



## **MODELACION MESOMECANICA DE ADHERENCIA HORMIGON - ACERO A DIFERENTES EDADES DE CARGA**

Ricardo H. Lorefice (1), Marcela M. Ledesma (1), Mauro I. Asili (1)

(1) Centro de Mecánica Aplicada y Estructuras  
CMAE-UNSE – Universidad Nacional de Santiago del Estero

e-mail: rlorefice@gmail.com

### **RESUMEN**

El estudio del fenómeno de adherencia hormigón-acero implica complejidades importantes cuando se analiza el mismo a diferentes edades de carga. Es sabido que durante el proceso de maduración del hormigón las propiedades mecánicas del mismo evolucionan de manera no lineal, generando por lo tanto diferentes respuestas mecánicas según la edad de entrada en servicio de la estructura. En este trabajo se presentan los últimos avances de una investigación en curso en la cual se simula el comportamiento del conjunto hormigón-acero a nivel mesomecánico, lo cual permite la consideración de modelos constitutivos de avanzada a fin de evaluar la respuesta de falla de estructuras de hormigón armado con particular atención a la incidencia de la edad del hormigón en el fenómeno de adherencia.

### **ABSTRACT**

Study of concrete-steel bond phenomena arise relevant issues when different loading ages are considered. During concrete maturity process, mechanical properties suffer a non-linear evolution generating different mechanical responses depending on the concrete age at the loading time. In this work we present the last advances of a developing research focused in the numerical simulation of concrete-steel bond at mesomechanical level of observation. This approach allows to introducing advanced constitutive models to failure assessment of reinforced concrete structures with particular attention to the incidence of concrete aging and its influence on the bonding phenomena.

## INTRODUCCION

La adherencia hormigón-acero es el fenómeno básico sobre el que descansa el funcionamiento del hormigón armado como material estructural. Si no existiese adherencia, las barras serían incapaces de tomar el menor esfuerzo de tracción, ya que el acero deslizaría sin encontrar resistencia en toda su longitud y no acompañaría al hormigón en sus deformaciones, con lo que, al fisurarse éste, sobrevendría bruscamente la rotura. La adherencia permite que el acero tome los esfuerzos de tracción, manteniendo la unión entre los dos materiales en las zonas entre fisuras, cumpliendo fundamentalmente dos objetivos: asegurar el anclaje de las barras y transmitir las tensiones tangenciales periféricas que se producen en la armadura principal como consecuencias de las variaciones de su tensión longitudinal. El fenómeno se desarrolla principalmente en la denominada zona de transición interfacial (*interfacial transition zone* – ITZ) y está originado por dos tipos de causas, unas de naturaleza física (o físico-química) y otras de naturaleza mecánica. Las primeras provocan la adhesión del acero de refuerzo con el hormigón, a través de fuerzas capilares y moleculares desarrolladas en la interfaz; vinculando al acero con la pasta cementicia por medio del efecto de retracción de fraguado. Las segundas, mucho más importantes, están constituidas por la resistencia al deslizamiento debida a la penetración de pasta de cemento en las irregularidades de la superficie de las barras. Esta causa de origen mecánico, que puede denominarse rozamiento, es la que produce la mayor parte de la adherencia en las barras lisas (hoy día prácticamente en desuso) y varía apreciablemente con el estado de su superficie. En el caso de barras corrugadas o nervuradas, a este rozamiento se añade el efecto de acuñaamiento del hormigón entre los resaltes, el cual es de fundamental importancia. Es claro que el mecanismo de adherencia es muy complejo y es función de la adhesión, rozamiento (tensiones tangenciales en el hormigón) y del efecto de acuñaamiento o trabazón originado por las nervaduras del acero, ver Figuras 1 y 2. Este último efecto es de gran relevancia, dado que la evidencia experimental indica que existe una fuerte influencia de la geometría de las nervaduras, de la microrugosidad superficial de las barras de acero y de la presión radial de confinamiento que se produce como consecuencia del efecto químico del fraguado de la pasta cementicia. Dado que una de las principales hipótesis de cálculo de las estructuras de hormigón armado se basa en la adherencia perfecta entre los materiales hormigón y acero, es claro que el estudio del problema de adherencia es de fundamental importancia en el ámbito de la ingeniería civil, sobre todo considerando los diversos factores que pueden afectar el mecanismo de transferencia de carga entre ambos materiales, con la consiguiente pérdida de capacidad portante, reducción del grado de seguridad y durabilidad de las estructuras de hormigón armado. Diversos autores han estudiado el fenómeno, principalmente desde el punto de vista teórico y experimental, por lo que sus conclusiones son en general estrictamente aplicables a los casos particulares en estudio, y difíciles de generalizar para la amplia gama de situaciones que pueden presentarse en las estructuras reales. Es claro entonces que la capacidad mecánica de la interfase hormigón-acero es de fundamental relevancia, y por ende, la edad de carga juega un rol preponderante en el análisis, dado que la evolución de la

resistencia de la pasta de cemento es función del proceso de hidratación, el cual a su vez depende de un complejo acoplamiento termo-químico-mecánico, el cual se conoce en general como proceso de fraguado del hormigón, y depende de varios factores relativos a la composición química de la mezcla, el tipo de cemento, la relación agua/cemento, condiciones ambientales, espesor de la pieza, temperatura, etc. ver Figuras 3 y 4. Si la estructura entra en carga durante el desarrollo de esta etapa de fraguado, y en particular, durante los primeros 21 días, el desarrollo de las fuerzas de anclaje y adherencia de las barras de acero en el hormigón será función de la evolución del proceso de fragüe o maduración que ocurre en la masa de aquel material. En este trabajo, dicho fenómeno se estudia sobre la base de un criterio numérico-computacional por medio del Método de los Elementos Finitos a nivel mesomecánico, con énfasis en el estudio del comportamiento micromecánico de interacción que se presenta en la zona de transición interfacial (ITZ – *Interfacial transition zone*) entre hormigón y acero, zona en la cual se presenta el efecto más relevante del fenómeno. La no-linealidad del fenómeno se modela considerando una ley constitutiva visco-elastoplástica de junta o interfase, ver Lorefice et al (2006, 2007, 2008), basada en el modelo viscoso de Perzyna (1966), lo cual permite una adecuada simulación de la zona de transición interfacial entre la barra de acero y el hormigón circundante, permitiendo la inclusión de efectos tiempo-dependientes en el proceso de fractura del material. Los primeros investigadores que estudiaron el fenómeno consideraron que la adherencia entre el acero y el hormigón era una interacción perfecta sin deslizamientos relativos entre estos dos materiales. Morsch (1908) distinguió dos tipos de fallas de adherencia, el *pull-out*, y el *splitting*. Abramsin (1913) señala que la tensión de adherencia es función del desplazamiento relativo de la barra respecto al hormigón en el cual se encuentra embebida. Tepfers (1973) afirma que la transferencia de tensiones desde la barra embebida al hormigón se produce mediante fuerzas inclinadas de compresión según un ángulo  $\alpha$ , ver Figura 1. La componente radial de esta fuerza se equilibra mediante un anillo de fuerzas de tracción que provocan fisuras internas, ver Figura 2. Según las condiciones de confinamiento de la barra, el fallo se puede producir por *splitting*, fisuración del recubrimiento, o por *pull-out*, deslizamiento de la barra. De acuerdo con Cairns (1995), la falla por fisuración del recubrimiento se origina cuando el mismo es menor que tres veces el diámetro de la barra, ya que al aumentar la carga las fisuras se propagan radialmente y un mayor recubrimiento retrasa la aparición de fisuras en la superficie. Diversos autores estudiaron los mecanismos en los que se basa el fenómeno de adherencia, ver Lutz y Gergely (1967), Goto (1971), Tepfers (1973), Orangun et al. (1977), Eligehausen et al. (1983). En general, una barra lisa embebida en un elemento de hormigón permanece adherida debido fundamentalmente a la adhesión química entre los dos materiales y al rozamiento. Si la longitud de anclaje no es suficiente, se produce un deslizamiento de la barra. Sin embargo, si la longitud es suficiente, se consigue transferir las tensiones de tracción desde la barra embebida al hormigón. A medida que la carga aumenta, la adhesión química se deteriora y permanecen las tensiones de rozamiento entre el hormigón y el refuerzo.

