

Comportamiento de anclajes químicos post instalados en hormigón fisurado bajo solicitaciones de tracción.

Behavior of post-installed adhesive anchors in cracked concrete under tension loads.

Victor Alejandro Roldan.

CeReDeTeC, FRM, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Mendoza.
Coronel Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza, Argentina.
Mail: victor.rolدان@frm.utn.edu.ar

Gustavo Luis Palazzo.

CeReDeTeC, FRM, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Mendoza.
Coronel Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza, Argentina.
Mail: gpalazzo@frm.utn.edu.ar

Noemí Graciela Maldonado.

CeReDeTeC, FRM, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Mendoza.
Coronel Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza, Argentina.
Mail: ngm@frm.utn.edu.ar

Alberto Marcelo Guzmán.

CeReDeTeC, FRM, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Mendoza.
Coronel Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza, Argentina.
Mail: mguzman@frm.utn.edu.ar

Francisco Alberto Calderón.

CeReDeTeC, FRM, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Mendoza.
Coronel Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza, Argentina.
Mail: francisco.calderon@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

Hoy en día los anclajes químicos son ampliamente utilizados para la rehabilitación de estructuras de hormigón armado existentes. Esto es debido a que son muy versátiles a la hora de incorporar elementos estructurales metálicos de refuerzo, como por ejemplo riostras metálicas a estructuras de hormigón existentes. En el presente trabajo se estudia la influencia de la fisuración en la capacidad portante de los anclajes químicos sometidos a tracción. Para tal fin se estudió cuáles son los anchos de fisura posibles que pueden presentarse en una estructura de hormigón existente. Posteriormente se realizaron ensayos de arrancamiento de anclajes colocados en bloques de hormigón fisurados y sin fisurar. Los resultados obtenidos se compararon con las ecuaciones para cálculo de capacidad de anclajes dadas en la normativa norteamericana para cálculo de hormigón ACI318-14. Esta

Recibido: Septiembre de 2016

Aceptado: Noviembre de 2016

normativa no contempla el uso de anclajes en hormigones en los que no es posible controlar el ancho de fisura, por lo que sobrevalora su capacidad. Finalmente se presentan las conclusiones relevantes del estudio realizado.

Palabras claves: anclajes químicos, hormigón fisurado, ensayos de arrancamiento.

ABSTRACT

Nowadays the adhesive anchors are widely used in the retrofitting of existing concrete structures. The adhesive anchors are a versatile way to attach new metallic structural components, as metallic braces, to the existing concrete structure. In this paper the influence of the cracking in the adhesive anchor tensile capacity is evaluated. For that end the possible crack widths that may occur in existing concrete structures were studied. Later a series of pull-out tests of adhesive anchors placed in uncracked and cracked concrete were performed. The tests results were compared with the equations for the calculation of the anchor tensile capacity given in the structural concrete standard ACI 318-14. This standard does not contemplate the use of adhesive anchors on existing concrete structures where the crack width cannot be controlled, so overestimates the tensile capacity of these anchors. Finally the main conclusions of the study conducted are presented.

Keywords: adhesive anchors, cracked concrete, pull out tests.

1 INTRODUCCION

Actualmente existen numerosas construcciones civiles cuyo desempeño sísmico puede ser deficiente. Sin importar la causa de este mal desempeño, estas estructuras necesitan ser rehabilitadas estructuralmente para asegurar un desempeño adecuado en caso de un terremoto. Si la rehabilitación se lleva a cabo incorporando nuevos elementos estructurales metálicos, es altamente probable que se deban diseñar conexiones entre la estructura de hormigón armado existente y los refuerzos previstos. Los anclajes post-instalados son ampliamente utilizados para unir nuevos elementos estructurales a estructuras existentes. Existe una gran variedad de anclajes post-instalados, los que se pueden clasificar en anclajes metálicos y anclajes químicos. Los anclajes metálicos transfieren las cargas actuantes al material base, en este caso hormigón armado, a través de fricción o trabazón mecánica. Los anclajes químicos transfieren las cargas mediante una trabazón química, la cual está compuesta por una combinación de adhesión entre el adhesivo-hormigón y por micro cuñas, (Eligehausen *et al.* 2006). Un factor que afecta la capacidad de carga de los anclajes químicos es la fisuración. Al realizar una perforación para colocar un anclaje se produce una discontinuidad en el material base, esto puede inducir a que las fisuras pasen por la perforación cuando la estructura se encuentre solicitada tanto estática como dinámicamente. Las causas de la fisuración de estructuras de hormigón se pueden dividir en dos causas principales: (Eligehausen y Balogh 1995), (Hoeler y Eligehausen 2008) (i) las fisuras producidas por restricciones de deformación, dilataciones térmicas, fluencia lenta o contracción, y (ii) las fisuras producidas por las deformaciones causadas por la fluencia del acero de miembros solicitados a flexión y diseñados incorrectamente. El ancho de la fisura que pueda aparecer en el hormigón existente dependerá de la causa que dio origen a la misma. La forma para evitar la formación de fisuras en estructuras a construir es introducir armadura adicional correctamente diseñada previo al colado del hormigón, pero en estructuras existentes esto no es posible. Por lo expuesto es altamente probable que los anclajes colocados en estructuras de

hormigón armado existentes induzcan fisuras, disminuyendo así su capacidad portante.

