

Caracterización experimental de anclajes post instalados de gran capacidad en situaciones sísmicas

Experimental characterization of post-installed anchors of high capacity in seismic situations

Emilio José Rey Bouzón^{*, a}, Manuel F. Herrador^b, Sindy Seara Paz^c, Senén Paz

Abuín^d, Roi Meizoso Loureiro^e y Juan Meizoso Rodríguez^f.

^a Estudiante de doctorado. Arquitecto Técnico e Ingeniero de obras públicas. Universidade da Coruña

^b Prof. Contratado Doctor. Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Universidade da Coruña

^c Prof. Contratada Doctora. Dra. Ingeniera de Caminos Canales y Puertos. Universidade da Coruña

^d Director Técnico. Doctor en Ciencias Físicas. GAIRESA

^e Departamento I+D+i. Licenciado en Química. GAIRESA

^f Director Técnico. Maquinista Naval Jefe. TEIMPERSA

RESUMEN

Esta investigación se centra en el desarrollo de un método de caracterización de anclajes de gran tamaño ($\phi 32$ mm) post instalados en hormigón con resina en caso de sismo. Se parte de los ensayos requeridos por la ACI 355.4-11 y sus condicionantes, proponiendo un nuevo diseño de probeta y de ensayo que cumpla con estos ya que el diseño propuesto en la norma hace inviable el ensayo. Se realizan los ensayos de caracterización a tracción en hormigón fisurado (apertura de fisura 0.3 mm), tracción en caso de sismo (ciclos de carga y apertura de fisura 0.5 mm) y cortante en caso de sismo (ciclos de carga y apertura de fisura 0.5 mm) obteniendo valores garantizados (percentil 95 %) para hormigones de resistencia reducida.

ABSTRACT

This research focuses on the development of a characterization system for large ($\phi 32$ mm), resin-bonded post-installed anchors in concrete in case of an earthquake. It is based on the tests required by ACI 355.4-11 and its conditions, proposing a new test and test design that meets these since the design proposed in the standard makes the test unfeasible. Tensile characterization tests are carried out on cracked concrete (0.3 mm crack opening), seismic tension (0.5 mm crack opening plus loading cycles) and seismic shear (0.5 mm crack opening plus loading cycles) obtaining guaranteed values (95% percentile) for reduced resistance concretes.

PALABRAS CLAVE: anclaje, epoxi, hormigón, sismo, tracción, cortante.

KEYWORDS: anchor, epoxy, concrete, earthquake, traction, shear.

1. Introducción

El contexto actual en construcción, en el que se valora la extensión de vida útil de las

estructuras como solución alternativa a la obra nueva para mejorar la utilización de recursos, ha

extendido el campo de aplicación de sistemas como el anclaje postinstalado de hormigón para enlace de estructuras existentes con elementos de nueva fábrica. A este desarrollo ha contribuido también el avance en la tecnología de resinas adherentes.

La normativa de referencia para este tipo de elementos es la ACI 355.4-11 [1]. Sin embargo, tras un extenso estudio de la normativa, se llega a la conclusión de que las dimensiones que propone la norma para los elementos de ensayo hace virtualmente imposible su aplicación sobre elementos de anclaje de gran diámetro, en particular, las barras de acero corrugado de 32 mm de diámetro. La literatura disponible sobre el tema es escasa; lo investigado sobre el tema se limita a ensayos en diámetros pequeños [2] o ensayos en obra. Estos además no reúnen los condicionantes que propone la ACI 355.4-11 [1] para simular los efectos de sísmicos en los que el hormigón debe estar fisurado con una apertura de fisura concreta.

Existen varios estudios sobre aproximaciones numéricas [3] y de cálculo neuronal [4] para predecir las características mecánicas pero no están respaldados por ensayos en grandes diámetros. Del mismo modo, aunque la información comercial de determinados suministradores incluye cálculos que estarían de acuerdo con la normativa, tampoco se proporcionan resultados experimentales de contraste.

