

La adherencia en el concreto reforzado: breve revisión histórica de la investigación del fenómeno

Steel-concrete bonding phenomenon:
a brief review of the phenomenon's research

Norberto Domínguez Ramírez¹

Revisión Científica

Domínguez Ramírez, N., La adherencia en el concreto reforzado: breve revisión histórica de la investigación del fenómeno. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 58, 61-72, 2013.

RESUMEN

La interacción acero-concreto (o "adherencia") es un fenómeno de vital importancia para las estructuras de concreto reforzado, al ser clave en la transferencia de esfuerzos entre las varillas de acero y el concreto circundante. La comprensión de dicho fenómeno ha sido objeto de arduas investigaciones llevadas a cabo desde los albores de la construcción y un sinnúmero de éstas se han realizado para incluir su influencia en el análisis, diseño y reglamentación de estructuras de concreto reforzado. En este trabajo se hace una revisión cronológica de dichas investigaciones, iniciando con la invención del concreto en la época romana, pasando por la incorporación del acero de refuerzo en su composición en el Siglo XIX, y continuando con los principales trabajos de investigación experimental y numéricos desarrollados en el Siglo XX.

Palabras clave: adherencia acero-concreto, concreto reforzado, análisis histórico, experimentación, modelación numérica, reglamentación.

Keywords: steel-concrete bonding, reinforced concrete, historic analysis, experiments, numerical modeling, design rules.

Recibido: 1 de Noviembre de 2012, aceptado: 10 de Abril de 2013

¹ Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, norberto_dominguez_mx@yahoo.com.mx

ABSTRACT

Steel-concrete bonding is an essential phenomenon for Reinforced Concrete structures (RC), because it allows the transfer of efforts between steel bars and concrete, guarantying a homogeneous behavior of the mixed material. The comprehension of this phenomenon has been a long task of research since the beginning of the Reinforced Concrete construction, and a great number of scientific works has been made in order to include its influence in the RC analysis and designing rules. The aim of this work is to review the research's evolution of bonding, starting with the concrete's invention by Roman civilization, passing by the European builder's rediscovery in the XIXth century, which incorporated the steel reinforcement into the concrete, and continuing with the main research works on bonding (experimental and numerical) developed during the XXth century.

INTRODUCCIÓN

Como material estructural y de construcción, el concreto reforzado constituye una de las mayores aportaciones tecnológicas de finales del Siglo XIX que ha permitido un importante desarrollo de la infraestructura desde entonces hasta nuestros días, permeado a todos los niveles sociales y económicos y rebasado las fronteras internacionales. Esta expansión proviene de la capacidad del concreto en adaptarse a las formas geométricas más diversas durante su etapa de fraguado, para después solidificarse y con ello favorecer la construcción de estructuras más esbeltas y resistentes -si se compara con la tradicional mampos-

tería-, y más económicas y sencillas de fabricar -si se compara con el acero estructural.

En el caso particular del concreto reforzado, el comportamiento global del conjunto es el resultado de la combinación de varios componentes materiales que interactúan a diferentes escalas, generando localmente fenómenos de disipación (como el agrietamiento del concreto o la plastificación del acero de refuerzo), asociados a la compatibilidad de deformaciones y a la transferencia de esfuerzos. Esto da origen a un fenómeno conocido como interacción acero-concreto o adherencia, el cual no es perfecto y al degradarse puede afectar el agrietamiento, disminuir la durabilidad, y modificar la respuesta dinámica del sistema estructural en su conjunto. Este trabajo tiene como objetivo presentar de manera breve una relación de diversos trabajos de investigación realizados en torno al fenómeno de adherencia y cómo dicha fenomenología ha sido considerada en el análisis y diseño de las estructuras de concreto reforzado.

¿Qué es la adherencia?

En la actualidad, el término adherencia se refiere al fenómeno de interacción física que se produce entre la masa de concreto y las barras cilíndricas de acero que se ahogan dentro de ésta, y que se localiza en la interfaz de estos dos materiales, permitiendo la transferencia y continuidad de esfuerzos y fuerzas entre los dos cuerpos en contacto, asegurando con ello un trabajo en conjunto. Según Domínguez (2005) el fenómeno presenta tres fases bien identificadas: (a) etapa de pseudo-adherencia perfecta, asociada a la adherencia química; (b) etapa de deslizamientos de transición, provocados por el microagrietamiento inducido por el bloqueo mecánico creado por la presencia de las nervaduras de la varilla de acero incrustadas en el concreto circundante; y (c) fase de grandes deslizamientos asociados a un mecanismo de fricción entre dos posibles superficies rugosas (acero-concreto o concreto-concreto) (Figuras 1, 2 y 3).

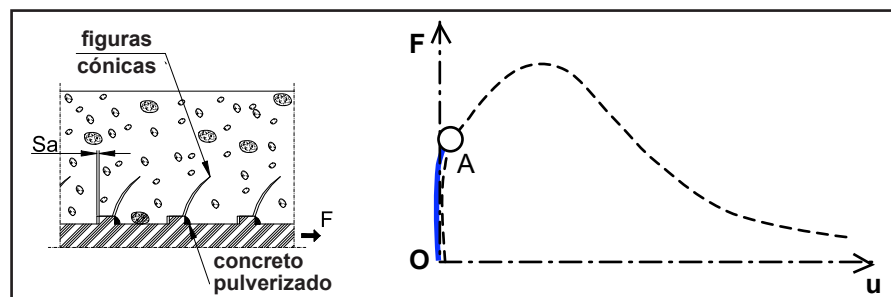


Figura 1. Agrietamiento del concreto y aparición de primeras microfisuras radiales, con pequeños deslizamientos entre superficies: límite de adherencia perfecta.

