en la primera iteración, con respecto a la solución del sistema de ecuaciones. Usualmente esta primera matriz de desplazamientos es la solución obtenida para el instante anterior o alguna otra derivada de ella. En otras palabras, la convergencia del método de Newton depende del tamaño del paso de cálculo. En el procedimiento estándar este paso de cálculo es único y debe satisfacer la convergencia tanto del problema global como de los  $n$  problema locales. De esta manera, si la falta de convergencia se da en alguno de los  $n$  problemas locales, se reduce el paso de cálculo de los  $n + 1$  problemas considerados.

El procedimiento anterior sería óptimo si los  $n + 1$  problemas no lineales involucrados tuvieran exigencias similares respecto al tamaño del paso de integración. Sin embargo este no es el caso. En casi todas las aplicaciones prácticas, los  $n$  problemas locales pueden ser agrupados en tres categorías. La primera corresponde a aquellos puntos de integración o

elementos cuyo comportamiento es elástico. En estos, el problema local se resuelve con una sola iteración y el problema de convergencia no se plantea. Habitualmente estos corresponden a buena parte de los problemas locales planteados para un instante dado. El segundo grupo corresponde a aquellos problemas locales no lineales que tienen requerimientos de pasos similares o inferiores a los del problema global. El primer y el segundo grupo conforman la inmensa mayoría de los problemas locales. En los ejemplos realizados por los autores esta cifra representa entre el 70 y el 95 % de los problemas locales. El último grupo corresponde a aquellos puntos de integración o elementos donde se concentra el daño o la disipación de energía. En estos, el problema local es extremadamente no lineal y las exigencias para el paso de integración son varios órdenes de magnitud superiores a los del problema global. Con el algoritmo estándar, todos los problemas necesarios para cada iteración deben resolverse con el menor de todos los pasos: aquel que corresponde al problema más difícil de todos los planteados. Es evidente que este procedimiento es extremadamente ineficiente. Estas observaciones sugieren que podría obtenerse un algoritmo mucho más eficaz si cada problema pudiera resolverse con pasos de integración diferentes. El algoritmo que se sugiere consiste en determinar el paso global de manera independiente a los pasos locales<sup>7,8</sup>. Estos últimos tienen como límite superior el tamaño del paso global, pero de ser necesario pueden ser tan pequeños como el usuario lo decida. De esta manera, los problemas locales más difíciles, aquellos donde se concentra el daño y la plasticidad, pueden ser resueltos con pasos de integración 100, 1000 o hasta 10000 veces más pequeños que el paso del problema global. Los ahorros de tiempo que se obtienen han demostrado ser extraordinarios<sup>7</sup>.

## TEORÍA DEL DAÑO CONCENTRADO

La Teoría del Daño Concentrado permite el análisis de estructuras aporticadas de concreto armado y de acero estructural. Esta teoría ha sido desarrollada en la Universidad de Los Andes desde principios de los años 90 y combina el concepto de rótula plástica con los métodos de la Teoría del Daño Continuo y de la Mecánica de la Fractura<sup>1-5</sup>.

En la Teoría de Daño Concentrado cada elemento del pórtico está compuesto por una viga-columna elástica y dos rótulas inelásticas como se muestra en la Figura 1. En el caso específico de estructuras aporticadas planas, la matriz  $\{U\}$  contiene los desplazamientos nodales y las rotaciones de los nudos del pórtico con respecto al eje perpendicular al plano que contenga el pórtico. Las matrices  $\{\sigma\}_k$  y  $\{\varepsilon\}_k$  corresponden a medidas de esfuerzos y deformaciones para un elemento  $k$  del pórtico. Específicamente, estas matrices están dadas por:  $\{\sigma\}_k^t = (m_i, m_j, n)_k$  y  $\{\varepsilon\}_k^t = (\phi_i, \phi_j, \delta)_k$  como se muestra en la Figura 2.

### Daño en una rótula plástica

Para un miembro de pórtico plano de concreto armado, se considera un conjunto de variables de daño  $\{D\}^t = \{d_i, d_j, d_a\}$ , donde  $d_i$  y  $d_j$  son una medida de la densidad del agrietamiento por flexión en las rótulas  $i$  y  $j$  respectivamente, como se muestra en la Figura 3 y  $d_a$  corresponde al daño debido a las fuerzas axiales. Estos parámetros pueden tomar valores entre cero y uno al igual que la variable de daño de los medios continuos pero están relacionadas con grietas macroscópicas en el material.

Las deformaciones generalizadas totales del miembro pueden ahora descomponerse en tres partes: las deformaciones de la viga-columna elástica, las deformaciones plásticas y un término adicional debido al daño en el elemento:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{vc}\} + \{\varepsilon^p\} + \{\varepsilon^d\} = [F_o]\{M\} + \{\varepsilon^p\} + \{\varepsilon^d\} \quad (9)$$

donde  $[F_o]$  es la matriz de flexibilidad elástica de la viga-columna elástica.

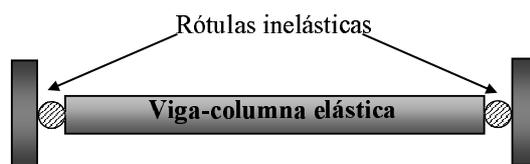


Figura 1. Modelo de disipación concentrada de un miembro de pórtico plano

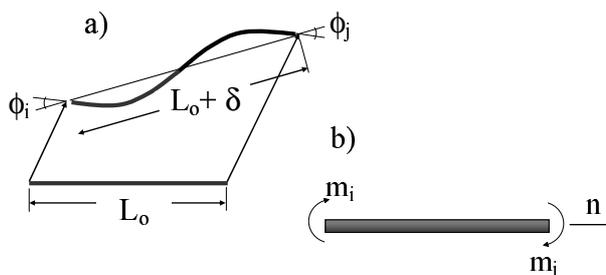


Figura 2. Representación de: a) deformaciones y b) esfuerzos en un elemento de pórtico plano

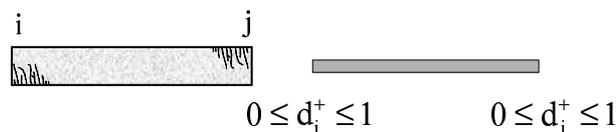


Figura 3. Representación de estado de daño por flexión en un miembro de concreto armado mediante variables internas

### Matriz de flexibilidad de un miembro elastoplástico con daño

Considérese un miembro de pórtico plano sometido exclusivamente a fuerzas axiales. En la Teoría del Daño Continuo<sup>9</sup>, se propone la siguiente ley de estado para un miembro de cercha sometido a fuerzas axiales, suponiendo un estado constante de daño en el miembro

$$\delta - \delta^P = \frac{F_{33}^o}{1 - d_a} n \quad F_{33}^o = \frac{L}{AE} \tag{10}$$

donde  $d_a$  es la variable interna que caracteriza el estado de daño axial, es decir, la densidad de microgrietas y microdefectos debido a efectos axiales,  $\delta$  es el alargamiento de la cuerda,  $\delta^P$  corresponde al alargamiento plástico de la misma,  $n$  es la fuerza axial,  $F_{33}^o$  es el elemento de la tercera fila y tercera columna de la matriz de flexibilidad elástica del miembro,  $L$  es la longitud de la cuerda,  $A$  es el área de la sección transversal del miembro y  $E$  el módulo de Young.

Por analogía con la expresión (9) la relación entre la fuerza axial y el alargamiento de la cuerda es:

$$\delta = \delta^{vc} + \delta^P + \delta^d = F_{33}^o n + \delta^P + \delta^d \tag{11}$$

donde  $\delta^{vc}$  corresponde al alargamiento de la viga-columna elástica y  $\delta^d$  es el alargamiento adicional debido al daño el cual se supone concentrado en las rótulas al igual que el alargamiento plástico  $\delta^P$ .

