

EVOLUCIÓN DE LA ADHERENCIA DE BARRAS DE ACERO CORROIDAS DENTRO DEL HORMIGÓN

Marianela Ripani^a, Sandra I. Robles, Néstor F. Ortega

*Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253,
8000 Bahía Blanca, Argentina, nfortega@criba.edu.ar*

^aBecaria CONICET

Palabras Clave: Hormigón Armado, corrosión, adherencia.

Resumen. Una de las causas de situaciones patológicas más importantes, en estructuras de hormigón armado, es la corrosión de sus armaduras metálicas, la cual se origina por distintos motivos, carbonatación del hormigón y/o ataque a las armaduras de acero por cloruros. Los efectos que produce ésta corrosión son: pérdida de sección de las armaduras, fragilización del acero por presencia de hidrógeno, fisuración del hormigón y pérdida de cohesión entre el hormigón y el acero. Con relación a este último efecto, el mismo se pone de manifiesto por la progresiva pérdida de la tensión de adherencia en la interfase entre estos dos materiales.

En este trabajo se realiza la modelación numérica del fenómeno de adherencia entre el hormigón y el acero, utilizando el Método de los Elementos Finitos. El modelo numérico se basa en un modelo material no lineal, donde se representaron diferentes calidades de hormigón, utilizando distintas curvas Tensión-Deformación, en función de las propiedades mecánicas de cada calidad de hormigón, empleando las recomendaciones del Código Modelo CEB-FIP 90.

El modelo consiste de un bloque de hormigón, en el cual se ha embebido una barra de acero, modelada con corrugas, ubicada longitudinalmente, en el centro del lado menor de la sección. En el extremo libre de la barra, es decir, el que emerge de la masa del hormigón, fue aplicada una carga axial, que tiende a deslizarla hacia el exterior de la probeta (Ensayo tipo Pull-Out). Para representar los efectos de la corrosión sobre el hormigón, se modeló, una sección transversal en forma de anillo, que define la interfase entre el acero y la masa de hormigón sano. Para simular el efecto de la corrosión en el modelo, se ha variado el Módulo de Elasticidad del hormigón situado en éste anillo, determinándose un Módulo de Elasticidad Equivalente, hasta obtener la falla del modelo.

El ajuste de este modelo numérico se realizó en función de las tensiones de adherencia últimas, obtenidas experimentalmente, por otros autores.

Se determinó que la evolución de la pérdida de radio, respecto del Módulo de Elasticidad Equivalente posee una variación del tipo exponencial, donde se individualizan distintos tipos de comportamientos, que representa la disminución de la tensión de adherencia, provocando la merma de la capacidad resistente de la estructura de hormigón armado afectada.

1 INTRODUCCIÓN

Desde hace tiempo, el Hormigón Armado es el material más difundido en la industria de la construcción, sobre todo con fines estructurales. Este material, al igual que otros, posee una determinada vida útil. El deterioro, por corrosión de sus armaduras, representa una de las principales causas de daño en las estructuras civiles, tales como puentes, carreteras, muelles, etc. Esto implica una disminución significativa de las características funcionales de la estructura de hormigón, a raíz de la pérdida de la adherencia entre el acero y el hormigón, de la disminución de la sección de las barras de acero, de la fisuración del recubrimiento de hormigón y de la fragilización de las armaduras por el hidrógeno que se desprende durante la corrosión.

En la medida que el deterioro avanza, puede devenir el colapso de la estructura; sin embargo una adecuada actuación sobre el fenómeno puede dar lugar al reciclado de la misma. Las primeras observaciones de corrosión, en barras de acero embebidas en hormigón, fueron hechas a principios del Siglo XX, en ambientes marinos y plantas químicas, pero recién a mediados del mismo siglo se puso énfasis en el estudio sistemático de la problemática. Las investigaciones sobre durabilidad estructural son de gran interés en todo el mundo, en especial en los países desarrollados, donde son crecientes las cifras que se invierten en el mantenimiento y el reciclado de distintos tipos de obras, expuestas a diferentes ambientes agresivos, tal es así, que la Administración Federal de Autopistas a fines de la década pasada, tenía en proceso de reparación más de 1000 puentes en todo el territorio de USA.

Específicamente, en el tema de la corrosión de armaduras en las estructuras de hormigón armado, se puede decir que el óxido generado por la corrosión posee mayor volumen que el hierro originario, esto se traduce principalmente en, una expansión, que produce la fisuración del recubrimiento de hormigón, en sentido paralelo a las armaduras afectadas, llegando hasta la eventual pérdida del mismo (Andrade et al., 1993). Como consecuencia de este proceso, se reduce la vida útil de las estructuras, las cuales experimentan una disminución de su capacidad portante (Rodríguez et al., 1996) debida, principalmente, a la merma de la sección de las armaduras, y la pérdida de adherencia entre el hormigón y el acero, influenciadas directamente por la velocidad de corrosión (Rodríguez et al., 1998).