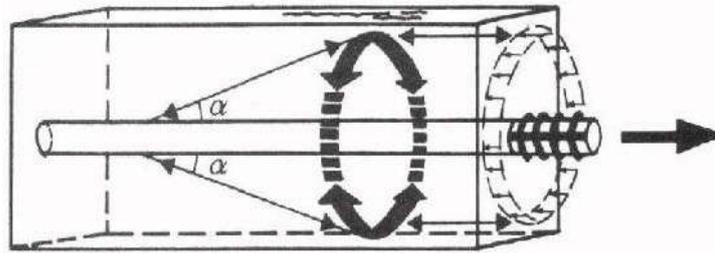


Figura 1. Fuerzas de adherencia equilibradas por anillo de tracción, Tepfers (1973).

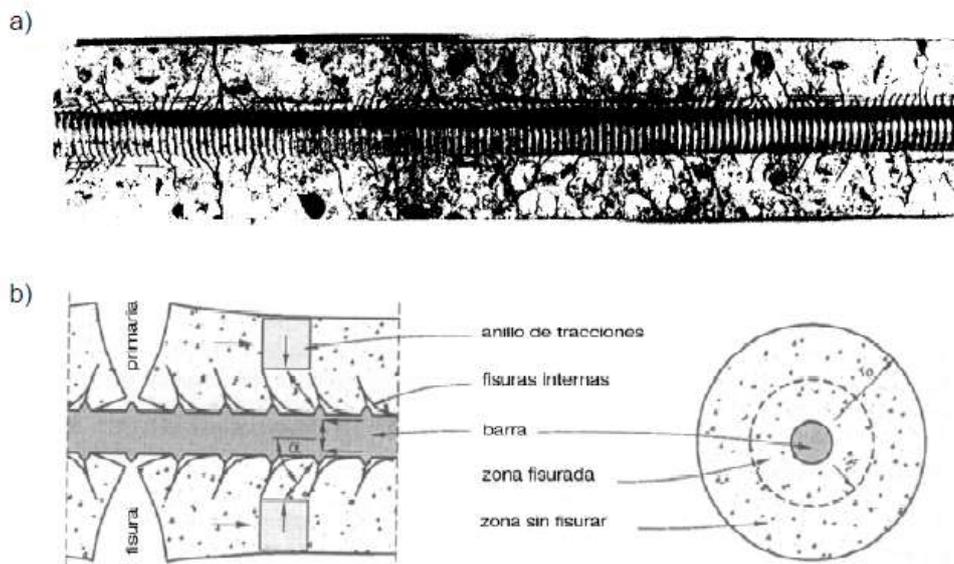


Figura 2: a) Fisuras primarias y secundarias alrededor de una barra de acero, b) Mecanismo de fisuración alrededor de la barra luego de formadas las fisuras internas (Goto, 1971)

Lutz y Gergeley (1967) y Goto (1971) describen los mecanismos básicos de adherencia y la formación de los diferentes tipos de fisuras debidas a fallos de la adherencia, clasificándolas en: primarias, secundarias y longitudinales. La Figura 2 a) presenta la sección longitudinal de una probeta de hormigón cilíndrica en un ensayo de *pull-out* seccionada longitudinalmente por el plano de una fisura de recubrimiento. En la Figura 2 b) aparece la fisuración del hormigón: la fisura primaria (de longitud  $r_0$ ), que alcanzan la superficie y, las secundarias (fisuras transversales internas de longitud  $r_i$ ). Los principales mecanismos de adherencia entre el hormigón y el acero de refuerzo, pueden resumirse como sigue:

- **Adhesión:** la tensión de adherencia se debe a la interconexión físico química de partículas de la pasta de cemento con la rugosidad de la superficie de contacto de armadura.

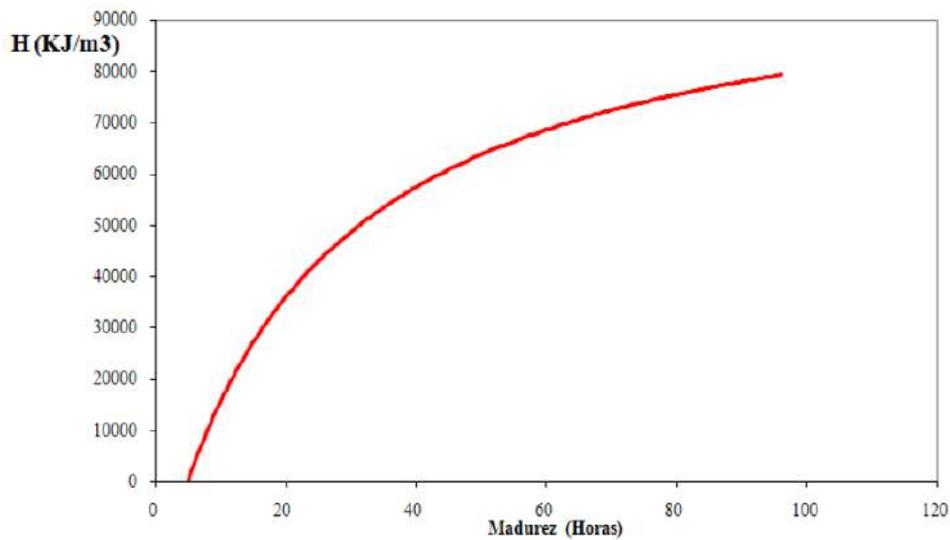


Figura 3: Calor de hidratación versus maduración (Rizo patrón et al, 2011)

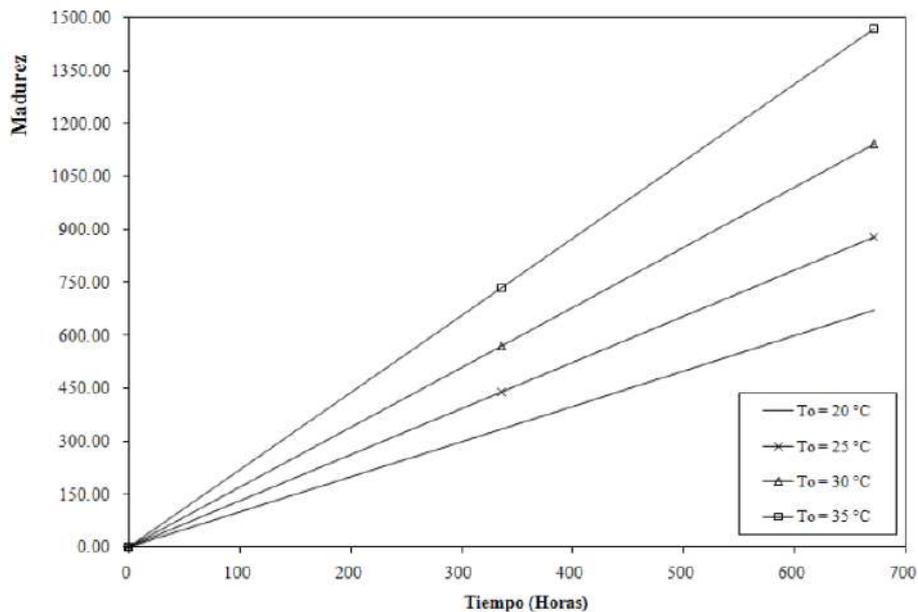


Figura 4: Evolución de la madurez en función de la temperatura (Rizo patrón et al, 2011)

- *Rozamiento*: la adhesión se anula conforme aumenta la carga aplicada, y la adherencia por rozamiento toma parte del fenómeno, donde la característica que lo controla es la superficie de la barra, con sus irregularidades.
- *Interacción Mecánica*: conforme se incrementa la carga aplicada, el comportamiento del elemento se modifica, aumentando considerablemente el deslizamiento de la barra debido a la fisuración interna, por lo que en esta fase el nivel de confinamiento influye considerablemente, al igual que el recubrimiento, la cuantía de armadura transversal, nivel de tensión, etc.