Comparando las ecuaciones (10) con (11) es posible obtener una definición del término adicional  $\delta^d$ :

$$\delta^d = \frac{\omega F_{33}^o}{1 - d_a} n \quad (12)$$

Con la expresión anterior se obtiene un modelo de inelasticidad concentrada que es equivalente a la Teoría del Daño Continuo en el caso particular considerado. Puede observarse que cuando el daño es igual a cero, no hay deformaciones adicionales. En el otro caso extremo, cuando el daño es igual a 1, se tiene una rótula con flexibilidad infinita (o rigidez nula). En otras palabras, rótula y viga-columna elástica pueden suponerse desconectadas y el conjunto no tiene capacidad alguna para transmitir fuerzas axiales.

En el caso general cuando los efectos de flexión y carga axial están presentes simultáneamente, el problema es demasiado complejo como para obtener resultados analíticos similares. Por lo tanto se postula que las deformaciones generalizadas debidas al daño se expresan de la siguiente manera:

$$\{\varepsilon^d\} = [C(D)]\{\sigma\}; \quad \text{donde} \quad [C(D)] = \begin{bmatrix} \frac{d_i F_{11}^o}{1 - d_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{d_j F_{22}^o}{1 - d_j} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{d_a F_{33}^o}{1 - d_a} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación (13) en (9) se obtiene la ley de estado de un miembro elastoplástico dañado:

$$\{\varepsilon - \varepsilon^p\} = [F(D)]\{\sigma\} \quad \text{o} \quad \{\sigma\} = [K(D)]\{\varepsilon - \varepsilon^p\} \quad (14)$$

donde  $[F(D)] = [C(D)] + [F_o]$  es la matriz de flexibilidad del miembro dañado,  $[F_o]$  es la matriz de flexibilidad elástica,  $[C(D)]$  puede ser considerada como la flexibilidad adicional debida al agrietamiento del miembro y  $[K(D)] = [F(D)]^{-1}$  su matriz de rigidez.

### **Función de fluencia de las rótulas plásticas con daño**

Las leyes de evolución de las deformaciones plásticas generalizadas se obtienen mediante dos funciones de fluencia, una para cada rótula plástica. Si se consideran rótulas plásticas perfectas, se tiene:

$$f_i(m_i) = |m_i| - m_y \quad f_j(m_j) = |m_j| - m_y \quad (15)$$

donde  $f_i$  es la función de fluencia de la rótula  $i$  y  $f_j$  la de la rótula  $j$ .

Con el fin de representar el efecto Baushinger, a las expresiones (15) se les incorpora un término de endurecimiento cinemático lineal ( $\alpha c \phi^p$ ). Adicionalmente para considerar el aumento del tamaño del dominio elástico se introduce un término de endurecimiento isótropo lineal ( $\beta c p$ ) que se considera dependiente de la máxima rotación plástica  $p$ .

La introducción de un concepto equivalente al de esfuerzo efectivo<sup>9</sup> para el caso de momentos flectores en una rótula resulta en:

$$\bar{m}_i = \frac{m_i}{1 - d_i}; \quad m_j = \frac{m_j}{1 - d_j} \quad (16)$$

Si se suponen despreciables todos los efectos inelásticos axiales: alargamientos permanentes y daño axial, las funciones de fluencia para las rótulas plásticas con daño se obtienen a partir de las funciones de fluencia plásticas perfectas incorporándoles endurecimientos

cinemático e isótropo lineal y la noción de esfuerzo efectivo. Las funciones de fluencia resultantes se muestran a continuación

$$\begin{aligned} f_i(m_i, \phi_i^p, d_i) &= \left| \frac{m_i}{1-d_i} - \alpha_i c_i \phi_i^p \right| - (m_y + \beta_i c_i p_i); \\ f_j(m_j, \phi_j^p, d_j) &= \left| \frac{m_j}{1-d_j} - \alpha_j c_j \phi_j^p \right| - (m_y + \beta_j c_j p_j); \end{aligned} \quad (17)$$

$c$  y  $m_y$  son coeficientes que dependen de las propiedades del material del miembro, de su geometría y de la fuerza axial como se describe en Cipollina<sup>2</sup>.  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros a los cuales se asigna valores entre cero y uno para considerar el porcentaje de contribución de los términos de endurecimientos cinemático e isótropo al endurecimiento global. En el caso de estructuras de concreto armado  $\alpha$  es 0.80 y  $\beta$  es 0.20.  $p$  es la rotación plástica máxima en valor absoluto, es decir:

$$p_i = \text{máx } |\phi_i^p|; \quad p_j = \text{máx } |\phi_j^p| \quad (18)$$

Las leyes de evolución de las rotaciones plásticas se expresan como:

Para la rótula  $i$ :

Para la rótula  $j$ :

$$\begin{cases} \dot{\phi}_i^p = 0 & \text{si } f_i < 0 \text{ o } \dot{f}_i < 0 \\ \dot{\phi}_i^p > 0 & \text{si } f_i = 0 \text{ y } \dot{f}_i = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{\phi}_j^p = 0 & \text{si } f_j < 0 \text{ o } \dot{f}_j < 0 \\ \dot{\phi}_j^p > 0 & \text{si } f_j = 0 \text{ y } \dot{f}_j = 0 \end{cases} \quad (19)$$

### Leyes de evolución del daño de las rotulas plásticas

La energía de deformación complementaria del miembro dañado se obtiene a partir de la ley de estado (14) como:

$$W^* = \frac{1}{2} \{\sigma\}^t \{\varepsilon - \varepsilon^p\} = \frac{1}{2} \{\sigma\}^t ([F_o] + [C(D)]) \{\sigma\} \quad (20)$$

Si se supone que el daño asociado a las fuerzas axiales es despreciable ( $d_a \cong 0$ ). La tasa de disipación de energía de una rótula plástica se define entonces como:

$$\{G\} = \begin{Bmatrix} G_i \\ G_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial W^*}{\partial d_i} \\ \frac{\partial W^*}{\partial d_j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{m_i^2 F_{11}^o}{2(1-d_i)^2} \\ \frac{m_j^2 F_{22}^o}{2(1-d_j)^2} \end{Bmatrix} \quad (21)$$

donde  $G_i$  y  $G_j$  representan las tasas de disipación de energía en las rótulas  $i$  y  $j$  respectivamente. Las leyes de evolución de las variables de daño se obtienen a partir del criterio de Griffith<sup>10</sup> como:

Para la rotula  $i$ :

Para la rotula  $j$ :

$$\begin{cases} \dot{d}_i = 0 & \text{si } G_i < R_i \text{ o } \dot{G}_i < \dot{R}_i \\ \dot{d}_i \neq 0 & \text{si } G_i = R_i \text{ y } \dot{G}_i = \dot{R}_i \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{d}_j = 0 & \text{si } G_j < R_j \text{ o } \dot{G}_j < \dot{R}_j \\ \dot{d}_j \neq 0 & \text{si } G_j = R_j \text{ y } \dot{G}_j = \dot{R}_j \end{cases} \quad (22)$$

donde  $\dot{d}$  representa el incremento del daño y  $R$  la función de resistencia al agrietamiento.

En la Mecánica de la Fractura Frágil y en la Teoría del Daño Continuo se admite que la resistencia al agrietamiento es una función que depende del incremento de la longitud de la fisura, en el primer caso, o de la variable de daño continuo, en el segundo. Estas funciones se obtienen a partir de observaciones experimentales del comportamiento del material. La

función de resistencia al agrietamiento en la rótula plástica tiene la forma propuesta por Cipollina *et al.*<sup>2</sup>:

$$R_i = G_{cr} + q_i \frac{\ln(1 - d_i)}{1 - d_i} \quad (23)$$

donde  $G_{cr}$  y  $q_i$  son parámetros que dependen de las propiedades del material del miembro, de su geometría y de la fuerza axial como se describe en Cipollina *et al.*<sup>2</sup>

### Daño unilateral en pórticos planos de concreto armado

Experimentalmente se ha observado que cuando las sollicitaciones sobre un pórtico son histeréticas, se produce un fenómeno de abertura y cierre de fisuras. Tal y como se ilustra en la Figura 4, la ubicación de las fisuras producidas por momentos positivos y negativos no es la misma. Las fisuras creadas en alguno de los casos, por ejemplo debido a momentos positivos [Figura 4a)], tienden a cerrarse cuando el momento cambia de signo [Figura 4b)]. Se admite que el daño producido por un momento positivo o negativo no tiene influencia en el comportamiento del elemento mientras las fisuras estén cerradas.

