

## COMPORTAMIENTO NUMÉRICO EXPERIMENTAL DE BARRAS DE ACERO VINCULADAS MEDIANTE ANCLAJES QUÍMICOS A BLOQUES DE HORMIGÓN ARMADO

**Victor A. Roldan, Gustavo L. Palazzo y N. Graciela Maldonado**

CEREDETEC, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina,  
victor.roldan@frm.utn.edu.ar, gpalazzo@frm.utn.edu.ar, ngm@frm.utn.edu.ar

**Palabras clave:** Anclajes químicos, simulación numérica, modelos hormigón – acero – anclaje.

**Resumen.** Los anclajes químicos presentan una solución a numerosos problemas de la ingeniería civil en la que se desea adosar algún dispositivo, ya sea estructural o no estructural, a una estructura existente. El presente trabajo tiene por objeto evaluar la actualización de parámetros de dos modelos constitutivos incluidos en un programa comercial de elementos finitos, para reproducir la respuesta experimental obtenida en ensayos. El estudio realizado es parte de un proyecto destinado a evaluar la eficiencia de anclajes químicos para vincular disipadores de energía a estructuras sismorresistentes de hormigón armado. Para lograr el objetivo de este trabajo: i) se describe el estudio experimental de barras de acero vinculadas con anclajes químicos a bloques de hormigón, y sometidas a carga axial pseudo estática; ii) se describen los modelos constitutivos considerados para simular el comportamiento de conjunto bloque – barra – anclaje; iii) se evalúan los parámetros de los modelos numéricos que tienen influencia significativa en la variación de la respuesta; iv) se actualizan parámetros para aproximar la respuesta numérica a la experimental; y v) se evalúa el grado de aproximación alcanzado con diferentes modelos constitutivos tanto a nivel fuerza – desplazamiento, como a nivel tipología de falla. En las conclusiones se destacan las características de la simulación numérica para reproducir el fenómeno estudiado.

## 1 INTRODUCCION

Los anclajes químicos son un medio eficaz y versátil para realizar uniones de elementos estructurales y no estructurales a construcciones existentes por diversos motivos. Entre ello se puede destacar que, a diferencia de los anclajes metálicos, no ejercen fuerzas de expansión sobre el material base, además permiten su colocación aun cuando el elemento a unir se encuentre en su posición definitiva, característica especialmente deseable en el caso de la colocación de riostras de rigidización a estructuras aporricadas de hormigón armado existentes.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de anclajes químicos sometidos a esfuerzos de tracción pseudo estáticos. Este es un paso preliminar con el cual se pretende calibrar el modelo para luego someter los anclajes a cargas dinámicas para así poder determinar su aptitud para resistir cargas de origen sísmico.

El trabajo cuenta de dos parte principales, los ensayos de laboratorio de los anclajes químicos y el modelo computacional en el programa de elementos finitos ABAQUS. Los resultados obtenidos en laboratorio son contrastados con los resultados de la modelación, pudiendo así calibrar el modelo y determinar virtudes y deficiencias.

Los anclajes químicos se componen de tres elementos, una varilla roscada de acero, un bloque de hormigón donde va inserta la varilla roscada y el adhesivo epoxi. El acero de la varilla roscada se comporta de manera lineal para la carga de rotura del anclaje por desprendimiento del hormigón, por lo que el modelado de éste no presenta ningún inconveniente. Dada la gran rigidez y resistencia del adhesivo epoxi se puede modelar como un contacto rígido entre el hormigón y el acero. Como se verá posteriormente el hormigón es el material que presenta mayor dificultad para su modelado dado que se trata de un material heterogéneo y resulta difícil la obtención de los parámetros que lo definen.

El programa de elementos finitos ABAQUS cuenta con diversos modelos para representar el hormigón, pero dado que en etapas posteriores se procederá a la aplicación de cargas dinámicas se optó por los materiales "Cracking model for concrete" y "Concrete damage plasticity" (Abaqus Analysis User's Manual 6.11).

## 2 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE BARRAS ANCLADAS EN BLOQUES DE HORMIGÓN

Se describen en esta sección los ensayos de tracción pseudo estática realizados sobre barras de acero ancladas en bloques de hormigón. Además de los ensayos se presentan las propiedades geométricas y mecánicas de los materiales constitutivos de los prototipos.

### 2.1 Barras de acero

El anclaje está compuesto por una varilla roscada de acero inoxidable de 10mm de diámetro y con una tensión de rotura de 900MPa.

### 2.2 Bloques de hormigón

Se confeccionaron 2 bloques de hormigón prismáticos, las probetas A y B, de 30cm de ancho por 40cm de largo y 15cm de alto. A fin de obtener un hormigón con una resistencia a compresión aproximada de 25MPa se adoptó una dosificación por peso de 300 kg/m<sup>3</sup> de cemento, 200 l de agua por m<sup>3</sup>, 800 kg/m<sup>3</sup> de agregado fino y 1050 kg/m<sup>3</sup> de agregado grueso.