En el presente trabajo se estudia la posibilidad de utilizar anclajes químicos en estructuras de hormigón armado existentes cuando no es posible controlar el ancho de fisura. En la sección 2 se considera la fisuración en el hormigón, y su influencia en la capacidad a tracción del anclaje químico; en la sección 3 se discuten las limitaciones de las expresiones de cálculo para calcular la capacidad a tracción de anclajes químicos en hormigón fisurado que se establecen en reglamentos relevantes; en la sección 4 se presentan resultados analíticos y experimentales de la capacidad a tracción de anclajes químicos aplicados en 12 prototipos; y, finalmente, en la sección 5 se presentan en las conclusiones las consideraciones relevantes de este estudio.

2 CONSIDERACIONES SOBRE EL HORMIGÓN FISURADO

Un parámetro que afecta significativamente la resistencia a la tracción de los anclajes químicos es el ancho de fisura del hormigón. En la Figura 1 se muestra el esquema de transferencia de carga de un anclaje colocado en hormigón que posteriormente se fisuró, produciéndose una discontinuidad en la transferencia de las cargas. Una forma de prevenir la formación de fisuras en el hormigón es mediante la incorporación de barras de refuerzo adicionales a la estructura previo al colado del hormigón. En estructuras existentes no es posible adicionar mayor refuerzo al ya existente, por ello, el ancho máximo de fisura que puede presentarse en una estructura de hormigón armado existente que necesita ser rehabilitada, debe ser estudiado y definido.

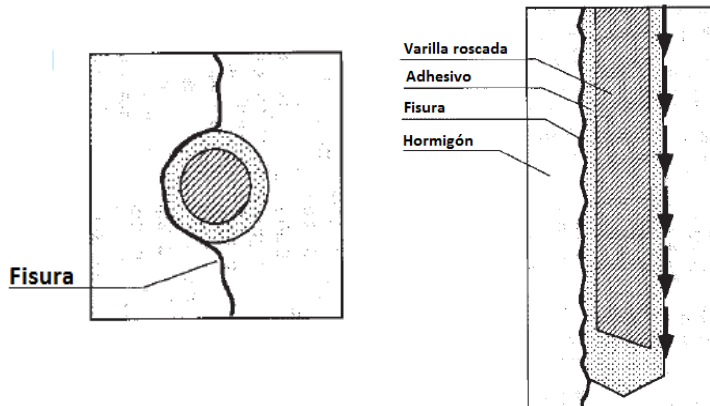


Figura 1: Transmisión de cargas al material base en hormigón fisurado.

Las causas de la fisuración en el hormigón se pueden dividir en dos grupos. El primer grupo son las fisuras debido a fenómenos reológicos y de inestabilidad volumétrica del hormigón, tales como el efecto creep, fluencia lenta, contracción de fraguado, variaciones de temperatura, etc. El segundo grupo son las fisuras que se producen en secciones diseñadas ineficientemente debido a la fluencia de la armadura por acciones tanto estáticas como dinámicas. Dependiendo cuál sea la causa que originó la fisura será el ancho de la misma.

2.1 Ancho de fisura debido a fenómenos reológicos y de inestabilidad volumétrica

En el trabajo realizado por Gilbert (1992) se encontró que el ancho de fisuras debidas a retracción de fraguado ronda los 0.3 mm. Shami Nejadi *et al.* (2004) midieron el ancho de fisura, debido a contracción por fraguado, de ocho losas de hormigón armado las cuales tenían restringida la posibilidad de deformarse longitudinalmente. El ancho promedio medido fue de 0.29 mm. Gilbert (2008) midió los anchos de fisura de 12 vigas simplemente apoyadas y 12 losas armadas en una sola dirección sometidas a carga de servicio durante 400 días, resultando 0.25 mm el ancho de fisura promedio para las vigas, mientras que fue de 0.20 mm para las losas.

En lo concerniente a la normativa el ACI224R-01 recomienda para estructuras de hormigón que van a estar expuestas a condiciones de humedad, aire húmedo o en contacto con el suelo, que el ancho esperable de fisura no supere los 0.3 mm. El código europeo EUROCODE 2, en el capítulo 7.3, recomienda que el ancho máximo de fisura para estructuras de hormigón armado sea entre 0.2 mm a 0.4 mm.

