

**SIMULACION NUMERICA DEL COMPORTAMIENTO
DE MATERIALES DAÑADOS Y LUEGO REPARADOS**

Bibiana Luccioni, Juan Carlos Ramallo, Rodolfo Danesi
Laboratorio de Estructuras - Universidad Nacional de Tucumán
CC 134 - Correo Central - (4000) Tucumán - Argentina

RESUMEN

Como resultado de la entrada del material en estado de comportamiento no lineal, un punto del sólido experimenta un cierto estado de daño. Esto da como resultado un daño en la estructura que se traduce fundamentalmente como pérdida de rigidez, ductilidad y resistencia si la estructura se vuelve a cargar.

En este trabajo se presenta un estudio teórico-numérico que permite predecir el comportamiento de estructuras de hormigón reparadas bajo carga. En primer lugar se define el daño local y se calcula el daño de la estructura original cuando es sometida a carga. Luego, en una segunda etapa, se simula numéricamente la reparación y se evalúa el comportamiento de la estructura una vez reparada.

El estudio se realiza mediante un programa de elementos finitos no lineal utilizando modelos constitutivos de daño y plasticidad. En el trabajo se describen los modelos utilizados para la simulación de los materiales, la evaluación del daño y la posterior reparación. El mismo se completa con ejemplos de aplicación a elementos de hormigón armado ensayados bajo cargas estáticas, reparados y luego reensayados.

ABSTRACT

As a result of the entrance of the material in an inelastic range, a point of a solid experiences certain degree of damage. This results in damage of the structure that is traduced in loss of stiffness, ductility and strength when the structure is reloaded.

In this paper, a theoretical and numerical study which is able to predict the behaviour of repaired structures under reload is presented. First, the local damage is defined and the global damage of the original structure when loaded is evaluated. Then, in a second stage, the repairmen is numerically simulated and the behaviour of the repaired structure is analysed.

The study is done with a non linear finite element program, using damage and plasticity constitutive models. In the paper, the models used for the materials, for the evaluation of damage and for the repairmen are described. The paper is completed with applications examples to reinforced concrete elements tested under static load, repaired and the reloaded.

INTRODUCCION

A través de las teorías y métodos que se usan actualmente en la práctica, es difícil lograr criterios de reparación/refuerzo completamente efectivos que cubran los requerimientos de resistencia, rigidez, ductilidad, durabilidad, adherencia, etc.. En algunos casos, reparaciones y refuerzos realizados de acuerdo a prácticas convencionales han dado como resultado un "debilitamiento de la estructura".

Para mejorar las técnicas de intervención es necesario lograr una adecuada evaluación del estado de las estructuras y una mejor descripción del comportamiento estructural de los edificios tanto bajo determinadas condiciones de carga (cómo actúan en conjunto los mecanismos residuales en una estructura dañada existente y cómo interactúan dichos mecanismos con distintas técnicas de reparación o refuerzo) como bajo distintos agentes climáticos o ambientales agresivos.

Este trabajo forma parte de los primeros estudios de una línea de investigación sobre simulación numérica de reparación y refuerzo de estructuras dañadas. En el mismo se analiza el comportamiento de estructuras de hormigón armado bajo carga utilizando un modelo de plasticidad y daño acoplados. El mismo permite evaluar el daño local y global. Luego se simula la reparación y se vuelve a cargar la estructura con lo cual se obtiene una idea de la capacidad de carga de la estructura reparada y del efecto de la reparación en el resto de la misma.

MODELO CONSTITUTIVO

En esta sección se presentan las bases del modelo constitutivo utilizado para el material. Dicho modelo trata de manera unificada los fenómenos de plasticidad y degradación elástica, que ocurren a la vez en un punto del sólido. Es apropiado para describir el comportamiento de geomateriales y metales en pequeñas deformaciones por lo que puede utilizarse para hormigón armado.

