

ANCLAJES AL TERRENO INSTRUMENTADOS EN PROFUNDIDAD

Javier RIPOLL GARCÍA-MANSILLA

Ingeniero de caminos, Canales y Puertos

Ripoll Consulting de Ingeniería S.L.

Director

Javierripoll@ripollconsulting.com

RESUMEN

Las pruebas de carga de anclajes con su bulbo instrumentado constituyen un nuevo tipo de ensayos cuyos resultados facilitan la superación de una de las mayores dificultades que presenta la tecnología de los anclajes al terreno: la comprobación in situ de la idoneidad del diseño de los bulbos de los anclajes.

La novedad del ensayo radica en la instrumentación del bulbo que permite registrar y controlar con bastante precisión como se produce la transmisión de carga entre el bulbo y el terreno.

PALABRAS CLAVE: anclajes al terreno, anclajes al terreno instrumentados, bulbos de anclaje, transferencia de carga, tensión de adherencia, prueba de carga, idoneidad

1. Criterios habituales para el diseño de los bulbos de los anclajes al terreno

En el proyecto de toda obra con anclajes al terreno, una de las partes mas importantes y complicadas es el dimensionamiento y posicionamiento de los bulbos de los anclajes.

De forma muy simplificada podemos decir que la fuerza (F) sustentada por el bulbo de un anclaje al terreno depende del diámetro efectivo del bulbo (D), de la longitud efectiva del bulbo (L_b) y de la tensión de transferencia (T) desarrollada a lo largo del bulbo.

$$F = \int \Pi \cdot D \cdot L_d \cdot T$$

Dado que el objetivo de esta presentación es describir un tipo de ensayo y no un procedimiento de cálculo simplificaremos la parte teórica hasta un nivel únicamente conceptual. De acuerdo con ese criterio consideraremos que los diámetros y longitudes de los bulbos coinciden con los diámetros y longitudes de la perforación. Dicha consideración no es cierta en la mayoría de los casos pero facilita la claridad de nuestra exposición.

El valor de la fuerza a anclar (F) es un dato básico del proyecto. La tipología de anclaje a utilizar (número de cordones y sección tipo) puede determinarse fácilmente en función de F y considerando las especificaciones de durabilidad del proyecto.

El diámetro de la perforación se determina teniendo en cuenta que

- a) para cada tipología de anclaje existe un diámetro mínimo para poder introducir físicamente el anclaje
- b) las normativas vigentes suelen exigir un recubrimiento de lechada sobre todas las partes metálicas del anclaje que, como mínimo, debe ser del orden de 15-20 mm.
- c) El diámetro de la perforación debería ser lo mas pequeño que sea posible para minimizar los costes de la perforación

Con los condicionantes citados, en la práctica habitual y con las tipologías de anclaje y equipos de perforación habituales, el diámetro de la perforación suele ser un parámetro muy estudiado y por lo tanto puede considerarse como prácticamente prefijado para cada tipo de anclaje. No obstante, en muchas obras, por simplificar, se adopta un único diámetro de perforación para distintas tipologías de anclajes y en algunos casos el proyectista decide, siguiendo su criterio técnico, utilizar diámetros mayores que los estandarizados. En cualquier caso, el diámetro de perforación suele ser un parámetro poco discutido y que, en general, no representa una dificultad para el diseño general de los bulbos.

Conocidos F y D , para determinar L_b sólo es necesario conocer la tensión de transferencia T .

La tensión de transferencia de proyecto (T) es un valor de difícil estimación sobre todo considerando que varía con la profundidad y con las características de las diferentes capas del terreno. Para simplificar los cálculos suelen considerarse valores medios de la tensión de transferencia asociados a cada capa de terreno. Pero ¿Cómo se determinan dichos valores medios? Ahí es donde normalmente surgen distintas opciones con diferentes grados de fiabilidad:

- a) En muchos casos, nos atreveríamos a decir que en la mayoría, se recurre a tablas con una cierta aceptación internacional, publicadas por organismos o especialistas reconocidos y que se basan en un gran número de observaciones y ensayos. En dichas tablas se asocia un cierto rango de tensiones medias de transferencia a cada tipología de terreno. Dada la enorme variabilidad de terrenos y sus circunstancias, aunque dichas tablas pueden ser orientativas, su grado de aplicabilidad a un terreno concreto presenta muchas dudas. ¿Unos valores adecuados para una arcilla limosa en Ohio resultan igualmente apropiados para otra arcilla limosa en Murcia?
- b) En otros casos se intenta una aproximación mas particularizada a las características del terreno real del proyecto y para ello se realizan una serie de ensayos geotécnicos normalizados que, en general, suelen ser ensayos de penetración estática o dinámica. Los resultados de dichos ensayos no permiten la obtención directa de las tensiones de transferencia sino que es necesario recurrir a unas tablas de conversión que asocian los resultados de penetración con un cierto rango de tensiones de transferencia. Estas tablas de conversión suelen tener también unos orígenes y credibilidad internacional similares a las anteriormente citadas y aunque proporcionan estimaciones mas cercanas a la realidad siguen ofreciendo un grado de precisión bastante cuestionable.
- c) En un número de casos mucho mas reducido se intenta aumentar la exactitud en la determinación de las tensiones de transferencia y se realizan ensayos geotécnicos mas especializados como son los ensayos de corte de muestras inalteradas en laboratorio o los ensayos presiométricos in situ. No obstante este tipo de ensayos tampoco permiten la

determinación directa de las tensiones de transferencia sino que precisan tablas de conversión, en cierto modo, semejantes a las previamente citadas y, consecuentemente, los resultados siguen manteniendo un elevado grado de incertidumbre.

Los proyectistas solo pueden equilibrar la inseguridad en la estimación de los valores de las tensiones medias de transferencia mediante la adopción de coeficientes de seguridad elevados y la exigencia de pruebas de carga in situ que permitan verificar la corrección de su diseño.

No obstante, las pruebas de carga normalizadas vigentes tampoco permiten una verificación completa de la exactitud de las previsiones del diseño al no proporcionar información detallada sobre el comportamiento real del bulbo. Por lo tanto el proyectista solo puede llegar a saber si sus previsiones quedaron “cortas” (en el caso de que los anclajes no soporten las cargas de prueba) o superaron lo necesario (en el caso de que el anclaje soporte la carga de prueba). Ese grado de comprobación de la adecuación de un diseño parece excesivamente limitado.

Adicionalmente a los citados problemas de dimensionamiento, como se comenta a continuación, existe también un cierto problema en la determinación del posicionamiento del bulbo.

El extremo proximal del bulbo, normalmente, se ubica unos metros por debajo de la superficie de deslizamiento mas crítica del terreno anclado. Existen distintas normas de buena práctica que proponen como determinar esa distancia de seguridad. Una de ellas dice que debe ser el 15% de la altura del muro o el terraplén. Otra que debe ser el 15% de la longitud entre la cabeza del anclaje y la superficie de deslizamiento crítica. Otra que debe tener una longitud de entre 1,5 y 2 m. En resumidas cuentas, aunque de forma práctica parece que está aceptada una distancia de unos dos metros no se suelen dar criterios técnicos que la justifiquen.

La realización de pruebas de carga en anclajes con sus bulbos instrumentados permite comprobar con una elevada precisión como se produce la transferencia de cargas desde el bulbo del anclaje al terreno circundante. Instrumentando el bulbo pueden determinarse las tensiones de adherencia que se van desarrollando a medida que aumenta la carga del anclaje. Instrumentando la zona distal de la longitud libre, que suele estar inyectada con lechada, puede determinarse hasta donde llega el efecto de la transferencia de carga desde el bulbo al terreno.

En resumen, la instrumentación de los bulbos permite comprobar de forma precisa las previsiones de diseño de los anclajes al terreno.

Como nota final de este apartado, creemos interesante remarcar que nuestra experiencia práctica en la ejecución de pruebas de carga en anclajes al terreno confirma la necesidad de la comprobación del diseño de los bulbos. Estimamos que el porcentaje de fallo entre los anclajes que ensayamos es del orden del 15% y que una parte importante de dicho porcentaje es atribuible a una estimación incorrecta de las tensiones de transferencia del terreno.

2. La aceptación de la idoneidad de los anclajes al terreno.

En muchas obras, por comparación con la tecnología general del pretensado, surge la pregunta de si los anclajes al terreno que se van a instalar están “homologados” o no.

Existen muchas normativas internacionales que permiten homologar los anclajes de una estructura pretensada pero que presuponen que los anclajes se utilizan en unos entornos cuyas características fundamentales son conocidas y controladas (resistencia del hormigón, armadura

local de refuerzo, fuerzas máximas de tesado, etc.). El ámbito de aplicación de dichas normativas suele excluir explícitamente a los anclajes al terreno. La razón es sencilla: la homologación solo tiene sentido cuando se pueden controlar y verificar perfectamente todas las características del contorno. Sólo así es posible asegurar una repetitividad en los comportamientos y, en consecuencia, una homologación de los sistemas de anclaje.