2. Anclaje de estudio y ensayos planteados

El anclaje objeto del estudio de esta investigación es un anclaje postinstalado consistente en una barra corrugada de acero de 32 mm de diámetro insertada en un taladro de 40 mm de diámetro y 800 mm de profundidad relleno con resina. La campaña experimental de esta investigación se centra en la caracterización mecánica en caso de sismo por ser el caso más

restrictivo y garantía de que en el resto de caso las capacidades mecánicas serán mayores.

2.1 Ensayo de tracción sísmica

La base de este ensayo aparece descrito en el apartado 8.12 de la ACI 355.4-11 [1]. Se parte de los valores de un ensayo previo de tracción obtenido de un mínimo de 5 probetas con hormigón fisurado y una apertura de fisura de 0.3 mm para obtener un valor de referencia de resistencia a arrancamiento (apartado 8.4).

En el ensayo de tracción sísmica se aplican 3 escalones de cargas cíclicas de tracción a probetas con una apertura de fisura en esta ocasión de 0.5 mm:

- 10 ciclos con el 50 % de la carga de referencia;
- 30 ciclos con el 37.5 % de la carga de referencia;
- 100 ciclos con el 25 % de la carga de referencia.

Tras este proceso se llevan a rotura obteniendo el valor característico de resistencia a tracción en caso de sismo. También se requiere una muestra mínima de 5 ensayos.

2.2 Ensayo de cortante sísmico

Estos ensayos son similares a los del apartado anterior y aparecen descritos en el apartado 8.13 de la ACI 355.4-11 [1]. Como en el caso anterior se parte de una carga de referencia. En esta situación se puede obtener mediante ensayos, o mediante cálculos basados en el apéndice D de la ACI 318 [5]. En este caso, se opta por la referencia mediante cálculos.

A partir de este valor se aplican unos ciclos de carga de cortante alternando los sentidos a unas probetas con una apertura de fisura de 0.5 mm:

- 10 ciclos con el 50 % de la carga de referencia;
- 30 ciclos con el 37.5 % de la carga de referencia;

- 100 ciclos con el 25 % de la carga de referencia.

Tras estos ciclos se lleva a rotura y se obtiene el valor característico de resistencia a cortante en caso de sismo. Se requiere una muestra mínima de 5 probetas.

3. Diseño de probeta

Esta es una de las partes centrales de la investigación ya que las dimensiones que propone la norma para las probetas hacen inviable el ensayo.

3.1 Condicionantes de la norma ACI 355.4

La norma en su apartado 4.4 habla de los requerimientos de la probeta de ensayo y que se seguirán los de la ASTM E488 [6] siempre y cuando no interfieran con los de esta norma. En este caso, dado el tamaño del anclaje, los requerimientos de ASTM no son de aplicación. Los condicionantes limitantes en cuanto a puntos de aplicación de carga son los de ACI 355.4-11 [1] (Figura 1).

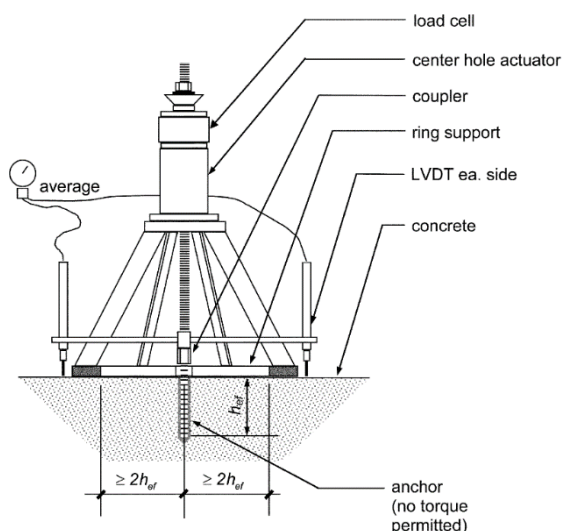


Figura 1: Disposición de ensayo propuesto por la norma ACI 355.4-11

Como se puede ver en la figura la distancia entre el apoyo del gato que se usa para traccionar el anclaje y el anclaje debe ser al menos de 2 veces la profundidad del anclaje para evitar la interacción de esfuerzos. Esto asegura que el hormigón no esté comprimido en la zona del anclaje creando un estado tensional en el que falsearía los resultados aumentando la fuerza de arrancamiento del anclaje como pasa en los pull-out y se explica en los condicionantes de los ensayos de adherencia de la EHE [7].