Los parámetros mecánicos obtenidos a partir de 6 probetas se presentan en la Tabla 1.

|                                   | Designación | Carga de rotura (KN) | Tensión (MPa) | Tensión a 90 días (MPa) | Tensión promedio (MPa) |
|-----------------------------------|-------------|----------------------|---------------|-------------------------|------------------------|
| Compresión                        | C1          | 191.3                | 24.3          | 29.2                    | 29.0                   |
|                                   | C2          | 196.2                | 25.0          | 30.0                    |                        |
|                                   | C3          | 181.5                | 23.1          | 27.7                    |                        |
| Tracción por compresión diametral | T1          | 78.5                 | 2.5           | 3.0                     | 3.1                    |
|                                   | T2          | 68.7                 | 2.2           | 2.6                     |                        |
|                                   | T3          | 93.2                 | 3.0           | 3.6                     |                        |

Tabla 1: Resultados de ensayos de probetas de hormigón a compresión y tracción por compresión diametral.

El módulo de elasticidad  $E_c$  del hormigón se calculó en función de la resistencia especificada a compresión  $f'_c$ , según lo indicado por el reglamento CIRSOC 201-2005, obteniendo un  $E_c = 25288,4\text{MPa}$

### 2.3 Anclaje químico

Para la ejecución de anclajes se utilizó un mortero epoxi Fischer EM 390 S. Se optó por este producto dado que las características del mortero epoxi lo hacen más resistente que otros tipos de adhesivos, por ejemplo los de base vinylester, lo cual es adecuado para realizar anclajes en hormigón.

En el centro de las probetas se introdujeron los anclajes químicos a una profundidad de 6cm. Se utilizó esta profundidad ya que para valores menores las resistencias obtenidas eran muy bajas porque se reduce el cono de arrancamiento de hormigón disponible para soportar la carga. Para valores de profundidad de empotramiento del anclaje mayores de 6cm la carga de falla era cercana a la carga de fluencia de la varilla, por lo que se corre el riesgo de que el anclaje falle por rotura de la varilla de acero.

### 2.4 Ensayo de barras ancladas en bloques de hormigón

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) de San Juan. Se empleó la máquina universal de ensayos que se muestra en la Figura 1.



Figura 1: Máquina universal de ensayos.

Para evitar concentraciones de tensiones en el apoyo de los bloques de hormigón sobre la máquina universal de ensayos, y para permitir que se formara el cono de arrancamiento del hormigón, se colocó un disco metálico sobre el cual se apoyó el bloque de hormigón según se observa en la Figura 2.



Figura 2: Bloque de hormigón sobre disco metálico de apoyo.

La carga de tracción pseudo estática sobre la barra de acero se aplicó por medio de una varilla rosada de 2" de diámetro sujeta a un plato de la maquina universal de ensayos tal como se muestra en la Figura 3. Sobre el otro plato de la máquina se colocó el disco metálico y el bloque de hormigón, produciendo así una tracción en el anclaje químico hasta el arrancamiento del mismo del hormigón.



Figura 3: Varilla rosada para transmisión de carga a anclaje.

En la Figura 4 se observa la curva carga-desplazamiento obtenida para ambos ensayos, anclaje A para el colocado en la probeta A y anclaje B para el de la probeta B, la carga promedio de rotura fue de 30.3kN y el desplazamiento de rotura de 3.37mm. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para cada ensayo.

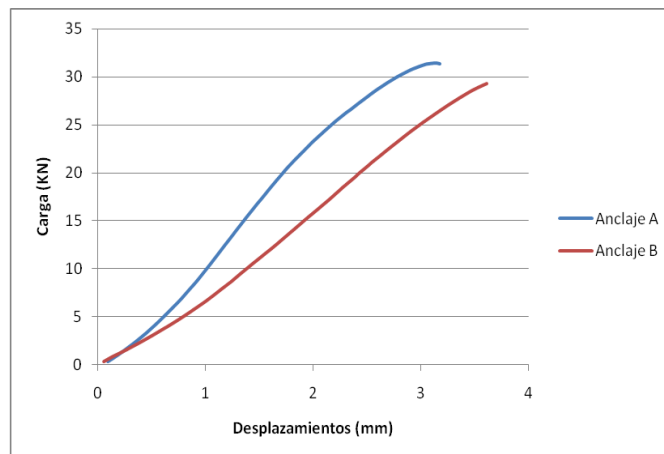


Figura 4: Grafico carga - desplazamiento de los anclajes obtenidos en los ensayos de laboratorio.

|            | Carga (kN) | Desplazamiento (mm) |
|------------|------------|---------------------|
| Anclaje A  | 31.31      | 3.17                |
| Anclaje B  | 29.28      | 3.61                |
| Diferencia | 6.48%      | 13.75%              |

Tabla 1: Cargas y desplazamientos obtenidos para los dos anclajes ensayados.

