

EXPERIENCIAS EN EL USO DE LOS END COMO HERRAMIENTA DE CONTROL DE CALIDAD EN LAS CONSTRUCCIONES DE HORMIGÓN

Ing. César Belinco¹, Arq. Walter Solferino¹, Dr. Mario Mariscotti¹, Ing. Sebastián Laprida¹
¹ Comité de Ensayos No Destructivos para la Ingeniería Civil y el Patrimonio Histórico – Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales, comunicacion@aaende.org.ar

RESUMEN

En la presentación se evaluará la necesidad de ejecutar Ensayos No Destructivos (END) como herramienta de control de calidad durante la ejecución de obras, tanto como en el diagnóstico de defectos detectados durante la ejecución de obras, y en estructuras terminadas, considerando las mismas como productos. Se analizarán defectos encontrados, originados algunos por deficiencias en la etapa el proyecto y especificación técnica, y otros por problemas de ejecución en distintas estructuras. En algunos de los casos de estudio tratados, estos defectos y problemas constructivos han afectado la seguridad y/o la durabilidad de las obras en cuestión. Se evaluarán algunas técnicas en uso actualmente: Gamagrafías y tomografías de hormigón armado, ensayos de extracción en caso de anclajes post instalados, etc.

Palabras claves: calidad, ensayos no destructivos, civiles.

INTRODUCCIÓN: NECESIDAD DE EJECUTAR END EN OBRAS CIVILES

Tareas preliminares y control de calidad habitual en la construcción civil

Regularmente, en las construcciones de hormigón bien ejecutadas, se efectúan (para la obra en particular, o en los laboratorios de empresas proveedoras) estudios y análisis preliminares acerca de las dosificaciones de los hormigones a emplear, en función de las propiedades deseadas del material: resistencia, control de retracción y calor de hidratación, trabajabilidad, permeabilidad, etc. Estos ensayos previos se complementan con ensayos de control de la producción en escala industrial, para lo cual se efectúan varios tipos de ensayo sobre el hormigón fresco (trabajabilidad, contenido de aire, temperatura), y se moldean probetas para verificar la resistencia del material colocado en los encofrados. Estas probetas, bien curadas y cuidadas, son ensayadas a compresión para verificar la resistencia potencia del material. También pueden utilizarse para evaluar la conformidad potencia con otras propiedades de diseño de las mezclas. Cuando el hormigón es armado, los aceros de refuerzo provienen en la gran mayoría de los casos, de usinas que cuentan con certificaciones de calidad según normas ISO, lo que exime habitualmente al comprador de la obligación de efectuar ensayos de recepción. Antes de la carga del hormigón en los encofrados o moldes, se verifica la geometría de los mismos, así como si las armaduras de refuerzo instaladas son las especificadas en la documentación de proyecto. También se verifican recubrimientos y eventualmente la posición de insertos embebidos en primera etapa. Luego de la carga, se controlan los procedimientos de curado, y se espera el tiempo que corresponda antes de remover apuntalamientos y desencofrar. Incluso, estas últimas operaciones pueden estar precedidas de ensayos, mediante probetas, de resistencia a

edad temprana, que aseguren una resistencia efectiva adecuada para la ejecución de esas tareas. Luego del retiro de los encofrados, se inspecciona la construcción para verificar la existencia o no de defectos aparentes o visibles.

Requisitos implícitos y explícitos.

Sin embargo, poco más se hace habitualmente para evaluar si toda la construcción en sí misma, considerada como un producto terminado total o parcialmente, satisface los requisitos implícitos y explícitos del diseño. Entre los requisitos implícitos se encuentra el que el hormigón existente en la estructura ha sido adecuadamente transportado, compactado y debidamente curado, y que por lo tanto se corresponde con el de las muestras y probetas obtenidas durante el hormigonado. También el que las deformaciones de los encofrados al ser cargado y compactado el hormigón (operación que incluye cierta rudeza), en combinación con las propias del hormigón debido a los efectos del calentamiento y posterior enfriamiento durante el fragüe, y los efectos de la retracción del hormigón, no hayan generado desplazamientos que afecten la geometría y con ello la serviciabilidad de la construcción (en ciertos proyectos, éstos pueden ser requerimientos explícitos). En ocasiones los separadores, ataduras y fijaciones de los refuerzos y los insertos embebidos pueden ceder durante las operaciones de descarga y compactación, y sufrir desplazamientos dentro de los encofrados, lo que se puede traducir en variaciones (en más y en menos) de los recubrimientos y las posiciones nominales de estos elementos, pudiendo esto traducirse en problemas de resistencia y durabilidad, además de dificultades en las tareas que siguen al hormigonado.

