

Análisis no lineal de estructuras de concreto armado a través de un portal de cálculo

Nonlinear analysis of reinforced concrete structure with a computing portal

Jaramillo, Nayive¹; Uzcátegui, Maylett²; Vera, Betsy³ y Flórez, Julio⁴

¹Escuela Básica de Ingeniería. Facultad de Ingeniería

²Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes (CECALCULA)

³Centro de Investigación en Matemáticas Aplicadas (CIMA), Facultad de Ingeniería

⁴Escuela de Civil. Facultad de Ingeniería

Universidad de Los Andes Mérida 5101-Venezuela

nayive@ula.ve

Recibido: 31-03-2008

Revisado: 13-04-2009

Resumen

Los portales de cálculo surgen para ofrecer a los usuarios, a través de la Web, el acceso a los recursos y servicios de grandes centros de cómputo de alto rendimiento. Con el propósito de evaluar la seguridad sismorresistente de edificaciones existentes o por construir se ha desarrollado un Portal de Cálculo, denominado "Portal de Pórticos" (PDP) al cual se puede acceder a través de la página Web <http://portaldeporticos.ula.ve>. Este Portal contiene un programa de elementos finitos que permite el análisis no lineal de estructuras aporticadas sometidas a solicitaciones extraordinarias como por ejemplo sismos. El elemento finito disponible actualmente se basa en la teoría de daño concentrado, considerando fatiga de bajo ciclaje en estructuras planas de concreto armado. En este trabajo se describe el Portal, la teoría del daño concentrado, algunos ejemplos y aplicaciones desarrollados en el mismo.

Palabras clave: Portales de cálculo, elemento finito, seguridad sísmica, teoría del daño, tecnología grid.

Abstract

Computing portals offer users access to resources and services of high performance computer centers through the Web. With the purpose of evaluating the seismic security of existing buildings, or of using it in the design stage, a computing portal called "Portal of Damage" (PDP) has been developed. It can be accessed through the Web page <http://portaldeporticos.ula.ve>. The system consists in a dynamic and nonlinear finite element program based on lumped damage mechanics considering the low cycle fatigue effects in reinforced concrete plane structures. This paper describes the program PDP, the lumped damage mechanics and some examples and applications developed using the PDP portal.

Key words: Computing portals, finite element, seismic security, lumped damage mechanics, grid technology.

1 Introducción

En la actualidad la Tecnología de la Información y Comunicación (TIC) juega un papel importante en el desarrollo de las actividades científico-técnicas, permitiendo que un mayor número de usuarios tenga acceso a la investigación global para su manipulación y sus aplicaciones en las diferentes áreas de la humanidad. Un ejemplo de esto lo constituye el Portal de Pórtico el cual es un programa de

elementos finitos no lineal que permite el análisis, tanto estático como dinámico, de estructuras de concreto armado, basado en la teoría del daño concentrado.

Los resultados del análisis se representan mediante gráficas de variable contra variable, variables contra tiempo y mapas de distribución de daños en cualquier instante del análisis.

La capacidad predictiva de este portal de cálculo ha sido y sigue siendo evaluada, a través de la comparación de

los resultados de simulaciones de ensayos experimentales encontrados en la literatura.

2 Usos de las TIC en análisis estructural: PDP

La utilización intensiva de las Tecnologías de Información y Comunicación (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, el acceso a datos experimentales, facilitar tanto el modelado como 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, es decir, la introducción de estas tecnologías implica un cambio en la sociedad, designando a la vez un conjunto de innovaciones tecnológicas que permiten una redefinición radical del funcionamiento de la sociedad. 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, distribuidos geográficamente, quienes interactuarán a través de la red mediante sistemas de videoconferencias de escritorios y/o herramientas de colaboración electrónica.

El significativo poder de cómputo para simulaciones y las inmensas bases de datos accesibles a través de INTERNET, transforman a la red en el computador, y los recursos de la red se acceden a través del WEB. Sin embargo, actualmente surge un nuevo paradigma de la computación distribuida denominado Tecnología Gris. Su objetivo es permitir gestionar y distribuir la potencia de cálculo disponible, de tal forma que los usuarios se beneficien de la potencia de ordenadores infrautilizados que se encuentran dispersos geográficamente. Éstos ceden parte de sus recursos para procesar aplicaciones con funciones de cálculo avanzadas.

