



**Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural**

Maio / 2006 ISBN 85-99956-01-9

Investigações Teóricas, Experimentais, Numéricas e Computacionais  
Trabalho JOR0011 - p. 1054-1063

**CALIBRACION DEL PORTAL DE PORTICOS EN BASE  
A ENSAYOS PsD REALIZADOS EN EL LABORATORIO ELSA  
SOBRE UN EDIFICIO DE 4 PISOS**

**M. Puglisi<sup>(1)</sup>, F. Taucer<sup>(2)</sup>, M. Uzcategui<sup>(3)</sup> Y J. Florez-Lopez<sup>(4)</sup>**

<sup>(1)</sup> UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Facultad de Arquitectura. Dpto. de Tecnología. Mérida, Venezuela. - [mpuglisi@ula.ve](mailto:mpuglisi@ula.ve)

<sup>(2)</sup> EUROPEAN LABORATORY STRUCTURAL ASSESSMENT, Ispra, Italia - [fabio.taucer@jrc.it](mailto:fabio.taucer@jrc.it)

<sup>(3)</sup> UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Cecalcula. Parque Tecnológico. Mérida, Venezuela - [maylett@cecalc.ula.ve](mailto:maylett@cecalc.ula.ve)

<sup>(4)</sup> UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Facultad de Ingeniería. Dpto. de Estructuras. Mérida, Venezuela - [iflorez@ula.ve](mailto:iflorez@ula.ve)

**RESUMEN**

El Portal de Pórticos es un programa de cálculo por elementos finitos de una nueva clase: se trata de un Portal de Cálculo. Los Portales de Cálculo se caracterizan porque el usuario final no tiene acceso a ellos directamente sino a través de la Web. El Portal de Pórticos (Portal of Damage en Inglés), permite el análisis de estructuras aporticadas sometidas a solicitaciones extraordinarias. Se trata de un programa no lineal, dinámico y basado en la teoría del daño concentrado. Esta última puede ser definida como la Mecánica de la Fractura para estructuras aporticadas al combinar sus métodos con el concepto de rótula plástica y la Teoría de Estructuras. También, se describe una prueba experimental de un edificio de concreto armado de cuatro pisos, llevada a cabo en el European Laboratory for Structural Assessment (ELSA), sometido a un acelerograma artificial derivado del sismo de Friuli de 1976 mediante el método pseudodinámico (PsD). Finalmente, se describe la simulación numérica de este ensayo y posteriormente se comparan los resultados experimentales con los resultados de la simulación y de esta manera calibrar el programa Portal de Pórticos.

*Palabras Claves:* Mampostería, plasticidad, pórticos, Concentrador Inelástico, Teoría del daño continuo.

## 1 INTRODUCCION

El Portal de Pórticos, completamente desarrollado en Venezuela [1,2], es el primer Portal de Cálculo en el mundo para el análisis estructural. Las ventajas de los Portales de Cálculo son evidentes: se puede ofrecer a todos los usuarios del planeta los recursos de grandes centros de cómputo de alto rendimiento, lo que permite minimizar las inversiones en software para el usuario final; se optimizan también los gastos de licencia, puesto que el usuario final sólo debe pagar por el tiempo utilizado y no se hace necesaria la adquisición de licencias anuales. Cualquier usuario tiene acceso instantáneo a todos los portales de cálculo. Finalmente es una nueva manera de compartir los programas protegiendo los derechos de autor al mismo tiempo.

El Portal de Pórticos (Portal of Damage en Inglés), permite el análisis de estructuras aporricadas sometidas a solicitaciones extraordinarias. Se trata de un programa no lineal, dinámico y basado en la teoría del daño concentrado [3,4]. Esta última puede ser definida como la Mecánica de la Fractura para estructuras aporricadas al combinar sus métodos con el concepto de rótula plástica y la Teoría de Estructuras.

Con el objeto de calibrar y evaluar el Portal de Pórticos, se han llevado a cabo una serie de simulaciones numéricas de ensayos experimentales realizados en el laboratorio ELSA (European Laboratory for Structural Assessment) [5,6]. En este trabajo se describe una de ellas: un edificio de 4 pisos fue sometido a un acelerograma artificial derivado del sismo de Friuli de 1976 mediante el método pseudodinámico (PsD) [7]. Dos simulaciones fueron llevadas a cabo. En la primera se aplicaron directamente los registros de desplazamientos aplicados sobre los pisos de la estructura empleando un análisis estático. En la segunda, el registro de aceleraciones que dio lugar a los desplazamientos aplicados sobre los pisos de la estructura fue utilizado como sollicitación dinámica siendo aplicados a los apoyos del modelo estructural.

