



MORELOS

IEEE 5º Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo  
Tecnológico, 10 al 12 de octubre de 2007, Cuernavaca, Morelos,  
México



## Un portal de cálculo para la simulación numérica del colapso de estructuras de concreto armado

M. Y. Uzcátegui-Flores<sup>1</sup>

B. Vera-Espinoza<sup>2</sup>

M. Puglisi<sup>3</sup>

L. A. Núñez<sup>1</sup>

J. Flórez-López<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes (Cecalcula). Mérida 5101, Venezuela.

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Matemáticas Aplicadas (CIMA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida 5101, Venezuela.

<sup>3</sup> Departamento de Tecnología de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Arte, Universidad de Los Andes. Mérida 5101, Venezuela.

**Resumen:** El programa Portal de Pórticos es un desarrollo novedoso que combina un programa de elementos finitos no lineal con Internet, es decir un Portal de Cálculo. El modelo físico del portal se basa en la Teoría del Daño Concentrado. El propósito del Portal es la simulación numérica de estructuras aperticadas de concreto armado bajo solicitaciones sísmicas u otro tipo de sobrecargas. Por medio de estas simulaciones se obtienen estimados cuantitativos de la densidad de agrietamiento de los diferentes componentes de la estructura, una medida de la fluencia del refuerzo y la posibilidad o no de colapso estructural. El Portal es una interfaz grafica que puede ser accedida a través de un navegador comercial (Explorer, Netscape, etc.) permitiendo establecer una comunicación entre el usuario y un servidor remoto de alto rendimiento. En este trabajo se describe el Portal, la teoría del daño concentrado y se discute sobre los posibles usos y aplicaciones del portal en la práctica cotidiana de la ingeniería.

**Abstract:** The program "Portal of Damage" is a new development that combines finite elements concepts with internet, in other words, a Compute Portal. The finite element in the program is based in the Concentrated Damage Theory. The purpose of the Portal is the numerical simulation of reinforced concrete framed structures subjected to seismic

solicitations or other overloads. A quantitative estimation of the crack density in the structure elements, the reinforcement yielding and the possibility or not in the collapse of the structure could be obtained with these simulations. The Portal is a Graphical interface that can be accessed using a commercial browser (Explorer, Firefox, Netscape, etc) establishing a communication between the user and the high performance server. In the present study the Portal of Damage and the concentrate damage theory are described and the possible use and application in the engineering practice is discussed.

**Keywords:** Computer Portals, Damage Theory, Finite Element, Seismic Security.

### Introducción

Los Portales de Cálculo son programas de muy reciente aparición. Se caracterizan porque el usuario final no tiene acceso a ellos directamente sino a través de Internet. Las ventajas son evidentes: Se protegen los derechos de autor; a través de los portales 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. Como puede verse, los Portales de Cálculo constituyen una herramienta fundamental para la democratización y masificación del uso de la alta tecnología. Es previsible, que los Portales se multipliquen en un futuro próximo y constituyan la regla general para el uso de programas de simulación en todas las áreas de ciencia e ingeniería. El programa Portal de Pórticos, permite el análisis de estructuras aporticadas sometidas a solicitaciones extraordinarias. Se trata de un programa no lineal, dinámico basado en la teoría del daño concentrado. En este trabajo se describe inicialmente la teoría del daño concentrado. En la segunda parte explica brevemente los portales de cálculo. Continuando con la tercera y cuarta parte para describir el programa Portal de Pórticos y su posible uso en la práctica cotidiana de la ingeniería.

### Teoría del daño concentrado

La Teoría del Daño Concentrado combina la Mecánica de la Fractura, la Teoría del Daño Continuo y el concepto de rótula plástica. Su objetivo es simular el proceso de deterioro y colapso de estructuras de la Ingeniería Civil bajo sobrecargas mecánicas. Si se considera una estructura aporticada compuesta por miembros como se muestra en la figura 1, las matrices de esfuerzo y deformaciones generalizadas de un elemento conformado por los nudos  $i$  y  $j$  están dadas por (1),

$$\boldsymbol{\sigma}^t = (m_i, m_j, n) \text{ y } \boldsymbol{\varepsilon}^t = (\phi_i, \phi_j, \delta) \quad (1)$$