## Ensayos de pull-out típicos

Con el fin de estudiar el fenómeno se plantearon diversas configuraciones de ensayos de extracción directa o pull-out con el objetivo de recrear una distribución uniforme de la tensión de adherencia a lo largo de una barra de acero embebida en hormigón. La longitud adherida de la barra se ha establecido en  $5\phi$  como máximo, por lo que este tipo de pruebas se denominan ensayos sobre longitudes cortas. Rehm (1961), propone un ensayo con probeta cubica de hormigón con una única barra de acero embebida centrada, Figura 5a. En este ensayo la zona adherida se encuentra en la zona central de la barra, lo cual genera excesiva fricción entre la placa de apoyo y la probeta, y el desarrollo de un efecto arco que interfiere con la zona adherida de la barra. El comité RILEM (1970) propone una modificación al ensayo de Rehm para subsanar estas falencias, modificando la ubicación de la zona adherida de modo de alejarla de la zona central colocando un elemento flexible para evitar la fricción entre la probeta y la placa, Figura 5c. Otro ensayo, es el propuesto por Losberg (1979), en el que el efecto arco se reduce disminuyendo la excentricidad de la fuerza de reacción distribuida con respecto al eje de la barra a través de un anillo que se inserta entre la probeta y la placa, Figura 5b. Rehm y Eligehausen (1979), modifican el ensayo original de Rehm adoptando probetas cilíndricas en donde el efecto arco se reduce significativamente, ver Figura 5d. Estos ensayos poseen en común una longitud de adherencia corta, aislando la barra mediante tubos plásticos o parafina en el resto de la longitud de contacto.

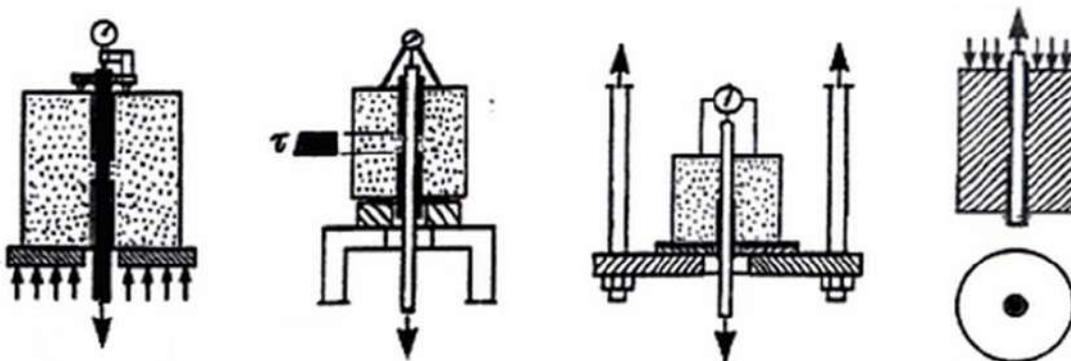


Figura 5. Ensayos de Pull-out a) Rehm, b) Losberg, c) RILEM/CEB/FIP, d) Rehm y Eligehausen.

El ensayo de interés para este trabajo es el propuesto por RILEM/CEB/FIP, basado en probeta cubica con una única barra centrada, con las siguientes características (Figura 6):

- Probeta es cubica de  $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ ,
- Barra de 12 mm de diámetro, sección transversal de  $1.13 \text{ cm}^2$ .
- La zona adherida tiene una longitud de  $5\phi$ , o sea, 60 mm.
- Carga en extremo inferior de la barra.
- Placa flexible entre placa de apoyo y probeta.

El hormigón de prueba posee una resistencia característica  $f_{ck} = 30$  MPa, con módulo de elasticidad longitudinal  $E = 34000$  MPa. El acero de refuerzo es de calidad BS 400 con módulo de elasticidad  $E = 200000$  MPa. El ensayo consiste en ejercer mediante un gato hidráulico una fuerza en el extremo inferior de la barra a velocidad controlada, la cual según *CEB Bulletin d'Information* Nro. 13 (1983), para una barra de 12 mm de diámetro es  $v = 72$  N/seg. La longitud adherida para esta barra es de 60 mm, y como se puede observar en la Figura 6, la zona de adherencia se encuentra en la parte superior de la probeta, alejada de la zona central para evitar que el efecto arco interfiera en el fenómeno. En la Figura 6 se puede observar un esquema de este ensayo normalizado de pull-out.

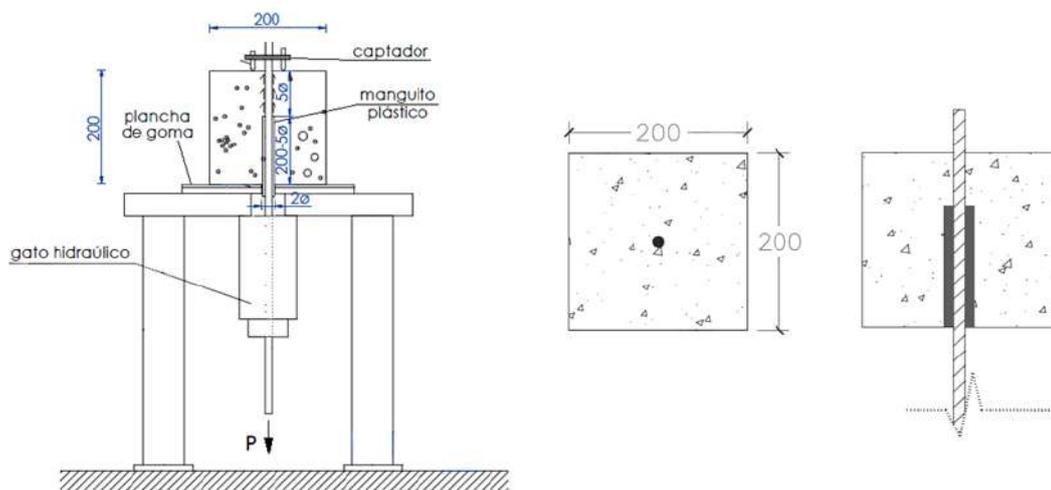


Figura 6: a) Disposición ensayo RILEM b) Longitud embebida probeta

### MODELO ELASTO-VISCOPLASTICO DE INTERFASE

Con el fin de modelar el comportamiento no-lineal de interacción mecánica en la zona de transición interfacial entre el hormigón y el acero se considera una ley constitutiva hiperbólica elasto-viscoplástica de junta apta para simular procesos de falla tiempo/tasa dependientes, ver Lorefice et al (2008). La condición de máxima resistencia se define en el marco de la Teoría Viscoplastica de Perzyna (1966), introduciendo un término adicional en la función de fluencia invíscida de modo de introducir el efecto tasa/tiempo (se considera un exponente de Perzyna  $N=1$ )

$$F = \tau^2 - (c - \sigma \tan \phi)^2 + (c - \chi \tan \phi)^2 - \dot{\lambda} \eta \quad (1)$$