Gracias a la tecnología Gris el usuario puede utilizar toda la red o redes de ordenadores, con el fin de solicitar los recursos que necesita de otros equipos que no trabajan al máximo de sus posibilidades. De esta manera el usuario podrá acceder a un supercomputador virtual con la potencia suficiente para realizar de forma sencilla los cálculos avanzados. Es decir, si el usuario necesita más recursos de memoria RAM o de disco duro para almacenar un trabajo, no hace falta que lo haga en los recursos de su propio equipo, sino que puede utilizar los recursos de otros ordenadores de la red Grid.

La tecnología Grid se diferencia de los sistemas cliente-servidor y otras tecnologías actuales (CORBA, EJB o

NET), en que está orientada a los recursos computacionales y no a la información, aunque la seguridad no está en un segundo plano y la comunicación es asíncrona.

La red Grid es un paso más allá de Internet, pues incorpora gran ancho de banda, alta velocidad de procesamiento, y bases de datos de gran tamaño con recursos disponibles tanto para la industria, como para los científicos como para los ciudadanos en general. La interconexión entre ordenadores usando la tecnología Grid permite a un número elevado de usuarios obtener información sin determinar a qué ordenador quieren conectarse. Dadas las nuevas herramientas, 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, a los datos, además permiten 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 (Webb, 2004). 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 simple 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 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 metadatos, tanto locales como remotos. Igualmente permite la transferencia 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 el seguimiento de estado de su ejecución.
- *Servicios de información*: provee información sobre la disponibilidad de recursos (CPU, almacenamiento, co-

municación entre los distintos nodos).

- **Servicios y herramientas de colaboración:** algunos portales incorporan herramientas (videoconferencias, chats, Voz sobre IP) para que la comunidad pueda interactuar y compartir la información.
- **Servicios de visualización y análisis de datos:** permite 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.

Bajo estas características fue desarrollado el programa Portal de Pórticos (PDP), 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 cuyos modelos matemáticos se basan en la Teoría del daño concentrado. El programa Portal de Pórticos es una interfaz grafica que puede ser accedido usando un navegador comercial (Explorer, Netscape, entre otros.) permitiendo establecer una comunicación entre el usuario y un servidor remoto que contiene el programa principal de elementos finitos. El programa PDP esta caracterizado por tres 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, (Jaramillo, 2004).

3 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 Fig. 1, las matrices de esfuerzo y deformaciones generalizadas de un elemento conformado por los nudos i y j están dadas por:

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

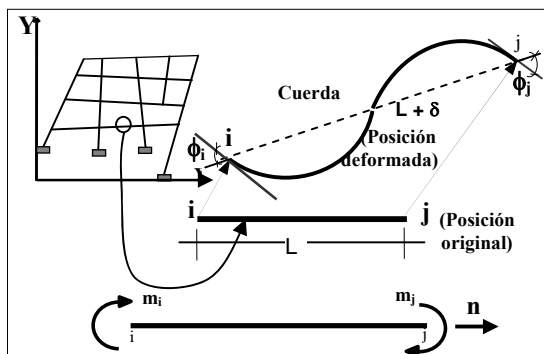


Fig. 1. Pórtico plano y definición de las deformaciones y los esfuerzos generalizados

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 Fig. 2. La teoría del daño concentrado se obtiene mediante la introducción de un nuevo conjunto de variables internas denominado matriz de daño: $D = (d_i, d_j)$.