Por otra parte, la probeta debe tener una profundidad mínima que se muestra en la ecuación (1).

$$h_{\min} = h_{ef} + \Delta h \geq 2.00 \text{ in.} \quad (1)$$

Donde:

$$\Delta h \geq 2d_o \geq 1.25 \text{ in}$$

h_{ef} : profundidad del anclaje

d_o : diámetro del taladro realizado para el anclaje

Así, las dimensiones de probeta mínimas para el anclaje propuesto para estudio son de $3.2 \times 3.2 \times 0.9 \text{ m}^3$ y un peso aproximado de 23 T.

La norma también distingue entre ensayos en hormigón sin fisurar y fisurado. En el caso de los ensayos en el hormigón sin fisurar las probetas son de hormigón en masa y en de las de fisurado llevan un armado en la dirección perpendicular a la fisura de con una cuantía aproximada del 1% inducir las fisuras en las probetas.

En nuestro caso los ensayos son sobre probetas con hormigón fisurado, para lo que la norma propone el montaje que se muestra en la figura 2.

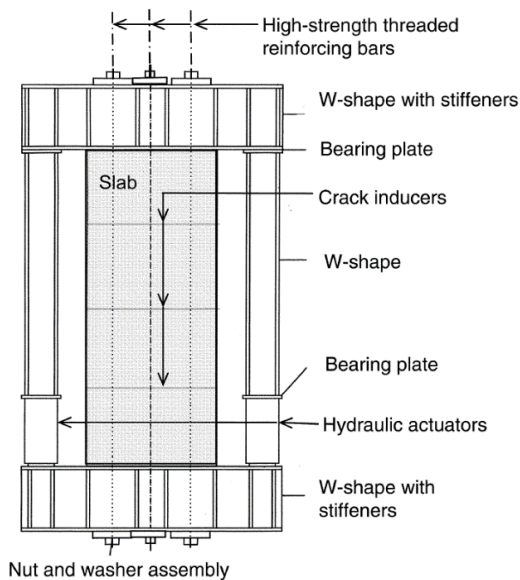


Figura 2: montaje propuesto por ACI 355.4-11 para fisuración

Con las dimensiones de probeta propuestas y considerando una resistencia habitual del hormigón a tracción de 1.5 MPa, sin incluir los aportes del armado, se necesita una carga en el orden de 4300 kN para fisurar la probeta, que podría reducirse con inductores de fisura, aunque no sustancialmente. El elevado valor de esta carga, junto con el peso y el número de ensayos a realizar (un mínimo de 15 probetas) hacen totalmente inviable el ensayo en términos mecánicos y económicos si no se modifica la configuración de la probeta.

3.2 Nuevo diseño de probeta

Se propone primero reducir la profundidad del anclaje de estudio a 550 mm y reducir el ancho de probeta a la distancia mínima a borde según la norma ACI 318 [5], que para anclajes de 32 mm es de 16 cm, dando un ancho de 32 cm.

Otra novedad del diseño de la probeta es la introducción de elementos en forma de ménsula en la base, sobre los que se realizará la sujeción sin que esto provoque interferencia de esfuerzos ni se comprima el hormigón en la zona del anclaje.