Existen modelos que aproximan la variación de los anchos de fisura, en función de las principales variables del proceso; relación agua/cemento, relación recubrimiento/diámetro, variación de la sección de acero, etc. (Alonso et al., 1998, Schierloh et al., 2001). Varios autores han analizado el efecto de la velocidad de corrosión, definiéndola como un factor clave para controlar la evolución de la fisuración (Vidal et al., 2004), y para predecir la seguridad y la vida residual de las estructuras afectadas (Du et al., 2006). También se han desarrollado modelos para representar los efectos de la corrosión sobre la interfase acero-hormigón a través de ensayos experimentales tipo Pull-Out y modelaciones numéricas en base al Método de los Elementos Finitos (Lee et al., 2002; Fang et al., 2006).

En los últimos años se desarrollaron modelos numéricos no lineales, para el estudio de la reducción de la tensión de adherencia entre hormigones con sus armaduras corroídas, considerando: fisuración del recubrimiento, reducción de la sección de acero, etc. (Berto et al., 2007).

En este trabajo se presenta un estudio numérico del deterioro de las estructuras de Hormigón Armado, en función de la pérdida de adherencia acero-hormigón, en barras de acero afectadas por la corrosión. Los análisis se realizaron a través de un software de Elementos Finitos (Algor V20, 2007), en base a un modelo material no lineal de Von Mises, aplicado a diferentes calidades de hormigón modelando las corrugas de las barras, con el objeto de considerar su colaboración en la adherencia ajustándose el modelo propuesto con determinaciones experimentales.

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO ESTUDIADO

En este trabajo se ensayó un bloque de hormigón de sección transversal rectangular, en el cual se embebió, longitudinalmente, una barra de acero. En el extremo libre de la barra, es decir, el que emerge de la masa del hormigón, se aplicó una carga axial (P) que tiende a deslizarla hacia el exterior de la probeta. La configuración descrita corresponde a un ensayo experimental tipo Pull-Out (Almusallam et al., 1996; Cairns et al., 2007; Soylev and Francois, 2003), con uno de los ensayos más difundidos, y se muestra en la Figura 1.

Para representar los efectos de la corrosión se dividió el modelo en tres partes bien definidas; la primera corresponde al acero que constituye la barra; la segunda, representa al bloque de hormigón que no ha sido alcanzado por los efectos de la corrosión y; la tercera, define la zona de hormigón afectada directamente por la corrosión (que se encuentra fisurada), cuya configuración geométrica presenta una sección transversal en forma de anillo, que define la interfase entre el acero y la masa de hormigón sano (García et al., 1998; Rodríguez et al., 1998). Las partes componentes del modelo se especifican en la Figura 1.

La barra de acero se modeló con corrugas superficiales, según la geometría descrita en Leonhardt (1987), de esta manera se simularon en la forma más simple y fidedigna posible, las barras de uso comercial en nuestro país, con el objetivo de incluir en el modelo, la colaboración a la resistencia al deslizamiento que las corrugas proporcionan.

El valor numérico de la carga (P) aplicada en el extremo libre de la barra, se obtuvo de Almusallam et al. (1996), a partir del gráfico “Relación entre el esfuerzo de adherencia último y diferentes grados de corrosión”, el cual presenta datos obtenidos experimentalmente de un Ensayo Pull-Out para un hormigón tipo H-30, los cuales sirvieron de apoyo para el desarrollo del presente modelo numérico.

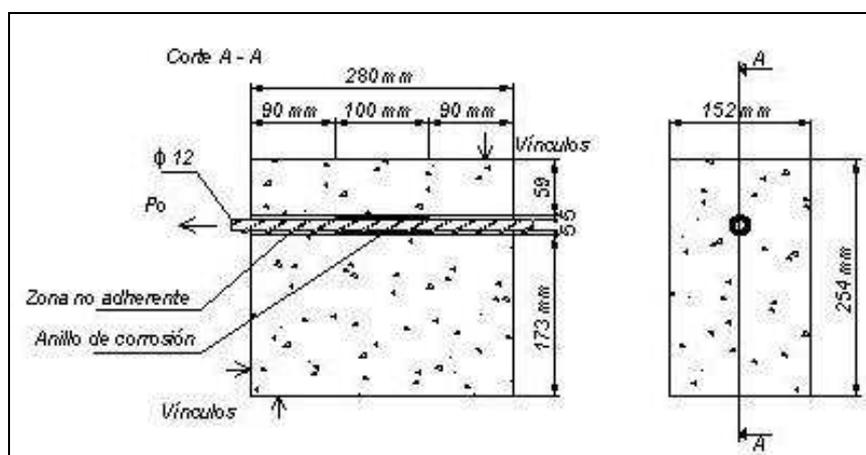


Figura 1. Geometría del modelo.

