

## **IMPLEMENTACION NUMERICA DE UN ELEMENTO FINITO DE MAMPOSTERIA EN UN PROGRAMA DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL BASADO EN LA WEB: PORTAL DE PORTICOS**

**Maylett Y. Uzcátegui Flores**

[maylett@cecalc.ula.ve](mailto:maylett@cecalc.ula.ve)

Centro Nacional de Calculo Científico Universidad de Los Andes (Cecalcula). Parque Tecnológico. Edificio General Masisni, Piso 3, Mérida 5101, Venezuela. Tel. y Fax: 58-274-2403021

**Mónica Puglisi**

[mpuglisi@ula.ve](mailto:mpuglisi@ula.ve)

Prof. Departamento de Tecnología de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Arte, Universidad de Los Andes, La Hechicera, Mérida 5101, Venezuela. Tel y Fax: 58-274-2401915.

**Julio Flórez López**

[iflorez@ula.ve](mailto:iflorez@ula.ve)

Centro de Investigación en Matemáticas Aplicadas (CIMA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Av. Tulio Febres. Mérida 5101, Venezuela. Telf.:58-274-2402867

**Resumen.** El programa Portal de Pórticos disponible en la página <http://portaldeporticos.ula.ve>, es un programa de elementos finitos que permite hacer simulaciones numéricas para representar el proceso de daño en estructuras aporticadas, y esta estructurado de tal manera que permite la inclusión de nuevos elementos finitos. Actualmente el programa cuenta con un elemento finito basado en la teoría de daño concentrado considerando fatiga de bajo ciclaje en estructuras planas de concreto armado. En este trabajo se propone la implementación de un nuevo modelo matemático y algoritmo de cálculo numérico que será incorporado al programa Portal de Pórticos. El modelo implementado simula el comportamiento de la mampostería de relleno en estructuras aporticadas tomando en cuenta el daño; el modelo está basado en el concepto del puntal equivalente, la teoría de la plasticidad y la teoría del daño continuo. Los resultados obtenidos son validados mediante la simulación numérica de ensayos llevados a cabo en pórticos con mampostería sujetos a cargas monotónicas y cíclicas.

**Palabras Claves:** Elemento finito, Mampostería, Teoría del daño.

## **1. INTRODUCCION**

El programa Portal de Pórticos es un programa de elementos finitos no lineal que permite la simulación numérica del proceso de agrietamiento y posible colapso de pórticos de concreto armado sometidos a solicitaciones sísmicas o desplazamientos extraordinarios de sus apoyos. Actualmente el programa cuenta con un elemento finito para el análisis de vigas y columnas esbeltas de concreto armado, el cual se basa en la teoría del daño concentrado considerando fatiga de bajo ciclaje. En este trabajo se incorporó un nuevo modelo matemático y algoritmos de cálculos numéricos al programa Portal de Pórticos; dicho modelo constituye el elemento finito que simula el proceso de daño de elementos no estructurales tales como mampostería de relleno, el cual se basa en el modelo del puntal equivalente, el concepto del concentrador plástico y la mecánica del daño. En la siguiente sección se describe el programa Portal de Pórticos con sus respectivos módulos: Preprocesador, Procesador y Postprocesador. Se presenta luego el modelo que simula el proceso de daño del elemento de mampostería de relleno en estructuras aporticadas y su implementación como nuevo elemento finito en el programa de elementos finitos Procesador. La validación se realizó a través de ensayos experimentales realizados en el Laboratorio de Materiales y Ensayos, de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Los Andes, en Mérida, Venezuela y del European Laboratory for Structural Assessment (ELSA por sus siglas en inglés), en Ispra, Italia.