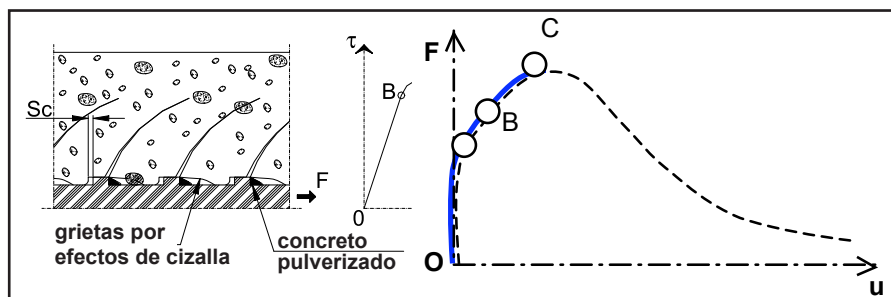


Figura 2. Aparición de grietas de cortante y propagación de fisuras radiales; transición de pequeños deslizamientos a grandes deslizamientos; degradación de la interacción mecánica por bloqueo entre concreto y nervaduras de acero (en caso de existir).

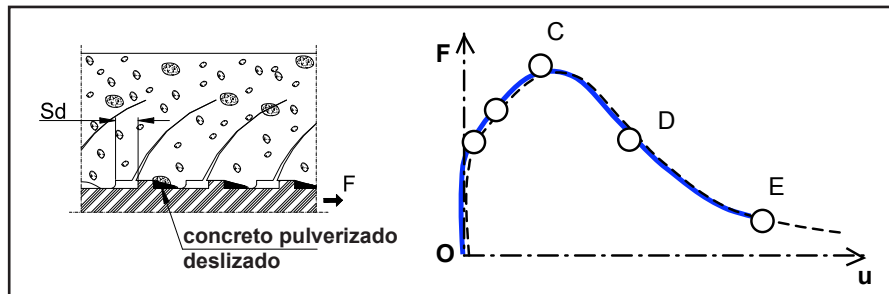


Figura 3. Coalescencia de grietas de cortante y redireccionamiento hacia una macrogrieta, con grandes desplazamientos de la barra de acero. La resistencia pospico es proporcionada por la fricción entre superficies de contacto.

De manera simplificada, el fenómeno también es conocido como "rigidez de tensión" (*tension stiffening*), que corresponde a la transformación de las fuerzas internas de tracción -desarrolladas internamente en la barra de acero- en esfuerzos superficiales de cortante -que aparecen en la superficie de las mismas barras-, transmitiéndose de ese modo al concreto circundante que tendrá que equilibrarlos, y viceversa. La respuesta del conjunto va a depender de la capacidad del concreto para deformarse tanto como el acero, ya que el acero tenderá a deslizarse al interior de la masa de concreto: el fenómeno de interacción corresponde precisamente a esta capacidad del concreto a deformarse y degradarse localmente que crea una especie de camisa o envoltura alrededor de la barra de acero, cuyas propiedades cinemáticas y materiales difieren notablemente respecto a las del concreto o a las del acero de refuerzo. Para una descripción más detallada del fenómeno de interacción, se recomienda consultar los trabajos de Domínguez (2005) y Domínguez e Ibrahimbegovic (2012).

Los orígenes del concreto reforzado

La referencia más antigua del concreto como material constructivo data del año 300 a.C. y es el conjunto de documentos escritos en la antigua Roma por Vitruvius (1960, 2000): el primer concreto consistió en una composición de hidróxido de calcio (cal), cenizas puzolánicas, pumita (piedra pómez) y rocas seleccionadas de un tamaño mayor. El mejor ejemplo que subsiste de esas primeras mezclas es el *Panteón Romano* (Figura 4), con un diámetro de 43.44 m, y un óculo al centro de 8.9 m de diámetro.

Después de 13 siglos en desuso, el concreto fue reintroducido en la construcción industrial en 1845 como material secundario para la protección contra fuego de estructuras de acero, las cuales esta-



Figura 4. A la izquierda, interior del Panteón romano según grabado del S. XVIII de Panini. A la derecha, detalle actual del óculo y de los casetones.

ban en apogeo a mediados del Siglo XIX. Hacia 1868, un jardinero de Versalles llamado J. Monier patenta un procedimiento para fabricar macetones florales, en el que inserta barras de acero en la mezcla de concreto, reinventando así al concreto reforzado y comercializándolo en Alemania a través de la empresa Monier Beton Brau. Hacia 1879, el ingeniero François Hennebique cuela en los alrededores de París la primera losa monolítica de concreto reforzada internamente con perfiles apertados de acero combinados con varillas lisas (Figura 5).

El nuevo sistema de piso se probó mediante la acumulación de una gran cantidad de bultos de arena. Una vez perfeccionado el sistema constructivo, se registra en Bruselas (el 9 de febrero de 1892) y posteriormente en París (patente número 223546 del 8 de agosto), la primera patente de concreto reforzado intitulada "*Combinación particular del metal y del cemento enfocada a la creación de viguetas muy ligeras de alta resistencia*" (Delhumeau, 1999).

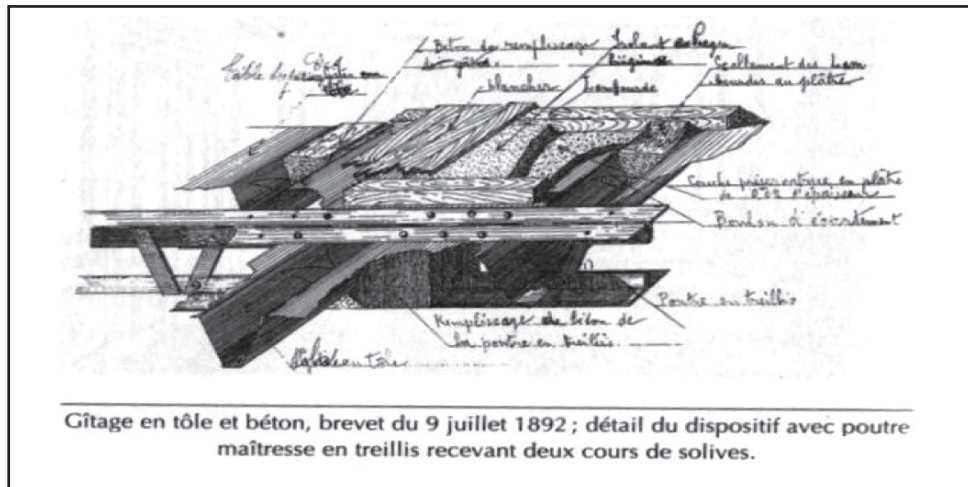


Figura 5. Interacción entre láminas de acero y concreto: detalle de dispositivo con viga maestra estilo armadura. Extracto de la patente del 9 de julio de 1892.