Ensayos No Destructivos y control de calidad del producto obtenido.

Para controlar esos requisitos implícitos y explícitos en las construcciones civiles, una herramienta muy poderosa son los END. Hoy en día no se concibe el funcionamiento de la industria aeroespacial, de la energía en cualesquiera de sus formas, el transporte ferroviario, la industria pesada, etc., sin controles de fabricación y funcionamiento mediante END. Por una serie de razones, este tipo de ensayo es muy poco aplicado en la construcción civil y se lo suele considerar más como una herramienta a utilizar “en caso de problemas” o cuando se desconocen las características de una construcción para obtener datos de la misma; que como una herramienta de uso sistemático en el control de calidad de una obra en construcción. En lo que sigue, se analizarán algunos casos que muestran que, incluso luego de décadas de funcionamiento, existen muchos problemas que afectan la calidad, y con esto nos referimos a la seguridad y la serviciabilidad, de las construcciones civiles, y que podrían haberse detectado y solucionado en el momento de la ejecución de la obra si se hubieran efectuado los END adecuados.

CASOS DE ESTUDIO

Presencia de oquedades no aparentes y durabilidad

Los autores han detectado en ocasiones en las que se analizaban problemas de durabilidad en estructuras, que la corrosión de armaduras se encuentra a veces asociada a problemas de compactación del hormigón aún en secciones no fuertemente armadas, donde la mayor porosidad y permeabilidad del hormigón se encuentra asociada a la presencia de oquedades no aparentes, es decir no observables ni aún bajo una cuidadosa Inspección Visual. Se presenta un caso de estudio, donde se obtuvieron gammagrafías de sendas vigas con problemas de fisuración extendida por corrosión expansiva de las armaduras. En la Figura 1 (a) se observa la fotografía de una viga ubicada en un edificio construido a mediados de la década de 1980, ubicado en el AMBA, dedicado a productos preelaborados secos de panadería y pastelería, donde en un sector se observó un importante cuadro de fisuración con armaduras corroídas, producida luego de una larga demora en la reparación

de un desagüe pluvial en mal estado. El hormigón especificado fue H-17. El ensayo a compresión de testigos extraídos verificó que el hormigón cumplía con creces esa resistencia de diseño. Se efectuaron otros ensayos sobre los testigos, determinándose un CUV de $300 \pm 30 \text{ kg/m}^3$, y una penetración al agua según norma IRAM 1554 de 31 mm promedio, lo que indica que no se trata de un hormigón especialmente resistente a las agresiones ambientales. Esto explica que el mal funcionamiento de los desagües haya gatillado el período de propagación de la corrosión de las armaduras en ese sector, luego de 30 años de servicio [1]. Esta situación se repitió en el interior del local correspondiente a esa fachada, con un ambiente seco y aparentemente poco agresivo.