## **2. PORTAL DE PORTICOS**

El programa Portal de Pórticos disponible en la página <http://portaldeporticos.ula.ve>, es un programa de elementos finitos no lineal que esta estructurado de forma modular, los módulos del sistema son: Preprocesador que permite definir la geometría de la estructura y sus apoyos, las propiedades de los elementos estructurales y las solicitaciones. Procesador que permite enviar los archivos con extensión .inp previamente generados en el Preprocesador a la cuenta en el servidor, además procesa dichos archivos utilizando el programa de elementos finitos. Los archivos generados son visualizados en el módulo Postprocesador, el cual muestra por medio de gráficos, distribuciones y animaciones el comportamiento de la estructura.

La teoría usada por el programa es la Teoría del Daño Concentrado [1], la cual describe el comportamiento de la estructura bajo los principios de la Mecánica de la Fractura, la Teoría del Daño Continuo y el concepto de rótula plástica. Mediante la Teoría del Daño Concentrado es posible representar de manera simple, eficaz y racional fenómenos tan complicados como la influencia del agrietamiento del concreto, la fluencia del refuerzo, el cierre de fisuras por cambio de signo de los momentos, la fatiga de bajo ciclaje, el endurecimiento por deformación del refuerzo, etc. Esta teoría que es la base del programa de elementos finitos no lineales incluido en el Portal ha sido probada y validada mediante la simulación numérica de pórticos y elementos estructural que han sido ensayados en laboratorio [2].

## **3. MODELO DE DAÑO PARA LA MAMPOSTERÍA CON CONCENTRADOR INELÁSTICO**

El modelo usado para el análisis de estructuras aporticadas de concreto armado con mampostería de relleno, esta basado en el concepto del puntal equivalente con concentrador inelástico. En dicho modelo se supone que el efecto de los paneles de relleno puede ser representado por dos barras diagonales a compresión conectadas por el concentrador como se muestra en la figura 1. Este último permite la transferencia de efectos entre los puntales. Todos los efectos inelásticos son incluidos en el concentrador mientras que las barras permanecen elásticas, [3].

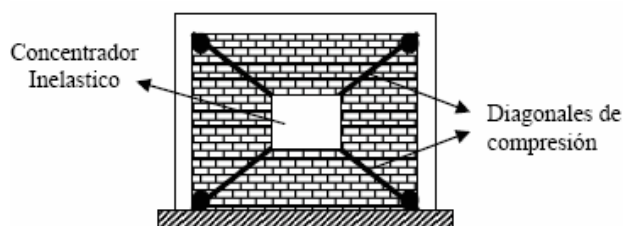


Figura 1- Modelo del puntal diagonal con concentrador inelástico.

El modelo está basado en los conceptos de la teoría del daño continuo, el comportamiento de la mampostería bajo fuerzas de compresión, el modelo del puntal equivalente y el concepto del concentrador inelástico. Además de la matriz de deformaciones generalizadas, la matriz de esfuerzos generalizados y la matriz de deformaciones plásticas, se incluye una nueva variable: el daño  $d_m$ , esta variable toma valores entre cero (0) y uno (1) y mide el estado de daño del concentrador, es decir, caracteriza el grado de agrietamiento de la mampostería de relleno.

El modelo descrito, se implementó como un elemento finito nuevo en el Modulo Procesador [4], desarrollado en el programa Portal de Pórticos y modificado en este trabajo para considerar el comportamiento de la mampostería de relleno con estructuras aporricadas de concreto armado. Para realizar el análisis de la estructura, el problema se divide en dos partes, un problema global y un problema local. El primero se resuelve a través del Modulo Procesador el cual determina los desplazamientos nodales de la estructura. El segundo es resuelto por la subrutina, escrita por Puglisi [3], a partir de MDC desarrollado por Florez y Marante [5], la cual calcula las deformaciones, fuerzas internas, esfuerzos, variables internas y el jacobiano local en coordenadas globales para cada miembro. La implementación del elemento finito se efectúa por medio de la inclusión de la subrutina UEL\_M, la cual es llamada cada vez que el Procesador necesite información sobre el elemento, para ello se modificaron y crearon nuevas subrutinas dentro del programa, ya que existe un intercambio de datos controlados que dependen del tipo de elemento y de su contribución a la estructura.