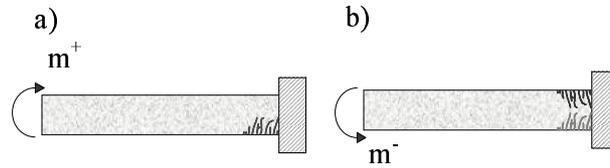


Figura 4. Representación del daño para momentos: a) positivos, b) negativos

Para modelar matemáticamente este fenómeno, se introducen dos variables de daño  $\{D^+\} = (d_i^+, d_j^+)$  y  $\{D^-\} = (d_i^-, d_j^-)$  donde los superíndices + y - describen el agrietamiento debido a momentos positivos y negativos respectivamente. A estas matrices se les denomina daño positivo y daño negativo. La ley de estado (14) se generaliza como:

$$\{\varepsilon - \varepsilon^p\} = [F(D^+)] \langle \sigma \rangle_+ + [F(D^-)] \langle \sigma \rangle_- \quad (24)$$

Los términos  $[F(D^+)]$  y  $[F(D^-)]$  representan las matrices de flexibilidad de un miembro agrietado y tienen la misma forma que en (14) sólo que ahora dependen del daño positivo y negativo respectivamente. Los términos  $\langle \sigma \rangle_+$  y  $\langle \sigma \rangle_-$  representan la parte positiva y negativa de la matriz de esfuerzos generalizados. Esto es:

$$\langle \sigma \rangle_+ = \begin{cases} m & \text{si } m \geq 0 \\ 0 & \text{si } m < 0 \end{cases} \quad \text{y} \quad \langle \sigma \rangle_- = \begin{cases} m & \text{si } m < 0 \\ 0 & \text{si } m \geq 0 \end{cases} \quad (25)$$

Las leyes de evolución de las variables de daño se plantean a partir de dos tasas de disipación de energía para cada rótula. Las tasas de disipación para la rótula  $i$  son:

$$G_i^+ = \frac{F_{11}^o \langle m_i \rangle^2}{2(1 - d_i^+)^2}; \quad G_i^- = \frac{F_{11}^o \langle m_i \rangle^2}{2(1 - d_i^-)^2} \quad (26)$$

De esta manera el criterio de Griffith generalizado para la rótula  $i$  es:

$$G_i^+ - R_i^+(d_i^+) \leq 0; \quad G_i^- - R_i^-(d_i^-) \leq 0 \quad (27)$$

Las funciones  $R^+$  y  $R^-$  representan la resistencia al agrietamiento debido a acciones positivas y negativas respectivamente y tienen la forma:

$$R_i^+ = G_{cr}^+ + q_i^+ \frac{\ln(1 - d_i^+)}{1 - d_i^+}; \quad R_i^- = G_{cr}^- + q_i^- \frac{\ln(1 - d_i^-)}{1 - d_i^-} \quad (28)$$

La función de fluencia de la rótula  $i$  para el caso de daño unilateral se escribe como:

$$f_i = \max \left( \frac{m_i}{1 - d_i^+} - \alpha_i^+ c_i^+ \phi_i^p - (m_{yi}^+ + \beta_i^+ c_i^+ p_i); -\frac{m_i}{1 - d_i^-} + c_i^- \phi_i^p - (m_{yi}^- + \beta_i^- c_i^- p_i) \right) \quad (29)$$

Las leyes de evolución del daño para la rótula  $i$  son:

$$\begin{cases} \dot{d}_i^+ = 0 & \text{si } G_i^+ < R_i^+ & \text{o } \dot{G}_i^+ < \dot{R}_i^+ \\ \dot{d}_i^+ \neq 0 & \text{si } G_i^+ = R_i^+ & \text{y } \dot{G}_i^+ = \dot{R}_i^+ \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{d}_i^- = 0 & \text{si } G_i^- < R_i^- & \text{o } \dot{G}_i^- < \dot{R}_i^- \\ \dot{d}_i^- \neq 0 & \text{si } G_i^- = R_i^- & \text{y } \dot{G}_i^- = \dot{R}_i^- \end{cases} \quad (30)$$

### Implementación por elementos finitos de la Teoría de Daño Concentrado

De acuerdo a la notación presentada en la sección 2, el elemento finito descrito anteriormente está conformado por las ecuaciones (18) a (29) como se muestra a continuación:

Variables:

- Esfuerzos:  $\{\sigma\}_k^t = (m_i, m_j, n)_k$
- Deformaciones:  $\{\varepsilon\}_k^t = (\phi_i, \phi_j, \delta)_k$
- Variables Internas:
  - Variables internas asociadas a las Funciones de Fluencia:  $\{V\}_k^t = (\Phi_i^p, \Phi_j^p, d_i^+, d_j^+, d_i^-, d_j^-)$
  - Variables internas A:  $\{A\}_k^t = (p_i, p_j)$

Ecuaciones:

- Ley de Estado  $\{R(\sigma_k, \varepsilon_k, A_k, V_k)\}$ : ecuación (24).
- Funciones de Fluencia  $\{f(\sigma_k, \varepsilon_k, A_k, V_k)\}$ : ecuaciones (26), (28), (29).
- Ley de evolución de las variables internas asociadas a las Funciones de Fluencia: ecuaciones (19), (30).
- Ecuaciones asociadas a las variables internas A  $\{T(\sigma_k, \varepsilon_k, A_k, V_k)\}$ : ecuaciones (18).

### COMPONENTES DEL PORTAL

El Portal es un programa de elementos finitos no lineales que ha sido diseñado para ser accedido exclusivamente a través de navegadores comerciales como Mozilla, Firefox o Explorer. A través de la dirección <http://portaldeporticos.ula.ve> o <http://150.186.96.9:808/PDP/> la usuaria o usuario tiene acceso a 5 enlaces diferentes, los cuales le permiten digitalizar la estructura, analizarla y posteriormente visualizar sus resultados. Los enlaces son: Preprocesador, Procesador, Postprocesador, Manual de Usuario y, Manual de Teoría. La página que se despliega cuando se entra al sistema se muestra en la Figura 5:



Figura 5. Pantalla para acceder a los módulos del sistema

### ■ Pre-Procesador

El Pre-Procesador es una interfaz Web realizada en el lenguaje de programación Java, que permite la generación de un archivo con extensión .inp. En este módulo del programa, el usuario define la geometría de la estructura y sus apoyos, las propiedades de los elementos estructurales y las solicitaciones a las que será sometido. Para definir la geometría de la estructura, el usuario suministra al sistema: el número de nodos y sus coordenadas, el número de elementos y sus nodos, las propiedades de la sección transversal de los miembros. Estas últimas propiedades son las dimensiones de las secciones transversales, el número de barras tanto en el refuerzo longitudinal como transversal, sus diámetros, y su posición en la sección transversal. El usuario debe definir el comportamiento uniaxial del concreto y el refuerzo, las cargas externas y desplazamientos impuestos, así como los lapsos de tiempo en los que serán aplicadas. La Figura 6 muestra el módulo 'pre-procesador'.

Los submenús usados en el Pre-Procesador son descritos a continuación:

**Geometría:** Se define la geometría del pórtico introduciendo los valores correspondientes a: niveles, tramos, secciones, elementos adicionales y elementos ficticios.

**Gráfico:** Esta opción permite visualizar el pórtico que se está analizando.

**Pasos:** Se escoge el número de pasos que se desea realizar durante el análisis. Las características principales para cada uno de los pasos son: Incremento inicial, duración del paso, incremento mínimo, incremento máximo y frecuencia.

**Nodos:** Permite agrupar los nodos del pórtico en conjuntos, imponer restricciones a los grupos de nodos para establecer las condiciones de borde del pórtico, aplicar cargas en los nodos (aceleraciones, desplazamientos o fuerzas).