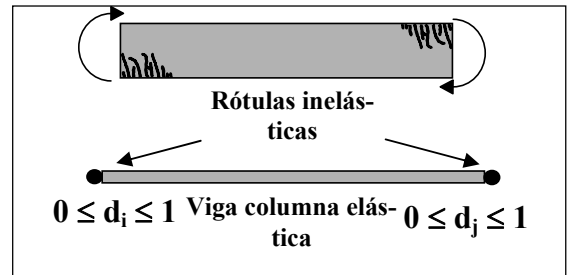


Fig. 2. Modelo de disipación de energía concentrada e interpretación de las variables de daño

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 (Cipollina, López y Flórez, 1995). La ley de estado se define de la siguiente manera:

$$\epsilon - \epsilon_p = F(D)\sigma \quad (2)$$

donde: $F(D)$ es la matriz de flexibilidad de un elemento agrietado.

$$F(D) = \begin{bmatrix} \frac{F_{11}^0}{1-d_i} & F_{12}^0 & 0 \\ F_{21}^0 & \frac{F_{22}^0}{1-d_j} & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}^0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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 siguiente:

$$U^* = \frac{1}{2} \sigma^t (\epsilon - \epsilon_p) = \frac{1}{2} \sigma^t F(D) \sigma \quad (4)$$

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

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

$$G_j = \frac{m_j^2 F_{22}^0}{2(1-d_j)^2} \quad (5)$$

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

$$\begin{cases} \dot{d}_i = 0 & \text{if } G_i - R(d_i) < 0 \text{ or } \dot{G}_i - \dot{R}(d_i) < 0 \\ \dot{d}_i > 0 & \text{if } G_i - R(d_i) = 0 \text{ and } \dot{G}_i - \dot{R}(d_i) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

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 (Flórez, 1998). 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:

$$f_i = \left| \frac{m_i}{1-d_i} - c\phi_i^p \right| - k_y \leq 0 \quad (7)$$

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 (Perdomo, Ramírez, y Flórez, 1999).

4 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://portaldepoticos.ula.ve>. El programa 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. Estas simulaciones numéricas están basadas en modelos de comportamiento originales desarrollados en el marco de la Teoría del Daño Concentrado y que fueron descritos en la sección anterior.

Para su utilización se requiere que el usuario deba 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 general del portal está conformada por tres módulos principales: *Preprocesador*, *Procesador* y *Postprocesador*.

Las pantallas principales correspondientes a cada módulo se muestran en la Fig. 3.

- **Módulo Preprocesador:** permite la digitalización del pórtico y sus solicitaciones. Esta digitalización consiste en describir la geometría del pórtico, las solicitaciones, las propiedades de las secciones transversales, descripción de los materiales (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 analizada.



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

5 Simulaciones numéricas con el portal de pórticos

A continuación se presentan los resultados conseguidos en el Portal de Pórticos de dos simulaciones de pórticos de concreto armado construidos a escala real. La primera simulación corresponde a un pórtico de un nivel y un tramo ensayo por (Calvi, Bolognini, 2001) en la Universidad de Pavia, Italia. La segunda simulación corresponde a pórtico de ocho niveles y tres tramos que forma parte de un edificio existente en la ciudad de Mérida-Venezuela, (Uzcategui, 2005).

5.1 Simulación en el portal de pórtico del ensayo de un pórtico a escala real realizado por Calvi y Bolognini, 2001.

El ensayo experimental llevado a cabo por Calvi y Bolognini 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 fue construido considerando la resistencia del concreto de 25Mpa. ($f'c=255Kg/cm^2$) y la resistencia del acero de 500Mpa ($Fy=5100Kg/cm^2$). El pórtico fue diseñado como la parte inferior de un pórtico de cuatro niveles siguiendo los procedimientos recomendados en el Eurocódigo 2 y 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 Fig. 4.

El ensayo se realizó 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 tres ciclos de desplazamientos horizontales de acuerdo a niveles predefinidos de deriva, los cuales fueron 0.1%, 0.4%, 1.2%, 3.6%, 0.4%.

La Fig. 5(a) muestra la curva fuerza-desplazamiento obtenida en el ensayo experimental. La Fig. 5(b) muestra la curva fuerza-desplazamiento obtenida en la simulación numérica del ensayo realizada 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.