Primeros estudios científicos en torno a la adherencia

El primer trabajo conocido sobre el fenómeno de la adherencia data de 1899 y estuvo a cargo de Considère (Delhumeau, 1999), consistió en medir el desplazamiento de los extremos de unos cables o "hilos" de acero ahogados en un mortero, al ser sometidos a una carga de tensión: de esta prueba se deducía una relación de fuerza-desplazamiento que hasta los años cincuenta se impuso como la prueba estándar para la medición de la adherencia.

En 1958 Rehm (1957, 1961) presenta los resultados de sus trabajos experimentales sobre adherencia, en los cuales por primera vez se realiza la prueba de extracción de varillas del concreto ("the pull-out test"): en cada espécimen de concreto se ahogó una barra de acero especialmente perfilada, con el objeto de producir un "diente" de concreto encajado en el cuerpo de acero (Figura 6a). Sus resultados permitieron distinguir dos tipos de falla en la adherencia: en la primera, la falla ocurre por la ruptura de la adherencia (extracción de la barra de acero con grietas radiales en el concreto propagándose a partir de la superficie de la barra); en la segunda, la falla ocurre por el daño del concreto al desarrollar una alta tensión interna (aparición de fisuras longitudinales paralelas al eje de la barra y propagándose en esa misma dirección).

Poco después, Lutz *et al.* (1966) retoma la prueba experimental de Rehm, aunque adaptándola de modo que ahora se agrega una nervadu-

ra o "diente" en la barra de acero, la cual queda "anclada" en el concreto, con ello cambia la respuesta obtenida por Rehm (Figura 6b). Haciendo variaciones graduales en la geometría de la nervadura (esto es, aumentando el ángulo de la cara lateral de la nervadura medido a partir del eje longitudinal de la barra), se observó que cuando el ángulo es superior a 40°, la forma de la nervadura ya no tiene mayor efecto en la respuesta global.

Posteriormente, Lutz y Gergely (1967) redefinen por primera vez a la adherencia como "fenómeno de interacción acero-concreto", el cual acopla tres mecanismos: a) adherencia química; b) fricción entre las superficies en contacto; y c) interacción mecánica entre la nervadura de acero y el concreto circundante. Hasta antes de este trabajo, se tenía la idea generalizada de que la adherencia dependía únicamente de la forma de las varillas de acero, como si fuese una propiedad intrínseca en ellas, sin tomar en cuenta el comportamiento del concreto. Hacia 1971, Goto (1971) aporta datos cualitativos sobre cómo son transferidas las fuerzas de la varilla de acero hacia el concreto a través de la zona de interacción, y cómo el concreto se daña de forma irreversible por estas acciones. Así surge el ensayo de tirante (cuerpo de concreto con una barra de acero ahogada, cuyos extremos son sometidos a tensión pura), al cual se le inyecta tinta en las grietas con el objeto de apreciar la distribución de éstas.

Numéricamente, el primer trabajo conocido es de Bresler y Bertero (1968), en el cual introdu-

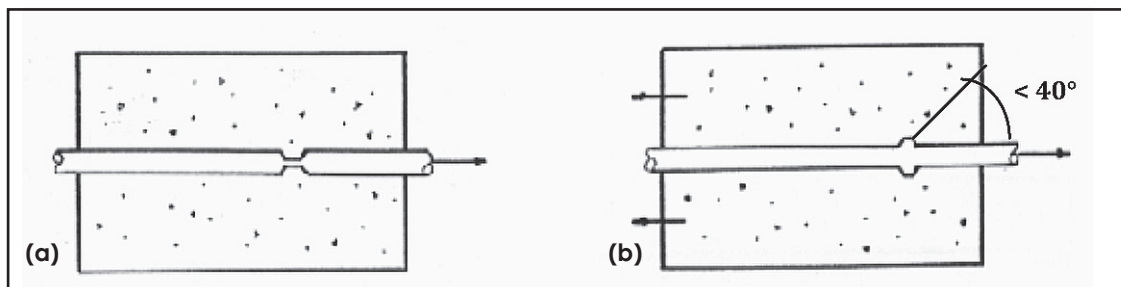


Figura 6. Prueba de: (a) Rehm con un diente de concreto; (b) de Lutz et al. con una nervadura.

cen el concepto de la “capa límite homogeneizada” que consiste en simular a la interacción como una capa con propiedades elásticas reducidas que representan el daño alrededor de la barra de acero. Posteriormente, Tepfers (1979) presenta una de las primeras investigaciones sobre la predicción de la resistencia de la interacción en función de las características de las barras nervadas. En su estudio, la interfaz se modela analíticamente como si fuese una capa en la que intervienen simultáneamente el cortante y la presión interna, y de este modo propone que la resistencia de la interacción está determinada por la capacidad del concreto circundante para soportar el esfuerzo circunferencial producido por la barra de acero.

Evolución de la investigación de la adherencia

A partir de las investigaciones presentadas previamente, el estudio del fenómeno de interacción acero-concreto ha tenido un desarrollo significativo durante los últimos cuarenta años, de modo particular en tres aspectos diferentes:

- Las investigaciones experimentales y fenomenológicas.
- La conceptualización teórica y la modelación numérica.
- La implementación en los códigos, normas y reglamentos internacionales.

En las siguientes secciones se describirán de forma sucinta y cronológica algunas de estas investigaciones, y en caso de requerir una descripción detallada y una comparativa, se recomienda consultar los trabajos de Lowes (1999) y de Domínguez (2005).