La ecuación constitutiva secante y la disipación se obtienen en forma estándar [1, 2, 3, 4], verificando el cumplimiento de la desigualdad de Clausius-Planck, para problemas térmicamente estables, adiabáticos e isentrópicos:

$$\sigma = m \frac{\partial \Psi(\varepsilon^e, \alpha, \beta)}{\partial \varepsilon^e} \quad (1)$$

En esta última ecuación, Ψ es la energía libre de Helmholtz, ε^e es la deformación elástica adoptada como variable libre del problema, σ es el tensor de tensiones de Cauchy, α es el grupo de variables internas plásticas, β es el grupo de variables internas no plásticas (degradación) y m es la densidad del material.

Para el caso particular que aquí se presenta, se escribe la energía libre como la suma de una parte correspondiente al fenómeno elástico más otra independiente, correspondiente al fenómeno plástico, utilizando el concepto de elasticidad desacoplada:

$$\Psi(\varepsilon^e, \alpha, \beta) = \frac{1}{2m} \varepsilon^e : C^s(\beta) : \varepsilon^e + \Psi^p(\alpha) \quad (2)$$

$$\Psi^e(\varepsilon^e, \beta)$$

donde ε^e es el tensor de deformaciones elástico. Sus relaciones con la deformación total y con su variación temporal vienen dadas por la clásica forma aditiva: $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$ y $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p$, respectivamente, $C^s \equiv C^s(\beta) = f(\beta)C^0$ es el tensor constitutivo secante, C^0 es la rigidez constitutiva inicial de un material no degradado y $f(\beta)$ es una función de transformación entre el espacio real degradado y el ficticio no degradado [5]. La expresión más simple para la función $f(\beta)$ coincide con la forma de degradación isotropa propuesta por Kachanov en 1958 [6] como $f(\beta) = (1-d)$.

Para el problema plástico se utilizan funciones de fluencia y potencial expresadas como funciones homogéneas de primer grado en tensiones (como las funciones de Tresca o de Von Mises para metales y de Mohr-Coulomb o Drucker-Prager para geomateriales):

$$F^S(\sigma, \alpha) = 0 \quad G^S(\sigma, \alpha) = 0 \quad (3)$$

La definición de la ley de evolución de las variables internas plásticas se obtiene a partir de una extensión conceptual de la definición de la regla de evolución de la deformación plástica [2, 7].

Para tener en cuenta el fenómeno de degradación de rigidez, se define una función límite escalar para activarlo [8, 9] en la siguiente forma:

$$G^D(\bar{\sigma}, \beta) = g(\bar{\sigma}) - g(\beta) = 0 \quad (4)$$

donde $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\sigma^o)$ es una función de tensión equivalente, $\sigma^o = C^o : \varepsilon$ es el predictor de tensiones no degradadas, $g(\cdot)$ es una función escalar positiva con derivada positiva a definir. En este caso particular $g(\bar{\sigma})$ define la función de degradación y $g(\beta)$ define el umbral de degradación.

La ley de evolución para las variables internas de degradación resulta de la condición de consistencia de degradación $dG^D = 0$. Más detalles pueden encontrarse en las referencias [8, 9, 10, 11, 12, 3, 4].

Sustituyendo la energía libre de la ecuación (3), en la ecuación (1), se deduce la siguiente ecuación constitutiva secante [2, 3]:

$$\sigma = f(\beta) C^o : \varepsilon^e \quad (5)$$

DAÑO LOCAL Y GLOBAL

La degradación de rigidez que sufre un punto material de un sólido sometido a acciones externas se mide a través de un índice de daño local. Puede observarse que dicho índice está relacionado con la disipación de energía para materiales que solamente sufren degradación de rigidez y se calcula mediante una normalización objetiva de la misma. En este trabajo, se utiliza una ampliación de este concepto a los efectos de establecer una medida escalar del deterioro [13, 14]. Se denomina índice de daño local a una medida normalizada y objetiva de la disipación total, producida por la plasticidad más la degradación de rigidez, que deriva de la ecuación (2). Esto es:

$$\delta D = m \left[\frac{r(\sigma)}{g_f^*} + \frac{(1-r(\sigma))}{g_c^*} \right] \delta \Xi_m = \frac{m}{g^*(\sigma)} \left(\frac{\sigma : \delta \varepsilon^p}{m} - \frac{\partial \Psi}{\partial \alpha} \cdot \delta \alpha \right) - \frac{m}{g^*(\sigma)} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \beta} \cdot \delta \beta \right) \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^3 \langle \sigma_i \rangle}{\sum_{i=1}^3 |\sigma_i|} \quad \langle \sigma_i \rangle = \frac{1}{2} [\sigma_i + |\sigma_i|] \quad (7)$$

donde g_f^* y g_c^* son las densidades de energía máxima que puede disipar un punto del sólido sometido a tracción y a compresión respectivamente, $\delta \Xi_m$ la disipación mecánica, δD es la variación del índice total de daño local que se descompone en una parte correspondiente al daño provocado por

la plasticidad δD^P y otra al daño provocado por la degradación de rigidez δD^r . Los σ_i son las tensiones principales.

El índice de daño global $0 \leq \bar{D} \leq 1$ resulta de hacer una extensión conceptual del problema del daño local, mediante una integración sobre toda la estructura de la disipación de energía local [13,14]:

$$\bar{D} = E_{dis} / E_{dis}^{max} \quad (8)$$

donde E_{dis} es la energía total disipada para un instante cualquiera del proceso en el dominio ocupado por el volumen dañado V^d

$$E_{dis} = \int_{V^d} \left[\int_0^{\Xi_m^{it}} \delta \Xi_m^{it} dV \right] = \int_{V^d} \Xi_m^{it} dV \quad (9)$$

$$0 \leq E_{dis}^{max} = \int_{V^d} \gamma(x) g^*(\sigma) dV \leq E_{dis}^{max} \quad (10)$$

E_{dis}^{max} es la máxima energía que puede disipar la estructura, para un determinado volumen de puntos dañados, donde E_{dis}^{max} es la energía que disiparía la estructura si todos sus puntos alcanzaran el daño máximo local. El índice de peligrosidad $0 \leq \gamma(x) \leq 1$ depende de la posición del punto y se define mediante un estudio no determinístico.

Sustituyendo E_{dis} y E_{dis}^{max} por sus valores, la ecuación (8) queda expresada como:

$$\bar{D} = \frac{E_{dis}}{E_{dis}^{max}} = \int_{V^d} d g^*(\sigma) dV / \int_{V^d} \alpha(x) g^*(\sigma) dV \quad (11)$$

Este índice mantiene el carácter objetivo que tiene el índice de daño local, variando entre cero y uno, según la estructura se encuentre en estado no dañado o totalmente dañado, respectivamente.

SIMULACION NUMERICA DE LA REPARACION

La reparación de estructuras dañadas es un tema mucho más complejo que el diseño y la construcción de edificios nuevos. Un factor importante para que toda esta operación se lleve a cabo en forma exitosa es contar con un diagnóstico adecuado de las causas del daño [15, 16]. En base a este diagnóstico se puede decidir el nivel de la intervención, esto es, si la estructura será reparada o reforzada.

En este punto se intenta predecir el comportamiento de estructuras de hormigón armado dañadas y luego reparadas utilizando el modelo de material descripto y al concepto de daño introducido. Ese estudio comprende básicamente dos puntos: en primer lugar, la evaluación de cuáles son las zonas de la estructura que deben ser reparadas y, en segundo lugar, la reparación de las mismas mediante una determinada técnica.

En la práctica, en la primera etapa intervienen no sólo el grado de daño del elemento considerado, sino también otros factores de índole económico y práctico. En cualquier caso, resulta un aporte importante contar con un indicador del grado de daño mecánico, que ayude a tomar decisiones sobre

la reparación. Por otro lado, es indispensable poder predecir el comportamiento de la estructura una vez reparada.