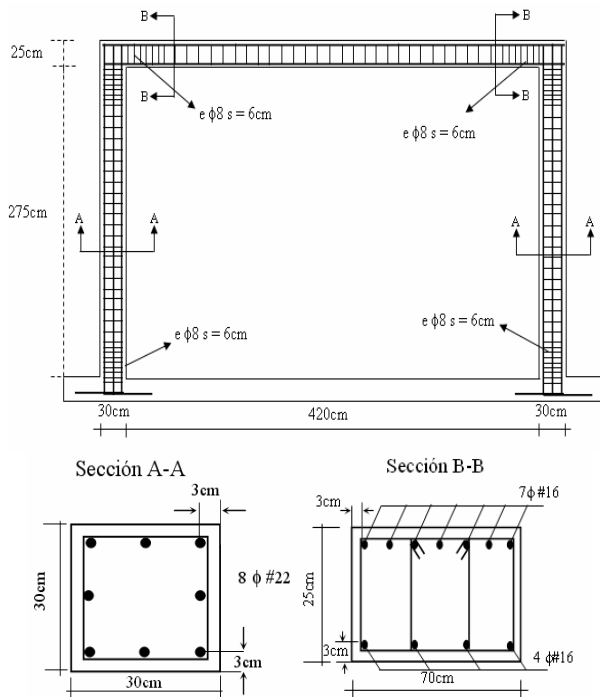


Fig. 4. Características geométricas y las secciones transversales del pórtico de concreto armado ensayado por Calvi y Bolognini, 2001

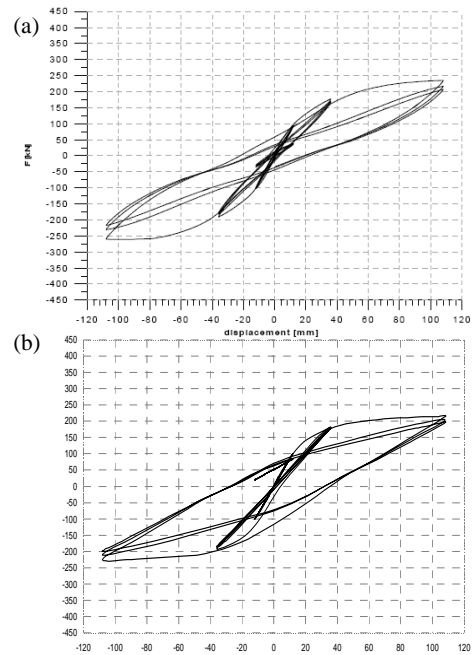


Fig. 5. Grafica de Fuerza vs. Desplazamiento (a) del ensayo experimental (Calvi y Bolognini, 2001) (b) simulación numérica llevada a cabo con el Portal de Pórticos

5.2 Simulación de un pórtico de concreto armado que posee ocho niveles y tres tramos (Uzcatogui, 2005)

Esta simulación consiste en un análisis dinámico de un pórtico de concreto armado de ocho niveles y tres tramos, (ver Fig. 6), el cual forma parte de un edificio diseñado para cumplir con la normativa venezolana COVENIN 1756. Para el análisis dinámico realizado, se aplicó en la base del pórtico un registro de aceleraciones de un sismo sintético, que se encuentra en la librería del programa Portal de Pórticos, "Z5S2GB2". Este sismo tiene una duración de 29 segundos y fue seleccionado de acuerdo a las características de la zona sísmica para la cual fue diseñado el edificio (zona 5), el uso de la edificación (tipo B2) y, el tipo de suelo donde se fundó (suelo S2).

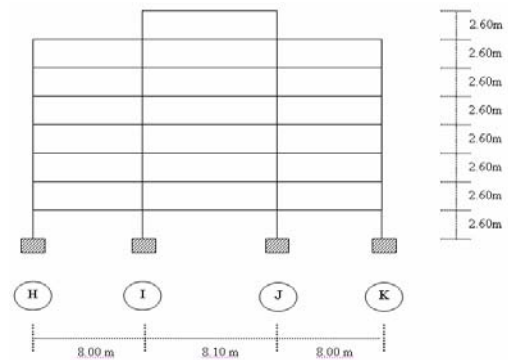


Fig. 6. Características geométricas del pórtico de concreto armado, de 8 niveles y 3 tramos, analizado con el Portal de Pórticos (Uzcatogui, 2005)

Luego del análisis dinámico del pórtico, se obtuvo una distribución de daño en cada uno de los elementos estructurales que lo conforman, ver Fig. 7.