La investigación experimental

Entre las investigaciones experimentales significativas, pueden mencionarse los trabajos de Viawathanatapa (1979), quien estudió la influen-

cia del refuerzo pasivo en el anclaje de las varillas activas, así como la respuesta cíclica de la interacción. En esta misma línea, resaltan por su amplitud los resultados de Mirza y Houde (1979) derivados de pruebas de extracción, con diferentes diámetros de barras de acero. Destaca particularmente la campaña conducida por Elieghausen *et al.* (1983) realizada en la Universidad de California en Berkeley. En dicha investigación, se analizó la influencia de diversos parámetros en el comportamiento de la interacción (resistencia del concreto, forma de colado, diámetro de varillas, tamaño de nervaduras, etc.), así como los efectos producidos en la respuesta estructural, luego de la aplicación de cargas variantes en el transcurso del tiempo (Figuras 7 y 8).

Desde principios de los años noventa, en la Universidad de Milán se inician una serie de trabajos (Bamonte *et al.*, 2002; Coronelli *et al.*, 2001; Gambarova y Rosati, 1997), que abordan los efectos de escala y los efectos del confinamiento o presión externa en la respuesta de la interacción. Paralelamente en Francia (Clément, 1987) se realiza una serie de pruebas de tirantes sometidos a doble tensión para analizar el daño en el concreto, así como un estudio que evalúa la influencia del confinamiento y de las condiciones límite en la adherencia (La Borderie y Pijaudier-Cabot, 1987) (Figuras 9a y 9b).

En lo que se refiere al estudio de la degradación de la interacción en el caso de cargas cíclicas pueden mencionarse los recientes trabajos experimentales sobre barras múltiples llevados a cabo por Zuo y Darwin (2000), los ensayos de extracción-empuje efectuados en especímenes confinados con placas de acero realizados por Lundgren (1999, 2000), los ensayos de estados límite en pruebas de extracción de tipo reversible, realizados por Koch y Balazs (2002).

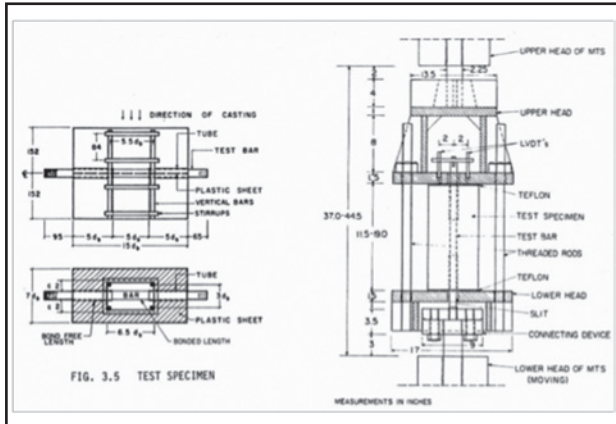


Figura 7. Prueba cíclica de Eligehausen et al. (1983): espécimen y equipo de prueba.

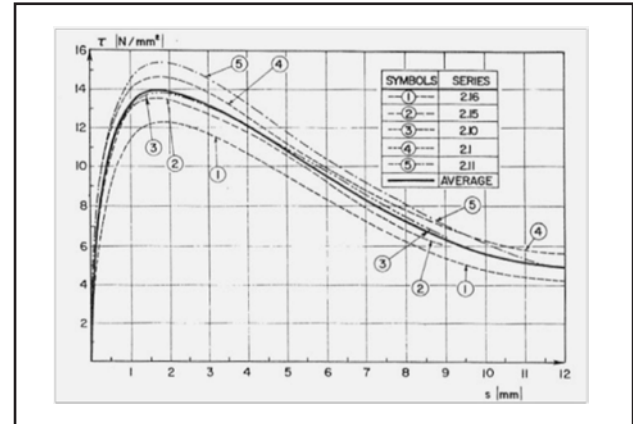


Figura 8. Gráfica Esfuerzo cortante vs. Deslizamiento obtenida por Eligehausen et al. (1983).

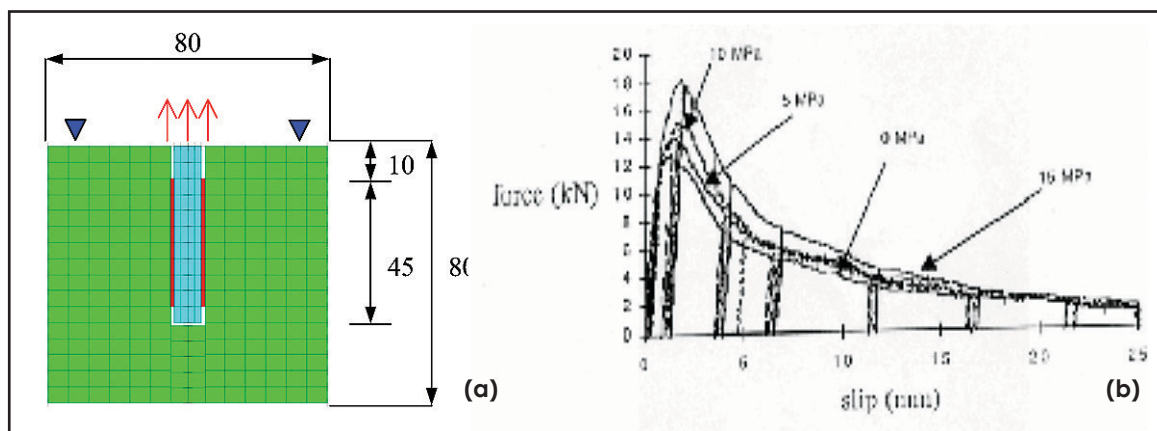


Figura 9. Prueba de confinamiento de Laborderie y Pijaudier-Cabot: **a)** espécimen; **b)** curva carga-deslizamiento.