De acuerdo a lo expuesto, el índice de daño local puede ser tomado como un indicador del daño mecánico local y, por lo tanto, en base a él, se puede definir un criterio mecánico para reparación. Una forma de expresar dicho criterio es la siguiente:

$$\text{Si } D \geq D^{pic} \text{ es aconsejable reparar la zona}$$

donde D^{pic} es el daño correspondiente al pico de resistencia en un ensayo de compresión uniaxial o sea, el daño a partir del cual comienza el ablandamiento.

En la práctica, cuando la estructura se analiza mediante un programa de elementos finitos, el índice de daño se calcula en cada uno de los puntos de integración definidos y puede tomarse como representativo de lo que ocurre en la zona de influencia de cada punto.

Cuando se analizan técnicas de reparación alternativas, lo ideal es lograr que, en aquellas zonas donde se repara la estructura, el material se comporte como nuevo. Esto, que en la práctica es bastante difícil de alcanzar, numéricamente resulta relativamente simple de simular. El material reparado recupera la resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía. Esto se puede simular haciendo nulo el daño local, o sea llevando a 0 las variables de endurecimiento plástico y de daño, que son formas normalizadas de la energía disipada por deformaciones plásticas y por daño respectivamente [4].

Si se analiza en detalle, este concepto es equivalente a un reemplazo de material dañado por material virgen. Por otro lado, esta forma de reparación puede simular aproximadamente las técnicas basadas en el sellado de fisuras. En realidad, en esos casos se incorpora un material distinto que, además, debido a su disposición, introduce cierto grado de anisotropía en el comportamiento mecánico. Sin embargo, teniendo en cuenta que la principal fuente de daño y de anisotropía en materiales del tipo del hormigón es la fisuración, el sellado de esas fisuras tiende a reducir el daño y la anisotropía.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

En lo que sigue se analizan ejemplos simple en los que se muestran cuáles son los efectos de la simulación numérica de la reparación en estructuras de hormigón armado.

Columna de Hormigón Armado Sometida a Tracción

En este ejemplo se analiza el comportamiento a tracción de la columna de hormigón armado de la Fig. 1. La misma se discretiza con un único elemento de tensión plana para el hormigón y 2 elementos de barras biarticuladas para la armadura. El hormigón se simula mediante un modelo elastoplástico dañado [4] y el acero mediante un modelo elasto-perfectamente plástico.

En la Fig. 1 se observa la curva de respuesta fuerza-desplazamiento de la columna. La primera no linealidad corresponde a la fisuración del hormigón y la segunda a la fluencia del acero.

En la Fig. 1 se presentan además las curvas de carga, reparación y recarga, para dos niveles de carga: uno antes de que la armadura alcance la fluencia y el otro después que se alcanza la fluencia de la armadura. Como se trata de un estado de tensión y deformación uniforme, el daño también está distribuido en forma uniforme y se repara todo el hormigón. En ambos casos, se logra una pequeña sobrerresistencia respecto de la misma estructura sin reparar y la recuperación de la rigidez inicial del elemento. Aparece también una acomodación de deformaciones y tensiones residuales debido al

cambio brusco en la rigidez del material durante la reparación. Como se recupera la capacidad de disipación de energía del material, se recupera también la ductilidad del elemento.

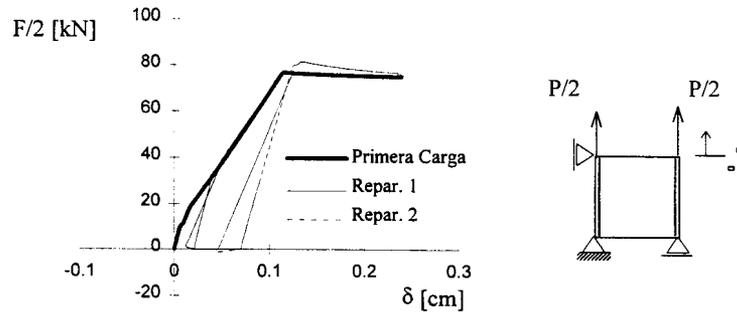


Fig.1 Columna de hormigón armado sometida a tracción

Viga de Hormigón Armado Sometida a Flexión

En este ejemplo se analiza el comportamiento a flexión de la viga de hormigón armado de la Fig.2. Para el hormigón se utilizan elementos de tensión plana isoparamétricos de 4 nodos y para la armadura elementos de barras biarticuladas de 2 nodos. La malla de elementos finitos puede verse en la Fig.2. El hormigón y el acero se simulan mediante modelos elastoplásticos.