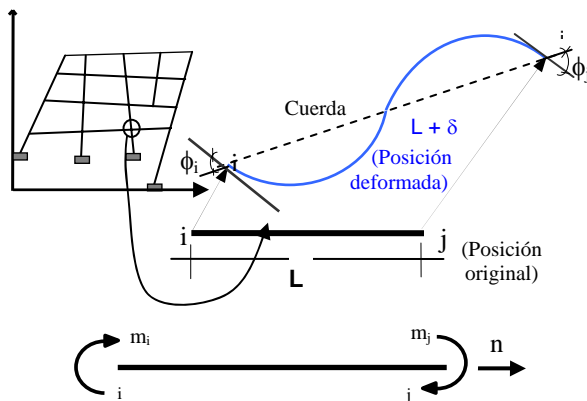


Figura 1. Pórtico plano y definición de las deformaciones y los esfuerzos generalizados.

Mediante la hipótesis de disipación de energía concentrada se pueden representar dos fenómenos inelásticos en un elemento de concreto armado durante un estado de sobrecargas: plastificación del refuerzo y agrietamiento del concreto. La hipótesis consiste en suponer que cada elemento del pórtico puede ser representado como una viga columna elástica y dos rótulas inelásticas tal y como se muestra en la figura 2. La teoría del daño concentrado se obtiene mediante la introducción de un nuevo conjunto de variables internas denominado matriz de daño:  $\mathbf{D} = (d_i, d_j)$ .

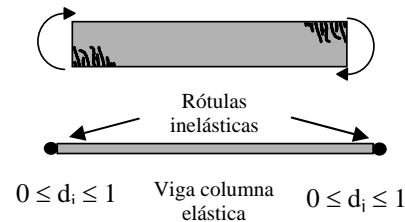


Figura 2. Modelo de disipación de energía concentrada e interpretación de las variables de daño

Las dos variables en la nueva matriz miden la densidad de agrietamiento del elemento y pueden tomar valores entre 0 y 1, el valor de 0 corresponde a un elemento sin daño, mientras que el valor de 1 representa un estado de agrietamiento total.

La ley de comportamiento que relaciona las matrices de esfuerzos y deformaciones generalizadas puede expresarse en términos de una ley de estado, una ley de evolución del daño para las rótulas y una función de fluencia para una rótula agrietada [1]. La ley de estado se define de la siguiente manera,

$$\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_p = \mathbf{F}(\mathbf{D})\boldsymbol{\sigma};$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{D}) = \begin{bmatrix} \frac{F_{11}^0}{1-d_i} & F_{12}^0 & 0 \\ F_{21}^0 & \frac{F_{22}^0}{1-d_j} & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}^0 \end{bmatrix} \quad (2)$$



donde  $\mathbf{F}$  es la matriz de flexibilidad de un elemento agrietado. Los coeficientes  $F_{ij}^0$  representan los términos de flexibilidad de la viga columna elástica tal y como se encuentran en los libros de texto de teoría de estructuras. La energía de deformación complementaria del elemento puede ser obtenida a partir de la ley estado,

$$U^* = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}' (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}' \mathbf{F}(\mathbf{D}) \boldsymbol{\sigma} \quad (3)$$

La tasa de restitución de energía de las rótulas plásticas se define utilizando los métodos de la mecánica de la fractura,

$$G_i = \frac{\partial U^*}{\partial d_i} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}' \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{D})}{\partial d_i} \boldsymbol{\sigma} = \frac{m_i^2 F_{11}^0}{2(1-d_i)^2};$$

$$G_j = \frac{m_j^2 F_{22}^0}{2(1-d_j)^2} \quad (4)$$

La evolución del agrietamiento en el elemento puede ser descrita utilizando un criterio de Griffith generalizado:

$$\begin{cases} \dot{d}_i = 0 & \text{if } G_i - R(d_i) < 0 \text{ or } \dot{G}_i - \dot{R}(d_i) < 0 \\ \dot{d}_i > 0 & \text{if } G_i - R(d_i) = 0 \text{ and } \dot{G}_i - \dot{R}(d_i) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