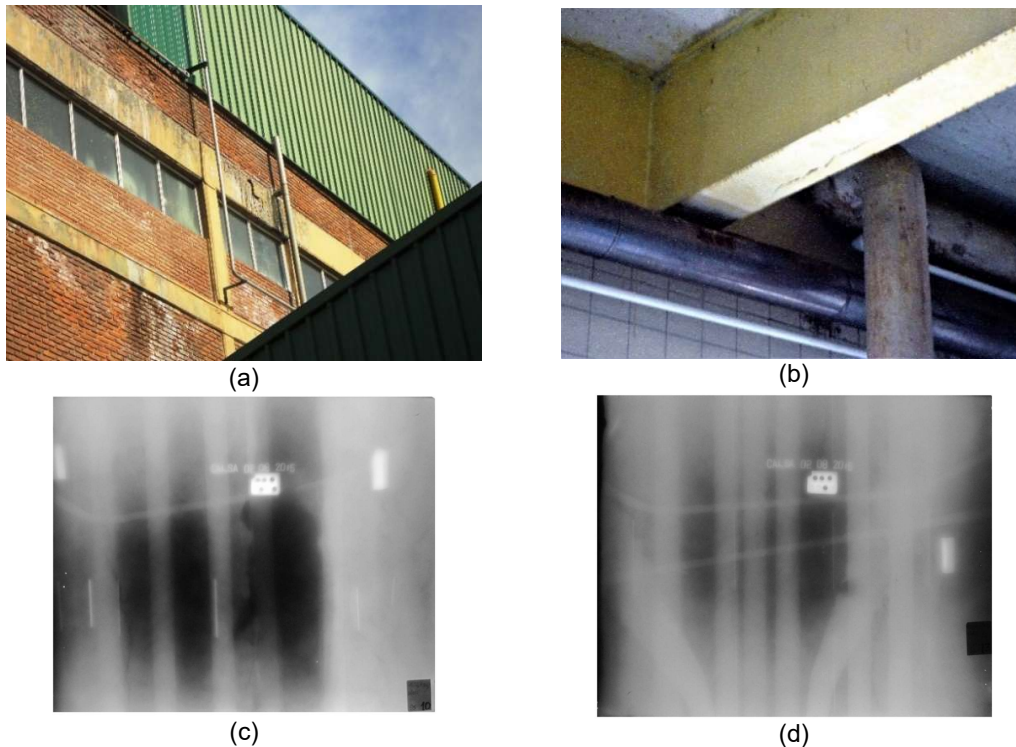


Figura 1: (a) Fachada de un edificio industrial con problemas de corrosión por desagües en mal estado; (b) Vista interior de d de las vigas paralelas y una transversal a la fachada de la Figura anterior. Obsérvese la fisura en la cara inferior de la viga transversal, al centro de la fotografía; (c) Gammagrafía de la viga paralela a la fachada; (d) Gammagrafía de la viga transversal a la fachada. Las oquedades se ponen en evidencia por las manchas oscuras en las gammagrafías: una falta de material deriva en una mayor intensidad de radiación y por lo tanto mayor densidad fotográfica.

Para evaluar el avance de la corrosión de las armaduras en las vigas paralela y transversal a la fachada (Figura 1 (b)), se obtuvieron dos Tomografías de Hormigón Armado de las dos vigas que se observan en la figura. En la tomografía correspondiente a la viga de la fachada (Figura 1 (c)), se aprecia la corrosión de las armaduras, pero especialmente la irregularidad de la textura del hormigón, donde los sectores más oscuros de la placa corresponden a un vacío no apreciable desde el exterior de la viga: La existencia de una oquedad existente en la viga, derivada de una mala compactación, favoreció la corrosión de las armaduras incluso más internas generando un cuadro de deterioro generalizado de la sección. Eso se tradujo en una pérdida de hasta el 6 % de la sección de armadura principal y el corte del estribo que se observa en la Figura 1 (c). La viga transversal a la fachada también sufrió problemas de corrosión, potenciados por la mala compactación del hormigón como se observa en la Figura 1 (d), que muestra oquedades también en la viga interior adyacente a la anterior. Es llamativo cómo la corrosión afectó a un sector de viga alejado unos 60 cm

del filo de la viga de fachada. Pese al importante cuadro de fisuración, la pérdida de sección de armaduras principales es apenas visible (menos a 1 m en barras de 20 mm de diámetro nominal). Evidentemente, el requisito implícito de correcta colocación del hormigón no había sido satisfecho.

Presencia de oquedades en columnas

Este caso corresponde al estudio mediante gammagrafías de columnas de hormigón armado sobre la planta baja de un edificio en construcción. El proceso de desencofrado de dichas columnas manifestó, superficialmente y en secciones próximas al encuentro de estas piezas con el suelo, la presencia de importantes espacios embebidos en el hormigón contaminados con suelo. Esto motivó la inquietud del cliente en el sentido de cómo podía conocer de forma no destructiva la existencia de volúmenes internos, obviamente no visibles, llenos con suelo o incluso oquedades. La encomienda del cliente para alcanzar este propósito fue llevada a cabo en dos etapas, en la primera se eligieron 3 columnas principales para evaluar la integridad en el sentido mencionado. Dado que el resultado mostró la presencia de oquedades internas en una de ellas, el cliente consideró inevitable continuar con más estudios por lo que se planificó una segunda etapa de muestreo en la cual se eligieron 17 columnas a estudiar, de las cuales 2 columnas adicionales presentaban oquedades, es decir 3 de 20 columnas. Las gammagrafías de la Figura 2 presentan zonas oscuras o de mayor densidad fotográfica (flechas "A") sobre los bordes inferiores de dichas imágenes que se deben a falta de concreto. Por otro lado, en esta misma columna también se ha detectado una sombra oscura de forma regular (flecha "B") que se asocia con un "taco" de madera incrustado en el concreto. Otro caso de un requisito implícito no cumplido.