Para simular la probeta usada en (Almusallam et al., 1996), con el Software Algor V20 (2007), se utilizaron elementos Bricks y Tetraédricos generados a partir de un mallado volumétrico, las condiciones de vínculo adoptadas representan los soportes de la máquina de ensayo. Lo descrito anteriormente se grafica en las Figuras 2 y 3.

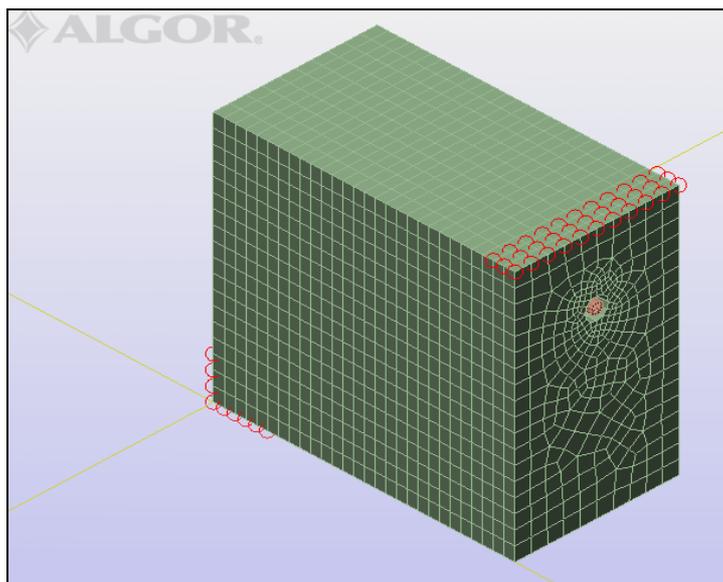


Figura 2. Modelo computacional.

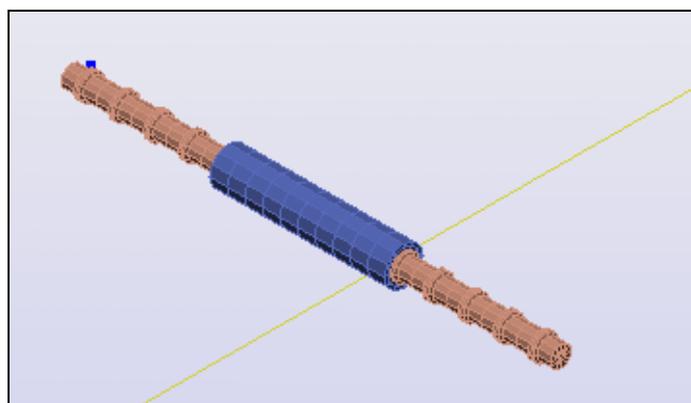


Figura 3. Barra de acero y anillo de corrosión, alojados dentro del bloque de hormigón.

3 MATERIALES CONSTITUTIVOS

Para la realización de este trabajo, basado en el Método de los Elementos Finitos, se utilizó el software Algor V20 (2007). Los modelos materiales utilizados para hormigón y acero, se detallan a continuación.

3.1 Acero

Para el acero se escogió un material elástico de la librería de materiales del software (Algor V20, 2007), cuyas características se describen en la Tabla 1.

Densidad de masa [kg/m ³]	7855
Módulo elástico [N/m ²]	2.00 E+11
Coefficiente de Poisson	0.28
Módulo elástico a cortante [N/m ²]	7.72 E+10

Tabla 1. Características del Acero.

3.2 Hormigón Sano

3.2.1 Zona de Compresión

La modelización numérica se basa en un modelo material no lineal de Von Mises, y para representar las diferentes calidades de hormigón, no especificadas en la librería del software, se introdujo una curva Tensión - Deformación para cada tipo de hormigón modelado, teniendo en cuenta las definiciones detalladas a continuación (Código Modelo CEB-FIP, 1990; EHE, 1998):

$\varepsilon_L = 0.12 \varepsilon_{m\acute{a}x}$. = deformación unitaria en el límite elástico

$\varepsilon_{m\acute{a}x} = 0.0022$ = máxima deformación unitaria (correspondiente a σ_{max})

E_{ci} = módulo tangente en el origen de la curva (según calidad de hormigón)

E_{c1} = módulo secante desde el origen hasta σ_{max} (según calidad de hormigón)

σ_{max} = tensión característica del hormigón considerado

σ_L = tensión correspondiente al límite elástico, según la ecuación 3.2.1

$E = \sigma_L/\varepsilon_L$ = Módulo secante desde el origen hasta σ_L

Lo expuesto anteriormente se muestra en la Figura 4.