Las propiedades requeridas por el programa para el elemento de mampostería son las siguientes: ( $S_0$ ) Rigidez de la diagonal equivalente; ( $c$ ) coeficiente de endurecimiento cinemático; ( $n_y$ ) Limite de fluencia; ( $m$ ) constante de proporcionalidad; ( $Tol$ ) tolerancias; ( $Max\_ite$ ) número máximo de iteraciones; ( $\alpha$ ) Alfa; ( $Pcr$ ) Desplazamiento correspondiente a la carga crítica; ( $Ip$ ) parámetro referido a las propiedades enteras.

### 3.1 Simulación numérica de pórticos rellenos con mampostería

Con el fin de validar, verificar el ensamblaje y adaptación del elemento finito descrito anteriormente en el programa no lineal de elementos finitos Modulo Procesador, se realizaron tres simulaciones numéricas de ensayos experimentales encontrados en la literatura.

***Pórtico con mampostería monotónico y cíclico.*** El pórtico con mampostería se corresponde a un ensayo experimental del programa experimental de Borges [6], realizado en el Laboratorio de Materiales y Ensayos, de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. El pórtico se construyó de concreto armado, como se muestra en la figura 2. El relleno de la mampostería se hizo con ladrillos con 3 huecos de arcilla, de 5x10x20cm.

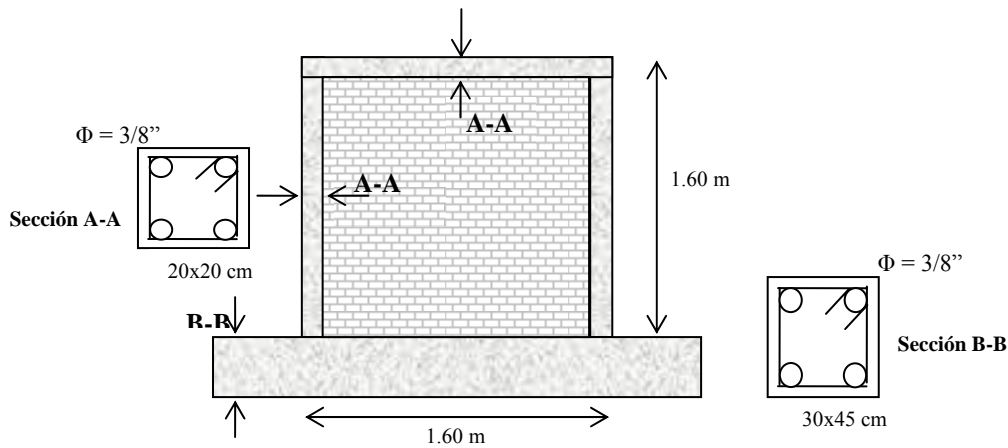


Figura 2- Características del pórtico.

Para los ensayos se usó un actuador hidráulico, a través del cual se impuso en la esquina superior derecha los desplazamientos de forma incremental, tanto para el ensayo monotónico como cíclico, hasta obtener la degradación apreciable de la resistencia del espécimen. Los parámetros del modelo usados en la simulación se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del modelo del pórtico con mampostería.

$S_o$ (ton/cm <sup>2</sup> )	$c$ (ton/cm <sup>2</sup> )	$n_y$ (ton)	$m$ (1/cm)	$\alpha$	Pcr (cm)
22.0	0.58	6.5	0.20	10.0	1.40

Los resultados se muestran en la figura 3 y 4, donde al comparar el ensayo experimental con la simulación, se concluye que el modelo implementado en el Modulo Procesador así como los cambios realizados al programa, permiten representar de forma muy similar la combinación de los dos elementos (elemento de daño concentrado con fatiga de bajo ciclaje en pórticos de concreto armado y elemento de mampostería de relleno).