En otras palabras, habrá propagación de fisuras sólo si la tasa de restitución de alguna de las rótulas alcanza el valor de la resistencia al agrietamiento  $R$ . La resistencia al agrietamiento puede ser calculada como una función del comportamiento uniaxial del concreto y el acero de refuerzo, de la fuerza axial sobre el elemento y del estado de agrietamiento en el elemento según el procedimiento descrito en [2]. Finalmente, la función de fluencia de rótula plástica dañada puede ser obtenida a partir del concepto de momento efectivo sobre una rótula y la hipótesis de equivalencia en deformaciones:

$$f_i = \left| \frac{m_i}{1-d_i} - c\phi_i^p \right| - k_y \leq 0 \quad (6)$$

donde  $c$  y  $k_y$  son parámetros que también pueden ser determinados en base en el comportamiento uniaxial de los materiales del elemento y la fuerza axial [3].

### Portales de cálculo

La utilización intensiva de las TIC ha ido transformando a la actividad científico-técnica, convirtiendo a la computación para (y por) usuarios en una disciplina emergente que abre sus propios métodos y soluciones. 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 la comunidad académica, una nueva manera de relacionarse para la producción y diseminación del conocimiento científico. La computación se hace cada vez más de uso intuitivo y en el futuro cercano apunta a desempeñar el papel que hoy juegan los servicios de agua y electricidad. La información será accedida, procesada y consolidada mediante técnicas de representación del conocimiento y manejo 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, distribuidos geográficamente, 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 diseminados a la sociedad a través 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.

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. Esta facilidad tiene un importante beneficio adicional que es la popularización del uso de sofisticadas aplicaciones científicas mediante el uso de Portales.

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 [4]. Los portales de aplicaciones científicas se constituyen en un importante tipo. 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 ubicuidad 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 deben 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 tienen incorporadas herramientas de visualización y manejo 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 metadatos, 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, manejo de datos y/o análisis estadísticos de datos, compartiendo estos resultados con otros miembros de la comunidad.

Bajo estas características fue desarrollado el programa Portal de Pórticos, cuyo objetivo principal es proporcionar instrumentos teóricos, numéricos y computacionales para que puedan ser usados en la reducción del riesgo sísmico, mediante la simulación numérica del proceso de daño estructural y del colapso de edificaciones de concreto armado. El programa Portal de Pórticos es una interfaz grafica que puede ser accedido usando un navegador comercial (Explorer, Netscape, etc.) permitiendo establecer una comunicación entre el usuario y un servidor remoto que contiene el programa principal de elementos finitos. El programa esta caracterizado por 3 componentes principales: Un Applet (programa que se ejecuta en la maquina del cliente incrustado en una pagina Web), el Servlet (que se ejecuta del lado del servidor), y los programas Fortran que ejecutan los cómputos, uno para cada módulo del programa.

### Portal de pórticos

El programa Portal de Pórticos es un programa de elementos finitos no lineal que ha sido diseñado para ser accedido exclusivamente a través de navegadores comerciales como Netscape o Explorer, el mismo se encuentra disponible en: <http://portaldeporticos.ula.ve>. El usuario debe abrir una cuenta, digitalizar el pórtico, generar el archivo de entrada y colocarlo en su cuenta en el servidor ya que las simulaciones numéricas no se realizan en la computadora personal del usuario sino en el servidor de alto rendimiento. Una vez realizado el análisis se accede a un post-procesador gráfico para visualizar los resultados. La estructura del portal está conformada por 3 módulos principales: Preprocesador, Procesador y Postprocesador. Las pantallas principales correspondientes a cada módulo se muestran en la figura 3.

**Módulo Preprocesador:** Permite la digitalización del pórtico y sus solicitudes. Esta digitalización consiste en describir la geometría del pórtico, las solicitudes,



las propiedades de las secciones transversales y del concreto y el acero utilizado.

**Módulo Procesador:** Es una interfaz con el programa de elementos finitos que se encuentra residenciado en el 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. En el Procesador se accede a la lista de archivos que el usuario tiene en su cuenta y se escoge cual debe ser procesado mediante el programa de elementos finitos.