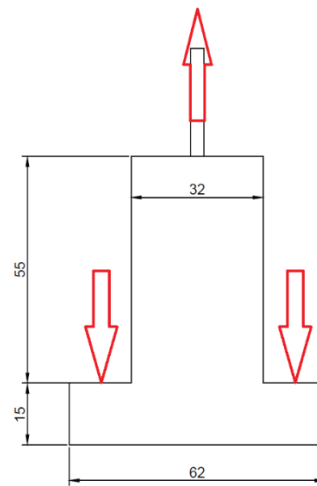


Figura 3: Nuevo diseño de probeta, cotas en cm

Con este nuevo tamaño y forma se dimensiona y distribuye un armado que sirva para fisurar la probeta y a su vez evite el hendimiento (*splitting*) que puede aparecer al reducir las dimensiones. Primero se distribuye el armado para la fisuración. Para esto se colocan 6 barras pasantes de diámetro 10 mm y 4 barras iguales en forma de U a cada lado de la fisura para que la fuerza de tracción sea más homogénea. También se colocan 2 cercos de diámetro 12 mm a cada lado de la fisura para garantizar la integridad de la probeta y evitar el hendimiento. Estos cercos representan una cuantía geométrica del 1 % de la sección de hormigón. Por último, se refuerzan las ménsulas con las que se sujetan la probeta con un armado denso que resista los esfuerzos (Figura 4).

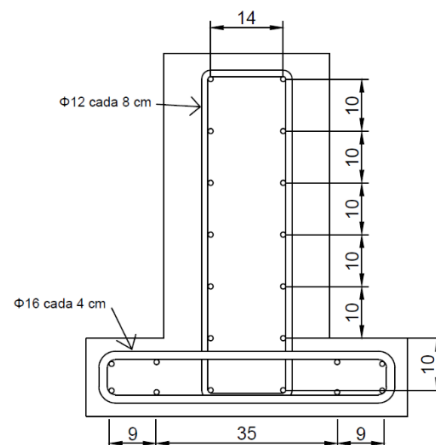


Figura 4: Armado de la probeta

Para simplificar la fisuración y asegurar se produzca en la zona central se colocan unas

chapas de 0.5 mm de acero galvanizado como se muestra en la Figura 5.

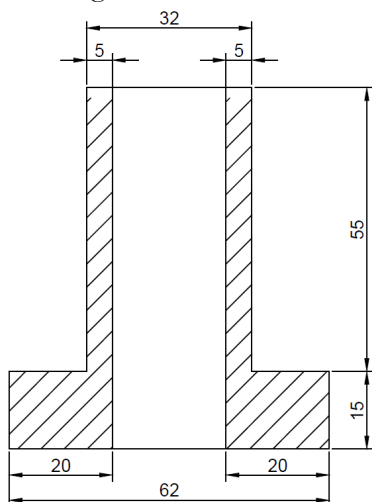


Figura 5: Inductores de fisura

Para los ensayos de cortante se diseña una probeta igual pero sin ménsulas, ya que se realizarán con la misma en posición horizontal.

4 Disposición de ensayos

Para realizar los ensayos se hacen dos montajes distintos sobre una mesa ranurada con un pórtico metálico. Previamente se dispone un montaje auxiliar sobre la losa de carga del laboratorio para la fisuración.

4.1 Montaje para fisuración

Dado que estos ensayos se realizan sobre hormigones fisurados es necesario producir una fisura en la probeta en la zona del anclaje. Para esto se dispone el montaje de la figura 6. La fisuración se realiza antes de los 14 días, antes de que el hormigón desarrolle un valor elevado de resistencia a tracción.

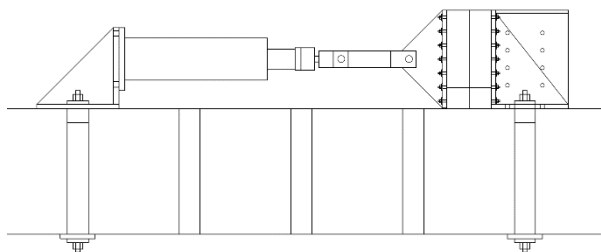


Figura 6: Montaje para fisuración

4.2 Montaje ensayo de tracción

El ensayo de tracción se hace sobre una mesa ranurada con un pórtico, empleando dos actuadores hidráulicos a la vez. El actuador horizontal controla la apertura de fisura y el vertical tracciona el anclaje, todo esto instrumentando la fisura con 4 sensores de desplazamiento lineal (LDS) y el desplazamiento del anclaje con otros 3. El esquema de montaje sobre la mesa ranurada se muestra en la figura 7.