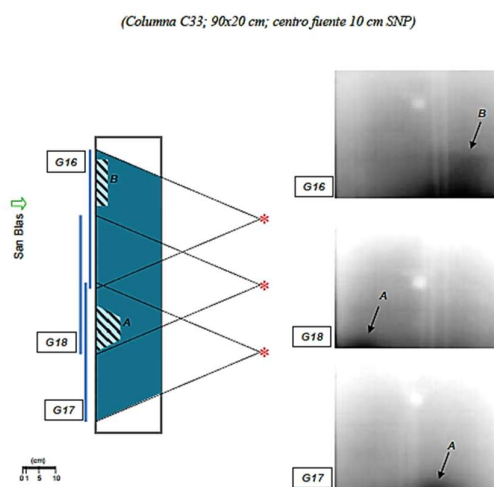


Figura 2: Detección de oquedades en columna de hormigón mediante gammagrafías. La falta de material deriva en una mayor intensidad de radiación y por lo tanto mayor densidad fotográfica.

Detección de oquedades en vainas de cables postesados

Debido al deterioro de un puente carretero y ferroviario la autoridad vial responsable del mismo solicitó el estudio de zonas críticas de la estructura para prevención y planificación de mantenimiento. En particular se gammagrafió en forma lateral un tramo de viga longitudinal de ancho 30 cm para inspeccionar el estado de 6 de sus cables de postesado con el objetivo de conocer la existencia de oquedades en el interior de sus vainas. Se obtuvieron 15 gammagrafías ubicadas estratégicamente a lo largo de la viga siguiendo la trayectoria de estos cables según la información de sus planos constructivos (Figura 3 (a)).

Las gammagrafías obtenidas mostraron vacíos en las vainas de 3 de estos cables. La Figura 3 (b) es representativa de estos resultados mostrando la presencia de oquedad como una zona oscura del lado de arriba del cable superior [2]. Estas imágenes fueron analizadas cuantitativamente como muestra el gráfico de la Figura 4 (c). En este sentido, la curva azul de trazos corresponde a la distribución de densidad fotográfica medida sobre la línea blanca de trazos dibujada sobre la imagen, las líneas continuas fucsia y de trazos magenta representan la densidad fotográfica calculada con la expresión matemática que ajusta los datos medidos y la esperada sin presencia de oquedades ni defectos de los cordones de acero del cable, respectivamente [3]. Este análisis permitió determinar una oquedad en el interior de la vaina equivalente a 5 cm de aire y un defecto de sección del cordón superior de 7 mm de acero. Este es un ejemplo de problema recurrente de a tecnología de inyección de vainas.