**Módulo Postprocesador:** 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.

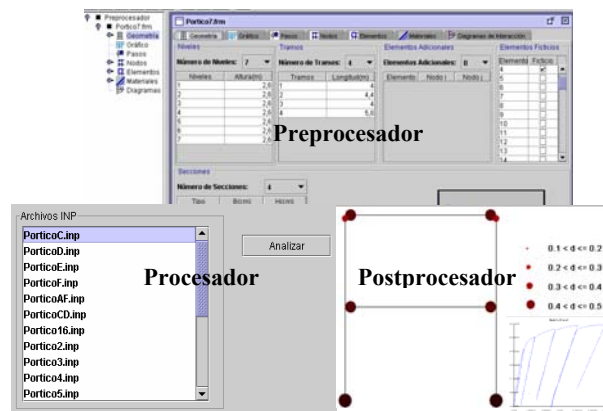


Figura 3. Pantallas que representan cada uno de los módulos del programa: Preprocesador, Procesador, Postprocesador.

### Ejemplos de validación

Con la finalidad de validar la teoría propuesta se llevó a cabo un programa experimental, el cual consiste en simular el proceso de daño de edificaciones a escala natural y compararlo con los resultados experimentales obtenidos. A continuación se muestra los resultados de 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 [5]. Esta prueba se realizó en un muro de reacción, la cual es una estructura altamente

resistente que consiste en dos losas de reacción ortogonales. El modelo a ser probado se fijó al piso de reacción y las cargas se aplicaron por medio de un controlador pseudo-dinámico a través de la acción de un gato hidráulico entre la estructura y el muro de reacción. El edificio fue sometido a la historia de desplazamientos que se muestran en la figura 5, mediante actuadores hidráulicos fijados a las losas de los cuatro niveles de la estructura. 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 posee una losa sólida, con espesor de 150 mm para cada piso.



Figura 4. Edificio utilizado en la simulación numérica.

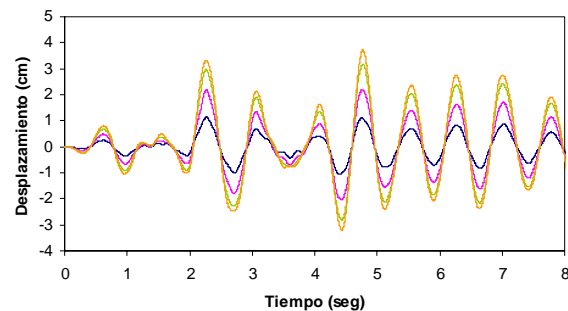


Figura 5. Historia de desplazamiento aplicada a cada uno de los niveles del pórtico.

En la Figura 6 y 7 se muestra la respuesta de la estructura ensayada, y los resultados de la simulación obtenidos a través de la simulación numérica mediante el programa Portal de Pórticos, en ella se representa la historia del corte basal. Tal como puede observarse, hay una buena correlación entre ambas curvas. En la figura 8 se muestra el mapa de daños de uno de los pórticos.

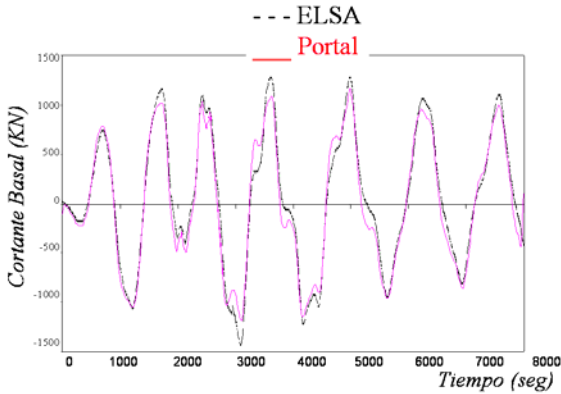


Fig. 6. Comparación del cortante basal vs. el tiempo entre el ensayo experimental y la simulación numérica.