## 2 TEORÍA DEL DAÑO CONCENTRADO

Considérese una estructura aporricada como la mostrada en la figura 1a. Se acepta que cada elemento del pórtico puede ser considerado como el ensamblaje de una viga-columna elástica y dos rótulas plásticas tal y como se indica en la figura 1b.

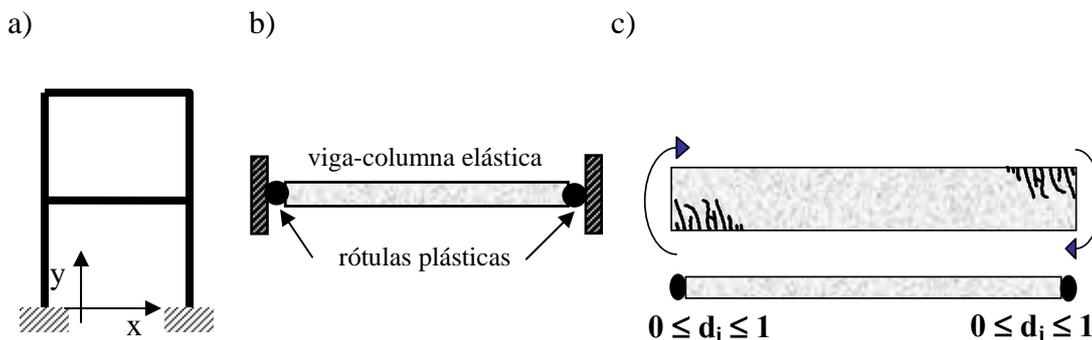


Figura 1. a) Estructura aporricada b) Modelo de plasticidad concentrada c) Esfuerzos generalizados

En ambas rótulas plásticas se concentran no sólo las rotaciones permanentes, como en el modelo clásico, sino también el agrietamiento. Para ello se introducen como variables internas asociadas a una rótula plástica la rotación permanente  $\phi^p$  y un parámetro adicional denominado daño  $d$ . Esta última puede tomar valores entre cero y uno como la variable de daño de la mecánica de los medios continuos. A partir de estas variables, de conceptos de la teoría del daño continuo y de la teoría de estructuras clásica es posible determinar la energía de deformación complementaria de un elemento de pórtico [4]  $U^*$ :

$$(1) \quad U^* = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^t \mathbf{F}(\mathbf{D}) \boldsymbol{\sigma}; \quad \mathbf{F}(\mathbf{D}) = \begin{bmatrix} \frac{F_{11}^0}{1-d_i} & F_{12}^0 & 0 \\ F_{21}^0 & \frac{F_{22}^0}{1-d_j} & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}^0 \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\sigma}^t = (m_i, m_j, n)$$

donde  $\mathbf{F}(\mathbf{D})$  es la matriz de flexibilidad de un elemento de pórtico agrietado;  $\mathbf{D}=(d_i, d_j)$  es la matriz de daño del elemento que tiene los valores del daño correspondientes a las rótulas plásticas  $i$  y  $j$  del elemento;  $F_{ij}^0$  son los coeficientes de la matriz de flexibilidad de un elemento elástico tal y como aparecen en los libros de texto de análisis estructural;  $\boldsymbol{\sigma}$  es la matriz de esfuerzos generalizados del elemento y  $m_i, m_j$  y  $n$  son los momentos en los extremos  $i, j$  y la fuerza axial tal y como se muestra en la figura 1c.

A partir de la energía de deformación complementaria es posible obtener expresión de las tasas de disipación de energía  $G_i$  y  $G_j$  de las dos rótulas plásticas del elemento:

$$(2) \quad G_i = \frac{\partial U^*}{\partial d_i} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^t \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{D})}{\partial d_i} \boldsymbol{\sigma} = \frac{m_i^2 F_{11}^0}{2(1-d_i)^2}; \quad G_j = \frac{m_j^2 F_{22}^0}{2(1-d_j)^2}$$

La evolución del agrietamiento en el elemento puede ahora ser determinada mediante la aplicación de una forma generalizada del criterio de Griffith:

$$(3) \quad \begin{cases} \dot{d}_i = 0 & \text{if } G_i - R(d_i) < 0 \text{ or } \dot{G}_i - \dot{R}(d_i) < 0 \\ \dot{d}_i > 0 & \text{if } G_i - R(d_i) = 0 \text{ and } \dot{G}_i - \dot{R}(d_i) = 0 \end{cases}$$

donde  $R$  es la función de resistencia al agrietamiento de una rótula plástica cuya expresión es:

$$(4) \quad R(d_i) = G_{cr} + q \frac{\log(1-d_i)}{1-d_i}$$

donde  $G_{cr}$  y  $q$  son parámetros del elemento que pueden ser determinados a partir de la geometría del elemento y las propiedades del material [3]. Es importante señalar que los valores de daño pueden ser utilizados como índices de la potencial reparabilidad del elemento [8].