En la Figura 5 se visualiza el modo de falla, que corresponde a un cono de arrancamiento de hormigón con una porción inferior en la que la barra se desprendió junto con el mortero epoxi sin hormigón adherido. En la Figura 6 se observan las medidas del cono de hormigón.



Figura 5: Falla del anclaje por arrancamiento del cono de hormigón.

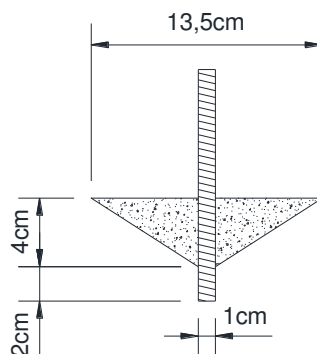


Figura 6: Medidas del cono de arrancamiento de hormigón.

### 3 MODELOS CONSTITUTIVOS PARA LOS MATERIALES INTERVINIENTES

La simulación numérica del ensayo se realizó con el programa de elementos finitos de propósito general ABAQUS (2010). Por lo que en esta sección se describen los modelos constitutivos considerados para cada material del conjunto barra – anclaje – bloque.

#### 3.1 Barra de acero

Las varillas roscadas se modelaron con comportamiento elástico ya que las cargas a las cuales fallaron los anclajes son menores que la de fluencia del acero de las varillas. Los parámetros necesarios para su modelación son el módulo de elasticidad del acero,  $E_s=210000\text{MPa}$ , el módulo de Poisson = 0,3 y la densidad del acero =  $7900\text{kg/m}^3$ .

## 3.2 Bloques de hormigón

De los 3 modelos para el hormigón que se disponen en ABAQUS, fueron considerados en este trabajo el modelo "Cracking model for concrete" y el "Concrete damage plasticity", los cuales se describen a continuación. El modelo restante, "Concrete smeared cracking", no fue seleccionado ya que está diseñado para estructuras que van a estar sujetas a esfuerzos monotónicos y en trabajos posteriores se pretende evaluar el comportamiento de los anclajes sujetos a cargas dinámicas.

### 3.2.1 Cracking model for concrete

#### 3.2.1.1 Principales características del modelo

- Provee la capacidad de modelar hormigón en todo tipo de estructuras como vigas, reticulados, cascaras y sólidos.
- Está diseñado para aplicaciones en el que el comportamiento está dominado por la fisuración a tracción.
  - Puede ser utilizado para modelar hormigón simple.
  - Asume que el comportamiento a compresión siempre es elástico lineal.
  - Es más preciso en aplicaciones donde el comportamiento frágil domina de manera tal que la suposición de que el material es elástico lineal en compresión es adecuada.
  - Permite la remoción de elementos basado en el criterio de falla frágil.

#### 3.2.1.2 Parámetros que definen el modelo

- Comportamiento elástico lineal:

Cuando el material se encuentra sometido a esfuerzos de tracción se comporta de manera elástica lineal hasta alcanzar el valor de tensión de falla a tracción del material, luego de lo cual comienza la fisuración. El programa utiliza el criterio de Rankine para detectar el comienzo de la fisuración cuando es alcanzada la tensión máxima de tracción del material. En la Figura 7 se observa el criterio de Rankine para un estado tensional plano, siendo  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  las tensiones principales y  $\sigma_t^1$  la tensión de falla del material a tracción. Debe definirse el valor del módulo de elasticidad del hormigón,  $E_c = 25288,4$  MPa, el módulo de Poisson = 0,2 y la densidad del hormigón =  $2400$  kg/m<sup>3</sup>.

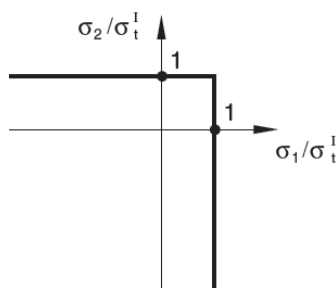


Figura 7: Criterio de Rankine.

- Relación tensión – deformación pos-falla:

El comportamiento pos-falla a tracción se puede definir en forma de tabla, indicando los

valores de tensión y desplazamientos, como se muestra en la Figura 8, siendo  $\sigma_t^I$  la tensión de falla del material a tracción y  $u_n^{ck}$  el valor de apertura de la fisura. Otra manera en la que se puede definir el comportamiento pos-falla a tracción es través del concepto de energía de fisuración (Hillerborg 1976). En este caso se definió en forma de tabla de valores colocando los valores de tensión y desplazamiento de la curva de decaimiento que se describe mas adelante.

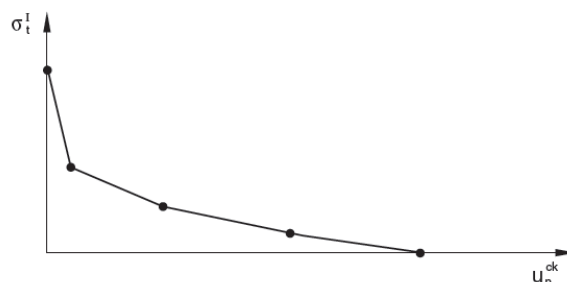


Figura 8: Comportamiento pos-falla a tracción del hormigón.