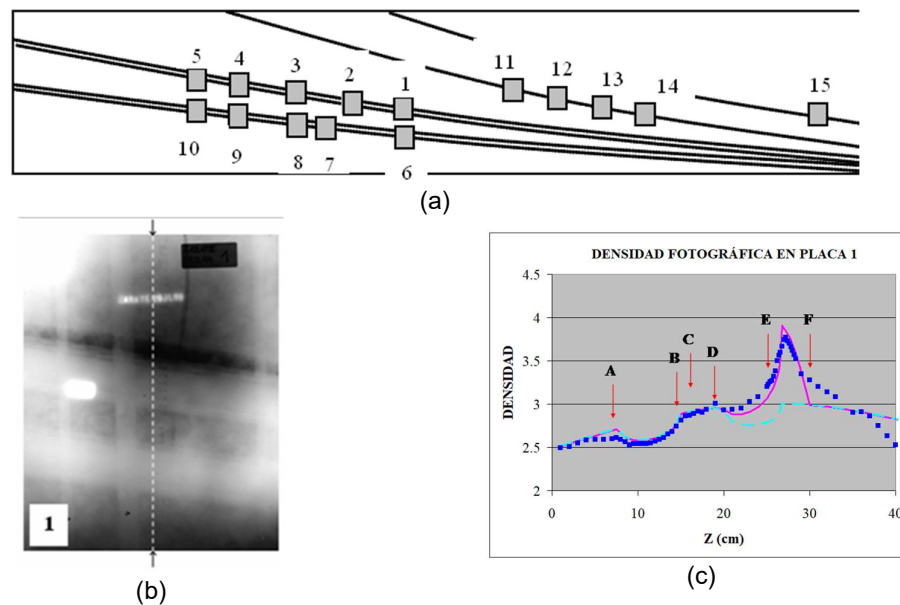


Figura 4: (a) Esquema de ubicación de gammagrafías a lo largo de la viga; (b) Gammagrafía 1, representativa que muestra oquedad en cable superior; (c) Distribución de densidad fotográfica a lo largo de línea blanca de trazos sobre gammagrafía 1.

Control de armaduras en secciones de empalmes de vigas de gran tamaño

Este caso corresponde a la determinación mediante la técnica de la THA de la cantidad y tamaño de barras presentes en 16 sectores inferiores de 2 grandes vigas prefabricadas de un estadio. El objetivo propuesto por el cliente era poder confirmar la presencia de empalmes de armadura en determinadas ubicaciones a lo largo de las vigas según los datos documentados en los planos de construcción. A pesar de la alta densidad de armadura en las secciones estudiadas, la THA ha sido fundamental para poder resolver de manera satisfactoria el presente objetivo, el cual no podría haberse resuelto por otra técnica no destructiva conocida hasta el momento. En este sentido, las Figura 5 (a) y (b) muestran el resultado de una de estas secciones en la que se determinaron 44 barras de diámetro 25 mm, distribuidas irregularmente en 2 camadas y en 80 cm de ancho de viga. Las gammagrafías obtenidas para desarrollar las correspondientes tomografías permitieron, también, determinar la presencia de extremos de barras que conformaban empalmes dentro del volumen de estudio, además en algunos sectores se alcanzan a individualizar ciertos detalles que indican que entre algunas barras cortadas y continuas existe un cordón de soldadura de 2 a 3 cm de largo en el sentido longitudinal de las barras (Figuras 5 (a) y (b)).

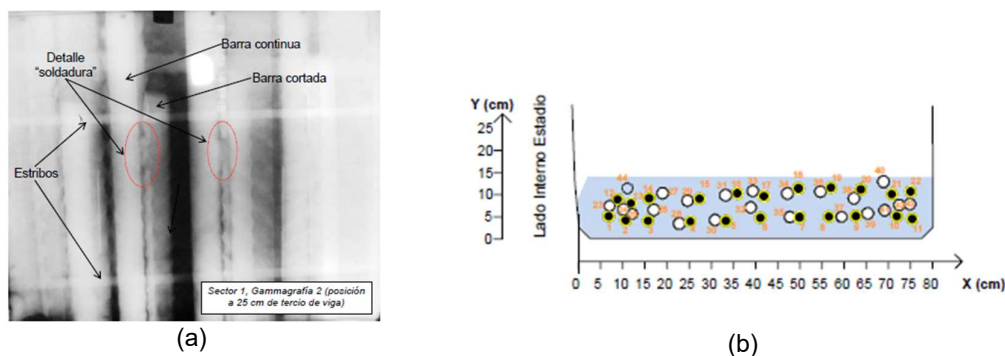


Figura 5: (a) Gammagrafía de una fracción de una viga de 80 cm de ancho con barras d_b 25 mm en una sección de empalmes, observándose barras soldadas; (b) Resultado de la tomografía de una de las secciones de empalme de la viga. Los círculos negros y blancos corresponden a barras continuas y cortadas, respectivamente.

PRECALIFICACIÓN, DISEÑO, INSTALACIÓN E INSPECCIÓN DE ANCLAJES Y REFUERZOS POST-INSTALADOS EN LAS CONSTRUCCIONES DE HORMIGÓN

