

Las técnicas de ensayos no destructivos para el control de materiales y de estructuras de ingeniería civil

Giacinto PORCO y Giulia Francesca VALER MONTERO
Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile
Rende, Cosenza, 87036, Italia,
0984-496909
a.porco@sismalab.it, giuliafvalerm@gmail.com

Dolores ROMANO
Sismalab s.r.l. – Spin-off dell'Università della Calabria
Rende, Cosenza, 87036, Italia,
0984-447093
d.romano@sismalab.it

Resumen

El problema de la verificación de la fiabilidad de los edificios y de las estructuras en Italia, ha sido hasta hace unos años, un obstáculo casi insuperable; una acción correctiva muy decisa, se ha dado con la entrada en vigor de la nueva ley para las construcciones en Italia, es decir la NTC 08. En esta última, se encuentran los conceptos de mantenimiento, inspección de los materiales de construcción durante su fabricación y de pre-calificación antes de empezar a construir. Esta nueva ley resuelve el problema de la verificación de los edificios existentes, y también introduce la obligación de vigilancia rutinaria de las estructuras de carácter geotécnico a través del monitoreo, para atestiguar la conservación y el mantenimiento de las prerrogativas especificadas en el proyecto. Además, esta ley hace sí que el uso de las técnicas no destructivas sea legítimo, y es por esta razón que estas se convierten en guías, como en el caso del campo industrial, para alcanzar niveles apreciables de seguridad y fiabilidad, incluso en estructuras de hormigón armado.

Es en este campo, que ha sido ideado y ensamblado el presente trabajo, con el cual se desea dar una contribución, en términos de análisis y discusión sobre las técnicas de ensayos no destructivos más utilizados para el control de los materiales y durante las fases de construcción de una obra, o para evaluar los edificios existentes. Otro tema tratado en este trabajo, está relacionado con las técnicas de ensayos no destructivos, que se utilizan para el control de las estructuras, dando también en este caso, consejos sobre técnicas dedicadas para el control de las estructuras existentes y las de nueva construcción. Es conveniente precisar que a fin de limitar la extensión de este trabajo, el análisis en las técnicas de ensayos no destructivos se limitará únicamente a los materiales utilizados en la construcción de edificios de hormigón armado y mampostería, mientras que con respecto a la parte relativa a la supervisión de obras, en este trabajo se le proporcionará solo información general sobre las estructuras de carácter geotécnico por lo cual, se aconseja visionar textos específicos para estudios más aprofundados.

1. Introducción

Las técnicas de ensayos no destructivos para el control de estructuras y materiales (END) representan, en ámbito aeronáutico, mecánico y de la locomoción, instrumentos de referimento imprescindibles para la búsqueda de la fiabilidad y de la seguridad, tanto como en las primeras etapas de la producción, que durante la vida útil de aviones, helicópteros o incluso de un simple componente estructural o de un motor.

Muy diferente es en cambio la realidad que se vive en el ámbito civil. La pregunta común que se siente formular, por quien proviene de la industria es la siguiente: en el campo de la ingeniería civil, el nivel de revisión de las estructuras y la difusión de técnicas de END es igual o al menos comparable a el del mundo industrial?

Dado que el nivel de seguridad y fiabilidad que se requieren a los aviones a las locomotoras o a los autos, necesariamente debe ser similar a la requerida para nuestras casas, los puentes o viaductos que se utilizan de manera rutinaria, la respuesta debería ser afirmativa. En cambio, la situación es muy diferente. La evidencia de esto se denota en la continua insuficiencia demostrada por los edificios y las obras de infraestructura, en presencia de condiciones de carga, como el terremoto, que sin piedad, muestra coeficientes de seguridad inadecuados de obras las cuales no preservan las prerrogativas de la vida inherentes a los planes originales. Todo, pone fuertemente énfasis en la falta, por lo menos hasta hoy, de legislación y de procedimientos de control adecuados y reconocidos, que permitan de realizar obras no solo seguras pero también controlables fácilmente tanto en fase de realización como en el curso de la vida útil.

Es en este campo, que ha sido diseñado y construido el presente trabajo, con el que desea hacer una contribución, en términos de análisis y discusión sobre las principales técnicas de ensayos no destructivos utilizados para el control de los materiales de pre-calificación y durante las fases de construcción, o con el cual podremos conocer a algunos pasos del procedimiento de verificación de los edificios existentes. Otro tema experimental que se tratará, será relacionado con las técnicas de ensayos no destructivos, que se utilizan en las obras estructurales, dando también en este caso, consejos sobre algunas técnicas dedicadas al monitoreo de las estructuras de nueva construcción^{(1) (7)}.