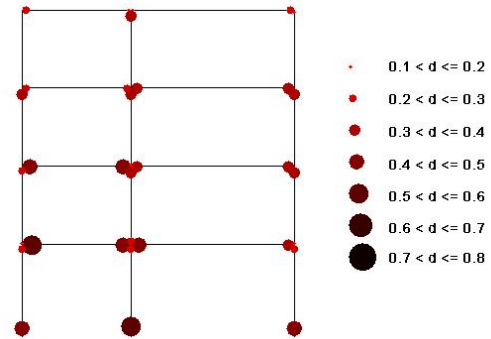
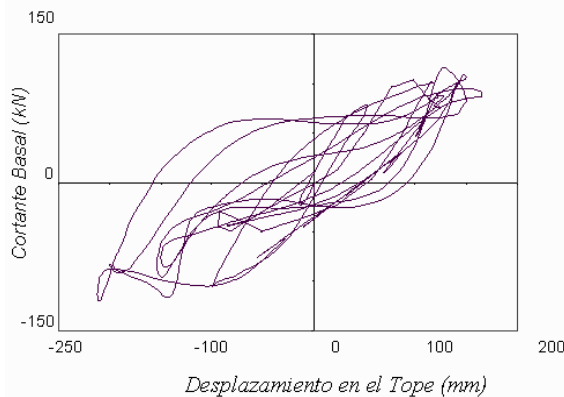
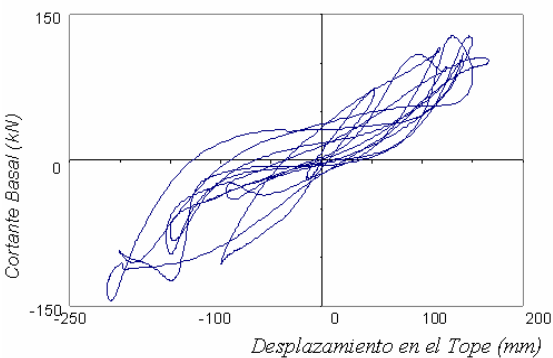


Fig. 8. Mapa de daño obtenido en el módulo Postprocesador del programa Portal de Pórticos.



(a)



(b)

Fig. 7 Grafica cortante basal vs. Desplazamiento en el tope. (a) Simulación numérica con el Portal. (b) Ensayo experimental.

### Posibles usos y aplicaciones del Portal de Pórticos en la práctica cotidiana de la ingeniería

La filosofía que sustenta las normas de construcción actuales es la siguiente: Las estructuras deben ser capaces de soportar sismos ligeros sin sufrir daños estructurales, deben ser capaces de soportar sismos medianos sin sufrir daños estructurales no reparables y deben ser capaces de soportar sismos severos sin colapsar. Sin embargo, las normas no especifican los instrumentos o los métodos para verificar que un diseño dado cumple con esta filosofía. Los mapas de daños obtenidos con el Portal pueden servir de base para esta evaluación. Tal y como se demuestra en [6], la variable de daño esta relacionada con el potencial de reparabilidad de la estructura. Por ejemplo se ha determinado que valores de esta variable inferiores a 0.25 corresponden a daño estructural insignificante. Valores inferiores a 0.45 corresponde a daño estructural reparable y valores superiores a 0.6 corresponden al colapso progresivo del elemento. Usando el Portal para generar mapas de daño como el mostrado en la figura 8, el ingeniero puede calibrar un diseño estructural y aumentar, o reducir, el refuerzo o las dimensiones de las secciones para adecuar su estructura a la resistencia deseada. Otro problema que es de gran importancia en Venezuela y otros países en vías de desarrollo es la evaluación de la seguridad estructural de edificaciones existentes. En este caso, el Portal puede ser usado como instrumento de diagnóstico de estructuras potencialmente vulnerables.

Finalmente el Portal abre nuevas líneas de investigación fuera del ámbito de la Ingeniería Civil. Al



presentarse un producto diseñado para el uso masivo del cálculo numérico intensivo y sofisticado, surgen nuevos problemas en las áreas de la Tecnología de la Información, el Cálculo Numérico, la Ingeniería de Software y la Computación Paralela. Este programa pertenece a la categoría de los denominados Portales de Cálculo cuyo uso y desarrollo es nuevo no ya en Venezuela sino en el mundo.