Basados en la revisión de la literatura y de las normativas, se adoptó un ancho de fisura de 0.4 mm para realizar ensayos de arrancamientos de anclajes químicos colocados en bloques de hormigón fisurados, simulando los niveles de fisuración debidos a fenómenos reológicos y/o inestabilidad volumétrica.

2.2 Ancho de fisura debido a fluencia de la armadura de refuerzo.

Para el caso de fisuración en el hormigón debido a la fluencia de las barras de refuerzo, Byung Hwan Oh *et al.* (2007) encontraron que en vigas de hormigón armado sometidas a cargas repetidas, el ancho máximo de fisura fue de aproximadamente 0.75 mm. Por otro lado, Marzouk *et al.* (2010) investigaron la fisuración en placas de hormigón cargadas en el centro. Cuando el refuerzo alcanzó la tensión de fluencia, se midieron fisuras de entre 0.4 mm y 1.2 mm, con un promedio de 0.8 mm. Una serie de vigas fueron ensayadas hasta la falla por Hughli *et al.* (2015), en donde los anchos de fisuras se midieron con sensores piezoeléctricos. Los anchos máximos medidos fueron de entre 0.5 mm a 0.8 mm. Un estudio exhaustivo fue llevado a cabo por Hoeler (2006) para determinar el ancho máximo esperable de fisura que se puede producir en el hormigón. El ancho máximo determinado fue de 0.8 mm.

A efectos de representar el comportamiento de anclajes en hormigones fisurados como consecuencia de la fluencia de las barras de refuerzo, los ensayos experimentales de arrancamientos de anclajes químicos llevados a cabo, contemplaron hormigones fisurados con un ancho de fisura de 0.8 mm.

Cabe destacar que no se debe anclar en zonas de rótulas plásticas ya que la fisuración en esas zonas suele ser excesiva, produciéndose incluso desprendimiento del hormigón. Por ello el anclaje en esas zonas no resulta eficiente, pudiendo llegar a perderse la totalidad de la capacidad del anclaje para transmitir cargas.

3 CAPACIDAD NOMINAL A TRACCIÓN DE ANCLAJES SEGÚN CÓDIGOS RELEVANTES

En esta sección se presentan los requerimientos que se establecen en el ACI318-14 para el diseño de anclajes químicos sometidos a cargas de tracción, así como también, las consideraciones dadas por la guía ACI355.4-11 para la calificación de anclajes químicos.

3.1 ACI318-14

Unos de los códigos más avanzados con respecto al diseño de anclajes químicos es la norma norteamericana ACI318-14. Según el anclaje que se estudie, metálico o químico, se debe calcular la resistencia nominal para cada tipo de falla posible, siendo la adoptada, la menor que resulte del análisis. En el caso de los anclajes químicos sometidos a tracción se deben evaluar tres modos de falla posibles: resistencia a la falla del acero, resistencia a la falla por rotura del cono de hormigón, y resistencia a la falla de la adhesión (Figura 2). Para poder utilizar las ecuaciones provistas en el ACI318-14 para calcular la resistencia a la adhesión, se necesitan valores de referencia. Estos se obtienen a través de un proceso de ensayos a los que deben someterse los anclajes. En la guía norteamericana ACI355.4-11 (2011) se listan los ensayos a los cuales deben someterse los anclajes químicos a fin de obtener los valores de referencia, y con ellos, poder utilizar las ecuaciones para la determinación de resistencia nominal del anclaje químico.

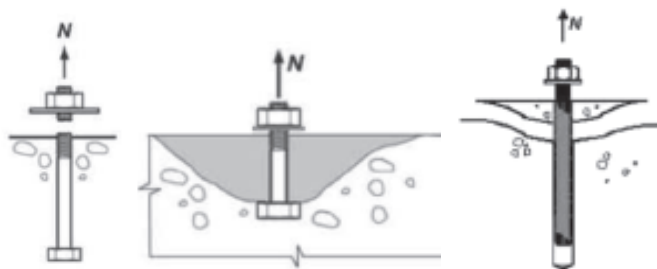


Figura 2: Modos de falla de anclajes químicos sometidos a tracción (ACI318-14).