Como primer paso se obtuvo la energía de fisuración a través de la resistencia a compresión del hormigón, interpolando de los valores recomendados dados en el manual de ABAQUS (Abaqus Analysis User's Manual 6.11). El valor utilizado para la tensión de falla fue de 3,1MPa y el valor de energía de fisuración fue de 0,0758N/mm. La energía de fisuración es el área encerrada por la curva de decaimiento pos-falla del hormigón sometido a tracción (ver Figura 9).

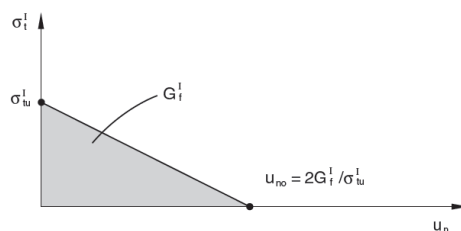


Figura 9: Concepto de energía de fisuración.

Se utilizaron dos puntos para definir el comportamiento pos-falla, donde comienza la falla para una tensión de tracción de 3,1 MPa y el desplazamiento igual a 0 mm, y el punto para cuando se alcanza la rotura en el que la tensión es 0 MPa y el desplazamiento  $u_{no} = 0,049$ mm (Ec. 1). Este desplazamiento se obtiene con la energía de fisuración  $G_t$ , y la tensión de rotura a tracción  $\sigma_t$  (ver Figura 9). En la Figura 10 se muestra la curva de comportamiento pos-falla adoptada.

$$u_{no} = 2G_t / \sigma_t = 2 \cdot 0,0758 \text{N/mm} / 3,1 \text{MPa} = 0,049 \text{mm} \quad (1)$$

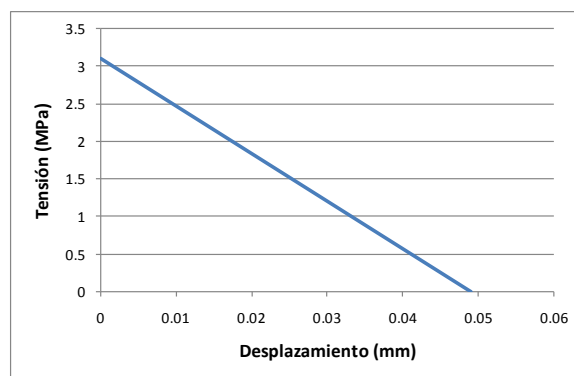


Figura 10: Curva tensión-desplazamiento adoptada para el hormigón pos-falla a tracción.

- Falla frágil:

Activando la opción falla frágil y colocando el desplazamiento último = 0,049 mm, los elementos de la malla que van alcanzado ese desplazamiento son removidos de la malla. Con esto se evita problemas de convergencia por excesivas deformaciones y permite ver el modo de falla.

- Corte frágil:

Una característica de este modelo es que mientras que el comportamiento elástico del material y el inicio de la fisuración están basados en el Modo I de fractura, que es el que corresponde al comportamiento a tracción del material, el comportamiento pos-falla tiene en cuenta tanto la influencia de la resistencia a tracción como a corte. La resistencia proporcionada por el esfuerzo de corte se cuantifica por medio del factor de retención de corte. Este modelo tiene en cuenta que el comportamiento a corte pos-falla es dependiente de la apertura de la fisura, ya que para valores de apertura de fisuración pequeños el hormigón sigue transmitiendo corte a través de la trabazón entre los agregados. El programa varia el modulo de corte del material fisurado,  $G_c$ , multiplicando el modulo de corte del material sin fisura,  $G$ , por factor de retención de corte,  $\rho$ , que a su vez es función de la deformacion especifica de la fisura,  $e_{nn}^{ck}$ , (Ec.2).

$$(2) \quad G_c = \rho(e_{nn}^{ck}) \quad G$$

El factor de corte se puede especificar en forma tabular, siendo 1 para un ancho de fisura de 0cm, con lo que se logra que se transmita todo el corte, y 0 para el ancho de fisura máximo del material para el cual se produce la falla y no se transmite mas corte.

Como se verá más adelante este parámetro se utilizó para la calibración del modelo, por lo que se fue variando hasta obtener una respuesta acorde a lo obtenido en los ensayos.