**Elementos:** En esta opción se suministra toda la información referente a los elementos contenidos en el pórtico, a través de la creación de los grupos de elementos para posteriormente introducir los datos correspondientes al: Acero transversal, tipo de estribo, acero

longitudinal, cargas distribuidas y concentradas que actúan en el elemento, y finalmente la masa del elemento.

**Materiales:** Se introducen las propiedades mecánicas del concreto y el acero correspondientes al pórtico en estudio (el sistema asume que todos los grupos de elementos poseen propiedades mecánicas idénticas).

**Diagramas de interacción:** El momento crítico ó de agrietamiento, momento plástico o de fluencia, momento último y la curvatura plástica última con sus respectivos niveles de carga axial, son generados a partir de los diagramas de interacción.

Después de graficar los diagramas de interacción, se genera el archivo de datos .inp. Este archivo contiene dos tipos diferentes de datos, los primeros se refieren a la descripción de la geometría del pórtico incluyendo cargas y condiciones de borde, mientras que los segundos se refieren a los diagramas de interacción que contienen los parámetros del modelo. Estos últimos son los procesados por el programa que describe el elemento finito.

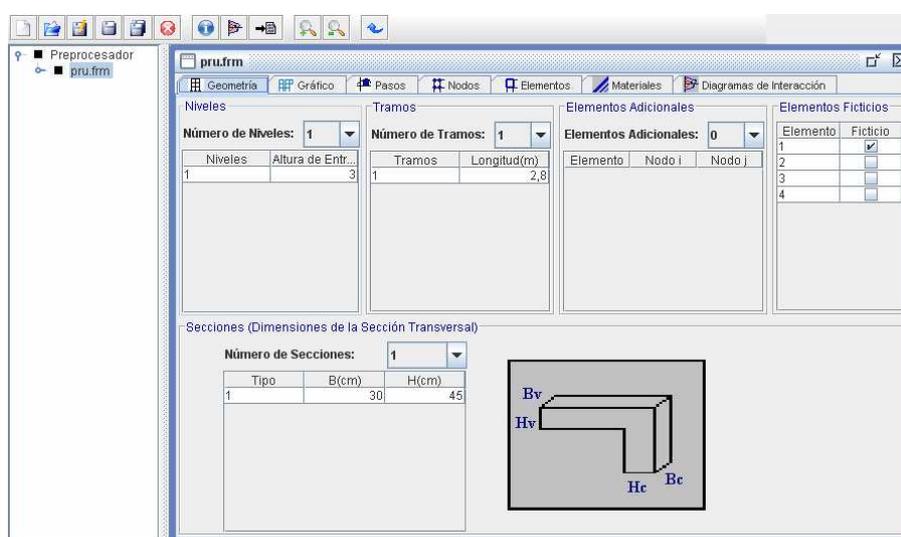


Figura 6. Módulo pre-procesador

## ■ Procesador

El segundo vínculo del portal, el procesador, es una interfaz con el programa de elementos finitos que se encuentra residenciado en un centro de cómputo de alto rendimiento. Este programa de elementos finitos permite el análisis inelástico, estático o dinámico y geoméricamente no lineal de la estructura. Dicho programa ha sido desarrollado específicamente para ser usado a través del enlace Procesador del Portal.

El procesador permite escoger alguno de los archivos de datos que se encuentran en la cuenta del usuario previamente enviados a través de la opción Archivo, para su posterior análisis. El usuario puede monitorear el modelo analizado así como abortarlo si se hace necesario. Al finalizar el análisis se despliega un mensaje que indica que el proceso ha culminado exitosamente. Si el análisis no corre exitosamente se despliega un mensaje que indica el error por el cual se detuvo el proceso. Los resultados del análisis son almacenados en los archivos de resultados y pueden ser descargados por el usuario a través de archivos de texto o usando el módulo de visualización de resultados Post-Procesador del programa Portal de Pórticos. La pantalla que muestra el módulo Procesador se muestra en la Figura 7.

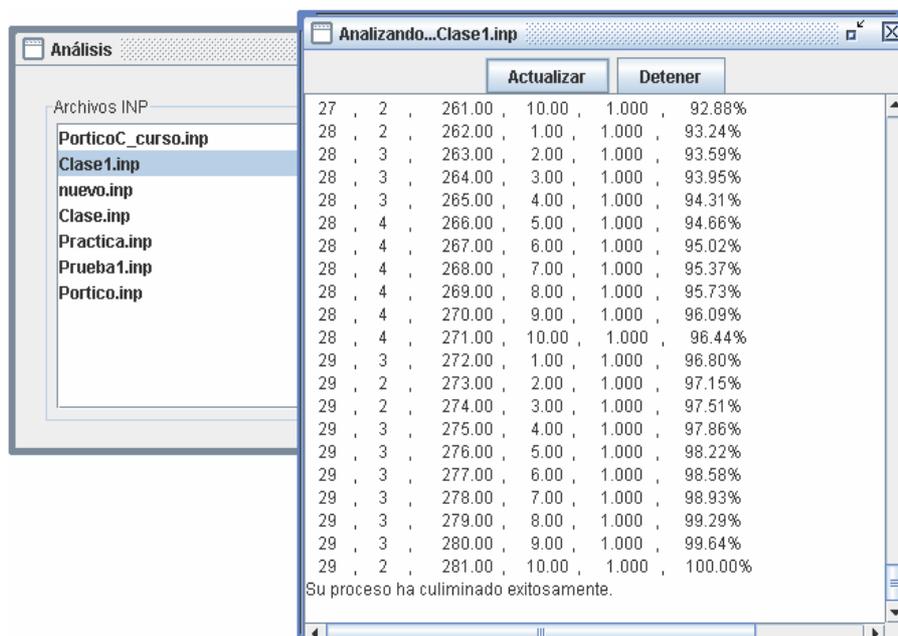


Figura 7. Información del estado del análisis en el procesador

Los archivos de resultados generados con el procesador productos del análisis son:

**Archivo.dat:** Archivo de datos en el cual se almacenan los resultados de las variables calculadas por el programa de elementos finitos para los elementos y nodos de la estructura tales como: rotación total del nodo, deformación axial del elemento, momento flector, carga axial, rotación plástica permanente, daño positivo y negativo, rotación plástica máxima, tasa de disipación de energía en las rótulas debido al agrietamiento positivo y negativo, desplazamientos, reacciones, momentos, tiempo, velocidad y aceleraciones.

**Archivo.sta:** En este archivo se almacena la información sobre el estado del proceso, es decir: Pasos analizados, número total de iteraciones realizadas para cada incremento, tiempo total del paso, tiempo del paso analizado, incremento del tiempo, porcentaje total del análisis ejecutado exitosamente.

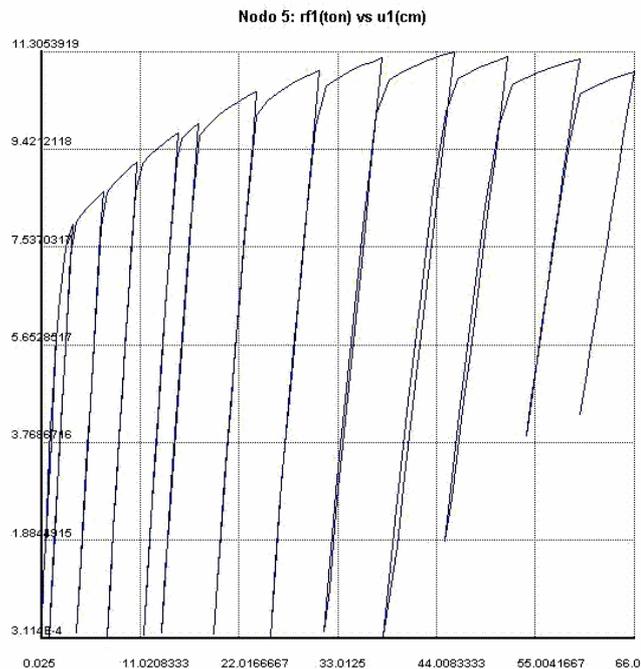
**Archivo.fin:** Archivo utilizado por el postprocesador para generar las gráficas y mapa de daño de la estructura analizada.