En la ecuación (1),  $\tau$  y  $\sigma$  representan las componentes tangencial y normal del vector tensión “ $t$ ” sobre la interfase en estudio, “ $c$ ” es la cohesión aparente,  $\phi$  el ángulo de fricción interna, mientras que  $\chi$  es la tensión de tracción uniaxial. El parámetro  $\dot{\lambda}$  representa la tasa del multiplicador viscoplastico y  $\eta$  la viscosidad aparente del material. La ecuación (1) implica un criterio no-lineal de máxima resistencia dependiente de la velocidad de aplicación de la carga, cumpliendo a la vez con las condiciones de consistencia clásicas formuladas por Kuhn-Tucker, recuperándose la

formulación elastoplástica (invíscida) si el parámetro de viscosidad  $\eta$  toma valor nulo. La tasa de liberación de energía durante el desarrollo del proceso de fractura tiempo-dependiente se puede expresar como:

$$\dot{q}^{vcr} = \mathbf{t}^T \dot{\mathbf{u}}^{vcr} \quad (2)$$

Los desplazamientos críticos tiempo-dependientes se expresan en términos de la función de potencial viscoplástico  $Q^{vcr}$  definida a partir de la superficie de fractura  $F$ , la matriz de no asociatividad  $\mathbf{A}$  y los gradientes a la superficie de fluencia:

$$\dot{\mathbf{u}}^{vcr} = \lambda \mathbf{A} \mathbf{n} \quad (3)$$

El gradiente de la función de fluencia viscoplástica  $\mathbf{n}$  se define como:

$$\mathbf{n} = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{t}} = \left[ \frac{\partial F}{\partial \sigma}, \frac{\partial F}{\partial \mathbf{t}} \right]^T = [2 \tan \phi (c - \sigma \tan \phi), 2\tau]^T \quad (4)$$

$\mathbf{A}$  es una matriz de transformación que introduce la pérdida de normalidad durante la evolución de apertura de fisura  $\dot{\mathbf{u}}^{vcr}$  en la forma:

$$\mathbf{A} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, & \text{Si } \sigma \geq 0 \\ \begin{pmatrix} f_{\sigma}^{dil} f_c^{dil} & 0 \\ 0 & \left(1 - \left| \frac{\sigma \tan \phi}{\tau} \right| \right) \end{pmatrix}, & \text{Si } \sigma < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Donde:

$$f_{\sigma}^{dil} = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{dil}} \quad (6)$$

$$f_c^{dil} = 1 - \frac{c}{c_0} \quad (7)$$

La solución del problema se plantea a partir de la condición de consistencia viscoplástica en la forma:

$$\dot{F} = \mathbf{n}^T \dot{\mathbf{t}} + \bar{r} \dot{q}^{vcr} + s \dot{\lambda} = 0 \quad (8)$$

con:

$$\mathbf{r} = \left( \frac{\partial F}{\partial c} \frac{dc}{dq^{vcr}} + \frac{\partial F}{\partial \chi} \frac{d\chi}{dq^{vcr}} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial F}{\partial c} = 2 \tan \phi (\sigma - \chi) \quad (10)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \chi} = -2 \tan \phi (\sigma - \chi \tan \phi) \quad (11)$$

$$\frac{dc}{dq^{vcr}} = - \frac{c_0 e^{-\alpha c} G_f^{II}}{[(e^{-\alpha c} - 1) q^{vcr} + G_f^{II}]^2} \quad (12)$$

$$\frac{d\chi}{dq^{vcr}} = - \frac{\chi_0 e^{-\alpha \chi} G_f^I}{[(e^{-\alpha \chi} - 1) q^{vcr} + G_f^I]^2} \quad (13)$$

$$s = -\frac{\partial \varphi^{-1}(\eta\lambda)}{\partial \lambda} = -\eta \quad (14)$$

Donde  $G_I^I$  y  $G_I^{II}$  representan la energía de fractura en Modo 1 (falla por tracción pura), y en Modo 2a (estado tensional de corte y alta compresión sin dilatación), respectivamente. Durante el proceso de carga, la degradación de los parámetros de resistencia evoluciona en función de las expresiones dadas en las ecuaciones (12), (13) y (14) conjuntamente con el tiempo de maduración del hormigón. La solución del problema no lineal se realiza mediante el Método de Newton-Raphson con la estrategia de proyección al punto más cercano o Closest Point Projection Method (CPPM), ver Loreñice et al. (2008).

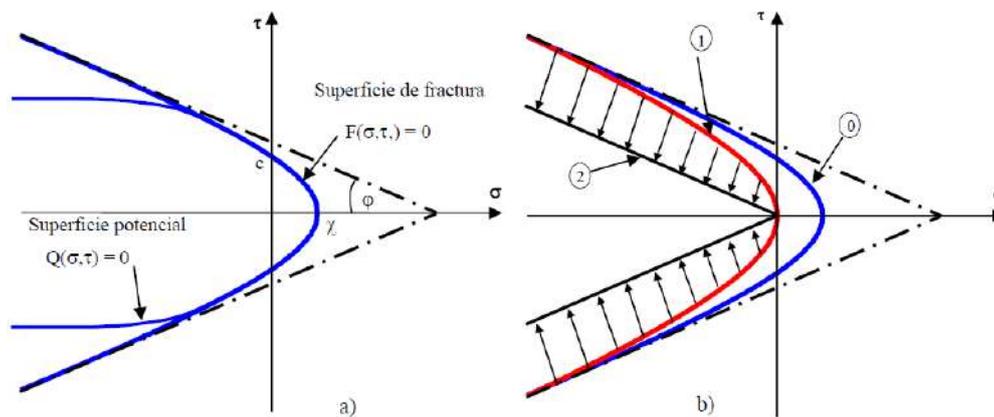


Figura 7. Superficie de fractura - modelo elasto-viscoplastico de interfase

## ENSAYOS NUMERICOS A NIVEL MESOMECANICO

Se consideran dos mallados de diferente nivel de refinamiento, combinando en ambos tanto elementos de continuo como elementos de interfase de espesor nulo. El procedimiento de generación de la geometría básica se realiza empleando el software FEAP (*Finite Element Analysis Program, R.L Taylor, Berkeley University*). Sobre esta geometría básica se incorporan los elementos de interfase de espesor nulo de 4 nodos mediante un algoritmo especialmente diseñado en lenguaje de programación C, el cual permite generar la inclusión de los elementos finitos de junta a partir de una malla de elementos triangulares o cuadriláteros convencionales. La malla gruesa posee 45 elementos de continuo en total, de los cuales 40 son triangulares y representan el material hormigón, mientras que 5 son elementos cuadriláteros (Q4) que representan la barra acero embebida. Luego de la generación de los elementos de interfase a través del algoritmo propio, la geometría resultante posee 132 nodos, y 50 juntas, en las que 46 representan la zona de transición interfacial entre hormigón y acero. La zona de transición interfacial se modela introduciendo elementos de interfase de contacto entre los elementos finitos convencionales de hormigón y acero, según el esquema de ensayo experimental, ver Figura 8. La malla fina, por su parte, se compone de 210 elementos de continuo, de los cuales 200 son elementos triangulares representativos del hormigón y 10 elementos Q4 para la modelación de la barra de acero, Figura 8b. Luego de la generación de juntas, resultan 622 nodos. Entre los elementos de hormigón se

definieron 270 elementos de interfase de espesor nulo. Entre los elementos de continuo de la barra de acero, al igual que en el caso de la malla gruesa, no se colocaron elementos de interfase. En la zona de contacto hormigón-acero, se definieron 8 elementos de interfase.

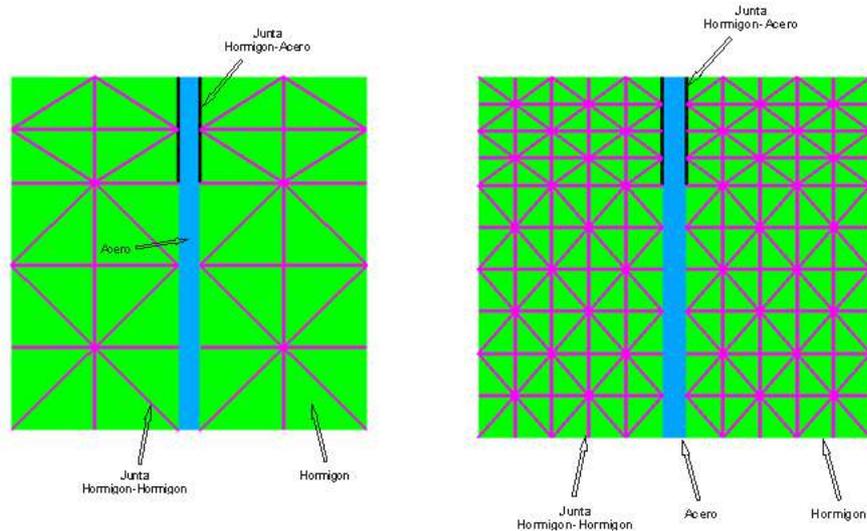


Figura 8: a) disposición de malla Gruesa. b) disposición en Malla Fina

De acuerdo con la configuración de ensayo experimental del RILEM, la probeta reposa sobre una placa flexible que le permite desplazarse horizontalmente, a fin de evitar que se genere un estado de tensiones complejo debido a la resistencia a la fricción entre placa de apoyo y probeta. Esta condición se reproduce en los modelos numéricos, en los que se restringe solo el desplazamiento vertical, mientras que el desplazamiento horizontal solo se restringe en un nodo de borde, Ver Figura 9. En ambas mallas, gruesa y fina, las restricciones se colocaron a los nodos pertenecientes a los elementos de continuo de hormigón.