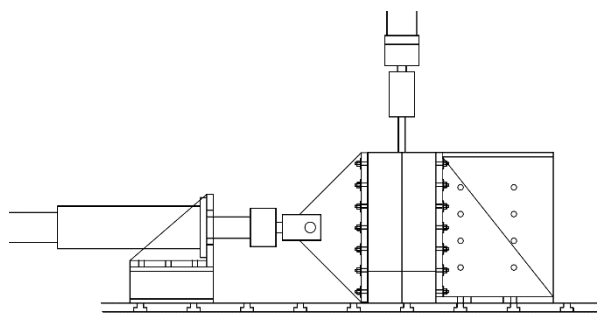


Figura 7: Setup ensayos de tracción

4.3 Montaje ensayo de cortante

El montaje para cortante es similar al de tracción, pero con la probeta en posición horizontal (Figura 8). Se instrumenta de forma similar la apertura de fisura y se aplican las cargas con el actuador que está en posición vertical.

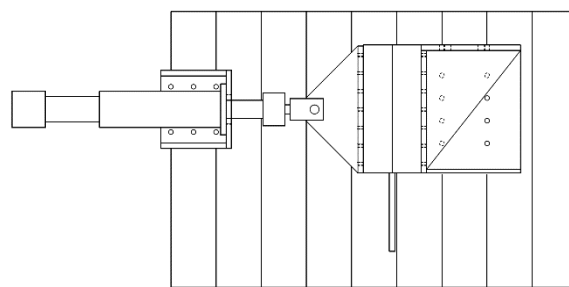


Figura 8: Montaje ensayo de cortante, vista en planta

5 Fabricación de probetas

Para la fabricación de las probetas se construyen moldes de madera con las tapas perforadas en las que colocar el armado de

fisuración y asegurar su posición para que encaje en el utillaje de ensayo.

La ACI 355.4-11 [1] es bastante conservadora para la obtención de los valores de resistencia mecánica en los ensayos de caracterización en caso de sismo y en su punto 4.3.4 dice que las probetas deben fabricarse con hormigón de resistencias a compresión que no supere los 4000 psi (27.6 MPa), recomendando valores de 2500 psi (17.2 MPa). En las figuras 9, 10 y 11 se muestra el proceso de montaje de las probetas y el resultado final una vez desmoldadas.