**ArchivoRP.txt:** Archivo de datos en el cual se indica el elemento o elementos así como el tiempo en que fue necesaria una reducción del paso cuando el programa no encuentra convergencia.

**Archivo.err:** Archivo de errores que indica al usuario a través de un número o un número y una letra el error por el cual se detuvo el análisis.

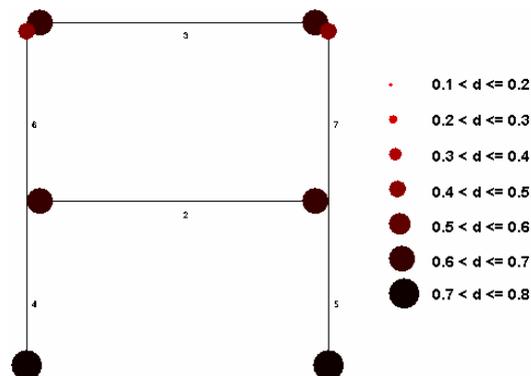
### ▪ Post-procesador

Este módulo permite visualizar los resultados del análisis mediante gráficas de variable contra variable, variables contra tiempo y mapas de distribución de daños en cualquier instante del análisis, es decir, permite mostrar al usuario por medio de gráficos, distribuciones y animaciones el comportamiento de la estructura. En la Figura 8 se muestra una gráfica de fuerza contra desplazamiento en el nodo del tope a través del post procesador del portal.



**Figura 8.** Gráfica de fuerza contra desplazamiento que se genera con el postprocesador

El usuario tendrá la opción de generar el mapa de daño de la estructura por medio del submenú “*Mapa de daño*” para cualquier instante de tiempo del análisis. Como se observa en la Figura 9, los daños son representados por círculos de distintos tamaños que indican el nivel de daño alcanzado en el elemento; este nivel de daño toma valores entre 0 y 1, donde cero (0) indica un elemento intacto, que no ha sufrido daño, mientras que el valor de uno (1) representa un elemento completamente dañado. Además este módulo permite obtener una animación del pórtico analizado y la aparición de los daños en cada elemento a través del tiempo.



**Figura 9.** Mapa de distribución de daño del pórtico analizado

## EJEMPLOS DE SIMULACIONES NUMERICAS CON EL PORTAL DE PÓRTICOS

A continuación se presentan algunas simulaciones numéricas realizadas con el programa Portal de Pórticos de ensayos experimentales encontrados en la literatura. Con el Portal de Pórticos se pueden modelar efectos tales como: Evolución del daño en estructuras planas de concreto armado, pérdida de rigidez y resistencia, fatiga de bajo ciclaje, etc.

### Simulación del ensayo experimental realizado por Abrams<sup>11</sup>

Abrams<sup>11</sup> ensayó especímenes de columnas empotradas en uno de sus extremos y sometidas a desplazamientos laterales reversibles en el extremo libre [Figura 11a)] con el propósito de estudiar la influencia de la variación de la fuerza axial en el comportamiento histerético a flexión en las columnas de concreto armado. En la simulación numérica que se presenta a continuación la columna fue sometida a una carga axial variable. Dicha variación se consideró como una función lineal de la deflexión lateral (ver Figura 11). Las características geométricas de las columnas se muestran en la Figura 10. La resistencia última del concreto ( $f'c$ ) en el espécimen es de 45.9 Mpa y el esfuerzo de fluencia ( $F_y$ ) del refuerzo longitudinal es de 423 Mpa.

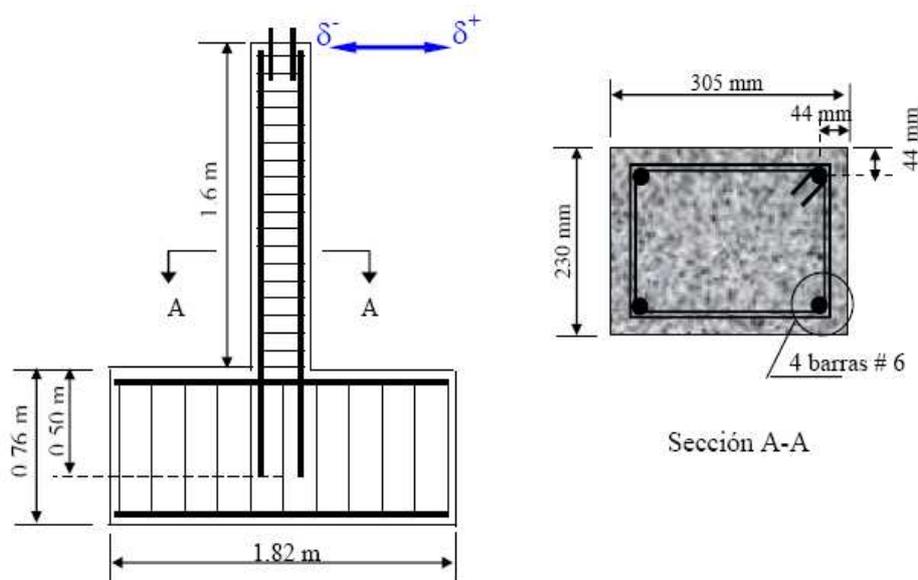


Figura 10. Características geométricas de la columna ensayada por Abrams<sup>11</sup>

En la curva de comportamiento obtenida del ensayo experimental, Figura 12a), se observa que aun cuando la sección transversal del elemento es simétrica, la relación entre el momento y la rotación fue asimétrica. Además la forma de los lazos histeréticos fue influenciada por la variación de la fuerza axial con los cambios en la deflexión lateral. En la Figura 12b) se muestra la simulación numérica del ensayo obtenida con el Portal de Pórticos. Se puede observar que el modelo implementado en el programa Portal de Pórticos representa el comportamiento histerético de los elementos estructurales incluso cuando la carga axial varía con la deflexión.

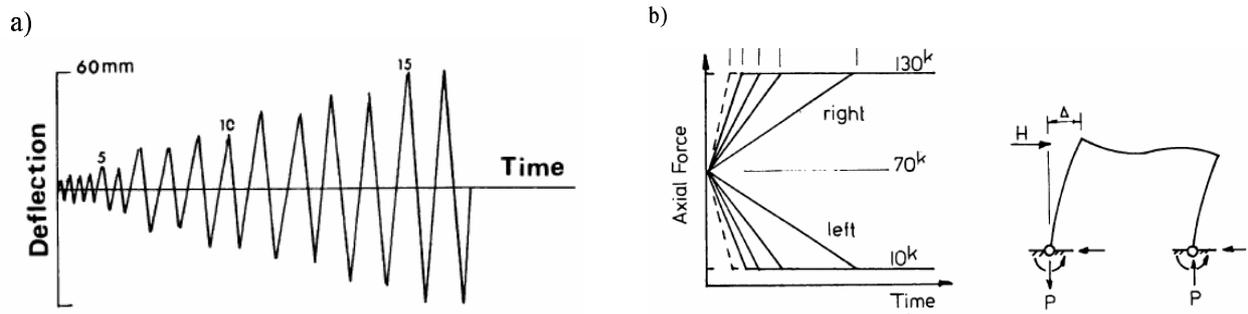


Figura 11. a) Historia de desplazamientos lateral aplicados al espécimen<sup>11</sup>. b) Fuerza axial con variación lineal respecto al desplazamiento lateral aplicada en la columna