Requisitos generales de los anclajes post-instalados

Los anclajes y refuerzos post-instalados son muy utilizados en la industria de la construcción, dado que los mismos presentan varios beneficios frente a los instalados en primera etapa, y evitan problemas en obras que pueden producirse por el desplazamiento de los refuerzos e insertos embebidos durante las operaciones de descarga y compactación, dentro de los encofrados. Pero cuando se utilizan anclajes y refuerzos post-instalados es mandatoria la utilización de productos homologados con sus respectivas aprobaciones, que cumplan con las características que presentan las necesidades de las obras de hormigón en materia de resistencia y durabilidad. También es necesario asegurar una debida instalación e inspección de la misma, ya que el uso de productos sin homologaciones y sin una correcta instalación, pueden ocasionar defectos no aparentes en el producto terminado del hormigón, afectando la durabilidad y seguridad. En hormigones estructurales, para el sistema de fijación post-instalado, se deben utilizar productos homologados con aprobaciones para el diseño y estar respaldados por un método de cálculo, como puede ser el caso del American Concrete Institute, que prescribe en su ACI 355.2 y ACI 355.4 requisitos de prueba y evaluación para anclajes mecánicos y químicos post-instalados respectivamente [4]. Así también, el ACI 318 toma en cuenta las variables dadas en un ESR, Evaluation Services Report, aprobación emitida por el ICC-ES (Evaluation Service) donde sus reportes proporcionan información sobre qué requisitos de código o criterios de aceptación se usaron para evaluar un producto, y cómo se debe identificar, instalar, entre otros [5]. Para realizar estos reportes, se utilizan criterios de aceptación AC193 y AC308, donde el propósito de estos es establecer los requisitos para que los anclajes mecánicos y químicos respectivamente, puedan ser reconocidos por el ICC-ES, permitiendo su uso en los requisitos del IBC (International Building Code). Por otro lado el ACI-318-19 en su capítulo 17.2.5 indica que los anclajes deberían ser instalados e inspeccionados de acuerdo con los requerimientos detallados en el capítulo 26.7 y 26.13, donde se especifica la revisión de distintas variables y condiciones que deben ser verificadas en la instalación, a fin de asegurar que sean coincidentes con el diseño adoptado, siguiendo los procedimientos de instalación recomendados por los fabricantes e indicando la figura de un instalador certificado de acuerdo a (ACI CPP 680.1-17) o un programa similar con requerimientos equivalentes. Como también indica el monitoreo de la instalación por un inspector certificado, y que esta certificación debería ser realizada de acuerdo con lo indicado en "ACI Post-Installed Concrete Anchor Installation Inspector

Program” (ACI CPP 681.2-19), y “ACI Adhesive Anchor Installation Inspector Program” (ACI CPP 681.1-17), o programas similares con requerimientos equivalentes [4].

Ensayos a ejecutar

Por lo indicado hasta aquí, cuando las características del material base son conocidas, tanto desde el punto de vista de la resistencia potencial y/o real del hormigón como también de la calidad constructiva (compactación y curado), la utilización de productos homologados con sus debidas aprobaciones, junto a una instalación a cargo de personal capacitado, hacen que una Inspección Visual específica sea suficiente para obtener un sistema post-instalado seguro. Sin embargo, aun cuando se satisfagan los requisitos anteriores, por necesidades de proyecto podría ser necesario realizar la validación de la instalación de las fijaciones. Lo mismo sucede en la etapa de diseño, cuando sea razonable considerar las incertidumbres respecto de las características del hormigón a obtener y la calidad constructiva con la que será ejecutada la obra, o en los casos en que se desconoce la calidad del material base sobre la que se instalarán los anclajes, incluyendo en eso no solamente resistencia, sino compactación, curado, etc. En estas circunstancias, es aconsejable la determinación de la resistencia de la fijación, para lo cual habrá que ejecutar END como se observa en la Figuras 6 (a) y (b), cuyos resultados brindarán información para ser utilizada según los criterios de evaluación requeridos en el proyecto.

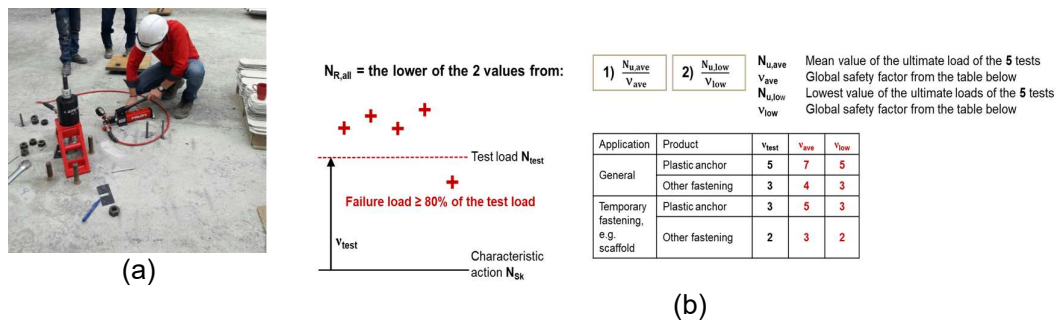


Figura 6: Ensayo No destructivo de Determinación de Resistencia: (a) Ejecución de un ensayo de extracción; (b) Evaluación de resultados.