En los anclajes adhesivos sometidos a tracción se deben evaluar tres resistencias nominales.

a) Resistencia del acero en tracción, art. 17.4.1: Esta es la resistencia que corresponde a la rotura del acero de la varilla roscada que conforma el anclaje. Para evaluar esta resistencia de debe aplicar la ecuación (1)

$$N_{sa} = A_{se,N} \cdot f_{uta} \quad (1)$$

Donde $A_{se,N}$ es el área efectiva de la varilla roscada y f_{uta} es la tensión de rotura del acero. Este tipo de falla es típica de los anclajes químicos con profundidades de empotramiento importantes. En este caso la resistencia a compresión del hormigón no influye en la del anclaje, debiendo la longitud de

empotramiento ser tal que permita la transferencia de esfuerzos desde la varilla roscada al hormigón sin que se produzca la falla de este último.

b) Resistencia del cono de arrancamiento del hormigón en tracción, art. 17.4.2: En este caso el anclaje falla debido a que se produce el cono de arrancamiento del hormigón. Para evaluar esta resistencia de debe aplicar la ecuación (2)

$$N_{cb} = (A_{Nc}/A_{Nc0}) \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} N_b \quad (2)$$

Donde A_{nc}/A_{nc0} , $\psi_{ed,N}$, $\psi_{cp,N}$, son factores de modificación que tienen en cuenta la distancia al borde y la adición de refuerzo suplementario para controlar el fenómeno de división del hormigón. Mayores detalles de estos factores escapan al alcance del presente trabajo.

El factor de modificación $\psi_{c,N}$ tiene en cuenta la posibilidad de que el hormigón en el cual esté colocado el anclaje químico se fisure. Para anclajes post instalados a ser colocados en zonas donde el análisis indica que no se van a producir fisuras con cargas de servicio, el coeficiente $\psi_{c,N}$ toma un valor de 1.4. Si el análisis indica que es factible que se produzcan fisuras, el valor de $\psi_{c,N}$ es 1.0. Este coeficiente solo considera la posibilidad de fisuras con cargas de servicio, pero no considera la posibilidad de fisuración con cargas eventuales como las sísmicas.

Se destaca que, el ancho de las fisuras esperable para cargas de servicio es aproximadamente 0.3mm, siendo este el máximo permitido por el ACI318-14 en el artículo R.17.4.2.6. Si en la etapa del diseño se determina que existe la posibilidad de que en el hormigón aparezcan fisuras de mayor ancho al límite establecido, se debe colocar armadura de refuerzo para su control.

N_b es la resistencia básica a la rotura por arrancamiento del cono de hormigón de un único anclaje químico solicitado a tracción y colocado en hormigón fisurado, y se determina mediante la ecuación (3)

$$N_b = k_c \lambda_a (f'c)^{0.5} h_{ef}^{1.5} \quad (3)$$

Donde λ_a es un coeficiente para hormigones con agregados livianos, $f'c$ es la resistencia especificada del hormigón a compresión, y h_{ef} es la profundidad de empotramiento del anclaje. El coeficiente k_c tiene un valor de 7 para anclajes post instalados en hormigón fisurado y 10 para hormigón no fisurado.

c) Resistencia por adherencia de un anclaje químico en tracción, art. 17.4.5: La falla de adherencia es una combinación de la falla por adherencia entre el adhesivo y el hormigón o el adhesivo y la varilla roscada, y la falla por arrancamiento de un cono de hormigón superficial. La ecuación (4) es la utilizada para calcular la resistencia a la adherencia.

$$N_a = (A_{Na}/A_{Na0}) \psi_{ed,Na} \psi_{cp,Na} N_{ba} \quad (4)$$

Donde A_{nc}/A_{nc0} , $\psi_{ed,Na}$, $\psi_{cp,Na}$, son factores de modificación que tienen en cuenta la distancia al borde y la adición de refuerzo suplementario para controlar el fenómeno de fractura del hormigón. Mayores detalles de estos factores escapan al alcance del presente trabajo.

N_{ba} es la resistencia básica a la adherencia de un único anclaje sometido a tracción colocado en hormigón fisurado y se debe calcular mediante la ecuación (5)

$$N_{ba} = \lambda_a \tau_{cr} \pi d_a h_{ef} \quad (5)$$

Donde d_a es el diámetro del anclaje y τ_{cr} es la resistencia característica a la tracción en hormigón fisurado.

De las ecuaciones antes presentadas, los fabricantes de anclajes químicos deben proveer los valores de k_c y τ_{cr} , quienes los obtienen por medio de ensayos. El ACI 355.4-11 establece los lineamientos y guías con respecto a los ensayos a realizar para obtener dichos valores.

3.2 ACI 355.4-11

El ACI 355.4-11 establece todos los ensayos a los cuales debe ser sometido un anclaje químico con el fin de calificarlo y obtener los valores k_c y τ_{cr} , necesarios para utilizar las ecuaciones de diseño del ACI318-14. Más aún, estos ensayos proveen información valiosa sobre el comportamiento del anclaje ensayado en distintas condiciones como pueden ser, anclajes colocados en hormigón fisurado, anclajes sometidos a cargas sísmicas, anclajes colocados a distintas temperaturas, etc. Esta normativa especifica los ensayos necesarios para obtener los valores de la resistencia característica a la tracción en hormigón fisurado, τ_{cr} . El anclaje va a estar sometido únicamente a cargas de servicio y el ancho de fisura requerido en los ensayos es de 0.3 mm. Para el caso de anclajes que van a estar sometidos a cargas sísmicas, los ensayos deben realizarse en hormigón fisurado con un ancho de fisura de 0.5 mm.