### 3 EL PORTAL DE PORTICOS

Este portal es un programa de elementos finitos dinámico no lineal basado en la Web. El usuario tiene acceso al programa en la dirección <http://portaldeporticos.ula.ve> En el portal el usuario puede: crear una cuenta en el servidor remoto; hacer uso de un preprocesador gráfico para la digitalización de la estructura (véase la figura 2); correr el programa de elementos finitos en el servidor remoto, monitorear el proceso e interrumpirlo si se hace necesario; subir o bajar desde el servidor hasta la computadora del usuario archivos de datos y resultados y finalmente analizar estos resultados empleando un postprocesador gráfico (véase la figura 3).

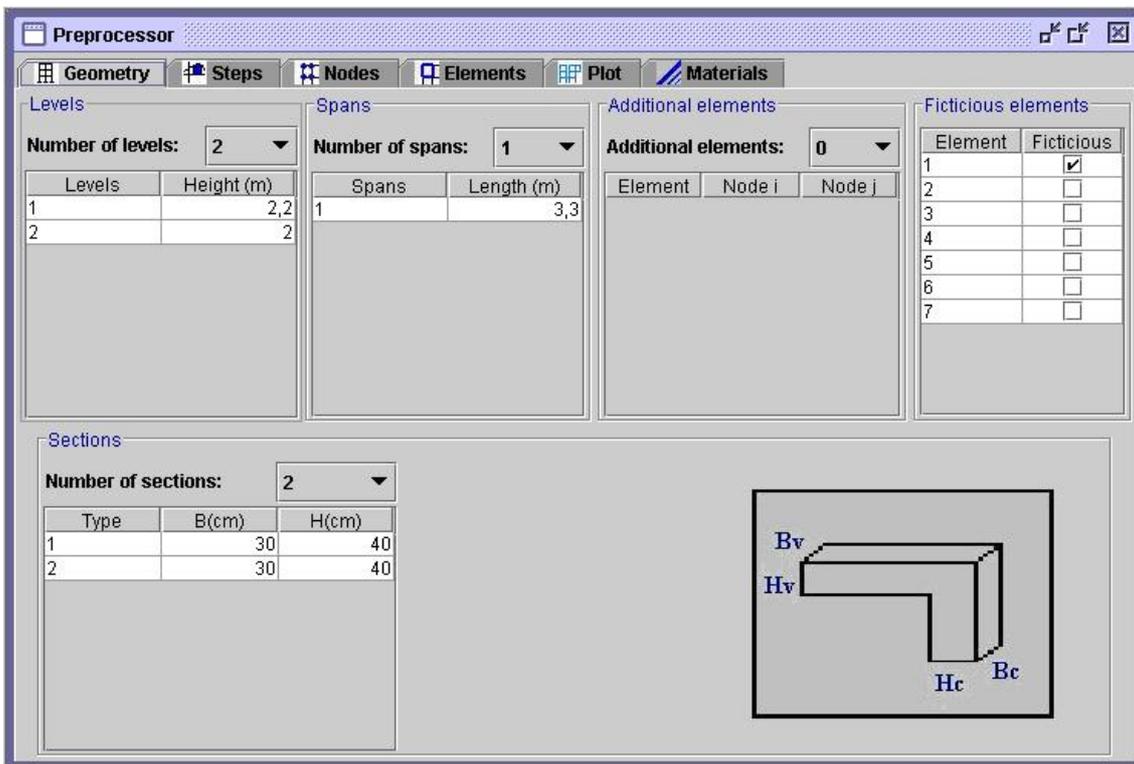
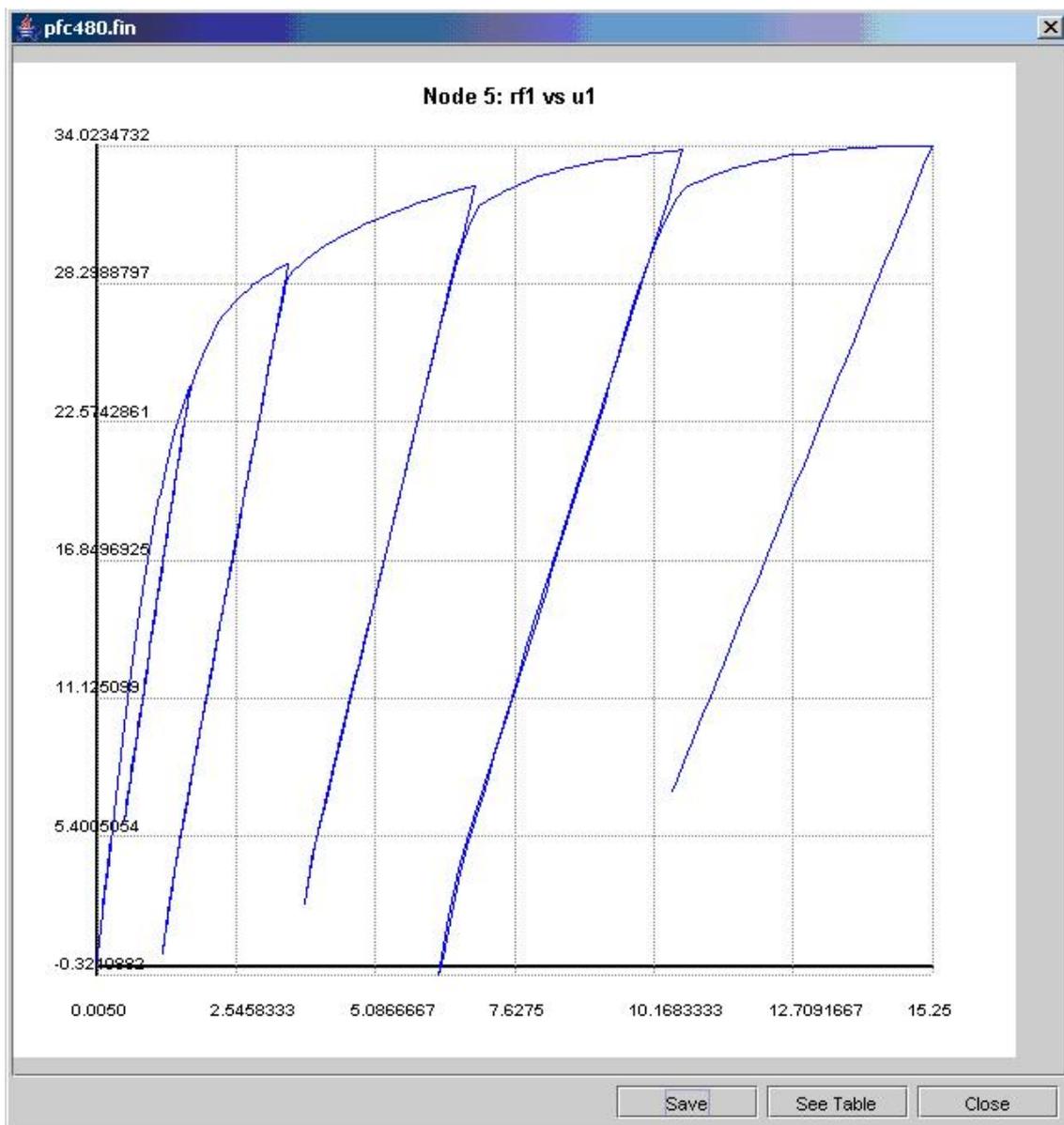