Los anclajes al terreno tienen un extremo semejante al de los anclajes de postensado normales pero su otro extremo ancla por adherencia en un medio, el terreno, de características extremadamente variables y muy difíciles de determinar. Por lo tanto, en este tipo de estructuras resulta prácticamente imposible pretender una repetitividad de resultados y, en consecuencia, realizar “homologaciones”.

Dada la variabilidad del terreno la idoneidad del comportamiento de un anclaje sólo puede verificarse mediante su ensayo in situ. Idealmente, para asegurar el comportamiento de todos los anclajes de una obra deberían comprobarse todos ellos pero esa opción normalmente supone un costo que resulta inviable económicamente y está injustificado en la mayoría de los proyectos. Así pues, de acuerdo a criterios estadísticos similares a los considerados en procesos de fabricación industrial suelen realizarse “homologaciones” por grupos de anclajes basadas en los resultados de ensayos de comprobación realizadas en un cierto número de unidades representativas del grupo.

Las normativas de anclajes al terreno reflejan los conceptos anteriores y fijan distintos tipos de ensayos (investigación, idoneidad y aceptación) que se realizan en un número de anclajes representativos de la totalidad prevista para la obra. El número y tipo de anclajes a ensayar depende de los resultados que se vayan obteniendo. Si dichos resultados coinciden con las expectativas los requerimientos de ensayo se minimizan, en caso contrario el nivel de control se va aumentando.

Como en uno de los extremos del anclaje al terreno se instala una cabeza similar a las normalmente utilizadas en tendones postensados suele ser recomendable asegurar su comportamiento mecánico mediante la realización de ensayos de tracción. No obstante, técnicamente, hay una diferencia importante entre una cabeza de un anclaje al terreno y una cabeza de un tendón postensado: en la cabeza del anclaje al terreno todos los cordones se disponen de forma paralela mientras que en la cabeza del tendón postensado suelen tener una cierta angulación que introduce un efecto desfavorable en la eficiencia del anclaje.

Para homologar cabezas de anclajes postensados suelen exigirse ensayos estáticos y dinámicos en los que se verifica el comportamiento de la cabeza completa y se tiene en cuenta tanto el efecto de las entallas introducidas por las cuñas como el efecto de la angulación de los cordones dentro de la cabeza del anclaje.

En el caso de anclajes al terreno, para “homologar” cabezas activas, no suele tener sentido realizar ensayos dinámicos pues los anclajes tienen un comportamiento básicamente estático. Por otro lado al ser los cordones paralelos, con criterios puramente técnicos, bastaría con comprobar la correcta eficiencia de un conjunto cono-cuña aislado acompañado de un ensayo complementario donde se verificase que la deflexión de la placa de anclaje es inferior a 1mm en condiciones de carga máxima.

La normativa actual de anclajes al terreno suele especificar que deben utilizarse cabezas de anclaje activo “homologadas” para su utilización en pretensado normal y que se realicen pruebas de carga “in situ”.

Los componentes de las cabezas de los anclajes de pretensado y los de las cabezas de los anclajes al terreno suelen ser diferentes, por lo tanto la exigencia de que las cabezas de anclajes al terreno cumplan con la normativa correspondiente a las cabezas de pretensado, en nuestra opinión, carece de sentido.

Como conclusión a este apartado, creemos que en toda obra con anclajes al terreno, para aceptar la utilización de una determinada tipología de anclajes deberían requerirse, como mínimo, las siguientes pruebas documentadas:

A) Pruebas a aportar por el suministrador de los anclajes activos

- un ensayo a rotura de un conjunto cono-cuña análogo al previsto en las placas de anclaje a utilizar que demuestre que una eficiencia real de al menos el 95%
- un ensayo o una justificación técnica que determine que la placa adquiere una flecha inferior a 1 mm cuando todos los cordones alcanzan el 95% de su carga de rotura nominal.
- una justificación técnica de que las presiones entre placa de anclaje y placa de reparto y entre placa de reparto y terreno son inferiores a las tensiones admisibles por los materiales en contacto.
- una justificación técnica del espesor de la placa de reparto que justifique que la deflexión a una carga 1,3 veces superior a la máxima prevista de proyecto no supera 1,5 mm

B) Pruebas a aportar por el fabricante de la lechada de inyección

- un ensayo que asegure que las características de la lechada a inyectar cumple con los requisitos especificados en la normativa vigente teniendo en cuenta que los componentes de la lechada ensayada deberán ser exactamente los mismos y provenientes del mismo fabricante que posteriormente se utilizarán en la obra.