La modelación por medio de métodos computacionales

La simulación numérica de la respuesta de estructuras es una de las líneas con mayor expansión en los últimos tiempos, debido a los grandes avances en informática y cálculos computacionales. Entre éstos se tienen modelos puramente empírico-fenomenológicos, como el caso de los modelos sugeridos por Rehm (1961), Tepfers (1979), Gambarova y Rosati (1997), etc. En el otro extremo, se tienen modelos de interacción puramente matemáticos, entre los que podemos citar los trabajos de Yankelevsky y Jabareen (2002), Khal-fallah (2005), que consisten en un análisis riguroso del fenómeno simulando el comportamiento de adherencia-deslizamiento de elementos esbeltos de concreto reforzado sujetos completamente a tensión. El modelo de interacción acero-concreto de tipo reglamentario más reconocido es el modelo CEB-FIP (1993) el cual está inspirado en el

modelo presentado por Eligehausen *et al.* (1983) mencionado previamente. Este modelo puede considerarse como de estilo semi-empírico/semi-analítico, y una de sus mayores contribuciones es el estimar la resistencia de la interacción en términos de esfuerzos-deformaciones, y no en términos fuerza-desplazamiento, que son los valores típicamente registrados en los ensayos experimentales.

Modelos similares, o bien, modificados, han sido elaborados por diferentes investigadores, entre los que podemos nombrar el modelo analítico de Harajli (1994), o el modelo de Ozbolt *et al.* (2002), que consiste en elementos discretos en tres dimensiones. Entre los modelos escritos en un marco termodinámico basados en una formulación elastoplástica, podemos citar los trabajos de Cox y Hermann (1998, 1999), que utilizan una superficie límite única; el modelo de Lundgren (1999) que permite un acoplamiento entre las

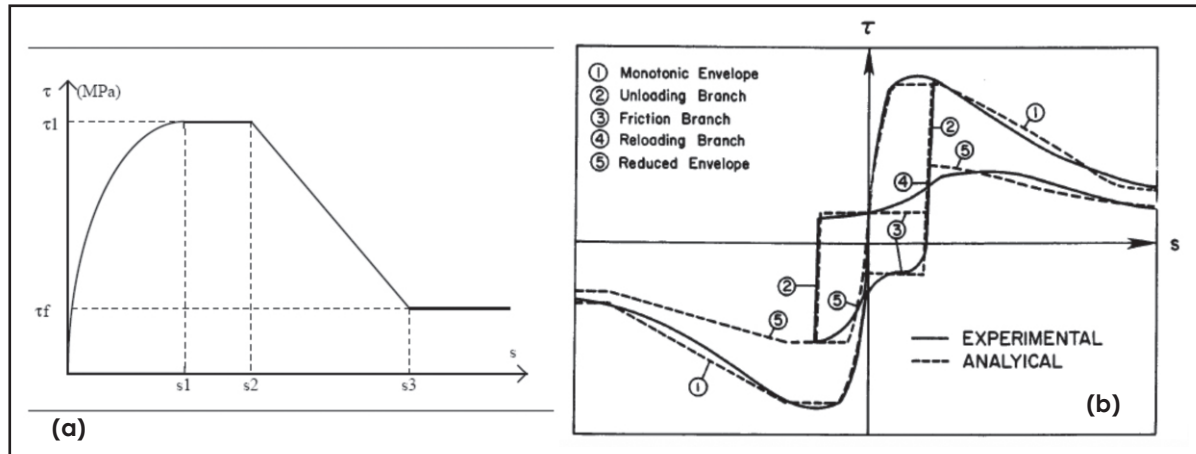


Figura 10. Modelo de comportamiento de la interacción acero-concreto propuesto por Eligehausen et al. (1983): **a)** ante carga monótona; **b)** ante carga cíclica.

deformaciones tangenciales y radiales a nivel de la interfaz; el modelo termodinámico de Désir (1999) y Romdhane (2002), en el que se acopla el daño de la interacción con los efectos de “puente” creados por las varillas expuestas luego de la aparición de una macro-fisura.

Por otra parte, el comportamiento de histéresis de la interacción en estructuras sujetas a cargas cíclicas ha sido analizado y modelado por Monti *et al.* (1997) con el método de las flexibilidades, en el marco de una formulación clásica con elementos finitos. Para este mismo tipo de sollicitación, D’Ambrisi y Filippou (1999) desarrollaron una solución similar, aunque mejor adaptada, para una escala superior de análisis –es decir, para una viga como elemento integrante de una estructura a escala global y con mayor grado de complejidad. Siguiendo la misma línea, una propuesta relacionada con una formulación en desplazamientos fue construida por Ayoub y Filippou (1999). Más tarde, esta misma formulación fue modificada por Fantilli y Vallini (2002) con el objetivo de describir la respuesta última de elementos viga de concreto armado sujetos a sollicitaciones de carga cíclica. En este mismo marco termodinámico, Domínguez *et al.* (2005a, 2005b, 2006, 2012) desarrollaron un modelo no lineal de la interacción acero-concreto que acopla tanto la teoría del daño continuo como una formulación pseudo elastoplástica e identifica además tres etapas en la degradación de la adherencia, íntimamente relacionadas con el grado de deformación alcanzado: una primera etapa pseudo-elástica, seguida de una etapa en donde la

interacción mecánica entre nervadura y concreto es mandatoria, y una última etapa de fricción entre superficies luego de la coalescencia de grietas generada en la etapa previa.