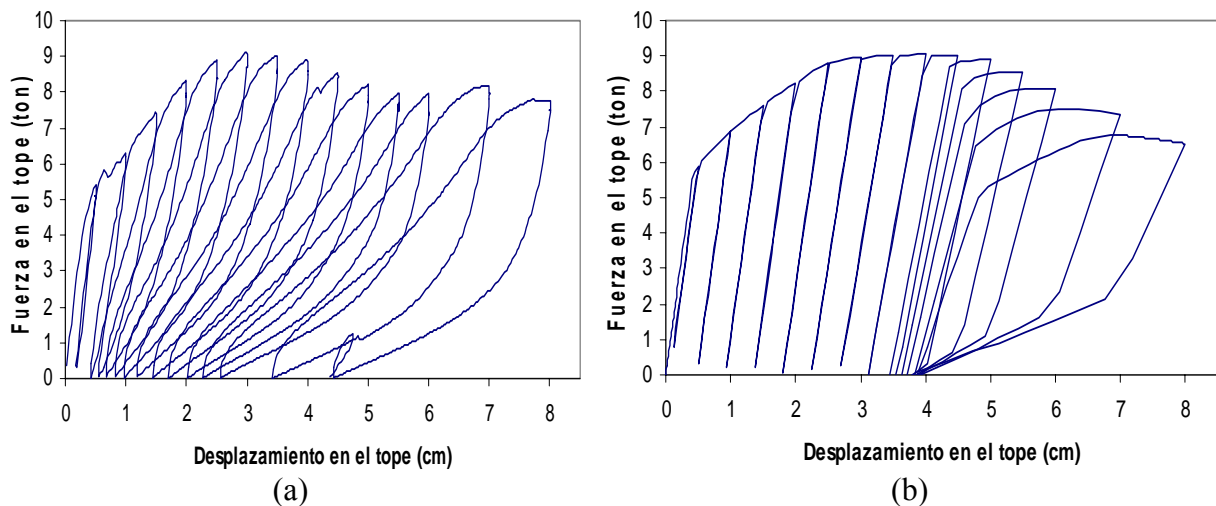


Figura 3- Grafica de fuerza en el tope contra el desplazamiento: a) Ensayo monotónico experimental, b) Simulación numérica del ensayo.

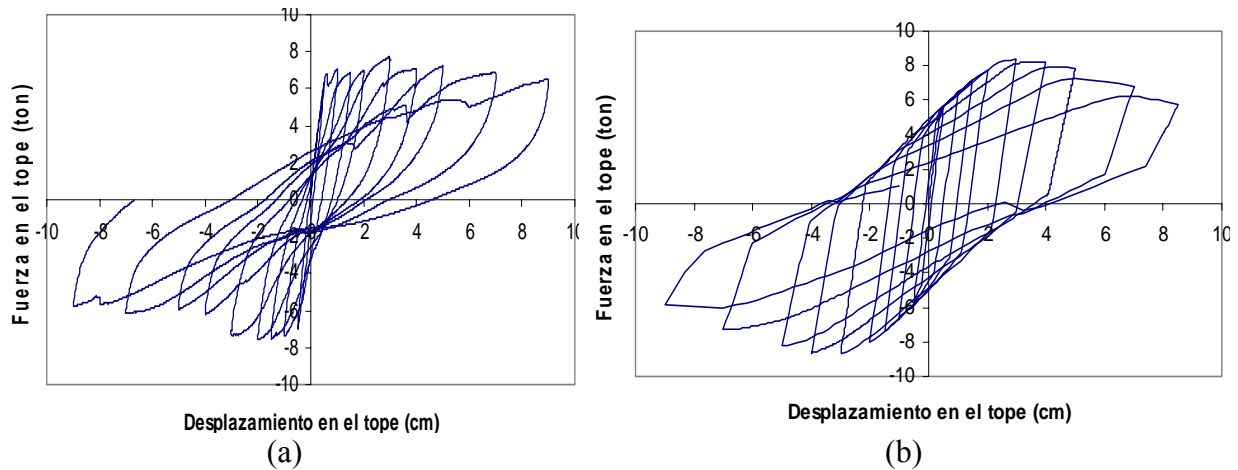


Figura 4- Grafica de fuerza en el tope contra el desplazamiento: a) Ensayo cíclico experimental, b) Simulación numérica del ensayo.