C) Pruebas a aportar por el instalador de los anclajes al terreno

- la realización de las pruebas de carga sobre anclajes instalados en la obra de acuerdo con la normativa vigente y con las especificaciones del proyecto.

Reunir y realizar las pruebas anteriores equivale, desde nuestro punto de vista a “homologar in situ” un sistema de anclajes al terreno no siendo posible una homologación basada en trabajos o ensayos previos.

3. Ensayos de anclajes al terreno instrumentados en profundidad

En los anteriores apartados hemos comentado que el diseño de los bulbos de anclaje resulta complicado y problemático basándose en los criterios y normativas vigentes y que las pruebas de carga “in situ” constituyen el único método fiable para verificar el correcto comportamiento de los anclajes al terreno.

Las pruebas de carga propuestas en las distintas normativas se basan en realizar controles de fuerzas y alargamientos localizados en las cabezas de los anclajes que permiten asegurar que el

anclaje resiste correctamente las cargas que recibe pero no proporcionan mucha información sobre lo que sucede en los bulbos de los anclajes. Por lo tanto, para controlar lo que sucede en dichos bulbos suele recurrirse a métodos de cálculo teórico que permiten estimar los mecanismos de transferencia de carga. En cierta manera, como comentábamos en referencia a la problemática actual para el diseño de los bulbos, volvemos a utilizar “tablas” para interpretar resultados y seguimos sin tener un conocimiento demasiado preciso de lo que realmente ocurre en los bulbos.

Intentando resolver este problema comenzamos a desarrollar la tecnología de las pruebas de carga en anclajes al terreno con sus bulbos instrumentados. La idea es instalar sensores de deformación en distintas secciones del bulbo y registrar las deformaciones que se originan para distintos niveles de carga aplicada en la cabeza del anclaje.

La posición de los sensores debe estudiarse con detalle para que puedan proporcionar información de lo que sucede en las secciones mas representativas del bulbo considerando las capas de terreno que atraviesa. Hay que tener en cuenta que el número de sensores que puede instalarse no es muy elevado por razones de espacio. La figura 1 muestra una disposición típica:

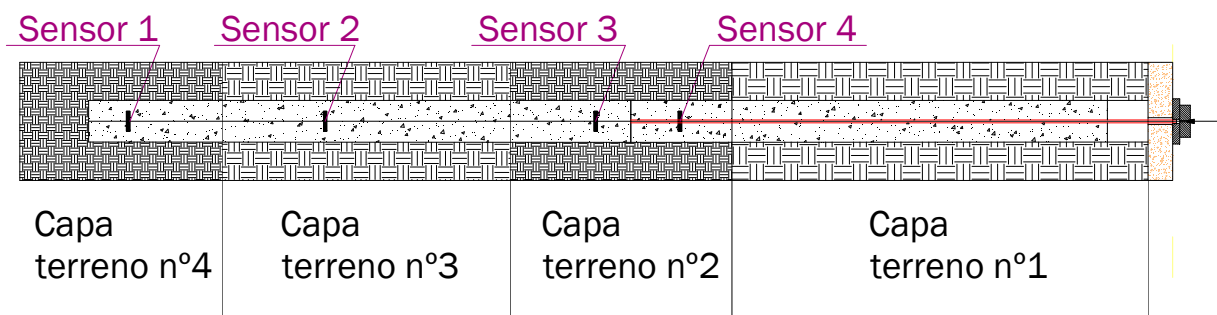


Figura 1: Posición de los sensores de deformación en un anclaje instrumentado

Las deformaciones registradas en los sensores dependen de la sección resistente del bulbo en el nivel donde se sitúa el sensor (dato conocido) y de la fuerza de tracción existente en dicha sección. Conocidas la deformación y la sección resistente puede determinarse la fuerza de tracción existente en la sección.