Figura 2. Pantalla del preprocesador gráfico del Pórtal de Pórticos



**Figura 3. Pantalla del postprocesador gráfico del Pórtal de Pórticos**

#### **4 SIMULACION NUMERICA DE UN ENSAYO SOBRE UN EDIFICIO DE CONCRETO ARMADO.**

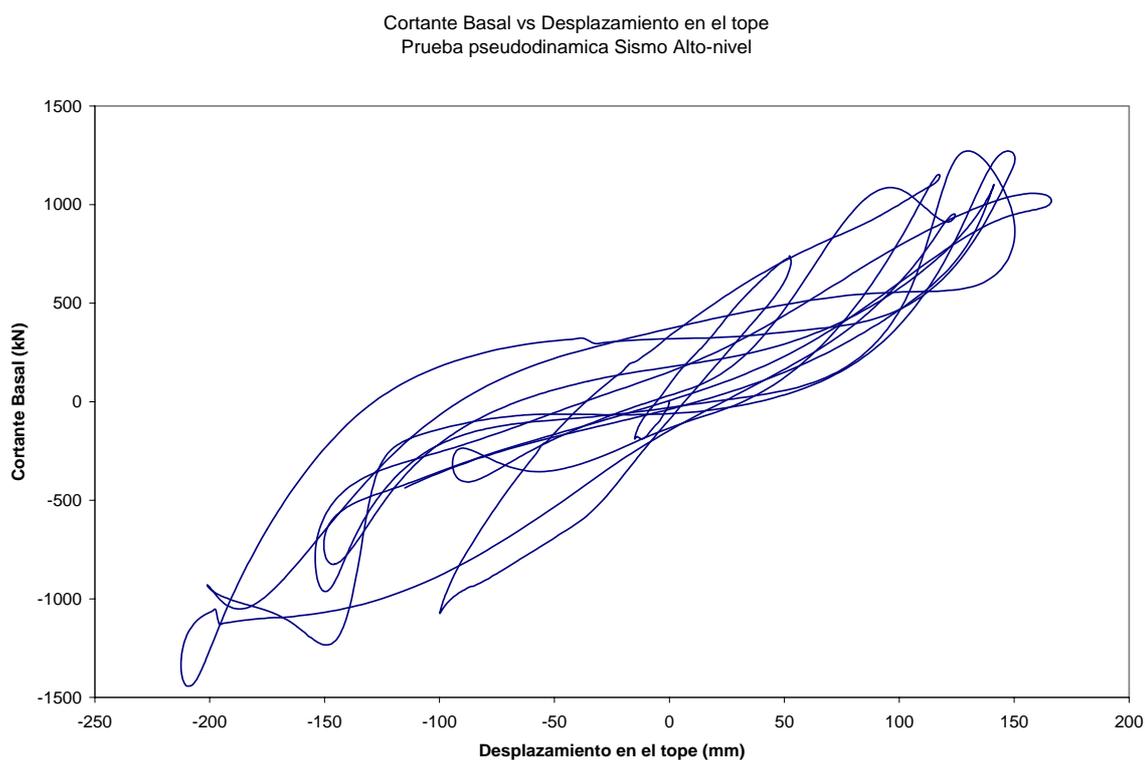
En el ELSA, un edificio de concreto armado de 4 pisos (véase la figura 4). Fue sometido a un ensayo pseudo-dinámico. Las solicitaciones sobre los pisos de la estructura fueron generadas usando las formas sinusoidales derivadas de una señal real, el sismo de Friuli de 1976. Los detalles del ensayo pueden ser consultados en [7]. Los datos para la simulación numérica son presentados en [6].



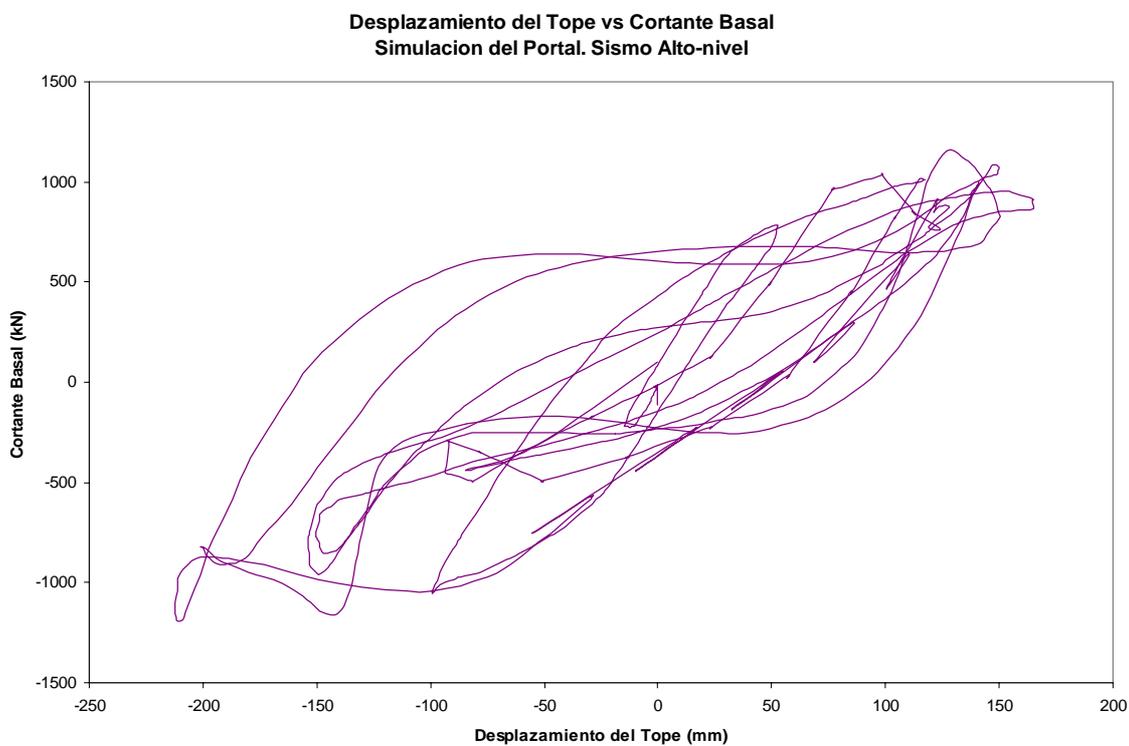
**Figura 4. Edificio de concreto armado ensayado en ELSA**

Para la estructura se realizaron dos procesos de evaluación diferentes, el primer proceso se realizó imponiendo la misma historia de desplazamiento que se generó en los ensayos experimentales en ELSA para cada piso, y en el segundo proceso se impuso el acelerograma artificial generado a partir de la señal real del sismo de Friuli de 1976, utilizado en ELSA y aplicado a la base de la estructura.