Una formulación interesante es la presentada por Gastebled y May (2000), en la que la evolución no lineal del comportamiento de la interacción es expresada en términos de fuerzas de equilibrio y en función de la disipación de la energía por fractura. En el mismo marco de la mecánica de la fractura, Ghandehari *et al.* (2000) realizó cálculos con el fin de simular el agrietamiento longitudinal en el cuerpo de concreto inducido por la interacción acero-concreto. Existen, asimismo, otros modelos interesantes, cuya formulación está escrita sobre la base de resoluciones numéricas pensadas para contextos completamente diferentes. Por ejemplo, Maker y Laursen (1994) propusieron una solución numérica en tres dimensiones basada en una resolución de tipo “problemas de contacto”. Otro modelo tridimensional recientemente desarrollado por Gebbeken y Greulich (2002), es bastante novedoso ya que está escrito a partir del método “hidrocódigos”, el cual está concebido para ser aplicado en problemas dinámicos y de propagación de ondas. Con un nivel de complejidad superior, Tikhomirov y Stein (1999) presentan la construcción de un elemento especial para concreto armado, en el que la interacción se vuelve un componente adicional del modelo numérico. En dicho modelo –que además es tridimensional- se integran: los comportamientos de los agregados, del cemento y de las interfaces respectivas que constituyen

el concreto, el comportamiento elasto-plástico de la barra de acero y la degradación de la interacción acero-concreto en el marco de los modelos micro-plan. Recientemente, basándose en la formulación XFEM y acoplado el modelo termodinámico de adherencia mencionado previamente, Domínguez *et al.* (2010) desarrollaron un elemento sólido enriquecido que acopla los tres comportamientos no lineales (concreto, acero y adherencia), y que tiene por objeto permitir el modelado de estructuras masivas de concreto reforzado, facilitando la construcción del mallado y evitando la unión nodal entre varillas y concreto (Figura 11).

La inclusión de manera ordinaria del fenómeno de interacción en el análisis y diseño de estructuras de concreto reforzado es aún lejana, y actualmente se considera como "perfecta" en la mayoría de los códigos, ya que las hipótesis de diseño se basan en dicha simplificación. Sin embargo, en problemas de predicción del colapso de estructuras no convencionales (que en la mayoría de los casos escapan a los códigos y reglamentos), se vuelve necesario incluir sus efectos, en la medida en que se requiere una solución analítica lo más próxima a la respuesta real de dichas estructuras.

Recientemente, han comenzado a aparecer publicaciones en las que se presentan simulaciones numéricas que integran explícitamente un modelo completo de interacción acero-concreto (es decir, un elemento finito particular y una ley de comportamiento de la interacción). Pue-

den citarse como ejemplos las simulaciones 2D de Lowes (1999), quien ha estudiado la respuesta de uniones trabe-columna de puentes sujetos a cargas sísmicas; las simulaciones desarrolladas por Assa y Dhanasekar (2002), en las cuales se incluyó el efecto de la interacción en el modelado de columnas de mampostería reforzadas con varillas de acero; el estudio del comportamiento del anclaje en concreto reforzado, específicamente para anclas de acero con cabeza y descabezadas, realizado por Appl *et al.* (2002); la simulación de una sección de un puente en concreto armado llevada a cabo por Nowak y Cho (2002) también en 2002, en la cual introdujeron el acoplamiento entre la corrosión y la resistencia de la interacción acero-concreto; y finalmente, los estudios de torres de enfriamiento y de un túnel de autopista realizados por Lackner y Mang (2001, 2003a, 2003b), en cuyo análisis estructural introdujeron un modelo de interacción desarrollado por ellos mismos.

La integración de la adherencia en la reglamentación y especificaciones de diseño

En general, los resultados de estos trabajos de investigación han sido y están siendo incorporados en muchos reglamentos internacionales, entre los que podemos citar la norma alemana DIN 1045, las recientes recomendaciones europeas del CEB/FIP Model Code 2010 y el Eurocódigo 2. Vale la pena mencionar que al menos cuatro Conferencias Internacionales "Bond in Concrete", enfocadas exclusivamente al estudio de la interacción acero-concreto, ya han tenido lugar en diferentes partes del mundo: la primera en Pais-

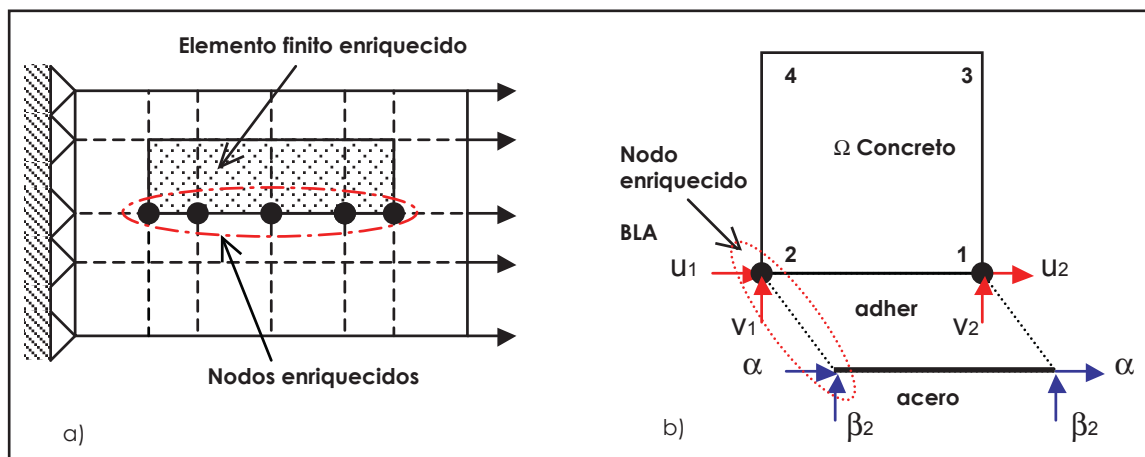


Figura 11. Elemento Finito Enriquecido que incluye tres comportamientos no lineales de tipo termodinámico para concreto, acero y adherencia.

ley, Escocia, en 1982; la segunda en Riga, Letonia, en 1992; la tercera en Budapest, Hungría, en 2002; y la última recientemente en Brescia, Italia, en 2012.