**Estructura aporcionada de mampostería.** Como último ejemplo se muestra la simulación numérica de una prueba experimental realizada a un edificio de concreto armado sometido a un acelerograma artificial, que se desarrolló en el Laboratorio Europeo para la Evaluación Estructural (ELSA), en Ispra, Italia, mediante el método pseudodinámico [7]. Las dimensiones del espécimen ensayado se muestran en las figura 5. Los dos pórticos extremos del edificio están rellenos con mampostería mientras que el pórtico central esta vacío. Todas las columnas tienen sección transversal cuadrada con 400mm de lado, excepto las columnas internas las cuales tienen 450x450mm. Todas las vigas tienen sección transversal rectangular, con altura total de 450mm y ancho de 300mm. El edificio fue sometido a la historia de desplazamientos que se muestran en la figura 6, mediante actuadores hidráulicos fijados a las losas de los cuatro niveles de la estructura. El relleno de la mampostería se realizo con bloques de dimensiones 245x112x190m. Los parámetros del modelo para la mampostería usados en la simulación se muestran en la tabla 2.

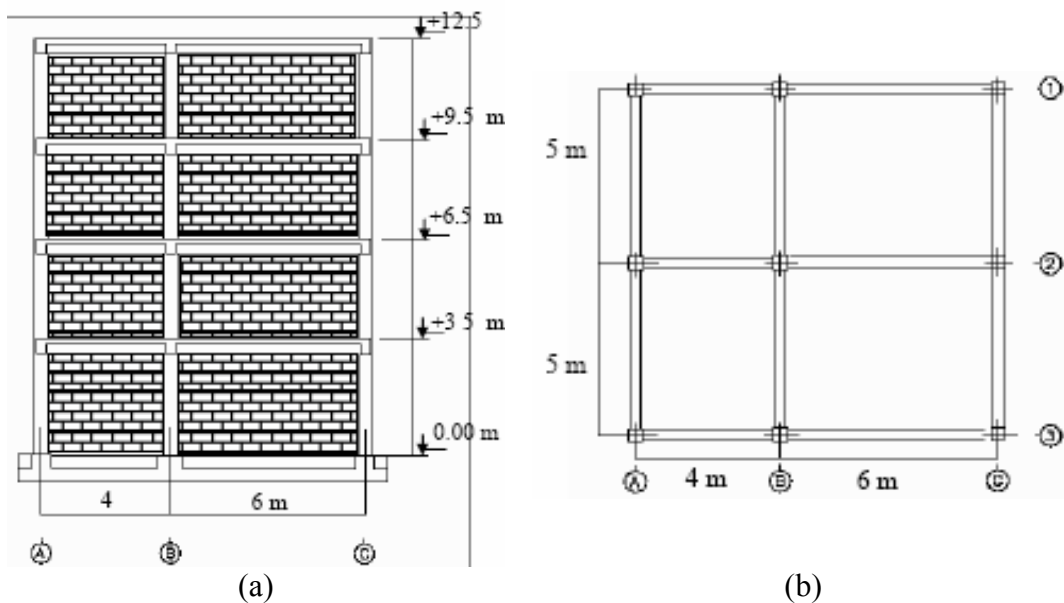


Figura 5- a) Vista Lateral de los pórticos de la estructura, b) Vista de planta de la estructura.