En la Fig.2 se han representado las curvas fuerza-desplazamiento vertical del centro de la viga. Durante la aplicación de la carga se pueden notar dos fuertes no linealidades en la respuesta. La primera corresponde a la fisuración del hormigón por tracción en la parte central inferior de la viga y la segunda corresponde a la entrada en fluencia de la armadura longitudinal. Se presentan las curvas de carga-descarga-recarga para el caso de la estructura dañada y de la estructura reparada, en dos situaciones: antes y después de la fluencia de la armadura longitudinal. Como se utiliza un modelo elastoplástico para el hormigón, el daño no implica degradación de rigidez. Debido a ello, en la recarga de la estructura dañada tiene la misma rigidez que la estructura reparada. En este caso la reparación implica recuperación de resistencia y ductilidad obteniéndose una sobrerresistencia sobre la disponible al momento de la descarga.

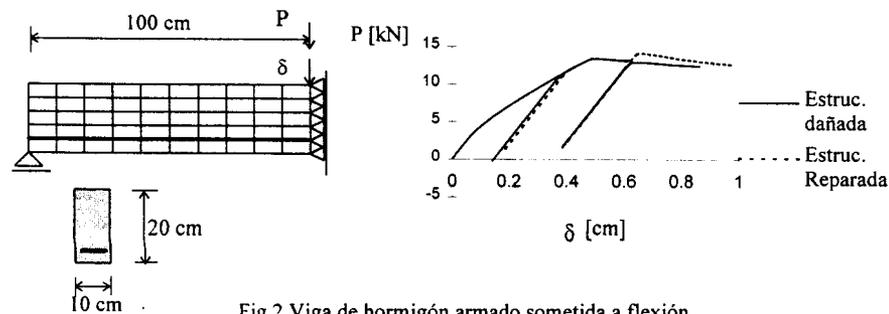


Fig.2 Viga de hormigón armado sometida a flexión

COMPARACION CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este punto se presenta la aplicación de los modelos y criterios desarrollados en puntos anteriores a la simulación del comportamiento de dos vigas de hormigón armado ensayadas siguiendo dos caminos de carga distintos, reparadas y luego reensayadas.

Las vigas analizadas son vigas simplemente apoyadas con voladizos como las presentadas en Fig.3 [18]. Las dimensiones y armaduras se presentan en la misma figura. Las propiedades mecánicas de los materiales se han resumido en la Tabla 1.

Se estudian dos tipos de carga ambos correspondientes a una carga P_1 actuando en el centro de la luz y una carga P_2 actuante a 10cm del extremo del voladizo. El tipo de carga I es monotónica y tal que P_1/P_2 permanece constante e igual a 3 durante los ensayos, mientras que en el tipo de carga II, se aplica primero la carga P_1 que se incrementa hasta alcanzar 70kN, valor que se mantiene constante durante la segunda etapa en la que se incrementa P_2 monotónicamente. Ambos especímenes son ensayados hasta alcanzar la máxima carga y luego descargados de manera de evitar el colapso de los mismos producido por la falla de la zona de compresión. Los especímenes dañados son reparados sellando las principales fisuras flexionales e inclinadas con resina epoxy. Luego las vigas son reensayadas, bajo las mismas configuraciones de carga, incrementando monotónicamente las mismas hasta el colapso.