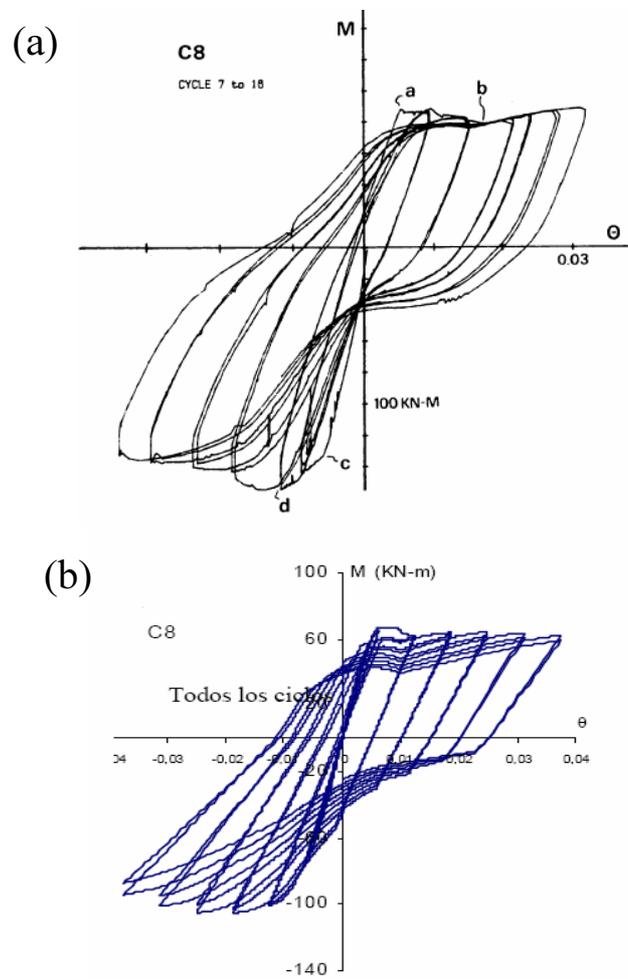


Figura 12. Curva de comportamiento momento – Curvatura con variación en la carga axial respecto a la deflexión a) del ensayo experimental<sup>11</sup>, b) de la simulación numérica realizada con el Portal de Pórticos

### Simulación numérica de un pórtico de concreto armado ensayado por Calvi *et al.*<sup>12</sup>

El ensayo experimental llevado a cabo por Calvi *et al.*<sup>12</sup> consiste en un pórtico de concreto armado de un vano y un piso a escala real, ensayado en el plano a diferentes niveles de deriva. El pórtico de concreto armado fue construido considerando la resistencia de concreto estándar de 25 Mpa ( $f'c=255 \text{ kg/cm}^2$ ) y la resistencia del acero de 500 Mpa ( $f_y = 5100 \text{ Kg/cm}^2$ ). El pórtico fue diseñado como la parte inferior de un pórtico de cuatro niveles siguiendo los procedimientos recomendados en el Eurocódigo 8, incluyendo los principios de diseño por capacidad. Los detalles de la geometría del pórtico y del refuerzo de sus elementos se observan en la Figura 13.

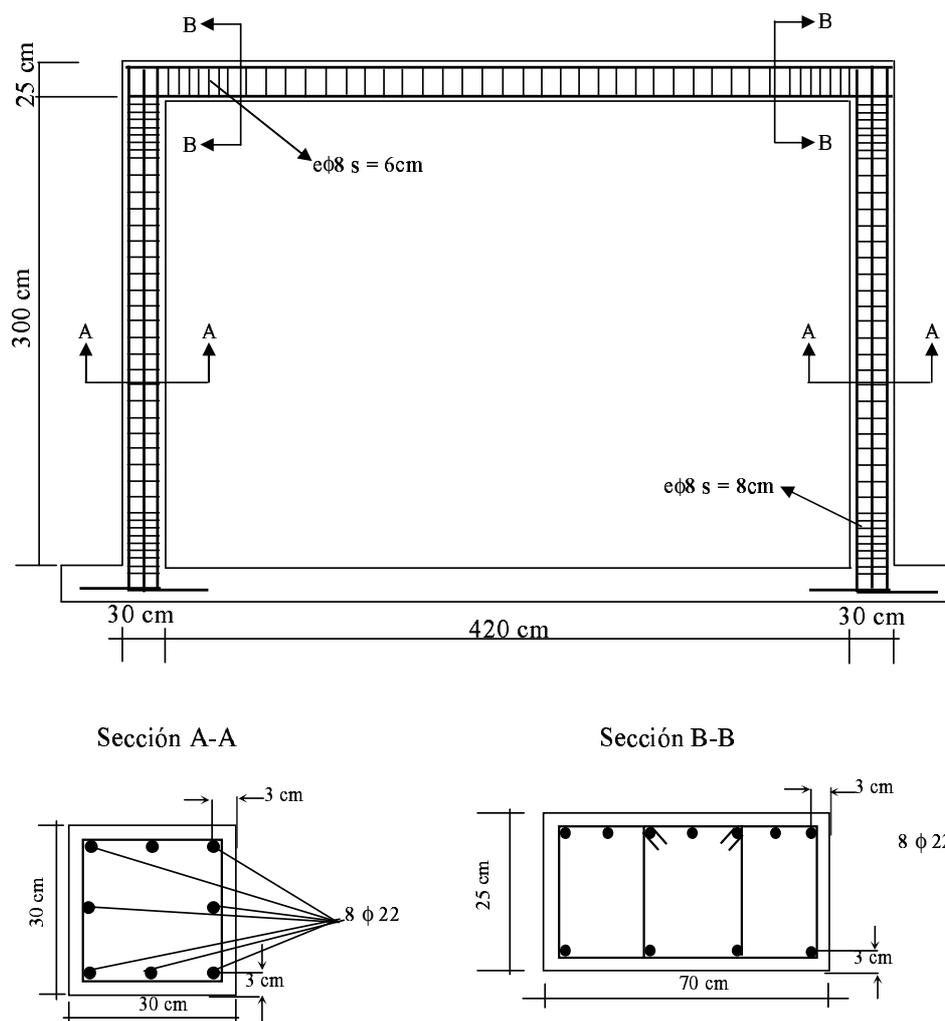


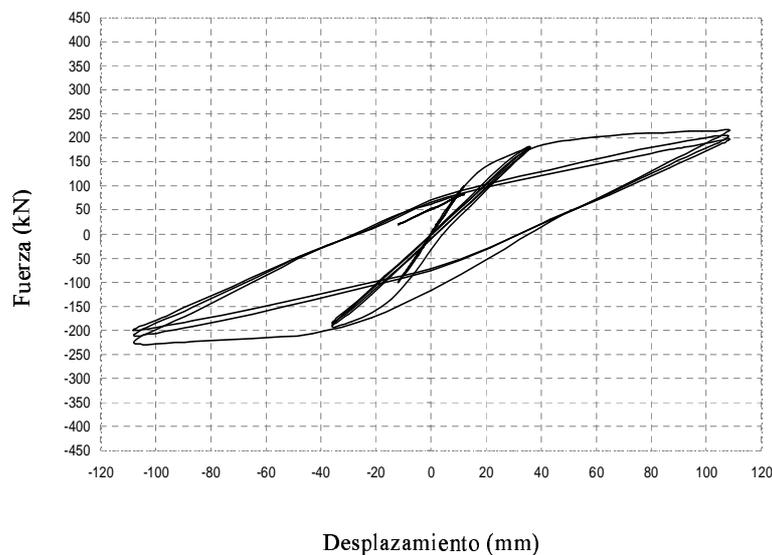
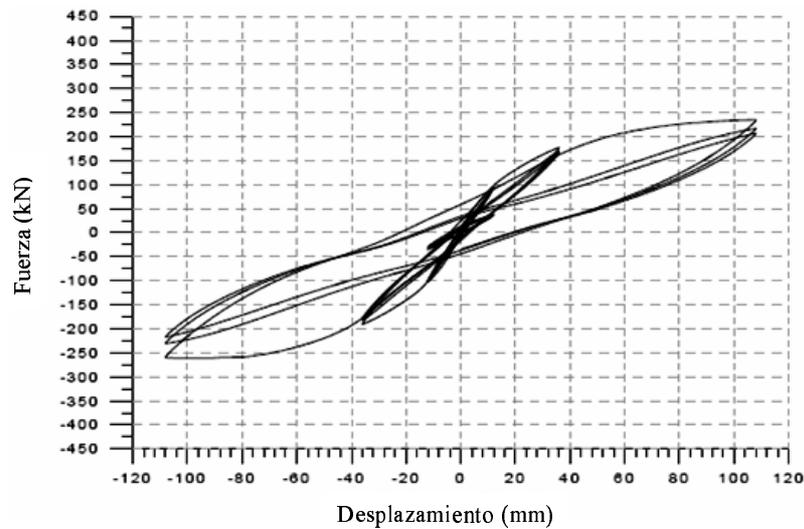
Figura 13. Geometría y detalles del refuerzo del pórtico de concreto armado usado en el ensayo experimental<sup>12</sup>

El ensayo fue realizado aplicando dos cargas verticales en las columnas, para simular la presencia de los pisos superiores. La carga vertical en las columnas se mantuvo constante durante el ensayo, permitiendo la redistribución generada por la aplicación de cargas horizontales. Se aplicaron ciclos de desplazamientos horizontales de acuerdo a los niveles predefinidos de deriva entre 0.1 % y 3.6 % como se muestra en la Tabla I.