Para cada fuerza de tesado aplicada en la cabeza del anclaje pueden determinarse las fuerzas que llegan a las distintas secciones instrumentadas del bulbo y, en consecuencia, pueden determinarse las fuerzas que van transmitiéndose al terreno entre las distintas secciones instrumentadas. Conocida la fuerza transmitida al terreno y la superficie a través de la que dicha fuerza se transmite es posible determinar la tensión de transferencia media desarrollada en dicha superficie.

El concepto es sencillo pero la dificultad radica básicamente en “como y donde” fijar los sensores y en estimar o evaluar el efecto de fenómenos como la fisuración de la lechada del bulbo que introducen una cierta imprecisión en las conclusiones determinadas a partir de los resultados del ensayo.

RCI ha desarrollado distintos sistemas para el posicionamiento y fijación de los sensores tanto en el bulbo de anclaje como en la zona libre que poco a poco se va perfeccionando y que permiten controlar con un grado de precisión muy elevado el proceso de transmisión de carga desde el bulbo del anclaje al terreno circundante.

A continuación presentaremos una serie de fotografías que muestran las principales fases del montaje y desarrollo de una prueba de carga en un anclaje con su bulbo instrumentado.



Figura 2: Sensor de deformaciones con su barra de soporte



Figura 3: Montaje de sensores en un anclaje



Figura 4: Sensor instalado en el bulbo de un anclaje (instalación flotante)



Figura 5: Sensor instalado en el bulbo de un anclaje (fijado al cordón)



Figura 6: Sensor instalado en la zona libre de un anclaje



Figura 7: Montaje de los cables de conexión entre los sensores y el equipo de control



Figura 8: Introducción del anclaje



Figura 9: Inyección del anclaje



Figura 10: Preparación de la cabeza



Figura 11: Colocación de gato de tesado y la instrumentación en cabeza



Figura 12: Montaje del sistema electrónico de control

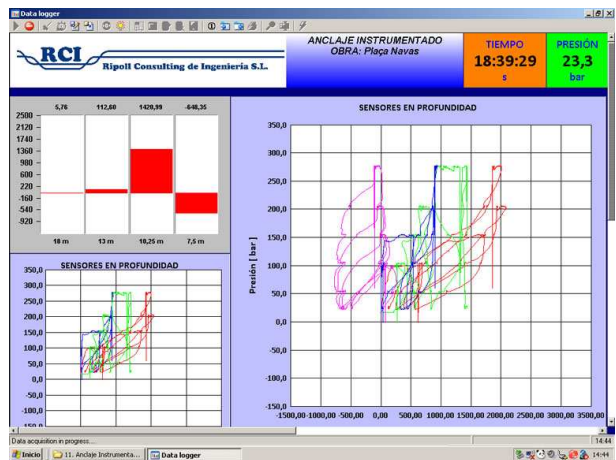


Figura 13: pantalla de seguimiento del ensayo

4. Principales resultados de los ensayos de anclajes al terreno con bulbos instrumentados

Los ensayos de anclajes al terreno con su bulbo instrumentado además de proporcionar todos los resultados exigidos por las normativas vigentes proporcionan otros resultados que permiten conocer el comportamiento real del bulbo.

Los resultados que se obtienen a partir de los registros realizados en la cabeza de anclaje y que son normalmente solicitados por la normativa vigente son:

- Curva fuerza aplicada – alargamiento del tendón
- Curva fuerza aplicada – alargamiento elástico y plástico del cordón
- Longitud libre aparente del tendón
- Carga de tesado recomendada para obtener una determinada carga remanente.