- Calculo de tensiones:

Para el cálculo de tensiones actuantes en el material el modelo plantea una descomposición de la tasa de deformación (Ec. 3) , siendo la tasa de deformación total,  $d\varepsilon$ , la suma de la tasa de deformación del material bajo comportamiento elástico,  $d\varepsilon^{el}$ , mas la tasa de deformación de la fisura,  $d\varepsilon^{ck}$ .



$$d\varepsilon = d\varepsilon^{el} + d\varepsilon^{ck} \quad (3)$$

Para la medición de las deformaciones que se producen en la fisura es conveniente generar un nuevo sistema de coordenadas alineadas con la fisura (ver Figura 11). La transformación de las deformaciones entre el eje de coordenadas global y el eje de coordenadas local se efectúa mediante la matriz de transformación  $T$ , que contiene los cosenos directores del eje de coordenadas local de la fisura. En la ecuación 4 se expresa esta transformación siendo  $\varepsilon$  la deformación respecto al ejes de coordenadas global, y  $e$  la deformación respecto al eje de coordenadas de la fisura.

$$\varepsilon = T e \quad (4)$$

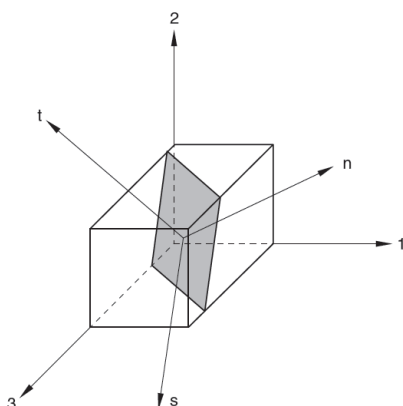


Figura 11: Ejes de coordenadas globales (1,2 y 3) y ejes de coordenada locales de la fisura (n, s y t)

De igual manera, mediante la ecuación 5, se pueden transformar las tensiones expresadas en el eje de coordenadas global,  $\sigma$ , respecto al eje de coordenadas local,  $t$ .

$$t = T \sigma \quad (5)$$

Finalmente, teniendo en cuenta las descomposición aditiva de las tasas de deformaciones de la ecuación 3 y las relaciones de la elasticidad, las tensiones se calculan de acuerdo a la ecuación 6, siendo  $D^{el}$  la matriz de elasticidad lineal.

$$d\sigma = D^{el} (d\varepsilon - T d\varepsilon^{ck}) \quad (6)$$

### 3.2.2 Concrete Damage Plasticity

#### 3.2.2.1 Principales características del modelo

- Provee la capacidad de modelar hormigón en todo tipo de estructuras como vigas, reticulados, cascaras y sólidos.
- Utiliza conceptos de daño elástico isotrópico en combinación con comportamiento plástico isotrópico en compresión y tracción para representar el comportamiento inelástico del hormigón.
- Puede ser utilizado para modelar hormigón simple.
- Está diseñado para aplicaciones en las que el hormigón está sujeto a cargas monotónicas,

cíclicas y dinámicas bajo presiones de confinamiento bajas.

- Consiste en la combinación de una plasticidad multi-endurecimiento no asociada y un daño elástico escalar para describir el daño irreversible que ocurre durante la fractura.
- Permite al usuario controlar la recuperación de rigidez durante cargas cíclicas reversibles.

### 3.2.2.2 Parámetros que definen el modelo

- Comportamiento elástico lineal:

Al igual que el modelo "Cracking model for concrete", este modelo presenta un comportamiento elástico lineal, tanto para esfuerzos de tracción como para compresión, hasta alcanzar el valor de tensión límite. Se debe definir el valor del módulo de elasticidad del hormigón  $E_c$ , el módulo de Poisson y la densidad del material. Los valores utilizados fueron los mismos que para el modelo "Cracking model for concrete".

- Relación tensión – deformación pos-falla:

El comportamiento pos-falla se define de igual modo que para el "Cracking model for concrete" por lo que se adoptaron los mismos valores.

Este modelo tiene la opción de generar una degradación de la rigidez si se produce una descarga luego de que se ha sobrepasado el valor de tensión de falla y nos encontramos en la curva de decaimiento. Esto se logra a través de un parámetro de daño  $d_t$ . Este parámetro multiplica al módulo de elasticidad del material original, por lo que el parámetro  $d_t$  toma valores desde 0 para cuando el material no ha sufrido daño alguno hasta 1 para una pérdida total de la rigidez. En la Figura 12 se muestra la ley constitutiva del hormigón sometido a tracción que utiliza el modelo. Se observa un comportamiento elástico lineal hasta alcanzar la tensión máxima  $\sigma_{t0}$ , luego de lo cual comienza la curva de decaimiento. Como en este trabajo no se produjeron descargas en ningún momento no se utilizó el parámetro de daño.

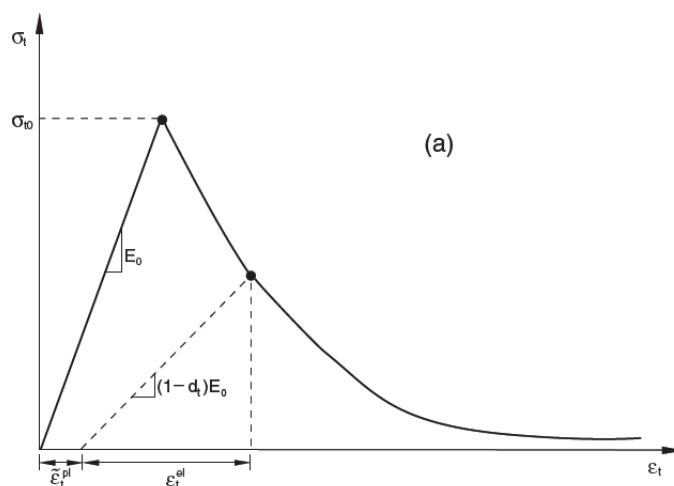


Figura 12: Comportamiento del hormigón en tracción.