4 ESTUDIO ANALÍTICO - EXPERIMENTAL DE ANCLAJES QUÍMICOS POST INSTALADOS BAJO SOLICITACIONES DE TRACCIÓN

Para evaluar el comportamiento de anclajes químicos en hormigón fisurado, se realizaron 16 ensayos de arrancamiento por tracción. Estos ensayos consistieron en traccionar una varilla roscada anclada mediante un adhesivo epoxi a un bloque de hormigón. Los mismos se realizaron con anclajes colocados en hormigón sin fisurar y en hormigón con un ancho de fisura de 0.4 mm y de 0.8 mm. En todos los casos, se consideraron prototipos sin confinamiento, por lo que el modo de rotura fue por cono de arrancamiento del hormigón.

En las sub secciones siguientes se caracterizan los prototipos ensayados, se muestran los resultados experimentales, se determinan las capacidades nominales de los anclajes según reglamentos relevantes, se comparan los resultados numéricos y experimentales, y se realiza una discusión de los resultados obtenidos.

4.1 Caracterización de los prototipos ensayados

4.1.1. Bloques de hormigón

A fin de evitar la influencia de la cercanía a los bordes los bloques de hormigón tenían 300 mm de longitud, 400 mm de ancho y 150 mm de alto.

La clase de hormigón utilizada en los ensayos correspondió a la calidad presente en las construcciones de hormigón armado de Argentina en condiciones de ser rehabilitadas. Para ello se utilizó una dosificación acorde al tipo de hormigón deseado. Durante el colado del hormigón se obtuvieron probetas cilíndricas normalizadas, las cuales posteriormente fueron ensayadas a compresión, obteniendo una resistencia de 17.8 MPa.

4.1.2. Barra de acero

Las varillas roscadas utilizadas presentaron 10 mm de diámetro, ensayándose a tracción una muestra de las mismas a fin de caracterizar al acero. Los resultados de los ensayos indicaron una tensión de rotura a tracción de 800 MPa. A fin de evitar que la rotura de los anclajes se produjese por falla de la varilla roscada la longitud de empotramiento adoptada fue de 70 mm, de esta manera todos los ensayos fallaron por arrancamiento del anclaje del bloque de hormigón.

4.1.3. Químico

Para la ejecución de anclajes se utilizó un mortero epoxi marca Fischer EM 390 S. Para la colocación se siguió el procedimiento descrito por el fabricante. Luego de realizada la perforación se limpió mediante dos ciclos de cepillado de la perforación y soplado de la perforación con soplete y cepillado nuevamente. Posteriormente se colocó el adhesivo epoxi dentro de la perforación y seguidamente la varilla roscada. Se dejó curar al menos 48 hs previo a la ejecución de los ensayos.

4.1.4. Fisura

Como condición más desfavorable para el comportamiento mecánico del anclaje, se espera que durante un evento sísmico la fisura en el hormigón atraviese el plano por el cual está colocado el anclaje. Para poder materializar la fisuración, previo al llenado de los bloques se colocó un inductor de fisura. Dicho inductor estuvo compuesto por una lámina plástica en forma de "U", la cual produjo una reducción de la sección de hormigón en el plano donde se colocó el anclaje. En los laterales de la lámina plástica en "U" se dejaron colocados unos tubos rectangulares plásticos, y luego de endurecido el hormigón se introdujo a través de los mismos una cuña metálica generando una expansión en el hormigón. De esta manera se indujo la fisura en el hormigón ya endurecido. El proceso de generación la fisura en primer lugar consistió en producir una expansión tal en los bloques de hormigón que permitiera marcar la fisura. Posteriormente se colocó el anclaje en el sector de la fisura, y una vez curado el adhesivo epoxi, se volvió a realizar una expansión a fin de lograr el ancho de fisura requerido, ya sea los 0.4 mm o 0.8 mm pretendidos. De esta manera se logró la formación de la fisura en el plano del anclaje, y con el anclaje ya instalado.

En la Figura 3 se muestra un detalle de los bloques de hormigón sin fisurar, y en la Figura 4 los moldes con el dispositivo inductor de fisura. En la Figura 5 se observa el bloque de hormigón fisurado, el cual luego de colocado el anclaje se procedió a incrementar el ancho de fisura en 0.4 mm o 0.8 mm según correspondía.

En la Figura 6 se muestra un bloque de hormigón fisurado con el correspondiente anclaje químico.