2. Técnicas de ensayos no destructivos para el control de materiales ediles

Los primeros problemas de carácter experimental con el que se enfrentan los operadores del sector civil, tanto en las primeras etapas de un proceso de construcción de una obra, que en las primeras etapas de un proceso de verificación y control de un edificio existente, están relacionados casi todos con la caracterización mecánica de los materiales de base. En la práctica, los problemas que afectan a los ingenieros siguen una jerarquía clara, que empiezan con las cuestiones relativas a los materiales que lo componen, es decir, concreto, acero⁽³⁾, mampostería, pasando a los problemas relacionados con el estudio y control de la resistencia de las partes estructurales, sin duda intactas si resultan de reciente construcción, y probablemente agrietadas si pertenecen a un edificio existente. Este segundo aspecto requiere un conocimiento preciso sobre los temas de monitoreo y control experimental de las estructuras al pasar del tiempo⁽⁴⁾.

En esta primera parte, se va a abordar el problema del control de los materiales en sí mismo y por lo tanto totalmente a parte del contexto estructural, discutiendo principalmente de ensayos de hormigón, y entrando por último, en la discusión sobre la caracterización mecánica de la mampostería, es decir, otro tipo de construcción común, sobre todo en los centros urbanos.

Teniendo cuenta que los materiales investigados con ensayos no destructivos requieren superficies y volúmenes homogéneos, con ausencia total de elementos perturbadores que pueden ser las instalaciones de agua o luz o en el caso de ensayos en estructuras en hormigón armado, las barras de refuerzo colocados en las zonas de interés experimental, es necesario ejecutar una investigación preparatoria END a la verificación física, a través de un “Pacómetro” o detector de armaduras. Por lo tanto, es necesario hacer hincapié en esta metodología antes de iniciar el análisis de las técnicas experimentales de control para los materiales.

2.1 Detección magnética de armaduras

La detección magnética de armaduras es una técnica experimental que en la mayoría de los casos es una técnica preliminar, para la realización de pruebas experimentales en obras de hormigón armado, para comprobar la consistencia entre aceros y para el desarrollo de las investigaciones de mampostería. De hecho, con el fin de realizar las investigaciones con martinets planos (gatos planos) en mampostería, es útil para verificar la ausencia de cualquier elemento que pertenece a las instalaciones (agua, luz, cableado en general), así como eventuales varillas de acero. Semejante, y tal vez de mayor importancia, es la verificación de la ausencia de varillas de acero cuando se trabaja en obras de hormigón armado; en relación a los argumentos que serán tratados a continuación tanto el ensayo con esclerómetro, que los ultrasonidos, pueden ser altamente influenciados por las barras de refuerzo presentes en la estructura.



Figura 1. Pacómetro.

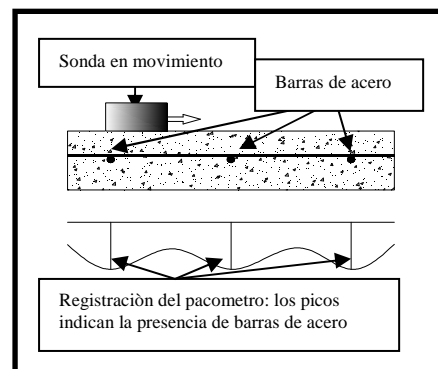


Figura 2. Datos pacometricos.

La técnica de ensayo no destructiva con método magnético tiene como finalidad principalmente la detección de la presencia, la dirección y el diámetro de las barras de acero dentro de los elementos de hormigón armado, propinando, el espesor de la capa de hormigón y la distancia entre las varillas de acero. Por supuesto, la técnica permite detectar elementos metálicos en general, y por lo tanto, puede ser aplicada sobre elementos de mampostería, para detectar la presencia de instalaciones y circunscribir áreas libres para poder realizar las pruebas siguientes que requieren esta circunstancia. Sin duda, para ambos tipos de construcción, este tipo de ensayo permite llevar a cabo el

importante objetivo de localizar partes de estructuras libres de interferencias y listas para dar cabida a las pruebas de ensayos no destructivos. La herramienta que se utiliza comúnmente es el Pacómetro (Fig. 1), que utiliza los principios de la inducción magnética. En una primera fase, la sonda de búsqueda, que contiene dos bobinas, recibe un pulso de corriente que hace que un campo magnético magnetice el elemento metálico presente sin corrientes parásitas (corrientes de Foucault). Agotado el pulso, las corrientes de Foucault empiezan a disolver la creación del campo magnético de intensidad reducida como "eco" del pulso inicial (Fig. 2).

La técnica de ensayo con pacómetro es regulamentada con los estándares británicos de la BS 1881:2004, y a través de las normas UNI 13860:2004 y UNI EN 1992-1-1:2005.

2.2 Técnicas de ensayos del concreto

Con técnicas de ensayos del concreto o hormigón se indican comúnmente procedimientos experimentales que permiten la adquisición de los parámetros mecánicos, físicos y químicos útiles para verificar el material estructural que constituye, en el caso de estructuras de hormigón, las secciones resistentes junto con las barras de acero, de vigas y columnas.

A continuación, se tratarán las técnicas que se utilizan para la caracterización mecánica del hormigón de edificios de nueva construcción y existentes:

- El método esclerométrico;
- El método de ultrasonidos.