El modelo plantea una descomposición aditiva de las deformaciones siendo la deformación total  $\epsilon$ , la suma de las deformaciones elásticas,  $\epsilon_t^{el}$ , y las deformaciones plásticas,  $\epsilon_t^{pl}$ .

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores las tensiones se calculan mediante la ecuación 7, siendo  $E_0^{el}$  el módulo de elasticidad el material inicial y  $E^{el}$  el módulo de elasticidad

degradado.

$$\sigma = (1-d) E_0^{el} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_t^{pl}) = E^{el} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_t^{pl}) \quad (7)$$

- Superficie de fluencia:

El criterio de falla del modelo es una modificación del criterio de Drucker -Prager (Kmieciak 2011, Lee 1998, Lubliner 1989), por lo que deben definirse los valores de la superficie de fluencia. Para la obtención de los valores que definen la superficie de fluencia deben realizarse ensayos de compresión biaxiales y triaxiales, dado que no se cuenta con el equipamiento necesario para efectuar estos ensayos se adoptaron los valores del trabajo de Kmieciak 2011, en la tabla 2 se muestran los valores utilizados.

| Angulo de dilatancia | Excentricidad | fb0/fc0 | K     | Parámetro de viscosidad |
|----------------------|---------------|---------|-------|-------------------------|
| 36                   | 0.106         | 1.16    | 0.667 |                         |

Tabla 2: Valores utilizados que definen la superficie de fluencia

### 3.3 Adhesivo químico

Dado que en los ensayos se observó que la falla se produjo por el hormigón sin que el mortero epoxi presentara daño alguno y además por el pequeño espesor que posee la capa de mortero, aproximadamente 1mm, se decidió modelar la adhesión entre la varilla roscada del anclaje y el hormigón como un contacto totalmente rígido. Para el comportamiento tangencial se colocó la opción "Rough" y para el comportamiento normal se colocó la opción "Hard Contact".

## 4 SIMULACIÓN NUMÉRICA

En esta sección se detalla: la clase de análisis empleado en la simulación numérica, la clase de elementos usado, la malla implementada, y el estudio paramétrico realizado.

### 4.1 Clase de análisis

Para ambos materiales, "Cracking model for concrete" y "Concrete Damage Plasticity", se utilizó el procedimiento Abaqus/Explicit dado que el modelo "Cracking model for concrete" se encuentra disponible únicamente para este tipo de análisis.

Abaqus/Explicit usa el operador de diferencias centrales como regla de integración en el tiempo y permite la incrementación automática.

### 4.2 Malla

El bloque de hormigón se malló con 29436 elementos del tipo C3D8R formando 32554 nodos, para la varilla roscada del anclaje se utilizaron 264 elementos del tipo C3D8R con 603 nodos, y finalmente para el disco metálico de apoyo se utilizaron 51 elementos del tipo C3D8R y 112 nodos (ver Figura 13). El mallado más grosero del disco metálico se debe a que el comportamiento de éste no es de interés para el problema en estudio.

Los tiempos totales computacionales para ambos materiales fueron de 2659 segundos para

el modelo "Concrete Damage Plasticity" y 1989 segundos para el modelo "Cracking model for concrete".

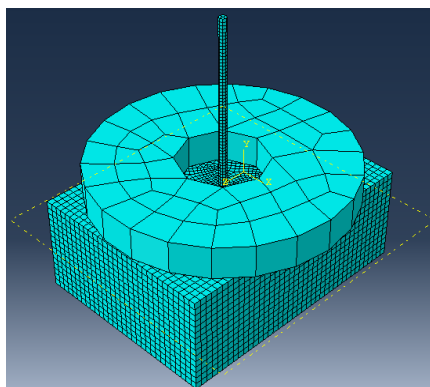


Figura 13: Malla utilizada.

### 4.3 Estudio de sensibilidad de parámetros para "Cracking model for concrete".

El factor de retención de corte debería obtenerse experimentalmente, para ello es necesario una maquina lo suficientemente robusta para poder registrar el comportamiento pos-falla del hormigón y además se deben realizar ensayos con un alto grado de complejidad. Dado que no se cuenta con este tipo de maquinaria se optó por realizar una calibración del modelo.

Los parámetros que se deben introducir son el factor de retención de corte,  $\rho$ , y la deformación específica de la fisura,  $e^{ck}$ , que es una magnitud adimensional. Mediante la deformación específica de la fisura  $e^{ck}$  el programa calcula el ancho de fisura,  $u^{ck}$ , multiplicándola por una longitud característica  $h$  (ecuación 8). Esta longitud la determina automáticamente el programa y depende de la geometría y el elemento utilizado (Abaqus Analysis User's Manual 6.11).

$$u^{ck} = e^{ck} h \quad (8)$$

Dejando todos los demás parámetros descriptos anteriormente fijos, se fue variando el factor de retención de corte y la deformación específica de la fisura hasta que se obtuvo una carga de rotura del orden de la obtenida en el ensayo.