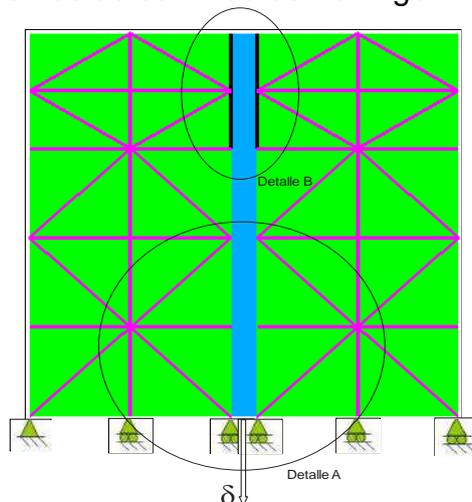


Figura 9. Malla Gruesa, condiciones de borde.

En Figura 10 a) se ilustra el punto de aplicación de los desplazamientos. El control de desplazamiento se ejerce en los nodos inferiores de la barra de acero, mientras que en figura 10b) se muestra la zona adherida de la barra en contacto con el hormigón, en la zona superior de la probeta de longitud de  $5\phi = 5 \times 12 = 60 \text{ mm}$

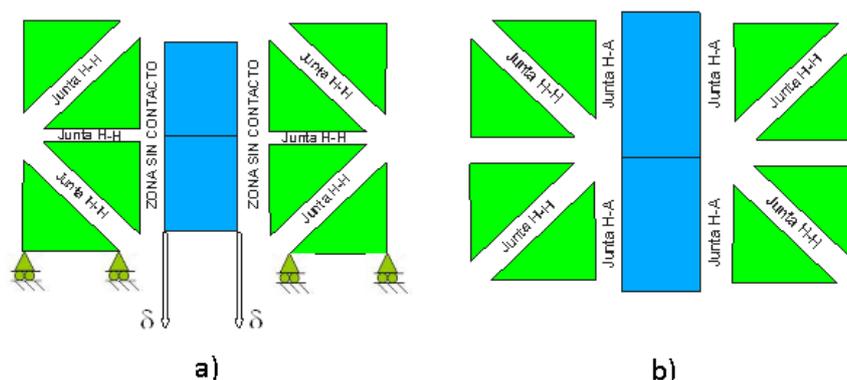


Figura 10. a) Aplicación de desplazamientos b) – zona de adherencia

### Parámetros materiales del ensayo numérico

Los elementos finitos convencionales representativos del medio continuo responden a una ley elástica lineal, mientras que los elementos de interfase obedecen a la ley de juntas no lineal elasto-viscoplástica definida por la ecuación (1). En el ensayo numérico de calibración y referencia a la edad de 28 días, se considera un módulo de elasticidad del hormigón  $E = 34000 \text{ MPa}$  y un coeficiente de Poisson  $\nu = 0.2$ , mientras que para el acero  $E = 200000 \text{ MPa}$  y  $\nu = 0.3$ . Los parámetros de rigidez elástica normal y tangencial de las juntas hormigón - hormigón (Juntas H-H), se consideraron los siguientes:  $E_N = 1E6 \text{ MPa/m}$ ,  $E_T = 1E6 \text{ MPa/m}$ , resistencia a tracción uniaxial  $\chi_0 = 5.0 \text{ MPa}$ , cohesión  $c = 15.0 \text{ MPa}$ ,  $G_r^I = 0.07 \text{ N/mm}$ ,  $G_r^{II} = 0.70 \text{ N/mm}$ . Para las juntas hormigón-acero (Juntas H-A), se consideraron los siguientes parámetros materiales:  $E_N = 1E6 \text{ MPa/m}$ ,  $E_T = 2.4E4 \text{ MPa/m}$ ,  $\chi_0 = 1.5 \text{ MPa}$ ,  $c = 4.5 \text{ MPa}$ ,  $G_r^I = 0.03 \text{ N/mm}$ ,  $G_r^{II} = 0.30 \text{ N/mm}$ . A fin de comparar los resultados numéricos, se ha consultado la normativa internacional vigente en cuanto a los valores que alcanza la resistencia última de adherencia de acuerdo con el Eurocódigo 2 y ACI 318-08.

### RESULTADOS COMPUTACIONALES

Los análisis computacionales se llevaron a cabo mediante el software DRAC (versión 2007, UPC/CMAE-UNSE) el cual incorpora la ley de junta elasto-viscoplástica descrita anteriormente. Los resultados del ensayo a los 28 días se resumen en las curvas que se muestran en las Figuras 11 y 12 en donde se puede observar que la tensión de adherencia local alcanza, para la malla gruesa en los elementos de interfase hormigón-acero, un pico de  $3.07 \text{ MPa}$  para un desplazamiento relativo en la zona superior de la probeta de  $0.0032 \text{ mm}$ . Para la malla fina, el pico de tensión es de  $2.78 \text{ MPa}$ , para un desplazamiento de  $0.0041 \text{ mm}$ .

Tabla 1. Resultados numéricos versus EC2.

Tipo de Malla	Tensión Adherencia Local [MPa]	CIRSOC 201 82 [MPa]	ACI 318 (2008) [MPa]	EC2 [MPa]	$\delta$ [mm]	P [kg]
Gruesa	3.07	4.0	5.50	3.0	0.0032	337.5
Fina	2.78				0.0041	336.3