Figura 11: Probetas ya fabricadas

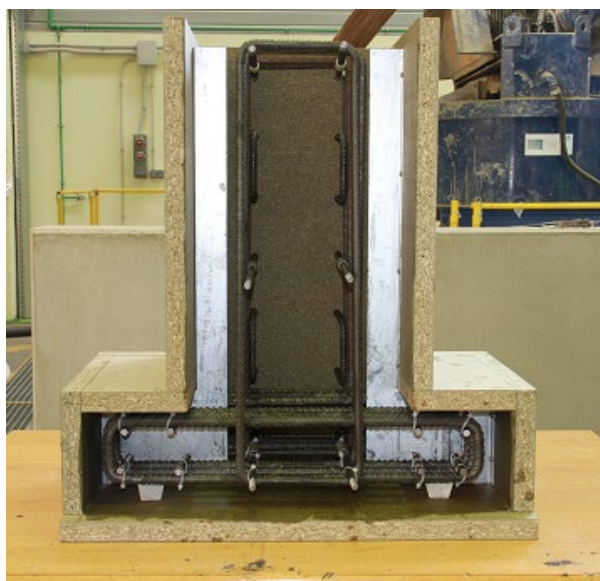


Figura 9: Probeta con armado sin tapa

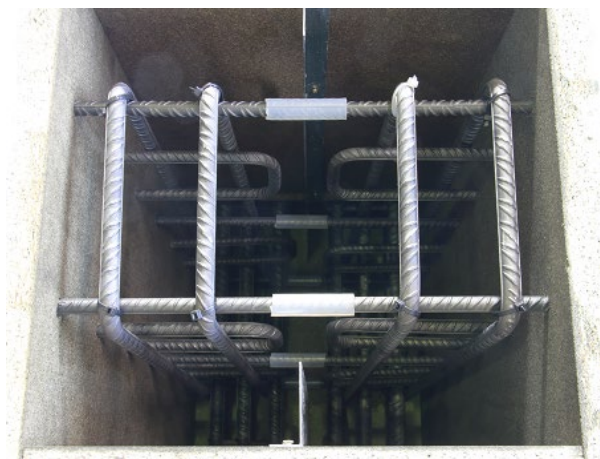


Figura 10: Vista interior de la probeta antes de hormigonar

5.1 Resina

El adhesivo utilizado se trata de Bepox 626 TIX, un formulado epoxídico bicomponente tixotrópico desarrollado a partir de los productos Bepox 626 y Bepox 889 TIX, del fabricante GAIRESA.

5.2 Hormigón

El hormigón con el que se fabrica las probetas se caracteriza según la UNE 12391-3 [8] obteniendo el valor de la Tabla 1.

Tabla 1: Caracterización del hormigón

	Media (MPa)
Compresión (f_{ck})	16.7

6 Fisuración de probetas

Antes de rellenar las perforaciones con resina anclaje las probetas deben ser fisuradas en toda la longitud del taladro del anclaje. Se utiliza el esquema de montaje del punto 4.1 como se muestra en la figura 12. El resultado puede verse en la figura 13 donde se aprecia la fisura.



Figura 12: Probeta durante fisuración



Figura 13: Probeta fisurada

7 Ensayos de tracción

El montaje y la instrumentación es el mismo en los ensayos de caracterización del anclaje a tracción con hormigón fisurado y en los de caracterización del anclaje en caso de sismo. Se colocan LDS en la parte inferior y superior de la fisura para controlar su apertura con el actuador que está dispuesto en horizontal, anclando la probeta a la mesa con macizos de acero (Figura 14).

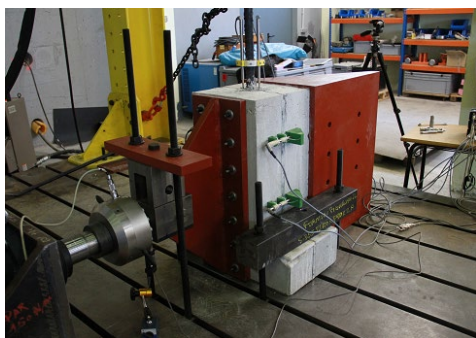


Figura 14: Montaje ensayo de tracción

En la figura 15 se muestran los tres LDS dispuestos a 120° que miden el desplazamiento relativo entre el anclaje y la cara superior de la probeta.

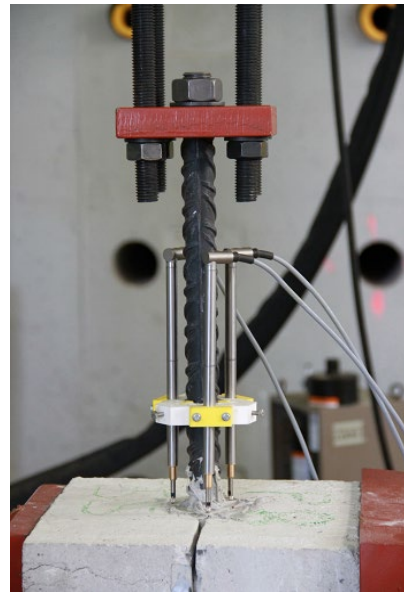


Figura 15: Instrumentación del anclaje

7.1 Ensayo de caracterización a tracción

En este ensayo se parte de una apertura de fisura de 0.3 mm y se tracciona el anclaje hasta rotura. En nuestro caso utilizamos una rampa de carga en control por desplazamiento de 3 mm/min.