Ensayos no Destructivos para la Determinación de la Resistencia y Verificación de la Instalación

Así como se mencionan las Inspecciones Visuales detalladas anteriormente en la etapa de construcción, como método de control de la instalación de los productos homologados con sus respectivas aprobaciones, existen casos específicos en que la instalación del anclaje homologado debe ser validada, independientemente de que se conozca la calidad del hormigón base y la calificación de los operarios que efectuarán la instalación. Ante esta situación, es aconsejable efectuar END en el marco de una normativa aplicable, como podría ser la norma British Standard BS 8539 9.3 & Anexo B.3 [6] que parte de una prueba con una carga predefinida y se plantea una evaluación de análisis con el muestreo mínimo del 2.5% de los anclajes, con un mínimo de 3 anclajes, en busca de obtener como resultado de la evaluación la conformidad o no conformidad de la resistencia de la fijación analizada. En aquellos casos donde se necesita determinar las resistencias de los anclajes o refuerzos post-instalados homologados sobre un hormigón cuyas características de resistencia son desconocidas o no están debidamente certificadas, es posible realizar pruebas destructivas o no destructivas para obtener un valor de resistencia que sirva como referencia para determinar y diseñar los anclajes. En estos casos, es aconsejable realizar END en obra para determinar la resistencia de la fijación. Estos ensayos podrían desarrollarse bajo las normativas British Standard BS 8539 & Anexo B.2.3.1 [6], donde la prueba tiene como punto

de partida una carga predefinida y se plantea una evaluación de análisis simplificado con el muestreo de al menos 5 anclajes, en busca de obtener como resultado de la evaluación, una resistencia admisible $N_{R,all}$ en función de la carga registrada N_{rec} , afectada por un factor de seguridad global como concepto de seguridad.

CONCLUSIONES

En los ejemplos anteriores, se han analizado problemas derivados de defectos no aparentes, es decir que no podrían ser detectados mediante las inspecciones de rutina empleadas habitualmente en la industria de la construcción, sobre las estructuras o construcciones ya materializadas; y sobre cómo acotar con END las incertidumbres asociadas al uso de anclajes post-instalados. Mediante el uso de END en las etapas de construcción, buena parte de estos problemas e incertidumbres pueden minimizarse, lo que considerando el costo de reparaciones o el del sobredimensionado de elementos estructurales ante incertidumbres, compensa con creces el costo de los ensayos; a la vez que permite obtener estructuras más confiables. Casos como éstos deben ser considerados como un llamado de atención, y una convocatoria para incluir este tipo de ensayo en la práctica cotidiana y en normativa relativa a las construcciones de hormigón, y en particular a las próximas ediciones del cuerpo reglamentario CIRSOC.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de Marcelo Ruffolo, Teresita Frigerio y Joaquín Boselli de THASA, en la búsqueda y análisis de las gammagrafías incluidas en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Malhotra VM, Carino NJ, "Nondestructive Testing of Concrete", Second edition, CRC Press, (2004), 11.1-11.24.
- [2] Mariscotti MAJ, Jalinoos F, Frigerio T, Ruffolo M, Thieberger P, "Gamma-ray imaging for void and corrosion assessment", Concrete International, Vol 31, No. 11, (2009), 48-53.
- [3] Mariscotti MAJ, Thieberger P, Frigerio T, Mariscotti F, Ruffolo M, "Investigations with reinforced concrete tomography". Structural faults & repair-2008, 12th International Conference and Exhibition, Edinburgh, (2008).
- [4] American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 318 "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)" (First printing: June 2019), páginas 233, 235, 540, 541, 554, 556, 557.
- [5] <https://icc-es.org/> (ICC Evaluation Service), "Evaluation Service Report", disponible Online en: <https://icc-es.org/wp-content/uploads/report-directory/ESR-3814.pdf> (acceso: 22/07/2020).
- [6] CFA (Construction Fixings Association), "Procedure for site testing construction fixings - 2012" (www.the-cfa.co.uk) (2012), 5-7