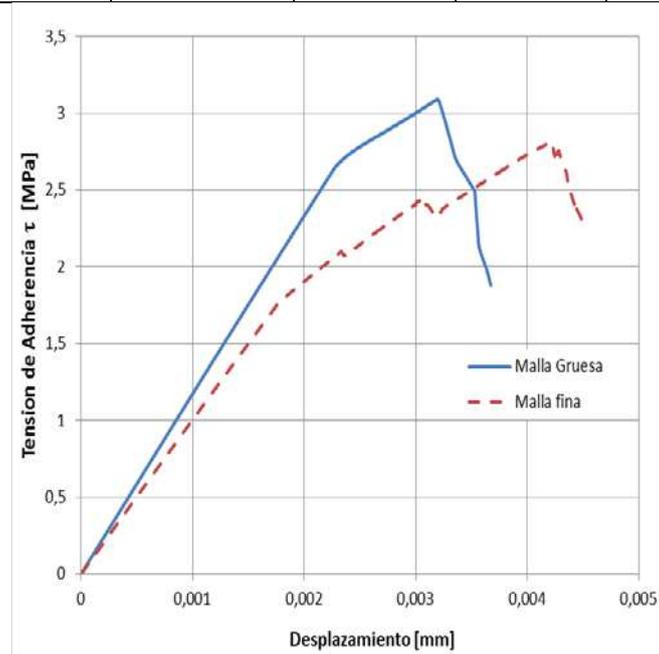


Figura 11. Curva Tensión Adherencia – Desplazamiento

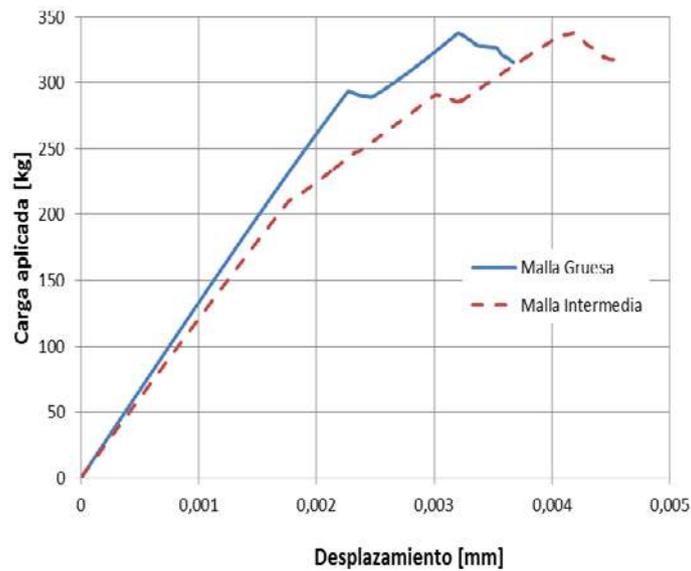


Figura 12. Curva Fuerza – Desplazamiento

El post-proceso de los resultados se completa por medio del software GID (CIMNE/UPC), a través de un mapeo de desplazamientos de las mallas generadas durante el preproceso de los datos de análisis obtenidos con el software DRAC. La geometría deformada y el patrón de energía disipada se ilustran en las Figuras 13 a 16, presentándose el mapeo de desplazamientos verticales en los elementos de medio continuo se ilustra en Figuras 17 y 18.

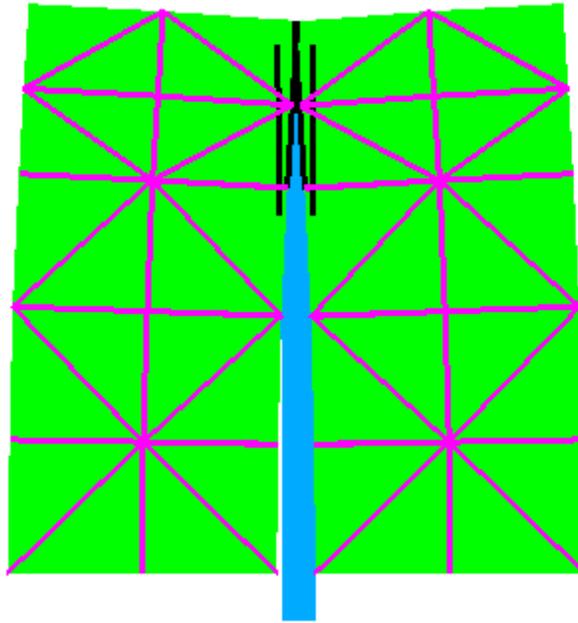


Figura 13. Malla gruesa deformada – Amplificación 500 veces

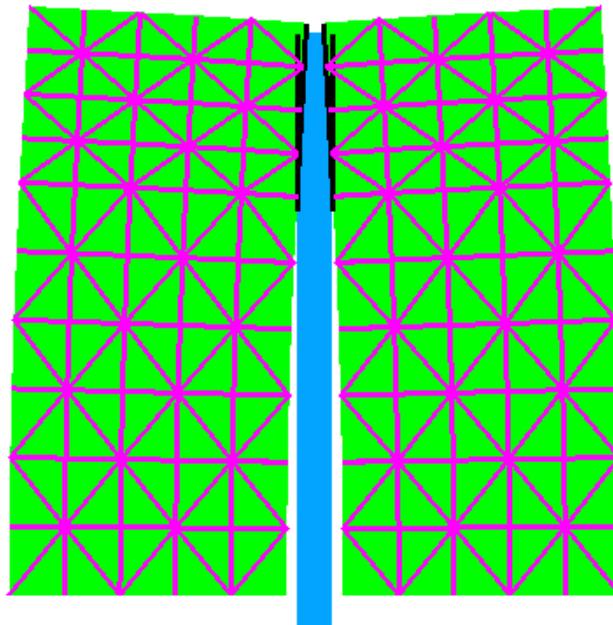


Figura 14. Malla fina deformada - Amplificación 500 veces

En estas figuras puede apreciarse que el modelo mesomecánico representa con buena precisión la geometría deformada observada durante el ensayo experimental, reproduciendo el fenómeno en forma cualitativa y coherente. En la zona superior, el hormigón comprime a la barra generando un fuerte régimen de presiones de confinamiento. Por otra parte, en la zona inferior, donde se aplican las condiciones de borde de la probeta, ésta se expande lateralmente, favorecida por la falta de restricción de desplazamientos horizontales en congruencia con la placa flexible que se dispone en los ensayos experimentales que permite la libre deformación en ese sentido.

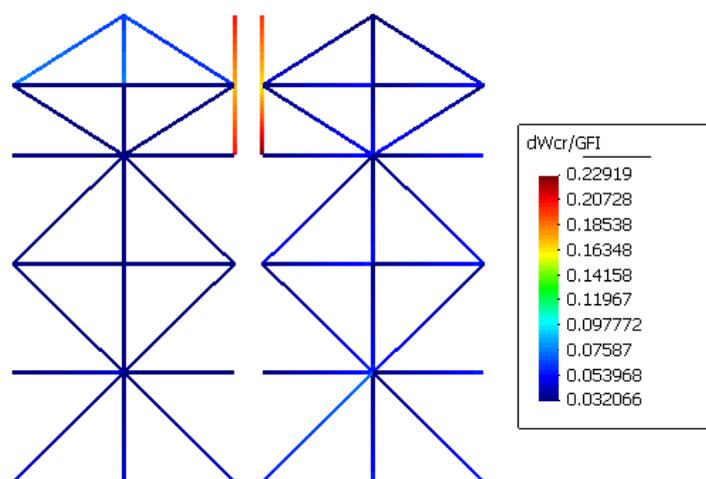


Figura 15. Energía disipada en elementos de interfase. Malla gruesa.

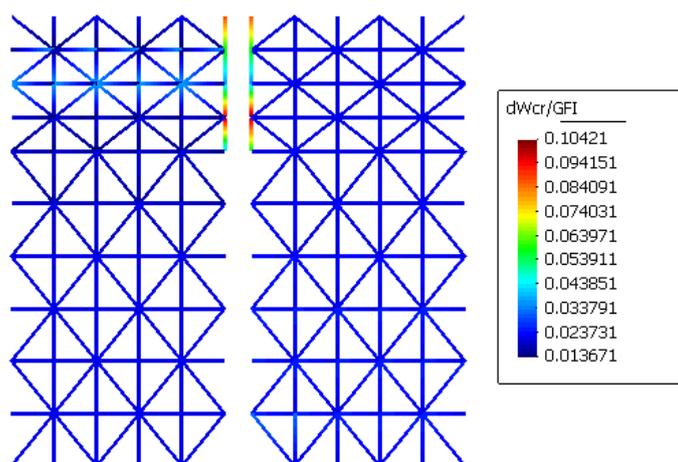


Figura 16. Energía disipada en elementos de interfase. Malla fina.

A partir de los patrones de fisuración obtenidos se puede concluir que la mayor disipación de energía se produce en las juntas que se encuentran en la zona interfacial hormigón-acero, tal cual ocurre en el ensayo experimental. Respecto a la deformación que experimenta la probeta, los mayores desplazamientos verticales se dan en la zona de adherencia en donde la longitud adherida es 60 mm, al igual que

ocurre en los ensayos experimentales disponibles en la bibliografía consultada. En las Figuras 19 y 20 se ilustran las tensiones tangenciales en las interfaces para ambas mallas en el paso de carga correspondiente al pico de tensión en las juntas hormigón-acero. Los resultados obtenidos con ambas mallas son consistentes entre sí y con los valores experimentales de referencia, ilustrando un patrón de comportamiento fuertemente no lineal del ensayo a medida que el mismo progresa, captando la degradación creciente de la resistencia de las interfaces hasta alcanzar el valor de carga máxima y posterior inicio del periodo de ablandamiento.