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos y en la tabla 3 la media, así como la desviación típica y el valor característico (percentil 95%).

Tabla 2. Resultados ensayo de tracción.

Probeta	Carga máxima (kN)
1	253.8
2	232.9
3	223.2
4	267.7
5	205.6

Tabla 3: Resumen resultados de tracción.

	Media (kN)	Desviación típica (kN)	Valor característico (kN)
Tracción	236.6	22.0	215.6

En la figura 16 se muestra una probeta ensayada. La existencia de armado para evitar el hendimiento limita el tamaño del cono de arrancamiento de hormigón que acompaña al anclaje, por lo que cabe esperar que los resultados sean más conservadores que los obtenidos con una aplicación directa de la norma.



Figura 16: Probeta rota en ensayo de tracción.

7.2 Ensayos de caracterización a tracción en caso de sismo

El montaje es idéntico al anterior, pero partiendo de una apertura de fisura de 0.5 mm. Se aplican ciclos de carga según la tabla 4 antes de llevar a rotura.

Tabla 4: Cargas aplicadas en los ciclos de fatiga a tracción.

Ciclos	10	30	100
Carga (kN)	118.3	88.8	59.2
Frecuencia (Hz)	0.1	0.2	0.3

Tras estos ciclos de fatiga se lleva el anclaje a rotura igual que en los casos anteriores con una rampa de carga de 3 mm/min obteniendo los resultados de la tabla 5. En la tabla 6 se muestra la media, desviación típica y el valor característico (percentil 95%).

Tabla 5: Resultados ensayo de tracción en condiciones sísmicas.

Probeta	Carga máxima (kN)
1	210.8
2	-
3	254.2
4	270.5
5	266.9
6	226.5

El resultado de la probeta 2 fue descartado por presentar un patrón de rotura anómalo, que se manifestó en forma de carga de rotura reducida respecto al resto de ensayos.

Tabla 6: Resumen resultados de tracción en caso de sismo.

	Media (kN)	Desviación típica (kN)	Valor característico (kN)
Tracción	245.8	23.3	223.6

8 Ensayo de cortante

Para este ensayo partimos del supuesto más restrictivo que es el de un anclaje colocado en un borde. La distancia mínima a bordes es 16 cm igual que la distancia mínima entre anclajes; por eso se usa probeta con la misma geometría que los ensayos de tracción, pero sin las patas ya que el ensayo se hace con la probeta horizontal. En este ensayo la apertura de fisura es de 0.5 mm y se instrumenta en 4 puntos igual que en el ensayo anterior. El montaje se puede ver en la figura 17.



Figura 17: Montaje del ensayo de cortante

8.1 Carga de referencia para ensayos de cortante

Para obtener la carga de referencia la ACI 355.4-11 [1] propone una caracterización experimental o la obtención a través de la formulación del apéndice D de la ACI 318 [5]. Se opta por lo segundo para no cargar en exceso la campaña experimental.

La ecuación (2) sirve para proporcionar la resistencia máxima de un anclaje situado en un borde:

$$V_b = 0.6 \left(\frac{l_e}{d_o} \right)^{0.2} \sqrt{d_o} \sqrt{f'_c} (c_{a1})^{1.5} = 53.5 \text{ kN} \quad (2)$$

Donde:

$$l_e = h_{ef} = 550 \text{ mm}$$

$$d_o = 40 \text{ mm}$$

$$f'_c = 17 \text{ MPa}$$

$$c_{a1} = 160 \text{ mm}$$

Para garantizar que este resultado es válido se rompe una probeta con una apertura de fisura de 0.3 mm siguiendo las indicaciones del punto 8.11 de la ACI obteniendo el valor de la tabla 7.