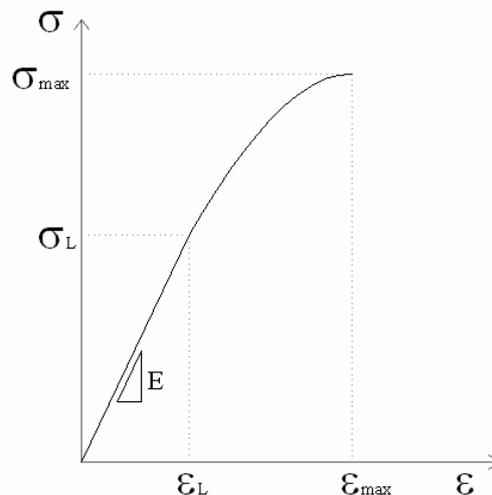


Figura 4. Curva Tensión-Deformación Uniaxial Equivalente.

En la Tabla 2 se presentan los valores obtenidos a partir de las expresiones anteriormente presentadas, para simular el hormigón de calidad H-30, utilizado para el ensayo experimental en la referencia Almusallam et al. (1996).

ε_L	0.00088
ε_{max}	0.0022
E_{ci} [MPa]	33500
E_{c1} [MPa]	17500
σ_{max} [MPa]	30
σ_L [MPa]	18.82
$E = \sigma_L/\varepsilon_L$ [MPa]	21382.46

Tabla 2. Características del hormigón H-30.

A continuación se definen las expresiones matemáticas adoptadas para las distintas zonas de la Curva Tensión-Deformación Uniaxial Equivalente del hormigón.

3.2.1.1 Zona Elástica

Se considera que el hormigón bajo la acción de cargas, se comporta de manera elástica lineal hasta que la deformación unitaria ε es igual a ε_L , es decir, para ε variando entre 0 y ε_L , según la siguiente ecuación:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (1)$$

3.2.1.1 Zona Plástica

Cuando las deformaciones en el hormigón, superan la deformación unitaria elástica máxima, es decir, para ε mayores a ε_L , la curva Tensión – Deformación Uniaxial Equivalente se define a través de la entrada de una serie de puntos que responden a la ecuación (2), válida mientras $\sigma \leq \sigma_{\max}$ (Código Modelo CEB-FIP, 1990).

$$\sigma = \left[\frac{\frac{E_{ci}}{E_{c1}} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \right)^2}{1 + \left(\frac{E_{ci}}{E_{c1}} - 2 \right) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}} \right] \sigma_{\max} \quad (2)$$

3.2.2 Zona de Tracción

El modelo material de Von Mises, asume un comportamiento similar tanto en compresión como en tracción. Para definir el hormigón se introdujo en el Software la curva correspondiente a la zona de compresión (Figura 4), quedando definida por defecto una curva similar para la zona de tracción. Se adoptó un modelo material tipo Von Mises debido a que es de implementación computacional simple, no obstante, dicho modelo constitutivo no representa exactamente al hormigón en tracción. Para simular el comportamiento del hormigón a tracción, Hassan Dirar and Morley, 2005 y Teguh et al., 2005, introducen en la programación del modelo, la restricción de la tensión límite de tracción logrando representar el comportamiento del hormigón, con una adecuada precisión que ha sido verificada con valores obtenidos experimentalmente, en elementos estructurales de hormigón armado, sometidos a flexión y sujetos a cargas estáticas (con errores menores al 5 %, en la predicción de la carga última), y con otros modelos computacionales de fisuración basados en las deformaciones totales (Hassan Dirar and Morley, 2005). Además, este tipo de modelo constitutivo también se ha empleado en la resolución de pilotes sometidos a cargas sísmicas (Teguh et al., 2005). En nuestro modelo, debido a que se utiliza un paquete comercial, se consideró que los elementos que presentan valores de tensión de tracción (σ_t) mayores a la tensión máxima de tracción adoptada ($\sigma_{t \max}$), se encuentran fisurados. El valor de la tensión $\sigma_{t \max}$ se considera igual a un 10 % de σ_{\max} , según la ecuación (3), que es una relación de uso habitual en los análisis de las estructuras de hormigón.

$$\sigma_{t \max} = 0.10 \sigma_{\max} \quad (3)$$

Es interesante comentar que cuando el hormigón del recubrimiento se fisura, se pierde la mayoría del confinamiento que tenían las armaduras y con un espesor de fisuras de 0,05 mm (ancho de fisura mínimo que se puede apreciar a simple vista), la pérdida de la tensión de adherencia es del 75 % (Almusallan et al., 1996).

3.3 Hormigón afectado por la corrosión

Para representar la fisuración del hormigón, que depende del avance de la corrosión y de los esfuerzos externos a que esta sometida la barra, se modeló un anillo de hormigón rodeando a la barra de acero. Las propiedades asignadas a este anillo, corresponden a un hormigón de menor calidad que el resto del hormigón no afectado por el fenómeno corrosivo. De esta forma se modela el efecto mecánico que genera la fisuración del hormigón que rodea a la barra (deslizamiento de la barra), independientemente de la morfología de las fisuras. Para ello, se define un coeficiente η que relaciona a la tensión correspondiente al límite elástico del hormigón sano (σ_L), con la Tensión Límite Elástico del hormigón afectado (σ_{LC}), siendo:

$$\frac{\sigma_{LC}}{\sigma_L} = \eta \quad (4)$$

con $\eta < 1$.