Hasta antes de la versión de 1971, el ACI-1963 consideraba exclusivamente el término "longitud embebida", lo que implicaba especificar el esfuerzo máximo permisible de adherencia con flexión para acero de refuerzo, definido por una ecuación sencilla que relacionaba el diámetro de la varilla y la resistencia a compresión del concreto. Posteriormente, se introdujo el concepto de "longitud de desarrollo", que tiene por objeto simplificar el cálculo de los esfuerzos de cortante en la cara lateral de las barras de acero, además de cubrir algunas de las deficiencias del criterio basado en esfuerzos, pues no toma en cuenta la variabilidad de los esfuerzos de flexión a lo largo de las barras, ni concilia dichos valores con los esfuerzos uniformes de anclaje. Por otra parte, este criterio de longitud de desarrollo asegura que el anclaje se extienda más allá de las zonas con esfuerzos máximos en el refuerzo. Si bien este criterio facilita la labor de diseño, prácticamente hizo desaparecer el concepto de interacción acero-concreto del código ACI. De acuerdo a diversos autores, esta decisión facilitó la comprensión de las recomendaciones de diseño, pero mantuvo muchas inconsistencias, dificultando además la introducción de modelos no lineales simplificados para la adherencia, que son esenciales para la revisión de estructuras existentes, dañadas o que requieren algún tipo de reforzamiento, tal y como lo demuestran las últimas investigaciones. En México, las "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto" del RCDF-2005 han adoptado el mismo concepto de longitud de desarrollo, tal y como lo indican en la sección 5.1: "Anclaje". El estudio y crítica de los criterios ahí mencionados escapa a los alcances del presente trabajo.

CONCLUSIONES

La interacción acero-concreto es la hipótesis fundamental en el diseño del comportamiento del concreto reforzado, y su relevancia queda de manifiesto ante la gran cantidad de investigaciones que se han llevado a cabo desde finales del Siglo XIX. La vocación de este trabajo de investigación ha sido la de relatar brevemente el devenir histórico del estudio de la adherencia y cómo se ha intentado incluir su influencia en el análisis, diseño y reglamentación del concreto reforzado. Si particularmente el concreto reforzado es una invención nacida de un empirismo intuitivo propio de la ingeniería, poco a poco se ha ido sujetando al formalismo técnico-científico, con el único fin de asegurar un alto grado de funcionalidad, durabilidad y confiabilidad estructural.

El análisis histórico-científico del desarrollo de la investigación de la interacción acero-concreto permite identificar tres grandes líneas de investigación en las que pueden agruparse dichos trabajos: las pruebas experimentales a escala local y global, la formulación matemática de la adherencia y sus aplicaciones en las simulaciones numéricas, y la inserción en los reglamentos de construcción y demás prácticas profesionales. Asimismo, muchos de estos trabajos sientan las bases para abordar otro tipo de interacciones como son las interacciones concreto-concreto, concreto-nuevos materiales o adhesivos, o bien concreto con diferentes propuestas de refuerzo. Finalmente, una de las motivaciones en la realización de este documento es la de enfatizar el aspecto humano en la creación, desarrollo y divulgación del concreto reforzado como material innovador, buscando con ello promover la práctica de la innovación entre los ingenieros constructores, sin perder de vista los aspectos formales que deben adoptarse para garantizar la seguridad en todas las aportaciones ingenieriles que puedan generarse en el futuro.

LITERATURA CITADA

- APPL, J. J., ELIGEHAUSEN, R., OZBOLT, J., Numerical analysis of splices with headed deformed reinforcing bars. "Bond in concrete": *Proceedings of the Conference held at the Budapest University of Technology and Economics*; Balazs et al. (Eds.), pp. 463-468, 2002.
- ASSA, B., DHANASEKAR, M., A numerical model for flexural analysis of short reinforced masonry columns including bond-slip. *Computer and Structures*, 80, 547-558, 2002.
- AYOUB, A., FILIPPOU, F. C., Mixed formulation of bond-slip problems under cyclic loads. *ASCE - Journal of Structural Engineering*, 125(6): 661-671, 1999.
- BAMONTE, P., CORONELLI, D., GAMBAROVA, P. G., Size effects in high-bond bars. "Bond in concrete": *Proceedings of the Conference held at the Budapest University of Technology and Economics*, Balazs et al. (Eds.), 43-52, 2002.
- BRESLER B., BERTERO, V. V., Behavior of reinforced concrete under repeated load. *ASCE - Journal of Structural Division*, 94(ST6): 1567-1590, 1968.
- CEB-FIP MODEL CODE *CEB-FIP Model Code 1990. Design Code*. Comité Euro-International du Béton et Fédération Internationale de la Précontrainte; Thomas Telford, London, 437 (ISBN 0 7277 1696 4), 1993.
- CLEMENT, J. L., *Interface acier - béton et comportement des structures en béton armé: caractérisation - modélisation*; Thèse de l'Université Paris VI, 1987.
- CORONELLI, D., GAMBAROVA, P. G., RAVAZZANI, P., Size effect in steel-concrete bond: test results and modelling for smooth bars. *Fracture Mechanics of Concrete Structures (Framcos)*, de Borst et al (Eds.), pp. 669-676, 2001.
- COX J. V., HERRMANN, L. R., Development of a plasticity bond model for steel reinforcement. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 3, 155-180, 1998.
- COX, J. V., HERRMANN, L. R., Validation of a plasticity bond model for steel reinforcement. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 4, 361-389, 1999.
- D'AMBRISI, A., FILIPPOU, F. C., Modeling of cyclic shear behaviour in RC members. *ASCE - Journal of Structural Engineering*, 125(10): 1143-1150, 1999.
- DELHUMEAU, G., *L'invention du béton armé. Hennebique 1890-1914*. France: Editions Norma, 1999.
- DESIR, J. M., ROMDHANE, M. R. B., ULM, F. J., FAIRBAIRN, E. M. R., Steel-concrete interface: revisiting constitutive and numerical modeling. *Computers and Structures*, 71, 489-503, 1999.
- DOMÍNGUEZ, N., *Etude de la liaison acier-béton: de la modélisation du phénomène à la formulation d'un Élément Fini Enrichi « béton armé »*. Thèse de l'ENS de Cachan, 2005.
- DOMÍNGUEZ, N., BRANCHERIE, D., DAVENNE, L., IBRAHIMBEGOVIC, A., Prediction of crack pattern distribution in reinforced concrete by coupling a strong discontinuity model of concrete cracking and a bond-slip of reinforcement model. *Engineering Computations*, 22, (5-6): 558-582, 2005.
- DOMÍNGUEZ, N., FERNÁNDEZ, M. A., IBRAHIMBEGOVIC, A., Enhanced solid element for modelling of reinforced concrete structures with bond-slip. *Computers and Concrete*, 7(4): 347-364, 2010.
- DOMÍNGUEZ, N., IBRAHIMBEGOVIC, A., A non-linear thermodynamical model for steel-concrete bonding. *Computers and Structures*, 106-107, 29-45, 2012.
- ELIGEHAUSEN, R., POPOV, E. P. BERTERO, V. V., Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. *University of California*; Report no. UCB/EERC-83/23 of the National Science Foundation, 1983.
- FANTILLI, A. P., VALLINI, P., Bond-slip and concrete fracture in RC members subjected to cyclic actions. "Bond in concrete": *Proceedings of the Conference held at the Budapest University of Technology and Economics*; Balazs et al. (Eds.), pp. 61-78, 2002.
- GAMBAROVA, P. G., ROSATI, G. P., Bond and splitting in bar pull-out: behavioural laws and concrete cover role. *Magazine of Concrete Research*, 49(179): 99-110, 1997.
- GASTEBLED, O. J., MAY, I. M., Numerical simulation of pulled specimens. *ACI Structural Journal*, 97(2): 308-315, 2000.