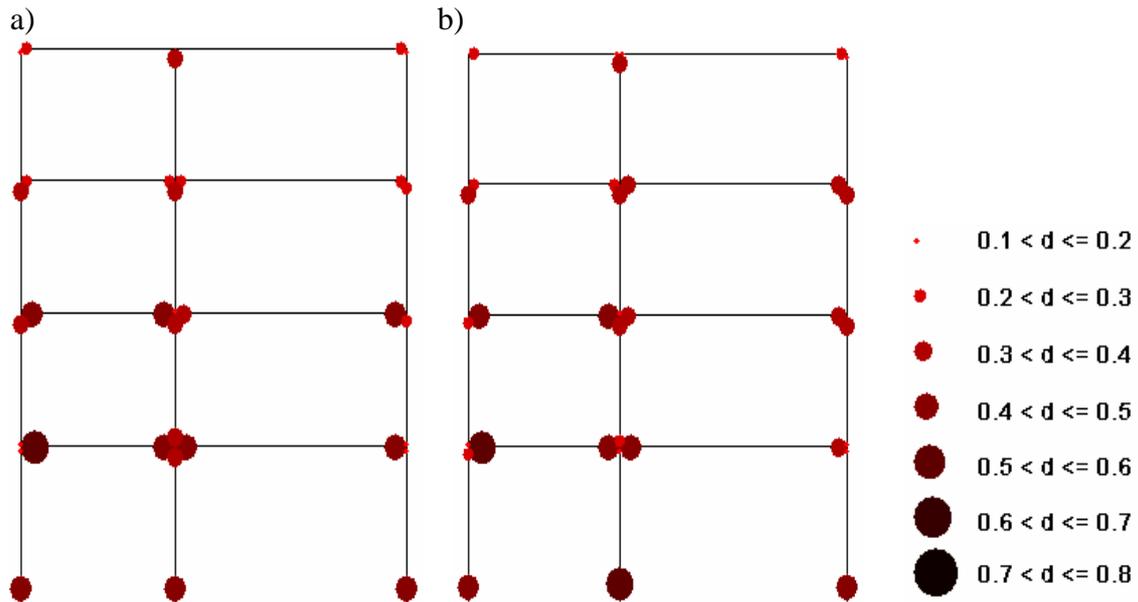
A continuación se observan las gráficas experimentales producidas en ELSA y sus correspondientes como resultado de la simulación numérica realizada por el Portal de Pórticos, a las cuales se les impuso la misma historia de desplazamiento para cada piso que se generó en ELSA. En la figura 5 se muestran los resultados experimentales resumidos, el gráfico de Cortante Basal vs el Desplazamiento en el Tope del edificio. En la figura 6 se indica la misma gráfica tal y como fue obtenida analíticamente por medio del Portal de Pórticos. Los mapas de daño al final de la simulación en los pórticos exteriores y el pórtico interno se muestran en la figura 7