Figura 3: Bloque de hormigón sin fisurar con anclaje.



Figura 4: Inductor de fisura en molde previo al colado del hormigón.



Figura 5: Bloque de hormigón con fisura marcada previo a la colocación del anclaje.



Figura 6: Bloque de hormigón con fisura incrementada luego de colocado el anclaje.

4.1.5. Procedimiento de ensayo

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) de San Juan - Argentina. Se empleó la máquina universal de ensayos que se muestra en la Figura 7. La carga de tracción pseudo estática sobre la barra de acero del anclaje se aplicó por medio de una varilla rosada de 2 pulgadas de diámetro sujeta a un plato inferior de la máquina universal de ensayos tal como se muestra en la Figura 8. Dado que la máquina utilizada permitía controlar el desplazamiento se aplicó una velocidad de 2 mm de desplazamiento por minuto. Sobre el plato superior de la máquina se colocó el bloque de hormigón, produciendo así una tracción en el anclaje químico hasta el arrancamiento del mismo del hormigón. En la Figura 9 se muestra la falla por arrancamiento obtenida.



Figura 7: Máquina universal de ensayos.



Figura 8: Varilla roscada para transmisión de carga a anclaje.



Figura 9: Falla del anclaje por arrancamiento del cono de hormigón.

4.2 Resultados de Ensayos

En la **tabla 1** se presentan los ensayos realizados y los resultados obtenidos. A fin de poder realizar una comparación entre los ensayos, y que esta sea independiente de la profundidad de empotramiento de los anclajes, se calculó la tensión característica de cada anclaje (τ). Esta tensión se obtuvo dividiendo la carga de ensayo con respecto al área lateral del anclaje empotrado, es decir, el perímetro de la varilla roscada por la longitud de empotramiento. Se indican también la reducción porcentual de la resistencia a tracción del anclaje debido a los distintos anchos de fisuración del hormigón.

En la Figura 10 se presentan los resultados de la tensión característica promedio para cada serie de ensayos.

Tabla 1: Resultado de los ensayos de arrancamiento de anclajes.

Serie	Tipo	Ensayo	Diámetro	Prof. de empot.	Carga máx.	Deformación	Def. prom.	τ	τ prom.	Reducción de la resistencia
			mm	mm	kN	mm	mm	Mpa	Mpa	
E1	Hormigón sin fisurar	E1-1	10	65	22.75	1.87	2.39	11.14	12.98	0.00%
		E1-2	10	70	26.53	2.47		12.06		
		E1-3	10	65	29.54	2.98		14.47		
		E1-4	10	65	27.82	2.15		13.62		
		E1-5	10	65	27.78	2.51		13.60		
E2	Hormigón fisurado, ancho de fisura 0.4mm	E2-1	10	65	15.47	2.12	2.48	7.58	6.73	-48.13%
		E2-2	10	68	15.61	1.67		7.31		
		E2-3	10	62	9.26	3.01		4.75		
		E2-4	10	67	12.436	1.80		5.91		
		E2-5	10	70	18.904	3.53		8.60		
		E2-6	10	72	14.14	2.75		6.25		
E3	Hormigón fisurado, ancho de fisura 0.8mm	E3-1	10	65	7.58	1.64	1.96	3.71	4.53	-65.10%
		E3-2	10	69	9.68	2.62		4.47		
		E3-3	10	72	13.2	2.08		5.84		
		E3-4	10	65	7.216	1.79		3.53		
		E3-5	10	66	10.584	1.68		5.10		

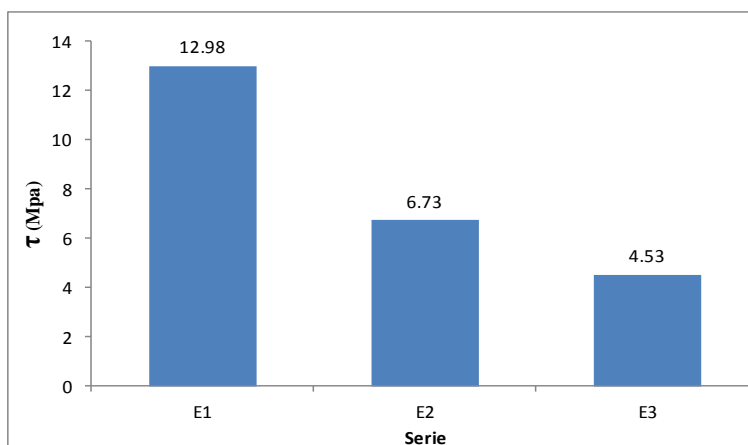


Figura 10: Tensión de adherencia promedio para cada serie.