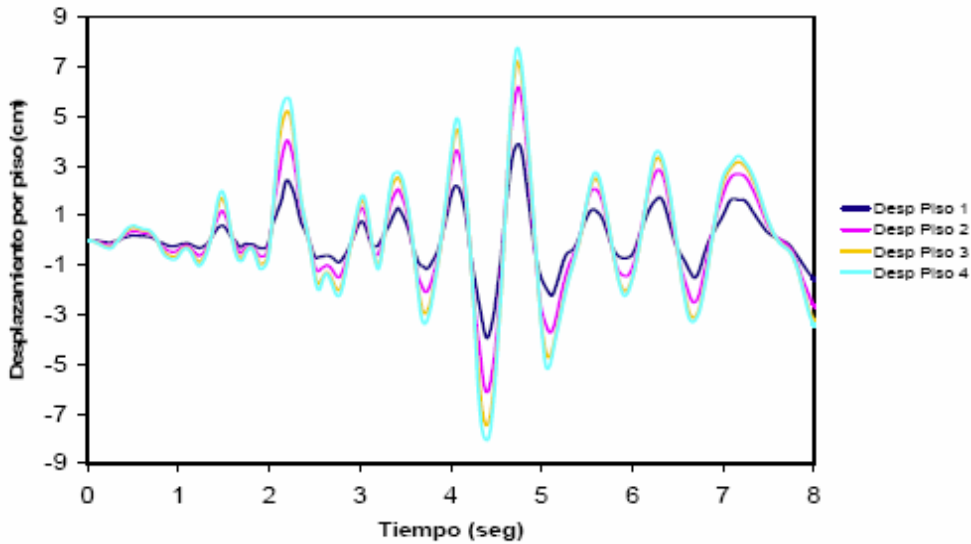


Figura 6- Historia de desplazamiento aplicada a la estructura.

Tabla 2 .Parámetros del modelo del pórtico con mampostería (ELSA).

Nivel	$S_o$ (ton/cm <sup>2</sup> )	$c$ (ton/cm <sup>2</sup> )	$n_v$ (ton)	$m$ (1/cm)	$\alpha$	Pcr (cm)
1-2	75.7	0.58	35.7	0.52	8	1.4
3	70.7	0.58	35.7	0.52	8	1.4
4	55.7	0.58	35.7	0.52	8	1.4

En la Figura 7 se muestra la respuesta de la estructura ensayada, y los resultados de la simulación obtenidos a través de la implementación numérica del modelo en el “Procesador”, en ella se representa la historia del corte basal. Tal como puede observarse, hay una buena correlación entre ambas curvas excepto en la fase final del ensayo.

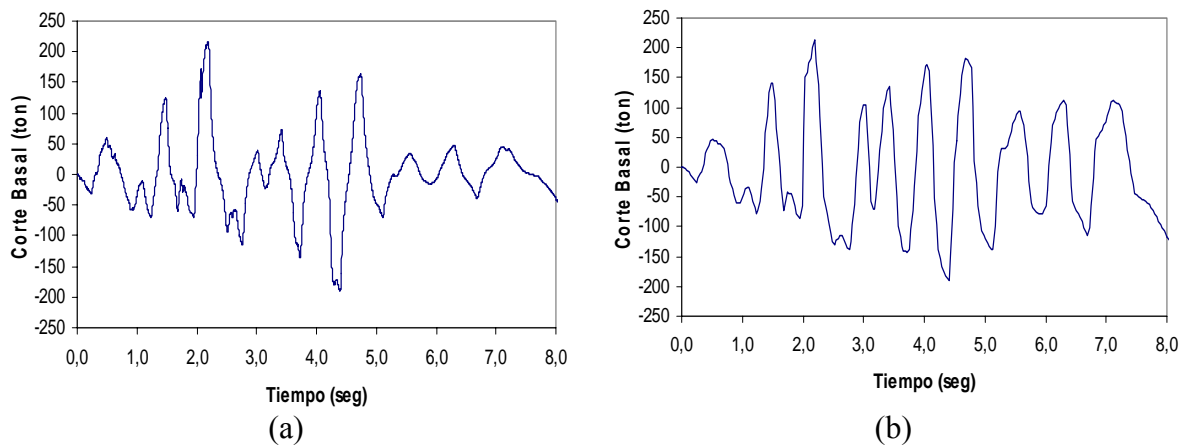


Figura 7- a) Cortante basal del ensayo experimental, b) Cortante basal de la simulación numérica.