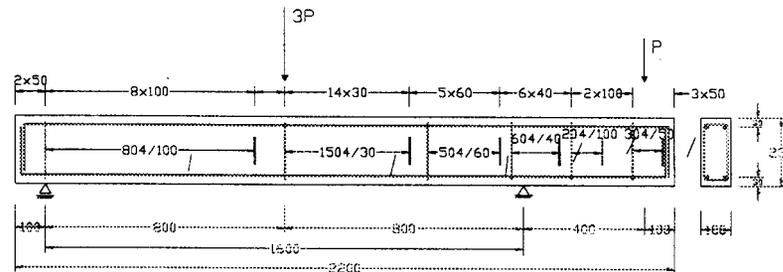


Fig. 3 Dimensiones en mm y armaduras de las vigas de hormigón armado.

Tabla 1. Propiedades Mecánicas de los Materiales

Hormigón	Armadura Longitudinal	Armadura Transversal
Mód. Elástico: 20000 MPa Coeficiente de Poisson: 0.2 Tensión de Fluencia: 19 MPa Tensión de Rotura: 21 MPa Crit. fluen.: Lubliner-Oller [2] Flujo asociado	Mod. Elástico: 210000 MPa Coeficiente de Poisson: 0.3 Tensión de Fluencia: 600 MPa Tensión de Rotura: 870 MPa Crit. Fluen.: Von Mises Flujo asociado	Mod. Elástico: 210000 MPa Coeficiente de Poisson: 0.3 Tensión de Fluencia: 240 MPa Tensión de Rotura: 390 MPa Crit. Fluen.: Von Mises Flujo asociado

El análisis de las vigas se lleva a cabo mediante un programa de elementos finitos utilizando los modelos y criterios antes descriptos. En la Fig. 6 puede verse la malla de elementos finitos utilizada. Para el hormigón se emplean elementos isoparamétricos planos de 8 nodos y 3x3 puntos de integración, mientras que para la armadura longitudinal y transversal se emplean elementos de barras biarticuladas. El hormigón se simula como un material elastoplástico-dañado con endurecimiento y el acero como un material elasto-perfectamente plástico, ambos materiales con las propiedades mecánicas indicadas en la Tabla 1.

En las Figs. 4 y 5 se muestran las curvas carga-desplazamiento numéricas y experimentales para ambos tipos de carga. En los dos casos de carga hay una muy buena aproximación entre resultados numéricos y experimentales en el centro de la luz, no así en el voladizo.

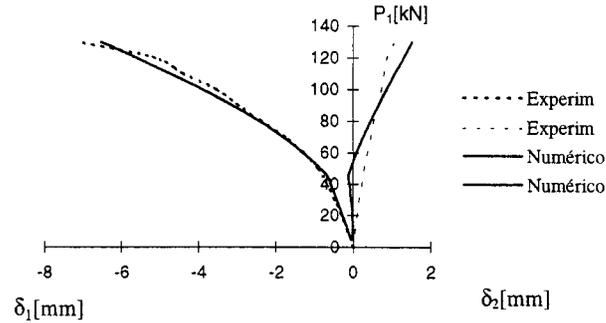


Fig.4 Curvas Carga-Desplazamiento. Tipo de Carga I (Primera carga)

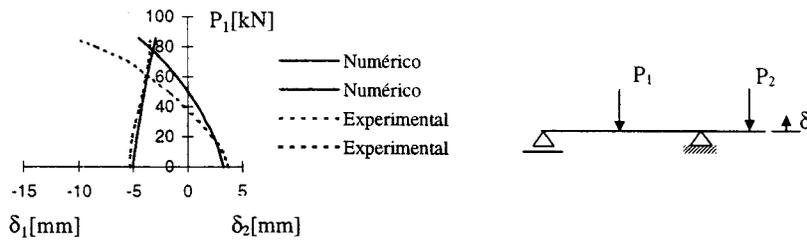


Fig.5 Curvas Carga-Desplazamiento. Tipo de Carga II (Primera carga)