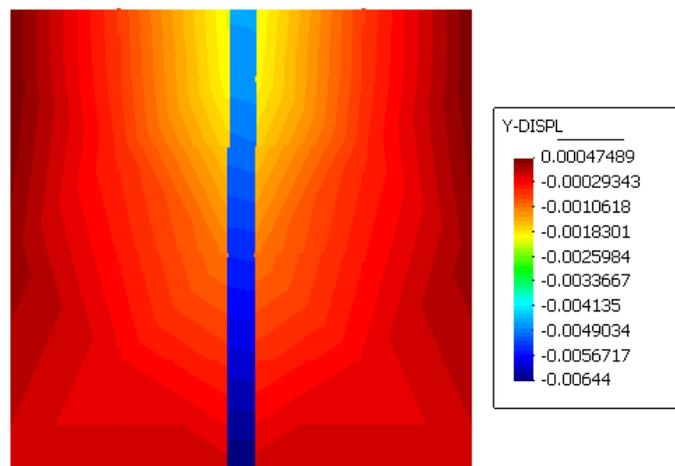


Figura 17. Malla gruesa, mapeo de desplazamientos verticales.

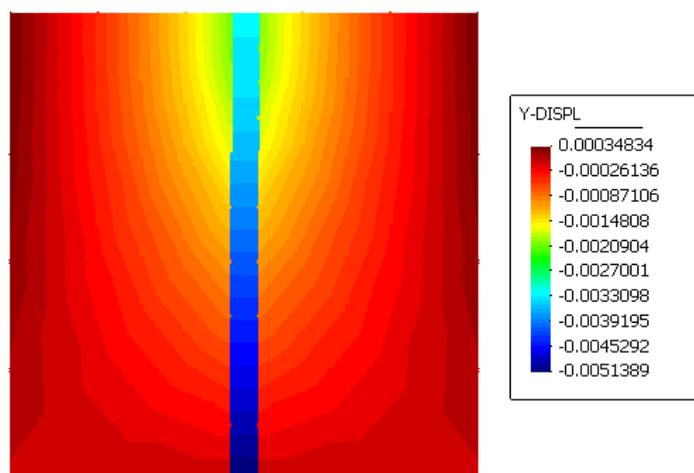


Figura 18. Malla fina, mapeo de desplazamientos verticales

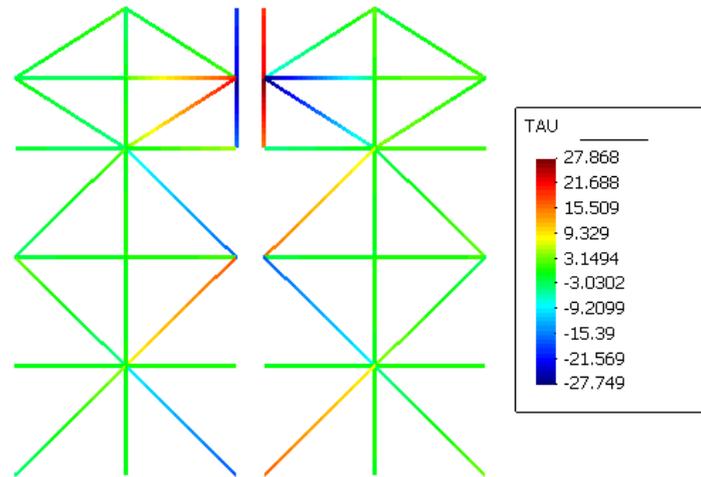


Figura 19. Malla gruesa, tensiones tangenciales en juntas

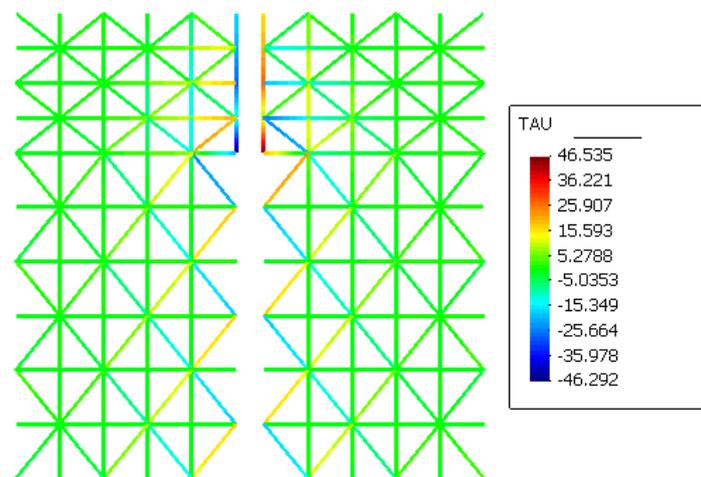


Figura 20. Malla fina, tensiones tangenciales en juntas.