**Figura 5. Gráfica del Cortante Basal vs Desplazamiento en el Tope en el ensayo experimental**

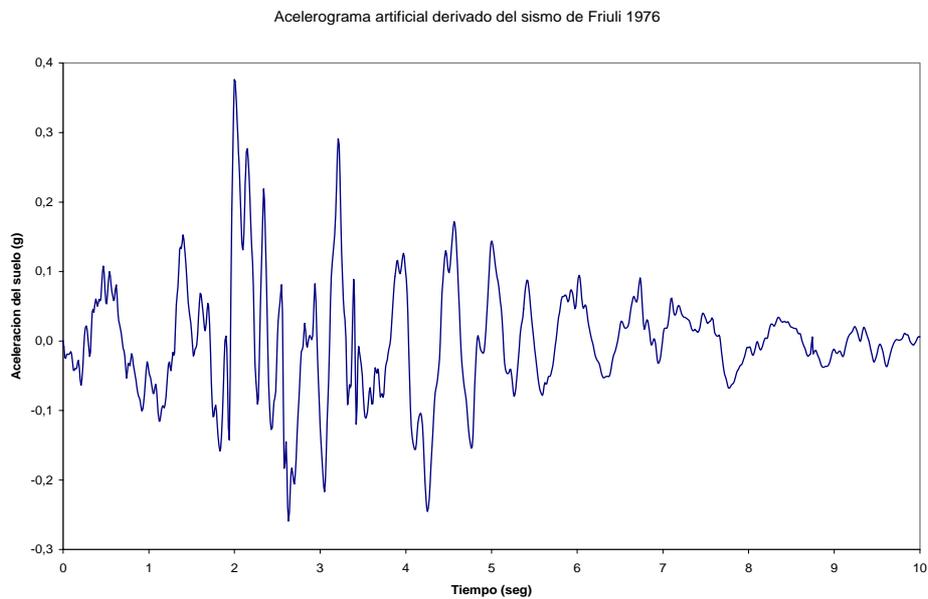


**Figura 6. Gráfica del Cortante Basal vs Desplazamiento en el Tope en la Simulación Numérica.**

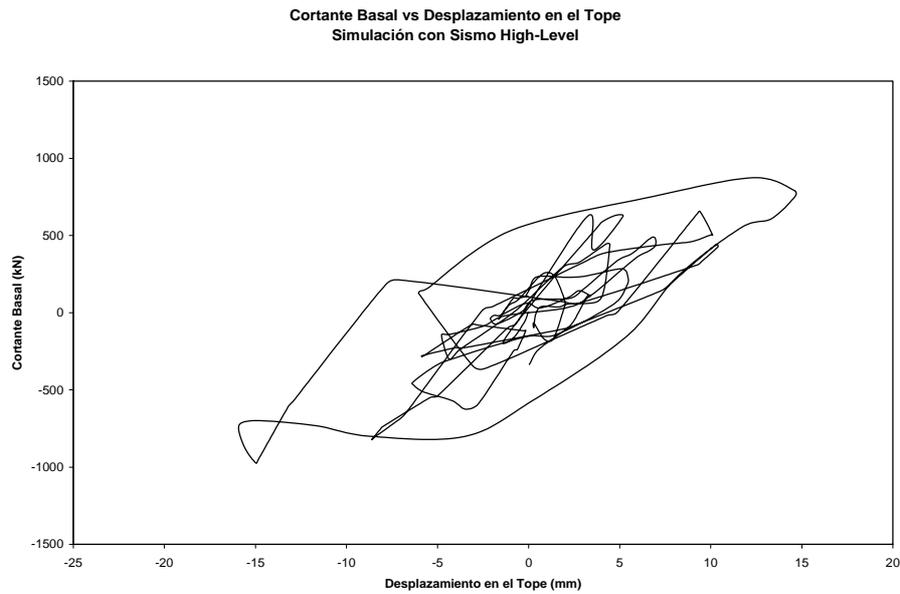


**Figura 7. Mapa de daño Simulación con Sismo Alto-nivel a) Pórtico 2 b) Pórticos 1 y 3.**

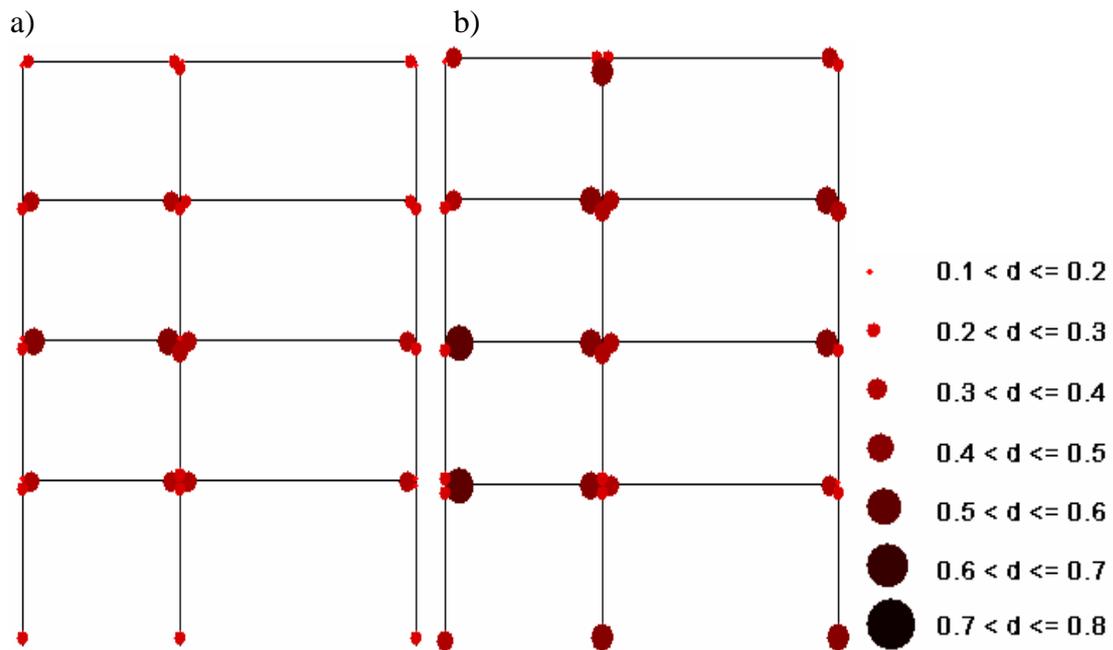
Para finalizar se muestran los resultados obtenidos en la simulación numérica realizada por el Portal de Pórticos, al cual se les impuso el acelerograma artificial derivado del sismo de Friuli de 1976 (véase la figura 8). A diferencia del cálculo anterior, en este caso se trata de un análisis dinámico. Los resultados se resumen en la gráfica de corte basal vs. Desplazamiento en el tope del edificio mostrada en la figura 9 y en los mapas de daño de la figura 10