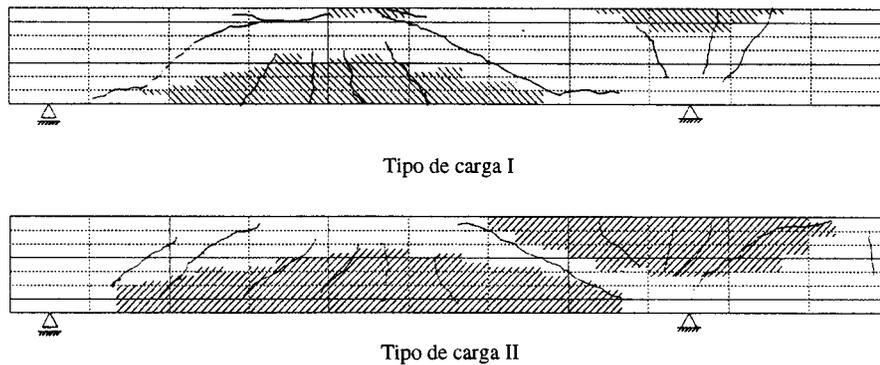


Fig.6 Cuadros de fisuración y zonas de daño

En las Figs. 6 se muestran los cuadros de fisuración obtenidos en los ensayos superpuestos con un monitoreo de los índice de daño que indica las zonas en las que este índice excede el valor tomado como

criterio límite para la reparación (0,3). Puede observarse que hay correlación entre este índice y las fisuras obtenidas en los ensayos, lo cuál indica que el índice de daño local es una medida apropiada del daño local y puede ser tomada, en este caso, como criterio para reparar.

En las Figs. 7 y 8 se comparan las curvas carga-desplazamiento numéricas y experimentales en las vigas reparadas y reensayadas. Puede verse una buena aproximación en ambos resultados lo cual da idea de que el procedimiento utilizado para simular la reparación reproduce aproximadamente el proceso de reparación aún cuando no tiene en cuenta el nuevo material ni la anisotropía introducida.

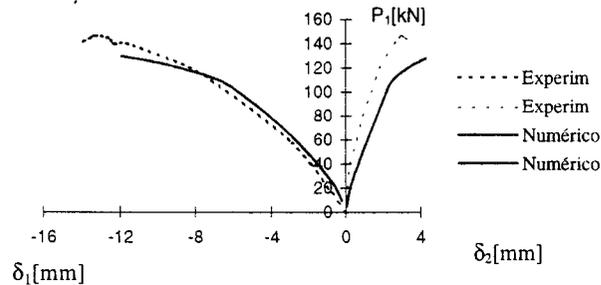


Fig.7 Curvas Carga-Desplazamiento. Tipo de Carga I (Recarga)

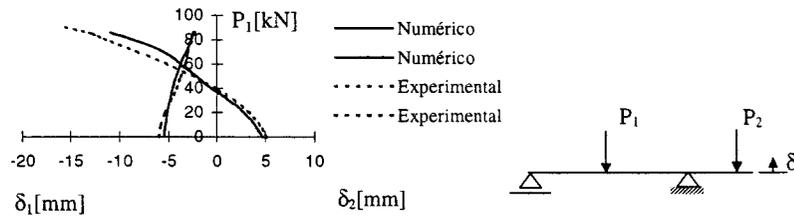


Fig.8 Curvas Carga-Desplazamiento. Tipo de Carga II (Recarga)

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado una forma objetiva, basada en la mecánica de los sólidos, de formular el daño (deterioro de las propiedades mecánicas iniciales del material) en una estructura. En particular, se ha considerado el daño producido por la plasticidad y la degradación de rigidez, que juntas pueden simular el concepto de fractura difusa. El índice de daño local definido puede ser utilizado como un criterio mecánico para la reparación.