Para cada grado de corrosión, los correspondientes valores de η , se presentan en la Tabla 3.

Grado de corrosión ($\Delta r/r$)	η
0.024	1.00
0.025	0.65
0.029	0.40
0.036	0.17
0.062	0.12
0.082	0.11
0.108	0.10

Tabla 3. Relación entre el grado de corrosión y el coeficiente que vincula la tensión en el límite elástico del hormigón sano, respecto del afectado por corrosión.

En la Figura 5 se muestran las curvas para hormigón sano y el afectado por la corrosión, y la relación entre ambas.

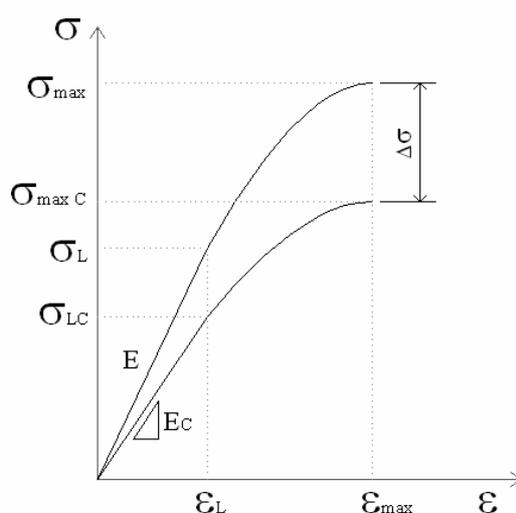


Figura 5. Curva Tensión-Deformación Uniaxial Equivalente para hormigón corroído.

A partir de η se determinan las tensiones σ_c para cualquier punto del hormigón afectado por corrosión, en base a la curva del hormigón sano. Lo expresado se ejemplifica en la ecuación (5), para una deformación unitaria ε_i dada, tal que:

$$\sigma_c(\varepsilon_i) = \eta \sigma(\varepsilon_i) \quad (5)$$

Cabe destacar que ε_L y ε_{\max} tienen el mismo valor numérico para el hormigón sano y el afectado por la corrosión. El Módulo Elástico del hormigón afectado, denominado Módulo de Elasticidad Equivalente (E_{equiv}), surge de la ecuación (6):

$$E_{\text{equiv}} = \frac{\sigma_{Lc}}{\varepsilon_L} \quad (6)$$

4 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

4.1 Análisis de la probeta sana

En primera instancia, se evaluó el comportamiento del modelo sano, es decir; sin influencia del proceso corrosivo, lo cual se representó colocando la misma curva Tensión – Deformación del hormigón en el bloque y en el anillo que rodea a la barra de acero, utilizando además, la carga máxima (P_0) que soportó el modelo sano, especificada en Almusallan et al., (1996), para dicha condición.

A partir de los datos mencionados anteriormente se determinó en el modelo computacional, el desplazamiento obtenido bajo la aplicación de la carga (P), en el punto A de la barra de acero, según lo muestra la Figura 6. Dicho desplazamiento se tomó como patrón de falla para el análisis de las probetas afectadas por la corrosión, entendiendo que en tal situación la barra desliza debido a que ya no posee adherencia. Este desplazamiento fue de 0.18 mm.

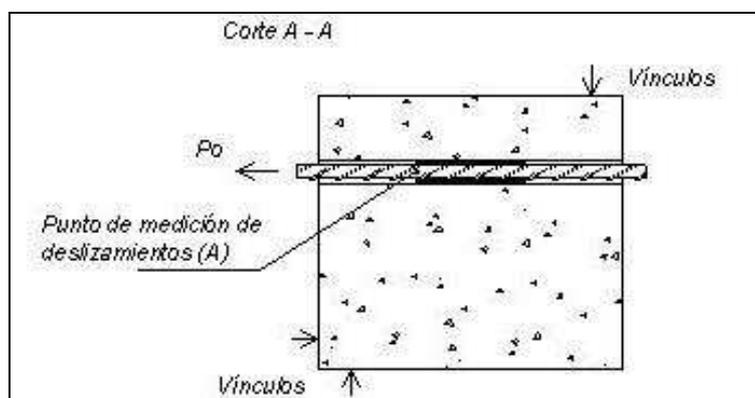


Figura 6. Zona de medición de los desplazamientos en la barra.