- GEBBEKEN, N., GREULICH, S., Bond modelling for reinforced concrete under high dynamic loading effects. "Bond in concrete": *Proceedings of the Conference held at the Budapest University of Technology and Economics*; Balazs et al. (Eds.), pp. 529-536, 2002.
- GHANDEHARI, M., KRISHNASWAMY, S., SHAH, S., Bond-induced longitudinal fracture in reinforced concrete. *ASME - Journal of Applied Mechanics*, 67, 740-748, 2000.
- GOTO, Y., Cracks formed in concrete around tension bars. *ACI Journal*, 68(4): 244-251, 1971.
- HARAJLI, M. H., Development/splice strength of reinforcing bars embedded in plain and fiber reinforced concrete. *ACI Structural Journal*, 91(5): 511-520, 1994.
- KHALFALLAH, S., Bond-slip analysis of reinforced concrete members. *Revue Française de Génie Civil*, 9(4): 509-521, 2005.
- KOCH, R. G., BALAZS, G. L., Limit states for long term and cyclic loading. "Bond in concrete": *Proceedings of the Conference held at the Budapest University of Technology and Economics*; Balazs et al. (Eds.), 211-220, 2002.
- LA BORDERIE, C., PIJAUDIER-CABOT, G., Etude expérimentale du comportement des matériaux renforcés. *Rapport intermédiaire: Détermination expérimentale des lois de comportement de l'interface fibre-matrice; Rapport LMT Cachan; Contrat I70/1F 3146 avec Electricité de France*, 1987.
- LACKNER, R., MANG, H. A., Adaptive FE analysis of RC shells. II: applications. *ASCE - Journal of Engineering Mechanics*, 127(12): 1213-1222, 2001.
- LACKNER, R., MANG, H. A., Scale transition in steel-concrete interaction. I: Model. *ASCE - Journal of Engineering Mechanics*, 129(4): 393-402, 2003.
- LACKNER, R., MANG, H. A., Scale transition in steel-concrete interaction. II: Applications. *ASCE - Journal of Engineering Mechanics*, 129(4): 403-413, 2003.
- LOWES, L. N., *Finite element modeling of reinforced concrete beam-column bridge connections*. Ph. D. Thesis, Civil Engineering Graduated Division, University of California, Berkeley, USA, 1999.
- LUNDGREN, K., *Three-dimensional modelling of bond in reinforced concrete: Theoretical model, experiments and applications*. Ph. D. Thesis, Division of Concrete Structures, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1999.
- LUNDGREN, K., Pull-out tests of steel-encased specimens subjected to reversed cyclic loading. *Materials and Structures*, 33, 450-456, 2000.
- LUTZ, L. A., GERGELY, P., Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete. *ACI Structural Journal*, 64(11): 711-721, 1967.
- LUTZ, L. A., GERGELY, P., WINTER, G., The mechanics of bond and slip of deformed reinforcing bars in concrete. Cornell University; Structural Engineering Report No. 324, 1966.
- MAKER, B. N., LAURSEN, T. A., A finite element formulation for rod/continuum interactions: the one-dimensional slideline. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37, 1-18, 1994.
- MIRZA, S. M., HOUDE, J., Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete. *ACI Structural Journal*, 76(1): 19-45, 1979.
- MONTI, G., FILIPPOU, F. C., SPACONE, E., Analysis of hysteretic behaviour of anchored reinforcing bars. *ACI Structural Journal*, 94(2): 248-261, 1997.
- NOWAK, A. S., CHO, T., Reliability models for bond resistance and corrosion in concrete bridges. "Bond in concrete": *Proceedings of the Conference held at the Budapest University of Technology and Economics*; Balazs et al. (Eds.), pp. 137-144, 2002.
- OUGLOVA, A., *Analyse du comportement des structures en béton armé atteintes de corrosion des armatures*. Thèse de Doctorat de l'ENS Cachan, 2004.
- OZBOLT, J., LETTOW, S., KOZAR, I., Discrete bond element for 3D finite element analysis of reinforced concrete structures. "Bond in concrete": *Proceedings of the Conference held at the Budapest University of Technology and Economics*; Balazs et al. (Eds.), 9-19, 2002.
- RAGUENEAU, F., DOMÍNGUEZ, N., IBRAHIMBEGOVIC, A., Thermodynamic-based interface model for cohesive brittle materials: application to bond-slip in RC structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(issue 52): 7249-7263, 2006.