4.3 Capacidad nominal de los anclajes ensayados según reglamentos relevantes

En la **Tabla 2** se presentan los parámetros utilizados y los resultados analíticos obtenidos a través de las ecuaciones (2) y (5) del ACI318-14.

Tabla 2: Resistencia analítica de los anclajes calculada con las expresiones del ACI318-14.

Serie	Ensayo	Diámetro mm	Prof. mm	Resistencia del cono de arrancamiento						Resistencia por adherencia						Ensayo	
				K_c	λ_a	$\psi_{c,N}$	ϕ	f'_c Mpa	N_{cb} kN	N_{cb} prom. kN	$T_{uncr,0}$ Mpa	T_{cr}	λ_a	ϕ	N_a kN	N_a prom. kN	N máx. kN
E1	E1-1	10	65	10	1	1.4	0.75	17.8	23.22	23.76	16.8	1	0.75	25.73	26.13	22.75	26.88
	E1-2	10	70	10	1	1.4	0.75	17.8	25.94		16.8	1	0.75	27.71		26.53	
	E1-3	10	65	10	1	1.4	0.75	17.8	23.22		16.8	1	0.75	25.73		29.54	
	E1-4	10	65	10	1	1.4	0.75	17.8	23.22		16.8	1	0.75	25.73		27.82	
	E1-5	10	65	10	1	1.4	0.75	17.8	23.22		16.8	1	0.75	25.73		27.78	
E2	E2-1	10	65	7	1	1	0.75	17.8	11.61	12.25	8.8	1	0.75	13.48	13.96	15.47	14.30
	E2-2	10	68	7	1	1	0.75	17.8	12.42		8.8	1	0.75	14.10		15.61	
	E2-3	10	62	7	1	1	0.75	17.8	10.81		8.8	1	0.75	12.86		9.26	
	E2-4	10	67	7	1	1	0.75	17.8	12.15		8.8	1	0.75	13.89		12.44	
	E2-5	10	70	7	1	1	0.75	17.8	12.97		8.8	1	0.75	14.51		18.90	
	E2-6	10	72	7	1	1	0.75	17.8	13.53		8.8	1	0.75	14.93		14.14	
E3	E3-1	10	65	7	1	1	0.75	17.8	11.61	12.26	8.8	1	0.75	13.48	13.98	7.58	9.65
	E3-2	10	69	7	1	1	0.75	17.8	12.70		8.8	1	0.75	14.31		9.68	
	E3-3	10	72	7	1	1	0.75	17.8	13.53		8.8	1	0.75	14.93		13.2	
	E3-4	10	65	7	1	1	0.75	17.8	11.61		8.8	1	0.75	13.48		7.216	
	E3-5	10	66	7	1	1	0.75	17.8	11.88		8.8	1	0.75	13.68		10.584	

4.4 Resultados experimentales vs. analíticos

En la Figura 11 se muestra para cada serie una comparación entre la carga máxima promedio obtenida, N_{ensayo} , y la carga promedio calculada analíticamente para los dos modos de falla considerados (rotura del cono de arrancamiento de hormigón, N_{cb} , y rotura por falla de adherencia, N_a).

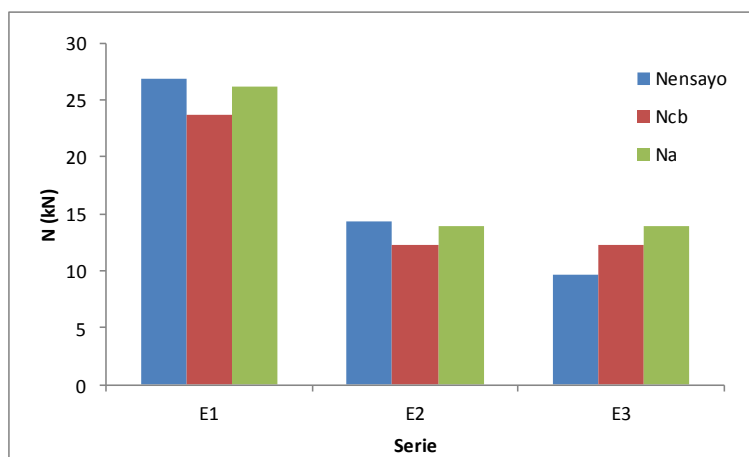


Figura 11: Tensión de adherencia promedio para cada serie.

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En cuanto al análisis de los resultados experimentales, se observa una disminución de la capacidad de carga del anclaje al presentarse un aumento en el ancho de fisura. Esta disminución, con respecto a un hormigón no fisurado, fue del orden del 48% para un ancho de fisura de 0.4 mm, y del 65% para un ancho de fisura de 0.8 mm.