### Referencias

- [1] A. Cipollina, A. López-Inojosa, J. Flórez-López, A simplified damage mechanics approach to nonlinear analysis of frames, *Computers & Structures* 1995; 54 (6), pp. 1113-1126.
- [2] Flórez-López, Frame analysis and continuum damage mechanics, *J. Eur. Mech.* 1998; 17 (2), pp. 269-284.
- [3] M.E. Perdomo, A. Ramirez, J. Flórez-López, Simulation of damage in RC frames with variable axial forces, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 1999; 28 (3), pp. 311-328.
- [4] R. Webb, (2004) Portals and Their Evolution: An Analysis of Portals With Communities of Practice Defence Research and Development Canada Technical Report.
- [5] Negro, P., Verzeletti, G., Magonette, G.E., Pinto, A.V. "Test on a four-storey full-scale R/C frame designed according to eurocodes 8 and 2: Preliminary report. European Laboratory for Structural Assessment.
- [6] E. Alarcón, A. Recuero, R. Perera, C. Lopez, J.P. Gutierrez, A. De Diego, R. Picon, J. Florez Lopez, A reparability index for reinforced concrete members based on fracture mechanics, *Engineering Structures* Vol 23, No 6, pp. 687-697, 2001

### Maylett Y. Uzcátegui Flores

Asistente de Investigación, Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes – CPTM. Ingeniero Civil, M.Sc. en Ingeniería Estructural, Universidad de Los Andes. Especialidad: Matemática Computacional, Simulación estructural mediante elementos finitos.

**Dirección del autor:** Av. 4 Bolívar, Edif. General Masini, Piso 3, estado Mérida.a 5101, Venezuela. email: [maylett@cecalc.ula.ve](mailto:maylett@cecalc.ula.ve)

### Betsy Vera Espinoza

Asistente de Investigación, Centro de Investigación en Matemáticas Aplicadas (CIMA). Ingeniero Civil. M.Sc. en Ingeniería Estructural, Universidad de Los Andes. Especialidad: Simulación estructural mediante elementos finitos.

**Dirección del autor:** Av. 4 Bolívar, Edif. General Masini, Piso 3, estado Mérida.a 5101, Venezuela. email: [betsy@ula.ve](mailto:betsy@ula.ve)

### Monica Puglisi

Prof. Dr. Departamento de Tecnología de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Arte, Universidad de Los Andes, Venezuela. Especialidad: Matemática Computacional, Simulación estructural mediante elementos finitos.

**Dirección del autor:** Departamento de Tecnología de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Arte, Universidad de Los Andes, La Hechicera, Mérida 5101, Venezuela. email: [mpuglisi@ula.ve](mailto:mpuglisi@ula.ve)

### Luis A. Núñez

Licenciado en Física (Universidad Simón Bolívar, 1979); Doctor en Ciencias (Universidad Central de Venezuela, 1988); Especialidad: Astrofísica Relativista, Física Teórica, Física Computacional. Coautor de casi 30 artículos en revistas técnicas internacionales y otros tantas comunicaciones en Congresos, tiene una significativa experiencia en la gestión de proyectos teleinformáticos institucionales.

**Dirección del autor:** Av. 4 Bolívar, Edif. General Masini, Piso 3, estado Mérida.a 5101, Venezuela. email: [nunez@ula.ve](mailto:nunez@ula.ve)

### Julio Flórez López

Ingeniero Civil de la Universidad de Los Andes, Venezuela (1980), DEA y Doctor en Mecánica Aplicada de la Universidad de París (1989), Profesor Titular de la Universidad de Los Andes. Área de especialidad: Mecánica de Sólidos y Estructuras. Director del Centro de Investigación em Matemáticas Aplicadas de la Universidad de Los Andes. Autor de 87 artículos científicos. Premio Nacional del CONICIT en 1997

**Dirección del autor:** Prof. Dr. Departamento de Estructuras, Facultad de ingeniería, Universidad de Los Andes, La Hechicera, Mérida 5101, Venezuela. email: [iflorez@ula.ve](mailto:iflorez@ula.ve)