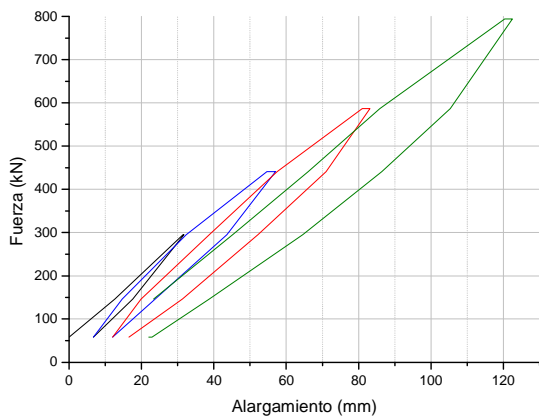


Figura 14: Curva fuerza aplicada - alargamiento total

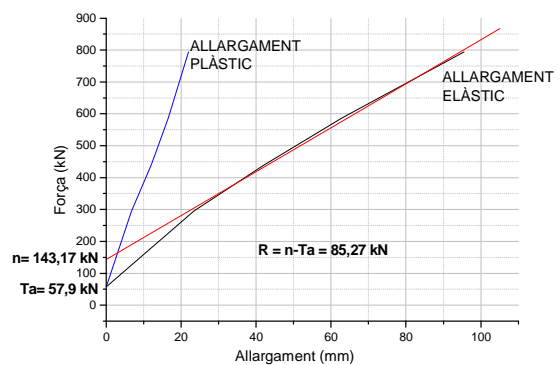


Figura 15: Curvas fuerza-alargamiento plástico y alargamiento elástico

En los ensayos con el bulbo instrumentado pueden obtenerse, adicionalmente, los siguientes resultados:

- Curvas fuerza aplicada – fuerza transmitida a lo largo del bulbo
- Curvas fuerza aplicada – tensión media de adherencia desarrollada
- Longitud del bulbo efectiva
- Previsión de la carga última real del anclaje

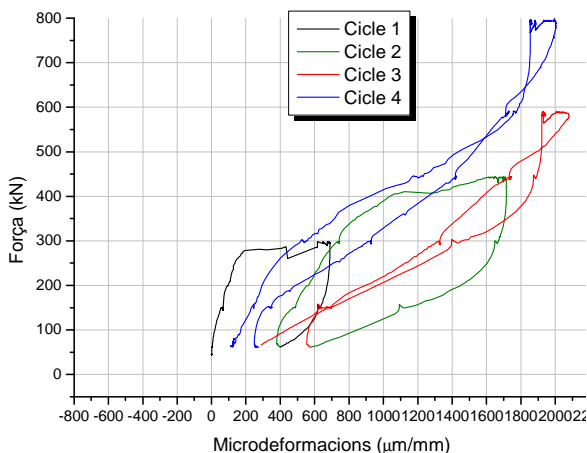


Figura 16: Curva fuerza- deformación en un sensor

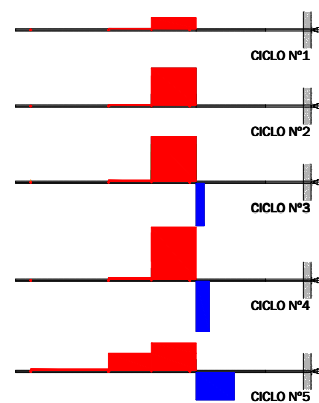


Figura 17: Fuerza aplicada - tensiones medias de transferencia

5 – Conclusiones

- La instrumentación de anclajes al terreno en profundidad proporciona al proyectista la posibilidad de verificar de una forma bastante precisa sus previsiones respecto a las tensiones medias de transferencia del terreno y, en consecuencia, verificar la corrección del dimensionamiento del bulbo del anclaje.
- La instrumentación de anclajes al terreno permite determinar la longitud de la zona libre inyectada de lechada que resulta afectada durante el tesado del anclaje y transmite esfuerzos al terreno. Conocer dicha longitud permitirá al proyectista comprobar si la ubicación del anclaje asegura la transmisión de cargas que se produce fuera de la zona crítica de deslizamiento.
- Los ensayos instrumentados facilitan también el control de la correcta ejecución de los anclajes pues, por ejemplo, pueden permitir la detección de zonas con problemas de inyección o capas de terreno con características anómalas.
- Consideramos que, en toda obra de una cierta responsabilidad, debería especificarse la exigencia de algunos ensayos instrumentados que, realizados al principio de la obra, permitirían una mejor comprobación del diseño de los anclajes y facilitarían posteriormente la comprensión de los resultados obtenidos en los ensayos de control normalizados.

Agradecimientos

La introducción de nuevas técnicas de control, aunque proporcionen información importante y tengan un costo muy reducido resulta bastante complicada pues al no figurar en ninguna normativa de obligado cumplimiento sólo puede realizarse en obras cuyos responsables tienen un interés especial en profundizar en el conocimiento y en el control de su obra y deciden sobrepasar los requerimientos mínimos de control que las normativas exigen.

Agradecemos la colaboración y compromiso de algunas personas y empresas que durante los últimos años, de distintas formas, han ido contribuyendo al desarrollo de la tecnología de este tipo especial de ensayos: D. Jordi Pujol y D. Xavier Pascual de la empresa **Barcelona de Serveis Municipals (BSM)**, D. Javier Gete Alonso de la empresa **INTEC S.L.** y D. Álvaro García de la empresa **Collosa S.A.**