4.2 Determinación de la Carga Máxima admitida para un cierto nivel de corrosión

Para determinar la carga ($P_{\Delta r}$) que soporta el modelo, para una calidad de hormigón específica y una pérdida de radio (Δr), provocada por el nivel de corrosión impuesto en el análisis, se utilizaron como punto de partida los siguientes datos: Relación de Cargas ($P_{\Delta r}/P_0$) en función de la Pérdida en peso de la Barra, extraídos de Almusallan et al. (1996), cabe destacar que en el presente trabajo los datos de pérdida en peso se convirtieron en pérdida de sección de la barra, para realizar la Figura 7.

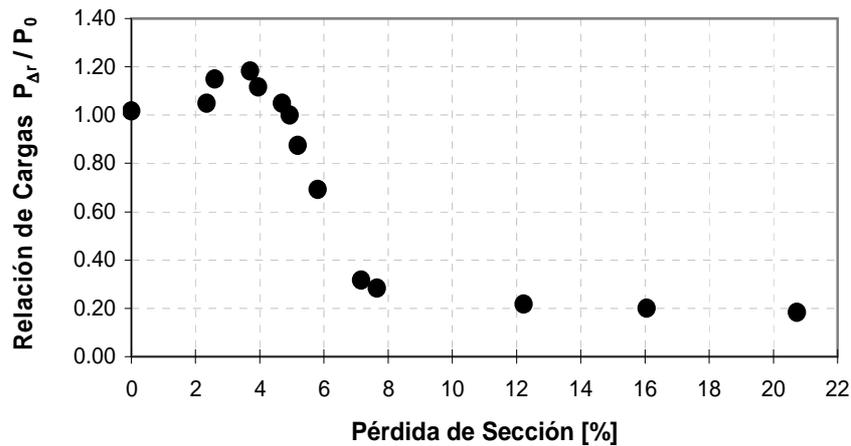


Figura 7. Relación de Cargas $P_{\Delta r} / P_0$ - Pérdida de Sección.

Para este trabajo numérico, se cambiaron los datos de entrada de la Figura 7, es decir, el porcentaje de pérdida de sección por su equivalente en pérdida de radio (profundidad del ataque de la corrosión). Como resultado, se obtuvieron los puntos: Relación de Cargas ($P_{\Delta r} / P_0$) en función de la Pérdida de Radio (Δr), presentados en la Figura 8.

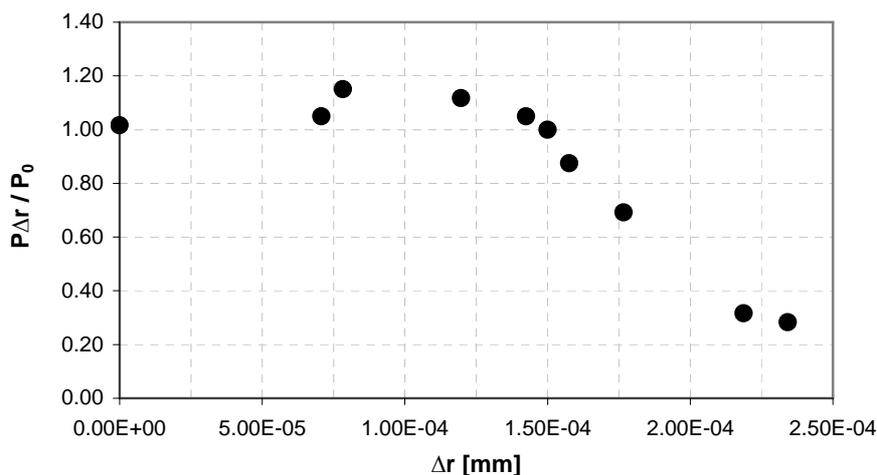


Figura 8. Curva: Relación de Cargas ($P_{\Delta r} / P_0$) - Pérdida de Radio (Δr).

A partir del gráfico de la Figura 8 y en base a una pérdida de radio (Δr), impuesta por el grado de corrosión que se está analizando, se obtiene la Relación de Cargas ($P_{\Delta r} / P_0$). Como la probeta ensayada está conformada por una calidad de hormigón sano conocida, también se sabe, por lo expuesto en el apartado 4.1, que soporta una carga máxima P_0 , por lo tanto es posible determinar la carga $P_{\Delta r}$ que soportará el modelo corroído.

4.3 Determinación del Módulo de Elasticidad Equivalente para cada nivel de corrosión

Para simular el efecto de la corrosión, en el modelo computacional se varió el Módulo de Elasticidad del hormigón situado en el anillo, hasta obtener la falla de la probeta; según el apartado 4.1., con la medición del desplazamiento en el punto A (Figura 6), para una carga aplicada igual a $P_{\Delta r}$. De esta manera, se determinó el Módulo de Elasticidad Equivalente

(E_{equiv}) y el par Δr - E_{equiv} , es decir, para ciertos valores preestablecidos de Δr se determinaron los E_{equiv} correspondientes, por lo tanto para cada calidad de hormigón dada, se obtiene la curva Δr - E_{equiv} .