Este parámetro varía desde un valor de 1 para un desplazamiento de 0 mm, lo cual indica que el material se encuentra sin fisurar por lo que se transmite todo el corte, hasta un valor de 0 para el desplazamiento de rotura, en donde ya no hay más posibilidad de transmisión de esfuerzo.

Valores muy pequeños de valor de retención de corte pueden conducir a problemas de convergencia en el modelo (Lisantono 2005), por este motivo se adoptó como 0,4 al mínimo valor de factor de retención de corte.

Los valores de factor de retención de corte y deformación específica de la fisura que condujeron a una falla del modelo que se asemejara con lo obtenido en el ensayo se presentan en la Tabla 3.

| Factor de retención de corte<br>( $\rho$ ) | Deformación específica de la fisura<br>( $e^{ck}$ ) |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1                                          | 0.000000000                                         |
| 0.9                                        | 0.000191698                                         |
| 0.7                                        | 0.000575095                                         |
| 0.6                                        | 0.000766793                                         |
| 0.5                                        | 0.000958492                                         |
| 0.4                                        | 0.001150190                                         |

Tabla 3: Valores de factor de retención de corte y desplazamientos.

Como puede apreciarse en la tabla 3 el desplazamiento, medido a través de la apertura de fisura, cuenta con una gran cantidad de decimales. Esto sucede ya que el modelo es altamente sensible al valor de apertura de fisura por lo que se tuvieron que realizar numerosas corridas hasta arribar a un valor que reprodujera la carga de rotura obtenida en el ensayo.

## 5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS RESPECTO A LOS EXPERIMENTALES

En la Figura 14 se observan los resultados obtenidos para el modelo "Cracking model for concrete", comparando las curvas carga-desplazamiento obtenida en el ensayo con la del modelo. En la curva del modelo, para valores de carga pequeños, el material presenta un comportamiento lineal hasta alcanzar la tensión de falla a tracción, luego de lo cual comienza el comportamiento frágil.

Se observa que pese a la diferencia en el valor del desplazamiento de rotura el valor de la carga final para el modelo y para los dos anclajes ensayados, Anclaje A y Anclaje B, (ver Figura 14) y el modo de falla (ver Figura 15) se aproximaron con bastante precisión a lo obtenido en los ensayos.

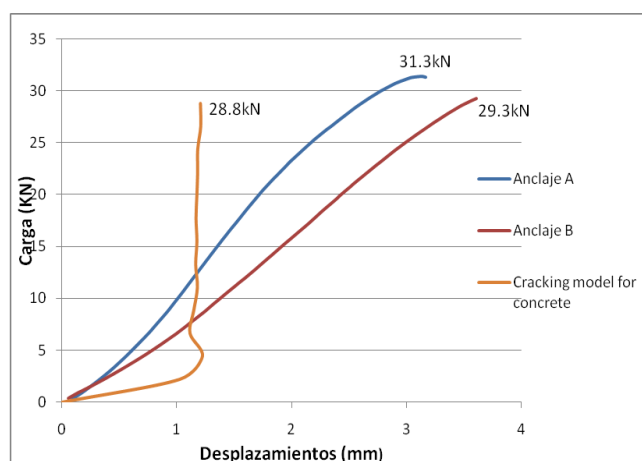


Figura 14: Gráfico fuerza-desplazamiento para modelos ensayados y modelo "Cracking model for concrete"

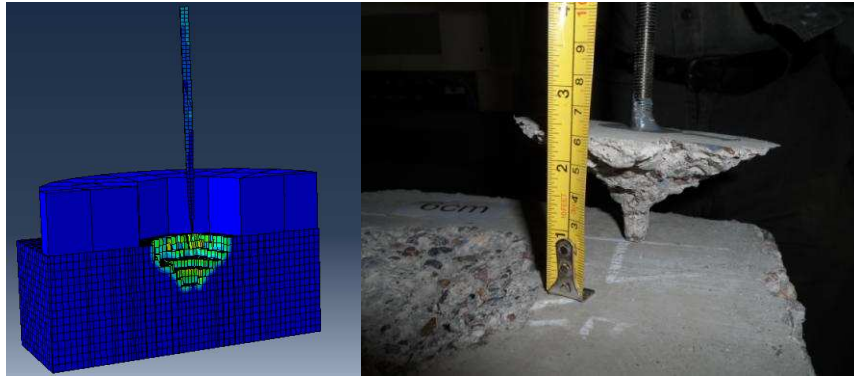


Figura 15: Modo de falla del anclaje para el modelo "Cracking model for concrete" y comparación con el obtenido experimentalmente.