Deriva	0.1 %	0.4 %	1.2 %	3.6 %	0.4 %
N° ciclos	3	3	3	3	3

**Tabla I.** Porcentaje de deriva aplicada al pórtico ensayado y número de ciclos aplicados

En la Figura 14a) se observa la curva fuerza-desplazamiento obtenida en el ensayo experimental, en la Figura 14b) se observa la curva fuerza-desplazamiento obtenida en la simulación numérica del ensayo realizado con el Portal de Pórticos. Como se puede observar, en la simulación numérica se logra representar con acertada similitud el comportamiento del pórtico de concreto armado obtenido durante el ensayo experimental.

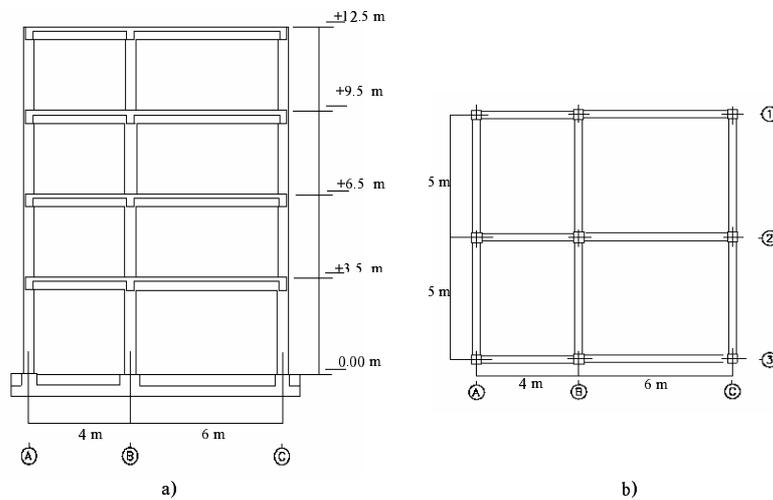


**Figura 14.** a) Curva fuerza-desplazamiento del ensayo experimental realizado por Calvi *et al.*<sup>12</sup>, b) simulación numérica del ensayo experimental realizada con el programa Portal de Pórticos

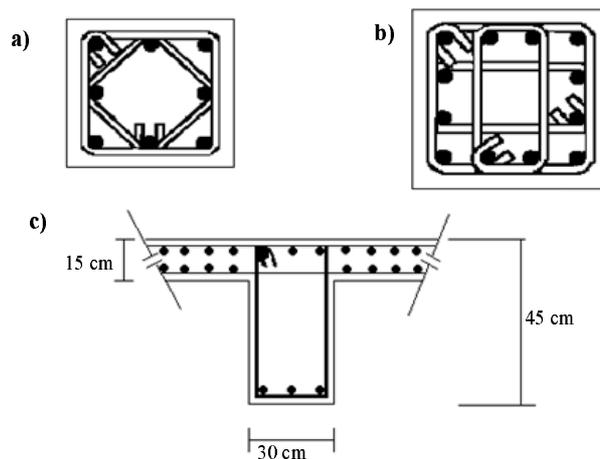
### Ensayo de pórtico a escala real realizado en ELSA<sup>13</sup>

A continuación se presenta la simulación numérica de un ensayo experimental realizado en el Laboratorio Europeo para la Evaluación Estructural (ELSA, por sus siglas en inglés) de un edificio de concreto armado a escala real<sup>13</sup>. El ensayo se llevó a cabo en un muro de reacción que contiene dos losas de reacción ortogonales. El edificio fue sometido a cargas aplicadas por un controlador pseudo-dinámico a través de la acción de un gato hidráulico entre la estructura y el muro de reacción. El diseño de la estructura se llevó a cabo tomando en cuenta el Eurocódigo 2 y 8 suponiendo las cargas típicas en el edificio (cargas muertas y vivas) y alta sismicidad.

Las características geométricas del edificio se observan en la Figura 15. Todas las columnas externas son cuadradas de 400 mm de lado y las columnas internas de 450 mm \* 450 mm [Figura 16a) y b)]. Todas las vigas poseen una sección transversal rectangular de 450 mm de altura y 300 mm de ancho [ver Figura 16c)].



**Figura 15.** Características geométricas del edificio<sup>13</sup>. a) Vista lateral de los pórticos de la estructura, b) vista en planta de la estructura



**Figura 16.** Sección transversal de los elementos de la estructura ensayada<sup>13</sup>. a) Columnas externas (40cm\* 40cm), b) columnas internas (45cm\*45cm), c) sección transversal de las vigas

Se consideró una resistencia del concreto de  $f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$  y un esfuerzo de fluencia del acero de  $Fy = 4200 \text{ Kg/cm}^2$ . En la Figura 17 se observa la historia de desplazamientos impuesta en cada uno de los niveles de la estructura. En la Figura 18 se presentan las historias de cortante basal obtenidas en el ensayo experimental y en la simulación numérica. En la Figura 19a) se muestra la gráfica experimental Desplazamiento vs Cortante basal en el tope del pórtico y en la Figura 19 b) la curva correspondiente a la simulación numérica.