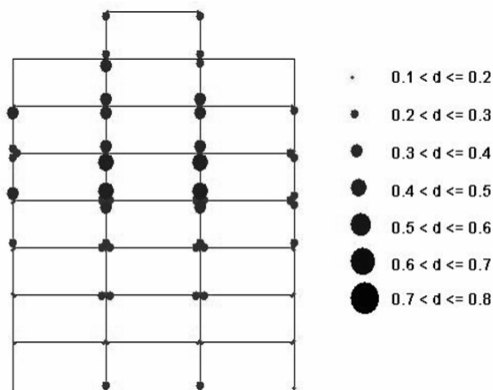


Fig.7. Mapa de daño del pórtico de ocho niveles y tres tramos analizado en el PDP

Esta variable de daño representa la densidad de micro grietas y por tanto en nivel de daño alcanzado por las vigas y columnas del pórtico. Un valor de daño entre 0.10 y 0.40 se considera insignificante, valores de daño entre 0.40 y 0.60 representan un daño reparable, mientras que valores de daño mayores de 0.60 en los elementos del pórtico se consideran daños graves que llevan al colapso progresivo de la estructura. En la Fig. 8 se muestra la historia de daño en el elemento más dañado del pórtico de ocho niveles y tres tramos luego del análisis dinámico realizado en el PDP.

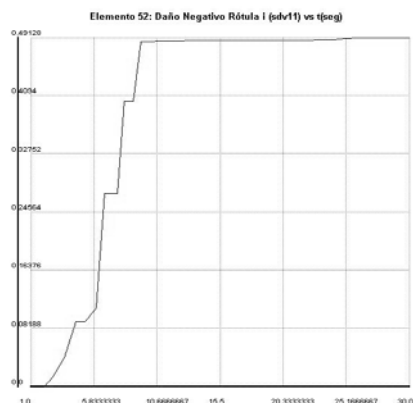


Fig. 8. Historia de daño en el elemento más dañado del pórtico de ocho niveles y tres tramos luego del análisis dinámico

Con la distribución de daño y por medio del diagnóstico y evaluación estructural el ingeniero podrá elaborar un

programa de rehabilitación en casos de edificaciones existentes que presente daños considerables o rediseñar los elementos de la edificación por construir de acuerdo a la magnitud y localización de los daños presentados.

6 Conclusiones

Gracias a los avances de las TIC's, el portal de pórticos ofrece a los usuarios seguridad en el acceso, manejo de datos, ejecución y seguimiento de procesos, servicios de información.

Para los elementos estructurales de concreto armado el Portal de Pórticos permite la caracterización de los siguientes fenómenos: pérdida de resistencia y rigidez, fatiga de bajo ciclaje, flexión con fuerzas axiales variables, secciones transversales asimétricas, "efecto Baushinger", análisis de daño estructural simultáneo con el análisis estructural (estático o dinámico).

Con la distribución de daño y por medio del diagnóstico y evaluación estructural el ingeniero podrá elaborar un programa de rehabilitación en casos de edificaciones existentes que presente daños considerables o rediseñar los elementos de la edificación por construir de acuerdo a la magnitud y localización de los daños presentados.

Referencias

- Calvi G, y Bolognini D, 2001, Seismic response of reinforced concrete frames infilled with weakly reinforced masonry panels, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 153-185.
- Cipollina A, López A y Flórez J, 1995, A simplified damage mechanics approach to nonlinear analysis of frames, *Computers & Structures*; Vol. 54, N° 6, pp. 1113-1126.
- Flórez J, 1998, Frame analysis and continuum damage mechanics *J. Eur. Mech*, Vol.17, N° 2, pp. 269-284.
- Jaramillo N, 2004, Portal de pórticos: un programa de elementos finitos basado en la Web, Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
- Webb R, 2004, Portals and their evolution: an analysis of portals with communities of practice defense research and development Canada technical report.
- Perdomo M, Ramirez A y Flórez J, 1999, Simulation of damage in RC frames with variable axial forces, *Earthquake Engineering & structural dynamics*, Vol. 28, N° 3, pp. 311-328.
- Uzcátegui M, 2005, Implementación de elementos finitos en un programa de análisis estructural basado en la Web. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.