Para independizar dicha curva del tipo de hormigón analizado, se adimensionalizaron los parámetros de entrada a la misma, a través de la relación E_{equiv}/E_0 y de la relación $\Delta r/r$, siendo E_0 el Módulo de Elasticidad del hormigón sano y r el radio inicial de la barra de acero, de esta manera se obtuvo la curva expuesta en la Figura 9.

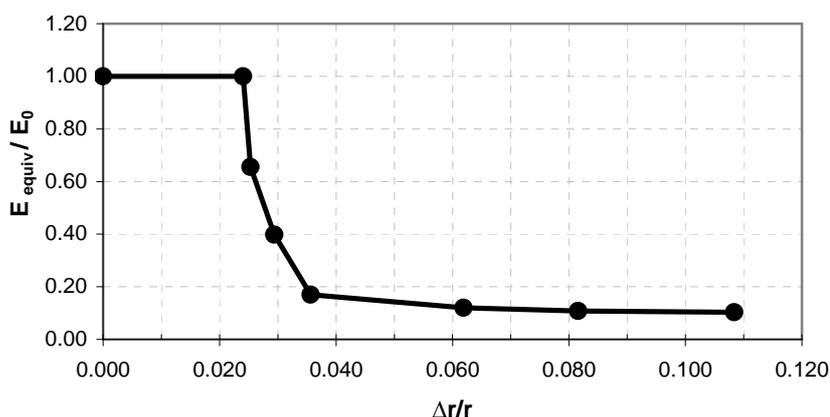


Figura 9. Curva: Relación de Módulos (E_{equiv}/E_0) – Relación de Radios ($\Delta r/r$).

4.4 Análisis de los resultados

La curva $\Delta r/r - E_{\text{equiv}}/E_0$ obtenida en la Figura 9, es de tipo exponencial. Cabe destacar que a partir de la relación $\Delta r/r = 0.020$, la cual se corresponde aproximadamente, con una pérdida de sección de la barra de acero del 4 %, al aumentar Δr se genera una disminución de E_{equiv} en forma exponencial, siendo esta disminución muy importante para los primeros niveles de corrosión caracterizados por $\Delta r/r$ entre 0.020 y 0.030 (pérdidas de sección entre 4 y 6 %). Este brusco descenso se debe no solo a los productos de corrosión que están presentes en la zona de la interface hormigón – acero, sino esencialmente a la pérdida de confinamiento de la barra, debido a la fisuración del recubrimiento de hormigón. Manteniéndose la relación E_{equiv}/E_0 con valores muy bajos, para $\Delta r/r$ mayores a 0.030 (pérdidas de sección superiores al 6 %). Obsérvese que esta variación del E_{equiv} se corresponde con bastante aproximación con lo determinado experimentalmente en la Figura 7 (Almusallan et al., 1996).

Para valores de $\Delta r/r$ menores a 0.024 se consideró que la relación E_{equiv}/E_0 es constante e igual a la unidad, es decir que el hormigón sano y el hormigón corroído tienen igual resistencia. En ensayos experimentales (Almusallan et al., 1996; Cairns et al., 2007) se ha demostrado que existe una leve ganancia de resistencia para los primeros niveles de corrosión, lo cual significaría que el hormigón afectado por la corrosión tiene mayor resistencia que el hormigón sano ($E_{\text{equiv}} > E_0$), en realidad, esto se debe a que en la superficie de la barra se genera un incremento de la rugosidad superficial, mientras que los productos de la corrosión no quedan en la superficie del hierro, lubricando la interfase, sino que se trasladan colmatando los poros del hormigón, lo cual origina un leve incremento de la adherencia entre el acero y el hormigón.

Es interesante comentar que en una estructura real afectada por corrosión de sus armaduras, el Δr se puede estimar descubriendo las armaduras en distintos lugares y/o realizando mediciones de la intensidad de corriente (velocidad de corrosión), con lo que

también se puede estimar la pérdida futura del material de la barra, prediciéndose el posible momento en el que se supere la resistencia a la adherencia de la armadura afectada.

En la actualidad se está trabajando en la incorporación de parámetros que permitan modelizar la morfología de la fisuración, y en la utilización de otros modelos materiales más complejos, para representar con mayor precisión el comportamiento de los materiales involucrados.

5 CONCLUSIONES

El análisis descrito en este trabajo, permitió obtener una curva que relaciona el avance de la corrosión en las barras de acero ($\Delta r/r$), con el cociente entre el Módulo de Elasticidad Equivalente (E_{equiv}) del hormigón circundante a la barra (que posee un determinado grado de fisuración) y el Módulo de Elasticidad del hormigón sano (E_{equiv}/E_0). De esta forma, el E_{equiv} representa la disminución de la adherencia entre la barra de acero y el hormigón, ocasionada por la corrosión de las armaduras.