Tabla 7: Resultado ensayo de caracterización a cortante

Probeta	Carga máxima (kN)
1	64.9

Se comprueba que el valor de la fórmula (2) es muy conservador, por lo que finalmente se usa

el valor del ensayo para calcular los ciclos de carga.

8.2 Ensayos de caracterización a cortante en caso de sismo

El proceso es similar al de tracción, llevando la fisura a una apertura de 0.5 mm y aplicando después ciclos de carga según la tabla 8.

Tabla 8: Cargas aplicadas en los ciclos de fatiga a cortante

Ciclos	10	30	100
Carga (kN)	±32.5	±24.4	±16.3

Se obtienen los resultados de la tabla 9.

Tabla 9: Resultados ensayo de cortante en condiciones sísmicas.

Probeta	Carga máxima (kN)
1	76.5
2	66.9
3	85.6
4	70.2
5	65.1

El patrón de rotura es el esperado para este tipo de ensayo (Figura 18).



Figura 18: Probeta ensayada a cortante

El resumen de resultados y su valor característico (percentil 95%) se muestra en la tabla 10.

Tabla 10: Resumen resultados de cortante en caso de sismo

	Media (kN)	Desviación típica (kN)	Valor característico (kN)
Cortante	72.9	7.5	65.8

9 Conclusiones

Se ha desarrollado un método de caracterización de anclajes de gran tamaño ($\phi 32$ mm) post instalados en hormigón con resina en caso de sismo. Este método respeta los condicionantes básicos de la norma ACI 355.4-11, de referencia para estos casos, pero contempla un diseño de probeta y un sistema de aplicación de carga que posibilita el ensayo sobre anclajes de gran diámetro.

La batería de ensayos presentada muestra que, bajo las condiciones particulares del ensayo (profundidad de anclaje de 550 mm y resistencia característica del hormigón de 16.7 MPa), los valores garantizados (percentil del 95 %) de rotura para el sistema de barra B500 SD de 32 mm de diámetro nominal y resina Bepox 626 TIX, obtenidos en línea con las disposiciones de la norma ACI 355.4-11 [1], son los siguientes:

- Resistencia a tracción en condiciones sísmicas: 223.6 kN
- Resistencia a cortante en condiciones sísmicas: 65.8 kN

Estos resultados son conservadores y en un caso real serán superiores ya que la resistencia del hormigón utilizado siempre será mayor.

Agradecimientos

Agradecer a Gairesa y a la Fundación de la Ingeniería Civil haber hecho posible esta

investigación con la firma de un convenio de investigación.

Referencias

- [1] ACI Committee 355, Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Comommentary, 2011.
- [2] S. Teng, K. Chanthabouala, D.T.Y. Lim, R. Hidayat, Punching shear strength of slabs and influence of low reinforcement ratio, *ACI Struct. J.* 115 (2018) 139–150. <https://doi.org/10.14359/51701089>.
- [3] M. Gesoğlu, E.M. Güneyisi, E. Güneyisi, M.E. Yilmaz, K. Mermerdaş, Modeling and analysis of the shear capacity of adhesive anchors post-installed into uncracked concrete, *Compos. Part B Eng.* 60 (2014) 716–724. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.015>.
- [4] S.S.S. Sakla, A.F. Ashour, Prediction of tensile capacity of single adhesive anchors using neural networks, *Comput. Struct.* 83 (2005) 1792–1803. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.02.008>.
- [5] American Concrete Institute, REQUISITOS DE REGLAMENTO PARA CONCRETO ESTRUCTURAL (ACI 318S-08) y COMENTARIO (Versión en español y en sistema métrico), Director. (2008) 520. [https://doi.org/10.1016/S1130-6343\(05\)73662-X](https://doi.org/10.1016/S1130-6343(05)73662-X).
- [6] ASTM International, Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements, *Astm.* (2018). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.072>.
- [7] M. Fomento, Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), 2008. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [8] UNE 12390-3, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a la compresión de probetas., Aenor. (2003).