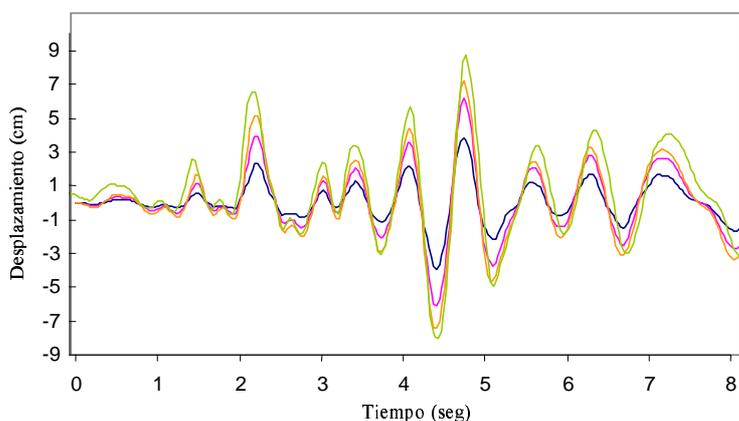


Figura 17. Historia de desplazamientos aplicadas a la estructura<sup>13</sup>

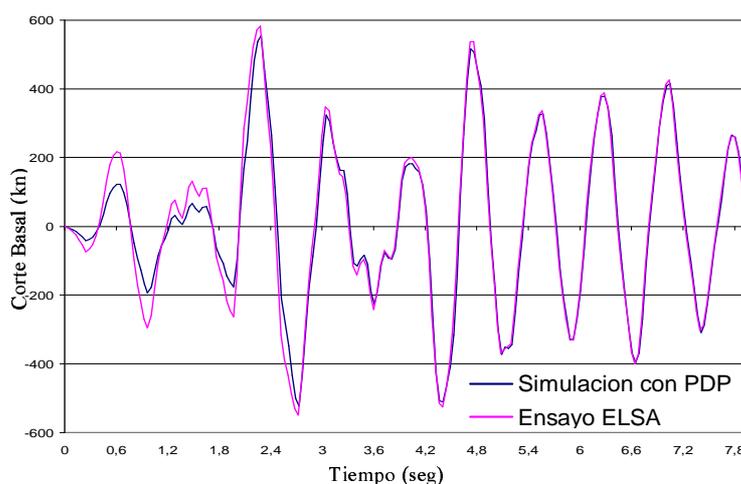
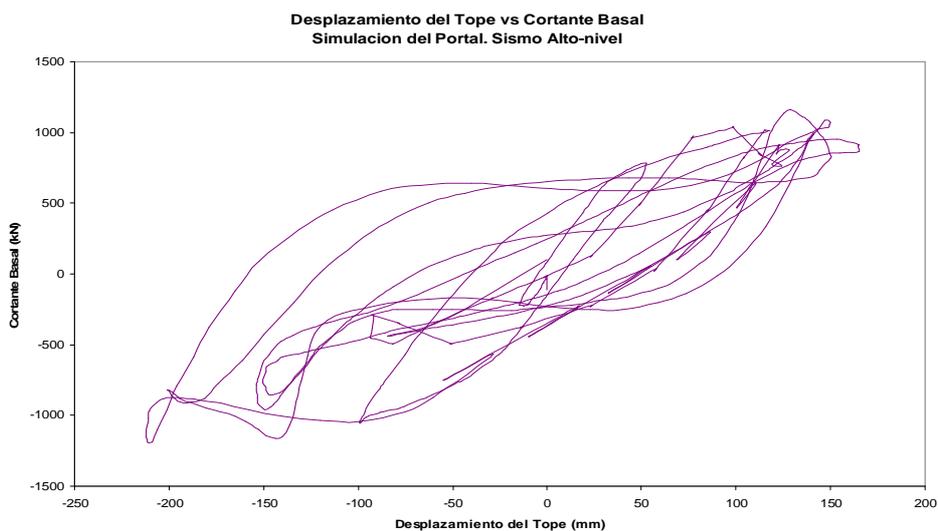
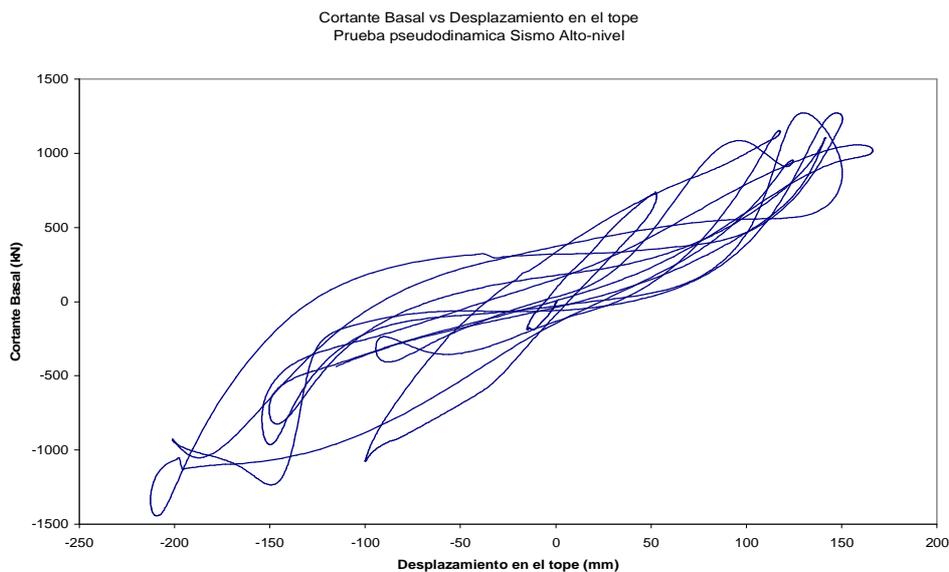


Figura 18. Comparación de las gráficas de cortante basal obtenida en el ensayo experimental<sup>13</sup> y en la simulación numérica de la estructura realizada en el Portal de Pórticos (PDP)

## CONCLUSIONES

El portal de cálculo descrito en este artículo es una innovadora herramienta para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras aporticadas de concreto armado. La digitalización de la estructura es relativamente sencilla de realizar ya que se dispone de ventanas especialmente diseñadas para su fácil manejo. El tiempo de análisis depende del tamaño de la estructura pero se cuenta con la ventaja de que el mismo es realizado en un computador de alto rendimiento ubicado en un centro de cálculo calificado. Con esta herramienta el usuario dispone de alta tecnología a muy bajo precio ya que únicamente debe afrontar el cargo de la conexión a Internet. Otra ventaja del uso del Portal de Pórticos



**Figura 19.** Comparación de las gráficas de corte basal vs. Desplazamiento en el Tope. a) Gráfica obtenida del ensayo experimental<sup>13</sup>, b) gráfica obtenida de la simulación numérica realizada con el Portal de Pórticos

la constituye la variedad de posibilidades de presentación de los resultados lo que permite una fácil interpretación de los mismos.

Si se considera que se estima en cientos de miles el número de edificaciones vulnerables alrededor del mundo y en virtud de las cuantiosas pérdidas humanas y materiales observadas luego de la ocurrencia de sismos de importante magnitud especialmente en países del tercer mundo, la labor de su identificación y proposición de posibles soluciones de reforzamiento es una tarea prioritaria. En este sentido, se puede afirmar que el Portal de Pórticos constituye un aporte muy valioso para afrontar la difícil tarea de mitigar los efectos desastrosos producidos por la ocurrencia de este tipo de eventos.

## REFERENCIAS

- 1 J. Flórez-López, "Modelos de daño concentrado para la simulación del colapso de pórticos planos", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. **9**, N° 2, pp. 123-139, (1993).
- 2 A. Cipollina y J. Flórez-López, "Modelos simplificados de daño en pórticos de concreto armado", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. **11**, N° 1, pp. 3-22, (1995).
- 3 J. Flórez-López, "Un modelo del comportamiento histerético de elementos de concreto armado basado en la Teoría del Daño Concentrado", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. **12**, N° 4, pp. 411-426, (1996).
- 4 J. Flórez-López, "Frame analysis and continuum damage mechanics" *J. Eur. Mech.*, Vol. **17**, (2), pp. 269-284, (1998).
- 5 M.E. Perdomo, A. Ramírez y J. Flórez-López, "Simulation of damage in RC frames with variable axial forces", *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. **28**, N° 3, pp. 311-328, (1999).
- 6 A. Benallal, R. Billardon, I. Doghri, "An integration algorithm and the corresponding consistent tangent operator for fully coupled elastoplastic and damage equations", *Com. Appl. Numer. Meths.*, Vol. **4**, pp. 731-740, (1988).
- 7 D. Avon, M.E. Marante, J. Flórez-López, "El doble paso de integración: un algoritmo computacional para mejorar la convergencia en problemas altamente no lineales", *Desarrollos recientes en Métodos Numéricos para Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Memorias de CIMENICS 2002*, Caracas, Venezuela, (2002).
- 8 M.E. Marante, J. Flórez-López, "Three-Dimensional Analysis Of Reinforced Concrete Frames Based On Lumped Damage Mechanics", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. **40**, N° 19, pp. 5119-5123, (2003).
- 9 J. Lemaitre y J.L. Chaboche, " *Mécanique des matériaux solides* ", Bordas, Paris (1985).
- 10 A. Griffith, "The phenomena of rupture and flow in solids", *Phil. Trans. Roy. Soc. Of London*, A 221, pp. 163-197, (1921).
- 11 D. Abrams, "Influence of Axial Force Variations on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns", *ACI Structural Journal*, Vol. **84**, N° 3, pp. 246-254 (1987).
- 12 G. M. Calvi y D. Bolognini, "Seismic response of reinforced concrete frames infilled with weakly reinforced masonry panels", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. **5**, N° 2, pp. 153-185, (2001).
- 13 P. Negro, A. Anthoine, D. Combesure, G. Magonette, J. Molina, P. Pegon, G. Verzeletti, "Test on the four-storey full-scale reinforced concrete frame with masonry infills: preliminary report", Special publication N° I95.54., European Laboratory for Structural Assessment, Ispra (VA), Italia, (1995).