Los resultados obtenidos son válidos para simular la respuesta mecánica de una probeta, afectada por la corrosión de sus armaduras, en un ensayo Pull-Out. Cabe destacar que dicho ensayo representa al fenómeno de adherencia entre las barras de acero, ubicadas en la zona de tracción de piezas sometidas a flexión pura, y el hormigón que las circunda.

Esto es muy importante, ya que conociendo el valor de Δr y, consecuentemente el de E_{equiv} , es posible estimar la disminución de la Capacidad Resistente de una estructura de hormigón armado, sometida a un determinado grado de corrosión de sus armaduras.

Lo desarrollado en este trabajo sirve de base para realizar modelos más amplios, que además de la adherencia entre el hormigón y el acero, incluyan otros factores con los cuales se pueda predecir la Capacidad Portante Residual de una estructura de hormigón armado, suponiendo diferentes niveles de corrosión en sus armaduras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur por el apoyo proporcionado para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Almusallam A.A., Al-Gahtani A.S., Aziz A.R., Rasheeduzzafart. Effect of reinforcement corrosion on bond strength. *Construction and Building Materials*, 10:2:123-129, 1996.
- Andrade C., Alonso C., Molina F.J. Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part I- Experimental test. *Materials and Structures*, 26:453-464, 1993.
- Algor V20 Professional Mech/VE, Docutech, Linear Stress and Dynamics, Reference Division. Pittsburgh, Pennsylvania, 2007.
- Alonso C., Andrade C., Rodriguez J., Diez J.M. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion. *Materials and Structures*, 31:435-441, 1998.
- Berto L., Simioni P., Saetta A. Numerical Modelling of bond behaviour in RC structures affected by reinforcement corrosion. *Engineering Structures*, 30:5:1375-1385, 2008.
- Cairns J., Du Y., Law D. Influence of corrosion on the friction characteristics of the steel/concrete interface. *Construction and Building Materials*, 21:190-197, 2007.
- Código Modelo CEB-FIP 1990 para Hormigón Estructural. Estructura y Edificación (E-4). Edición Española, Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos, Grupo Español de Hormigón y Asociación Técnica Española del pretensado, Madrid, 1990.

- Dekoster M. Buyle Bodin F., Maurel O., Delmas Y. Modelling of the flexural behaviour of RC beams subjected to localised and uniform corrosion. *Engineering Structures*, 25:1333-1341, 2003.
- Du Y.G., Chan A.H.C., Clark L.A. Finite Element analysis of radial expansion of corroded reinforcement". *Computers and Structures*, 84:917-929, 2006
- EHE. "Instrucción de Hormigón Estructural", (1998), Ministerio de Fomento de España, Madrid.
- Fang C. et al. Bond behaviour of corroded reinforcing steel bars in concrete. *Cement and Concrete research*, 36:1931-1938, 2006.
- García M.D., Gutiérrez J.P., Rodríguez J. Influencia de la corrosión sobre la adherencia acero/hormigón". *Revista Hormigón y Acero*, 210:23-40, 1998.
- Hassan Dirar, S.M.O., Morley, C.T. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete deep beams In: VIII International Conference on Computational Plasticity Fundamentals and applications (Complas 2005), Barcelona, Spain. 2005.
- Lee H.S. Noguchi T., Tomosawa F. Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Research*, 32:1313-1318, 2002.
- Leonhardt Fritz. *Estructuras de Hormigón Armado. Bases para el dimensionado de estructuras de Hormigón Armado. Tomo 1. Segunda Edición*, Editorial El Ateneo, 1987.
- Rodríguez J., Ortega L.M., Casal J., Diez J.M. La corrosión de las armaduras y la vida residual de las estructuras de hormigón. *Revista Hormigón y Acero*, 208:63-78, 1998.
- Rodríguez J., Ortega L.M., Casal J., Diez J.M. Comportamiento estructural de vigas de hormigón con armaduras corroídas. *Revista Hormigón y Acero*, 200:113-131, 1996.
- Schierloh M.I., Ortega N.F., Señas L. Relación entre algunas propiedades del hormigón del recubrimiento y su degradación, producida por los productos de corrosión de las armaduras. 14° Reunión de Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. *Olavaria*. 2:125-132, 2001.
- Soylev T.A. and Francois R. Quality of steel-concrete interface and corrosion of reinforcing steel. *Cement and Concrete Research*, 33:1407-1415, 2003.
- Teguh, M., Duffield CF, Mendis P., Hutchinson GL. 3-D finite element analysis of pile-to-pile cap connections subject to seismic action. *Earthquake Engineering in Australia – Conference, Australian*, 2005.
- Vidal T., Castel A., Francois R. Analysing crack width to predict corrosion in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 34:165-174, 2004.