En la figura 8 se muestra el mapa de daños de la mampostería al final del ensayo, así como una fotografía para el panel inferior que presenta el mayor daño. Puede observarse que, según la simulación, los daños se concentran en dos de los paneles del pórtico, especialmente en el de la derecha en el piso inferior.

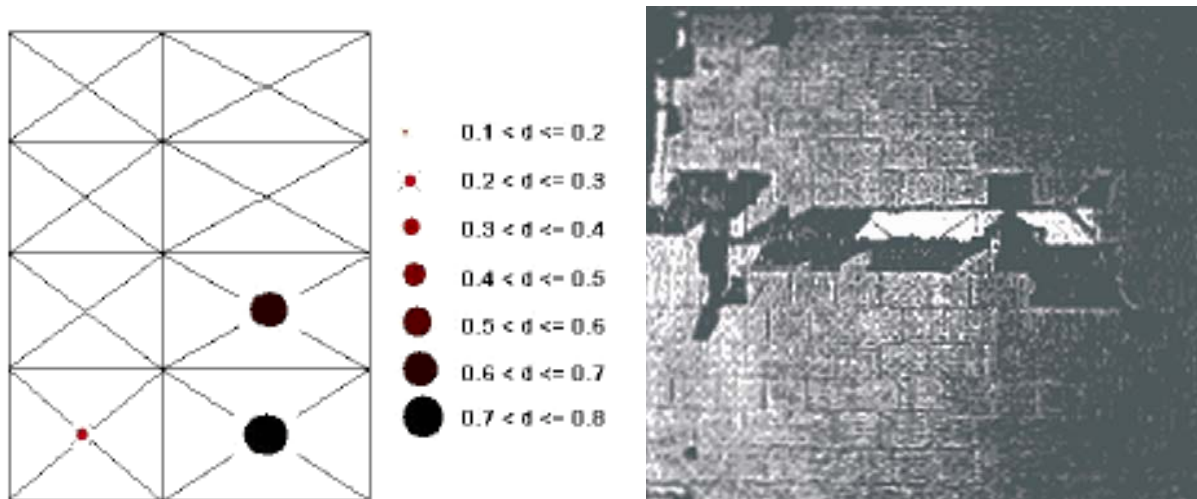


Figura 8- Mapa de daño del pórtico con mampostería, y fotografía del panel inferior derecho.

## REFERENCIAS

- [1].Marante M., Suárez L., Quero A., Redondo J., Vera B., Uzcátegui M., Delgado S., León L., Núñez L., Florez J., Portal of Damage: a web-based finite element program for the analysis of framed structures subjected to overloads. *Advances in Engineering Software*, vol. 36, pp. 346-358, 2005.
- [2].Jaramillo, N., *Portal de Pórticos: un programa de elementos finitos basado en la WEB*. Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes, 2004.
- [3].Puglisi, M., *Modelado de la mampostería de relleno mediante la teoría de daño concentrado*. Tesis de Doctorado, Universidad de Los Andes, Venezuela, 2005.
- [4].Uzcátegui M., *Implementación de elementos finitos en un programa de análisis estructural basado en la Web*. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Venezuela, 2005.
- [5].Marante, M., *Evaluación de la seguridad estructural: contribuciones a la teoría del daño concentrado a la mecánica de la fractura y a la teoría de localización*. Tesis Doctoral en Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes, Venezuela, 2004.
- [6].Borges, E., “Modelado de pórticos de concreto armado con mampostería de relleno bajo cargas monotónicas”, Tesis de Magister Scientiae en Ingeniería Estructural. Universidad de Los Andes, 2003.
- [7].Negro, P., Anthoine, A., Combescure, D., Magonette, G., Molina, J., Pegon, P., Verzeletti, G., Test on the four-storey full-scale reinforced concrete frame with masonry infills. Preliminary report. *European Laboratory for Structural Assessment*. Special publication N° I.95.54.