**Figura 8. Acelerograma Artificial derivado del sismo de Friuli 1976**



**Figura 9. Gráfica del Cortante Basal vs Desplazamiento en el tope de la Simulación Numérica**



**Figura 10. Mapa de daño Simulación con Sismo Alto-nivel a) Pórtico 2 b) Pórticos 1 y 3.**

## 5 AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen al FONACIT y al CDCHT de la Universidad de Los Andes por el financiamiento de los proyectos I-831-05-02-ED y I-829-05-02-AA.

## 6 CONCLUSIONES

El análisis realizado demuestra la capacidad del Portal de Pórticos para reproducir el proceso de daño de estructuras aporricadas de concreto armado bajo solicitaciones extraordinarias, al menos bajo condiciones controladas de laboratorio. Los datos necesarios para la simulación corresponden a las propiedades geométricas y de los materiales de la estructura y a las solicitaciones impuestas. No hace falta definir parámetros empíricos como es el caso de otros modelos y programas comerciales. Ello se debe a que la Teoría de Daño Concentrada esta basada en los conceptos fundamentales de la Mecánica de la Fractura y no en modelos semi-empíricos.

También debe subrayarse la similitud de los mapas de daño en el caso de la simulación estática, correspondiente al ensayo pseudo-dinámico, y los que se obtuvieron al final del análisis dinámico. Se constata de esta manera la validez de esta clase de ensayos para evaluar el comportamiento sísmico de la estructura.

## REFERENCIAS

- [1] MARANTE M.E., SUÁREZ L., QUERO A., REDONDO J., VERA B., UZCATEGUI M., DELGADO S., LEÓN L.R., NÚÑEZ L., FLÓREZ-LÓPEZ J., "PORTAL OF DAMAGE: a Web-Based finite element program for the analysis of framed structures subjected to overloads". *Advances in Engineering Software* 36 (2005) 346–358
- [2] ESPINOSA R., FLÓREZ-LÓPEZ J., JARAMILLO N., MARANTE M.E., QUERO A., SUÁREZ L. "Rupture of framed structures, lumped damage mechanics and Internet" *Latin-American Journal of Solids and Structures* Vol 2, n.1, 29-40 2005.
- [3] FLOREZ LOPEZ J., "A simplified model of unilateral damage for RC frames" *Journal of Structural Engineering ASCE*. Vol 121, No 12, Dec 1995
- [4] FLOREZ LOPEZ J., "Frame analysis and continuum damage mechanics". *European Journal of Mechanics* Vol 17, No 2, 1998.
- [5] PUGLISI M. "Modelo de comportamiento de la mampostería confinada basado en la teoría del daño". Tesis de Doctorado. Doctorado en Ciencias Aplicadas. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Venezuela 2005.
- [6] UZCATEGUI M. "Implementación de elementos finitos en un programa de análisis estructural basado en la Web. Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural. Universidad de Los Andes, Venezuela 2005
- [7] NEGRO P., VERZELETTI G., MAGONETTE G. y PINTO A.. "Test on a four-storey full-scale R/C frame designed according to Eurocode 8 and 2: Preliminary Report. EUR 15879 EN.ELSA Laboratory. 1994. Ispra (VA), Italy.
- [8] ALARCÓN E., RECUERO A., PERERA R., LOPEZ C., GUTIERREZ J.P., De DIEGO A., PICON R., FLOREZ LOPEZ J. "A reparability index for reinforced concrete members based on fracture mechanics" *Engineering Structures* Vol 23, No 6, 687-697, 2001