En el caso del modelo "Concrete damage plasticity" se arribó a una carga de rotura de 24,4kN, 5,9kN menor que la carga obtenida en el ensayo, pese a esto la curva carga - desplazamiento se aproxima a las obtenidas en los ensayos (ver Figura 16).

El modo de falla es similar al obtenido en los ensayos, esto se observa al graficar las deformaciones plásticas que representan las fisuras en el hormigón (ver Figura 17).

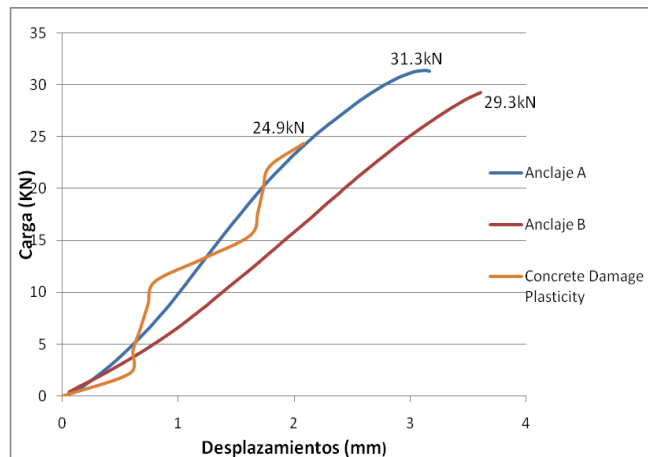


Figura 16: Gráfico fuerza-desplazamiento para modelos ensayados y Concrete Damage Plasticity.

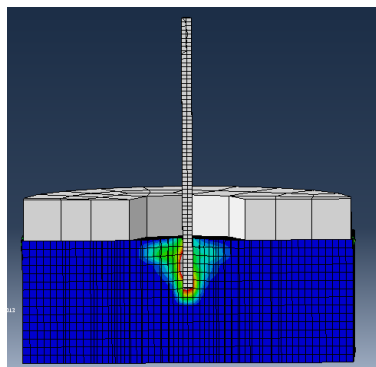


Figura 17: Modo de falla para el modelo de Concrete Damage Plasticity.

En la tabla 4 se muestran los resultados de carga de rotura y desplazamiento obtenidos experimentalmente y mediante los dos modelos utilizados.

|                             | Carga de rotura (kN) | Desplazamiento ultimo (mm) |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------|
| Experimental                | 30.3                 | 3.38                       |
| Cracking model for concrete | 28.8                 | 1.2                        |
| Concrete damage plasticity  | 24.9                 | 2.1                        |

Tabla 4: Valores de cargas y desplazamientos obtenidos.

## 6 CONCLUSIONES

Al utilizar el modelo de comportamiento del hormigón "Cracking model for concrete" se obtiene resultados adecuados en el valor de la carga de falla y el modo de falla, cono de arrancamiento del hormigón. No así con el resultado del desplazamiento último que es aproximadamente un 50% menor que el obtenido en el ensayo. A pesar de ello, la utilidad del modelo es de gran interés ya que la carga de rotura y el modo de falla, que es útil para el estudio del espaciamiento entre anclajes, son los dos factores principales que definen el diseño de una unión.

Dada la alta sensibilidad del modelo de "Cracking model for concrete" al factor de retención de corte se requiere de numerosas corridas para la calibración.

El modelo "Concrete damage plasticity" presenta una curva carga-desplazamiento que se aproxima a las obtenidas experimentalmente, sin embargo la carga de rotura es de un 19% menor que la de los ensayos. Esta diferencia se podría corregir variando algunos de los parámetros de la superficie de fluencia, ya que dependen de las características del hormigón.

Ambos modelos requieren de ensayos complejos para definir los parámetros que los constituyen, por lo que se debe realizar una calibración mediante ensayos.

En lo que respecta a la conveniencia de elección de alguno de los modelos se puede concluir que para cargas pseudo-estáticas ambos representan adecuadamente el fenómeno. En trabajos posteriores se someterán los anclajes a cargas dinámicas para evaluar las capacidades de los modelos para reproducir los ensayos.

## REFERENCIAS

- Abaqus Analysis User's Manual 6.11. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- CIRSOC 201, Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, 2005.
- Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P., Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and concrete research, volumen 6: 773-782, 1976.
- Jankowiak, T., and Lodygowski, T., Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. Foundations of civil and environmental engineering, N°6: 53-69, 2005.
- Kmiecik, P., and Kaminski, M., Modeling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. Archives of civil and mechanical engineering, volumen XI: 623-636, 2011.
- Lee, J., and Fenves, G., Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. Journal of engineering mechanics, volumen 124, N°8: 892-900, 1998.
- Lisantono, A., Sensitivity of shear retention factor in nonlinear finite element analisis of torsional reinforced concrete hybrid deep T-beams . Journal teknik sipil, volumen 6, N°1: 36-43, 2005.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., and Oñate, E., A plastic-damage model for concrete.

International Journal of solids and structures, volumen 25, N°3: 299-326, 1989.