En el trabajo se propone además una forma simplificada de simular la reparación de estructuras. La misma da lugar a la recuperación de la resistencia, rigidez y ductilidad del material dañado. En base a ella, se puede predecir el comportamiento bajo carga de una estructura reparada. Los ejemplos desarrollados demuestran que el criterio utilizado para la reparación y el método utilizado para simularla son adecuados para modelar, en forma aproximada, reparaciones que involucren reemplazos de material o sellado de fisuras

REFERENCIAS

- [1] Lubliner, J., *On thermodynamics foundations of non-linear solid mechanics*. Int. Journal non-linear Mechanics, No.7, 1972, págs. 237-254.
- [2] Oller, S., *Nuevos Materiales Estructurales Cerámicos en Ingeniería*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España, 1989.
- [3] Luccioni, B., *Formulación de un modelo constitutivo para materiales ortótropos*, PhD. tesis - Universidad de Tucumán Argentina, 1993.
- [4] Luccioni B., Oller S., Danesi R., *Coupled Plastic-Damaged Model*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 129, 1996, págs. 81-89.
- [5] Oller, S., Oliver, J., Cervera, M., Oñate, E., *Simulación de Procesos de Localización en Mecánica de Sólidos, Mediante un Modelo Plástico*. I Congreso Español de Métodos Numéricos.-- pp. 423-431-- Gran Canaria, España, 1990.
- [6] Kachanov, L., *Time of the rupture process under creep conditions*, Otd. Tech. Nauk. No. 8, 1958, págs. 26-31.
- [7] Oller, S., *Un modelo de daño continuo para materiales friccionales*, PhD. tesis - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, España, 1988.
- [8] Simo, J., Du, J., *Strain and Stress - Based Continuum damage Models I. Formulation*, Int. J. Solids Structures, Vol.23, No.7, 1987, págs. 821-840.
- [9] Oliver, J., Cervera, M., Oller, S. and Lubliner, J., *Isotropic damage models and smeared crack analysis of concrete*, SCI-C 1990, Second Int. Conf. on Computer Aided Design of Concrete Structure, Zell am See, Austria, 1990, págs. 945-957.
- [10] Barbat, A., Hanganu, A., Oller, S. and Oñate, E., *Rigorous damping matrix for finite element models with viscous behaviour*, Computing Nr. 5 August 1993 -- Rev. Soc. de Ing. Asist. de Calculator
- [11] Barbat, A., Hanganu, A., Oñate, E. and Oller, S., *Evaluation of the damage degree in buildings structures subjected to earthquakes*, Revue Roumaine des Sciences Techniques, Méc. Appl., Tome 39, Nr. 1, 1994, págs.. 23-36 Bucharest.
- [12] Hanganu, A., Oller, S., Oñate, E. y Barbat, A., *Evaluación del daño sísmico en modelos 3D de edificios de hormigón armado*, 2do. Congreso español de Métodos Numéricos en Ingeniería. La Coruña, España, 1993.
- [13] Oller, S., Luccioni, B., Barbat, A., *Un Método de Evaluación del Daño Sísmico en Estructuras de Hormigón Armado*, Revista Internacional de Métodos Numéricos para Diseño y Cálculo en Ingeniería, Vol.12, no.2, 1996, págs. 215-238.
- [14] Luccioni, B., Oller, S., *Evaluación del Daño Sísmico en Pórticos de Hormigón Armado*. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, Vol. 1, No.1, 1996, págs.1-16.
- [15] Penelis, G. G. and Kappos, A. J., *Earthquake-Resistant Concrete Structures*, E & Fn Spon, Imprint of Chapman & Hall. Great Britain, 1997, 572 págs.
- [16] Cook, G. K. and Hinks, A.J., *Appraising Building Defects*. Logman Scientific & Technical. Hong Kong. 1992, 488 págs.
- [17] Zavlariis, K., *Repairs in R.C. Structures. General Report*, Proceed. of the 11th Hellenic Conf. on Concrete, Techn. Chamber of Greece, Corfu (in Greek), 1994.
- [18] Kotsivos, M. et al, *Structural Concrete design: An Appraisal of Safety*. 11th Greek Concrete Conference, Corfu, 1994, págs. 18-20 (English Version).