Al calcular la resistencia de los anclajes mediante las fórmulas del ACI318-14, se observa que para las series E1 y E2, las resistencias calculadas concuerdan con la capacidad del anclaje obtenida mediante los ensayos. Las fórmulas del ACI318-14 sobrevalora la capacidad de los anclajes de la serie E3, anclajes en hormigón fisurado con un ancho de fisura de 0.8 mm.

6 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió el comportamiento de los anclajes químicos colocados en hormigón cuando una fisura atraviesa el plano en el cual se encuentran instalados. Para ello se determinó el ancho probable de la fisura dependiendo el origen de esta. Siendo de 0.4 mm por efectos reológicos o de inestabilidad volumétrica, y de 0.8 mm para el caso de fluencia de armaduras fuera de zonas de rótulas plásticas ante un evento sísmico. Posteriormente se realizaron ensayos de arrancamiento en anclajes químicos instalados en hormigón sin fisurar y hormigón fisurado, con los dos anchos de fisura estudiados. Los resultados obtenidos se compararon entre ellos y con las ecuaciones de cálculo de capacidad de anclajes provistas en el ACI318-14.

Del estudio realizado se desprenden las siguientes conclusiones:

a) En estructuras de hormigón sujetas a cargas sísmicas y fuera de las zonas de rótulas plásticas, pueden esperarse fisuras de aproximadamente 0.8 mm de ancho.

b) En caso de que la fisura intercepte la sección de un anclaje químico, se producirá una reducción de la capacidad del anclaje. Se observó que dicha

reducción fue del orden del 65% respecto a la capacidad del mismo anclaje en el hormigón sin fisurar.

c) La determinación de la capacidad de los anclajes de acuerdo a las expresiones provistas en el ACI318-14 se corresponden con los resultados experimentales obtenidos, para el caso de hormigón sin fisurar.

d) Los resultados experimentales en hormigón con ancho de fisura de 0.4 mm se correspondieron con las expresiones de cálculo del ACI318-14. No siendo así para hormigones con ancho de fisura de 0.8 mm para los cuales las expresiones de cálculo del ACI318-14 sobrevaloran la capacidad real de los anclajes.

7 AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo quieren agradecer al Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTeC) de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina. También se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Se agradece la colaboración de la empresa FISCHER que donó el adhesivo epoxi para la ejecución de los ensayos.

8 BIBLIOGRAFIA

1. Rolf Eligehausen, Rainer Mallee, John F. Silva; (2006) *Anchorage in Concrete Construction*. Ernst & Sohn Wilhelm, first edition, 391p.
2. Rolf Eligehausen, and Tamas Balogh, (1995), "Behavior of Fasteners Loaded in Tension in Cracked Reinforced Concrete", *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 3, pp. 365-379.
3. Matthew S. Hoehler and Rolf Eligehausen, (2008), "Behavior of Anchors in Cracked Concrete under Tension Cycling at Near-Ultimate Loads", *ACI Structural Journal*, V. 105, No. 5, pp. 601-608.
4. ACI Committee 318, (2014), "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-14)", Farmington Hills, MI, 524pp.
5. ACI Committee 355, (2011), "Qualification of Post-Installed Adhesive anchors in Concrete (ACI355.4-11)", Farmington Hills, MI, 59pp.
6. R. Ian Gilbert, (1992), "Shrinkage Cracking in Fully Restrained Concrete Members", *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 2, pp. 141-149.
7. Shami Nejadi and Ian Gilbert, (2004), "Shrinkage cracking and crack control in restrained reinforced concrete members", *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 6, pp. 840-845.
8. R. Ian Gilbert, (2008), "Control of flexural cracking in reinforced concrete", *ACI Structural Journal*, V. 105, No. 3, pp. 301-307.
9. ACI Committee 224, (2008), "Control of Cracking in Concrete Structures (ACI224R-01)", Farmington Hills, MI, 46pp.
10. EUROCODE 2, (2010), "Design of Concrete Structures", European Committee for Standardization, Brussels, 225pp.

11. Byung Hwan Oh and Se Hoon Kim, (2007), "Advanced Crack Width Analysis of Reinforced Concrete Beams under Repeated Loads", Journal of Structural Engineering ASCE, V. 133, No. 3, pp. 411-420.
12. H. Marzouk, M. Hossin, and A. Hussein, (2010), "Crack Width Estimation for Concrete Plates", ACI Structural Journal, V. 107, No. 3, pp. 282-290.
13. D. Hugi, H. Marzouk, (2015), "Crack Width Monitoring System for Reinforced Concrete Beams using Piezo-Ceramic Sensors", Journal of Civil Structural Health Monitoring, V. 105, No. 1, pp. 57-66.
14. Hoehler, M. S., (2006), "Behavior and Testing of Fastening to Concrete for Use in Seismic Applications, PhD dissertation, Universitat Stuttgart, Stuttgart, Germany, 261pp.