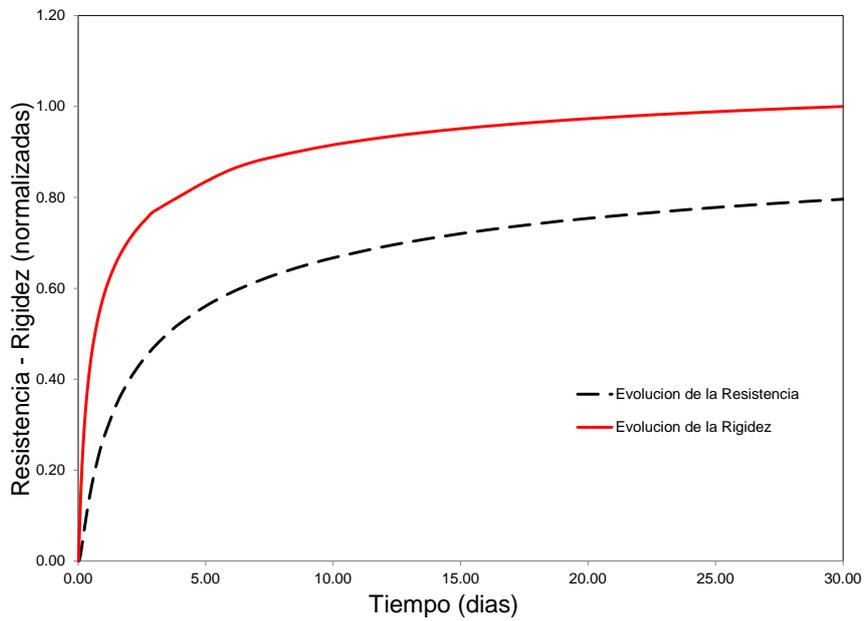


Figura 21: Evolución de la Rigidez y Resistencia en función de la madurez

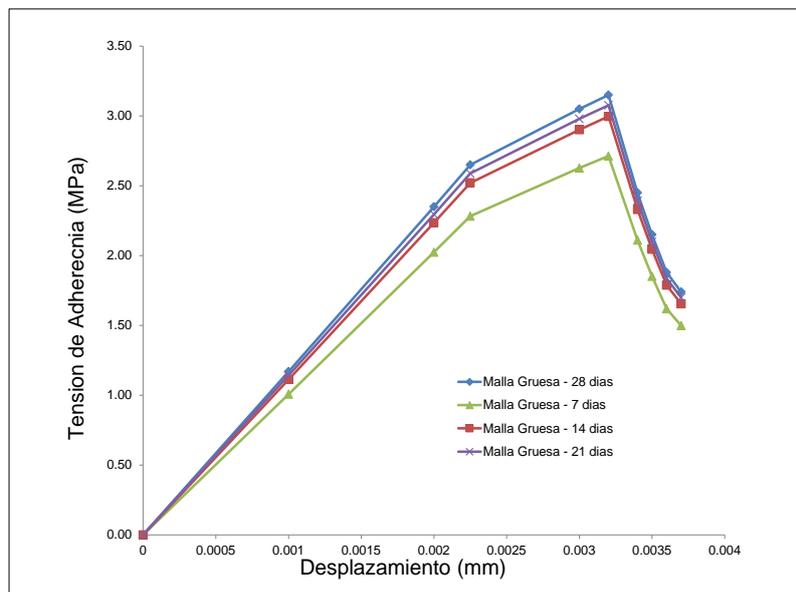


Figura 22: Malla Guesa, tensiones tangenciales a diferentes edades

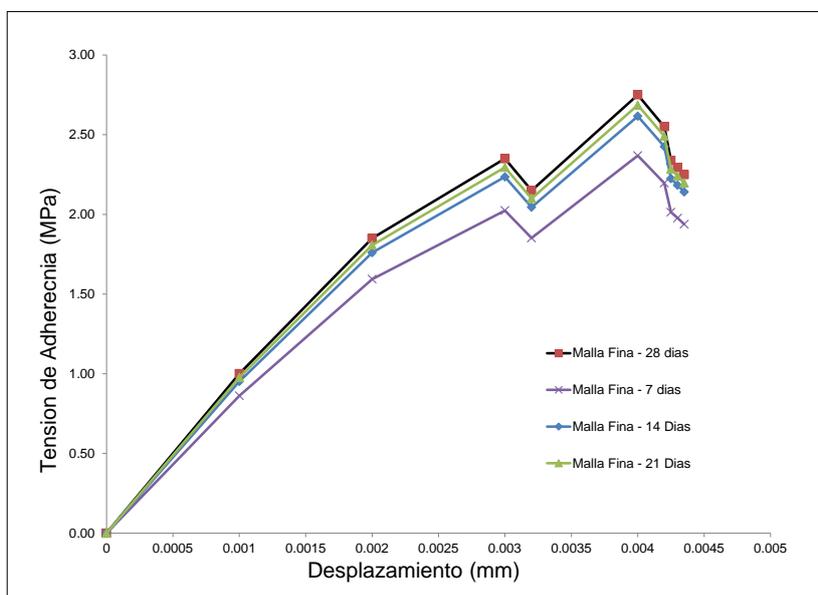


Figura 23: Malla Fina, tensiones tangenciales a diferentes edades

En Figura 21 se presenta la evolución de la rigidez material y de la resistencia media en función de la madurez, mientras que los resultados numéricos para las mallas gruesa y fina a diferentes edades de carga en términos de curvas desplazamiento – tensiones de adherencia se ilustran en Figuras 22 y 23. Los resultados computacionales muestran buena correlación con los datos de evolución temporal de la madurez disponibles en la literatura, conservando en principio la forma general de las curvas. Esto se debe a que en estos análisis, tanto la resistencia friccional como la resistencia a tracción del modelo de junta se han considerado tiempo-dependientes en idéntica forma, es decir, evolucionan en función de la madurez según la misma curva experimental, dado que no se cuenta con datos de ensayos diferenciados a nivel mesomecánico o micromecánico. Sin embargo, la evolución de ambas variables en principio puede ser diferente, ya que si bien la resistencia a tracción directa es claramente función de la edad del material, el coeficiente de fricción depende de otros factores además de la evolución de propiedades de envejecimiento del hormigón, tal como se ha indicado en la introducción de este trabajo. Este tema se encuentra actualmente en desarrollo, por lo cual los resultados anteriores revisten el carácter de preliminares, y se continúa trabajando en el desarrollo y calibración del modelo de interfase con el fin de lograr su validación con otros ensayos disponibles en la literatura.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado un criterio de modelación numérica a nivel mesomecánico por el Método de los Elementos Finitos del ensayo de extracción o *pull-out test* para estudio de la adherencia hormigón-acero considerando geometrías compuestas por mallas mixtas de elementos convencionales y elementos de junta de espesor nulo equipadas con una ley constitutiva elasto-viscoplástica de junta con evolución de parámetros a diferentes edades de carga. Los valores de tensiones de adherencia y cargas últimas obtenidos en las simulaciones numéricas guardan buena correlación con los rangos establecidos en la normativa y ensayos disponibles en la literatura, obteniéndose distribuciones de desplazamientos y tensiones cualitativamente consistentes con los indicados en los ensayos experimentales. Es de destacar que estos resultados son preliminares, restando aun tareas de calibración del modelo numérico y ajustes de modelación en las mallas a fin de reproducir con mayor precisión el complejo fenómeno de interacción mecánica en estudio, sobre todo a fin de tener en cuanto el efecto de las nervaduras de las barras de acero y la composición de fases de la mezcla de las probetas en estudio, lo cual conlleva en los ensayos experimentales a involucrar una zona de falla mucho más amplia que la restringida al plano de contacto directo entre el acero y el hormigón. Dichos aspectos introducen una diferencia sustancial en los resultados de los experimentos redundando en valores de carga última muy superiores a los obtenidos en las simulaciones computacionales, e incluso superiores a los indicados como límites en la normativa consultada.

## REFERENCIAS

- ACI 318-08, *Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario*, (versión en español y en sistema métrico), 2008.
- RILEM/CEB/FIP *Recommendations on reinforcement Steel for reinforced concrete. RC-6: Bond test for reinforcement Steel: 2. Pull-out test, Revised Edition*, 1983.
- Cairns, J., Jones. K., The Splitting Forces Generated by Bond. *Magazine of Concrete Research*. Vol. 47, N171, pags. 153-165. (1995).
- CIRSOC 201, *Proyecto, calculo y ejecución de estructuras de hormigón y armado y pretensado*, 1982.
- Eligehausen, R., Popov, E.P, Bertero, V., Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalised Excitations. College of Engineering, Univ. of California. Report UCB/EERC – 83/23 (1983).
- Eurocode 2, *Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings. European Standard*, PREN 1992-1-1, 2002.
- FEAP, *Finite Element Analysis Program*, R.L. Taylor, Berkeley University (2005).
- GID 7.5.3b, Pre and Postprocessor. International Center for Numerical Methods in Engineering, CIMNE.
- Goto, Y., Crack Formed in Concrete around Deformed Tension Bars. *ACI Journal*, Vol. 68, N4, pags. 244-251.
- Loreface, R., Etse, G., Lopez, C. y Carol I., *Mesomechanic Analysis of Time Dependent Concrete Behavior*, EURO-C 2006, Computational Modeling of

- Concrete Structures, Mayrhofen, Austria, 2006.
- Lorefice, R., *Modelación de la respuesta dinámica del hormigón mediante los criterios meso y macro mecánicos*, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina, 2007.
- Lorefice, R.H. & Etse, G., & Carol, I., *Viscoplastic approach for Rate-Dependent Failure Analysis of concrete joints and interfaces*, International Journal of Solids and Structures, 45:2686-2705, 2008.
- Losberg, A., Olsson, P.A., Bond Failure of Deformed Reinforcing Bars Based on the Longitudinal Splitting Effect of the Bars. ACI Journal, Vol. 76, N1, págs. 5-18 (1979).
- Lutz, L.A., Gergely, P., Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete. ACI Journal, Vol. 76, N1, págs. 19-46 (1967).
- Perzyna, P., *The constitutive equations for rate sensitive materials*, Quarterly of Applied Mathematics, 20:321-332, 1963.
- Orangun, C.O., Jirsa, J.O., Breen, J.E., Re-evaluation of test data on development length and splices. ACI Journal, Vol. 74, N3, págs. 114-122 (1977).
- Tepfers, R., *A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars*, 328. Doctoral Thesis. Ed. Chalmers University of Technology. Division of Concrete Structures, Goteborg, Sweden, Publication 73:2, 1973.
- Tepfers, R. & Olsson, P.A., *Ring test for evaluation of bond properties of reinforcing bars*. Proceedings International Conference Bond in Concrete: from Research to Practice, CEB-RTY, Riga Technical University, Riga, Latvia, 1-89 – 1-99, 1992.
- Rizo Patrón, M, Lorefice, R. y Etse, G., Evaluación de Falla en Estructuras Masivas de Hormigón Armado en Edades Tempranas. ENIEF 2011. Págs. 813-826. Rosario, Argentina (2011).