2.2.1. Método esclerométrico (Martillo de rebote).

El método esclerométrico nace, así como todas las técnicas de ensayos no destructivos, como técnica comparativa. En la práctica, se obtiene un índice de rebote que, sin ningún tratamiento del dato, permite la comparación de los materiales "in situ". La eficacia del método se basa en un valor de rebote que en las estructuras existentes, sin duda permite reunir en familias los tipos de concreto y, como resultado, reconocer las partes estructurales de la obra que fueron realizadas con el mismo tipo de hormigón. Esta característica coloca, en ausencia de la carbonatación, el método esclerométrico como una herramienta para su uso previo a la elaboración de los planes para la manutención de cualquier obra.



Figura 3. Método esclerométrico.

En las estructuras existentes, además, los índices de rebote correctamente correlacionados con los que se obtienen con la prueba a compresión de probetas de hormigón, proporcionan evaluaciones objetivas sobre la resistencia a la compresión del concreto ⁽⁶⁾. El método esclerométrico hoy en día, es un tipo de ensayo muy común, debido tanto a su presencia y uso en el campo de la ingeniería civil desde hace varios años, tanto al costo del ensayo que es relativamente bajo. Sin embargo, en la literatura, la metodología no está incluida entre los ensayos fiables. La razón de esta discriminación está vinculada a su utilización no muy precisa y eficiente en el pasado. De hecho, en los años que precedieron a la divulgación de los métodos de ensayos no destructivos en la ingeniería civil, era común encontrarse con documentos técnicos en los que se evaluó la resistencia mecánica del concreto “in situ” mediante el uso de curvas de correlación incluidas en el instrumento. Esta determinación llevó a obtener valores de resistencia a veces significativamente diferentes del valor real de rotura del hormigón analizado, ya que las curvas utilizados habían sido relacionados con tipos de concreto diferentes en composición y en otras características respecto a las de los investigados.

Este límite aparente, de hecho, es una consecuencia banal de la finalidad de aplicación correcta de la técnica de ensayo no destructivo, que surge principalmente como un método comparativo, y sólo con la ayuda de curvas propias de correlación, permite extraer los valores objetivos de resistencia. Una posible reducción de las reservas expresadas por la industria en el método experimental, se puede alcanzar mediante la propuesta, al menos por zonas geográficas limitadas, de investigaciones experimentales destinadas a la construcción de curvas de correlación, obtenidas a partir de hormigones con igual composición, aglutinante y trabajabilidad. En este sentido, una acción se comenzó hace unos años con el trabajo enumerado [8], donde en un área geográfica bien definida, se llevó a cabo un experimento con el objetivo final de la construcción de curvas propias de correlación.

En ese caso, se ensayaron con la técnica esclerométrica, hormigones preparados con diferentes mezclas tales como para proporcionar una gama completa de los valores característicos en la rotura. Para cada mezcla, se obtuvo una curva de correlación “ad hoc”, y posteriormente, con el uso de todos los valores experimentales, una curva de uso general. Las curvas se obtuvieron mediante la correlación de los parámetros no destructivos con las resistencias reales, aplicando el método de los mínimos cuadrados (Fig. 4).

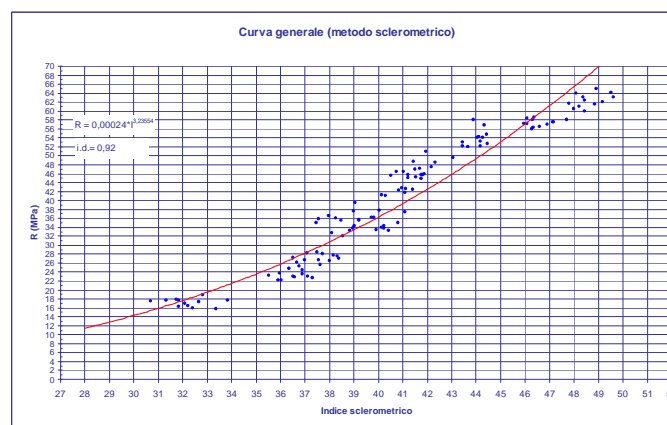


Figura 4. Curva de correlación de carácter general.

2.2.2 Método de ultrasonidos

Este tipo de método nace, como el esclerométrico, como estudio comparativo y provee la velocidad de tránsito de un pulso dentro del hormigón, que sin ningún tratamiento del valor adquirido, permite la homogeneización del material in situ y la identificación de miembros de soporte hechos del mismo material. El método ultrasónico, en comparación con el esclerométrico, ofrece la ventaja de investigar a fondo la parte de estructura examinada. También en este caso, la estimación de la resistencia a la compresión del hormigón, se obtiene mediante el uso de curvas de correlación, ya que el parámetro proporcionado por la prueba, es decir, la velocidad de propagación de los ultrasonidos, no está directamente asociado con la resistencia.

En la muestra de concreto, los transductores pueden estar dispuestos en tres posiciones diferentes (Fig. 5) y se definen así los métodos de lectura:

- método de transmisión directa;
- método de transmisión semi-directo;
- método de transmisión indirecta.

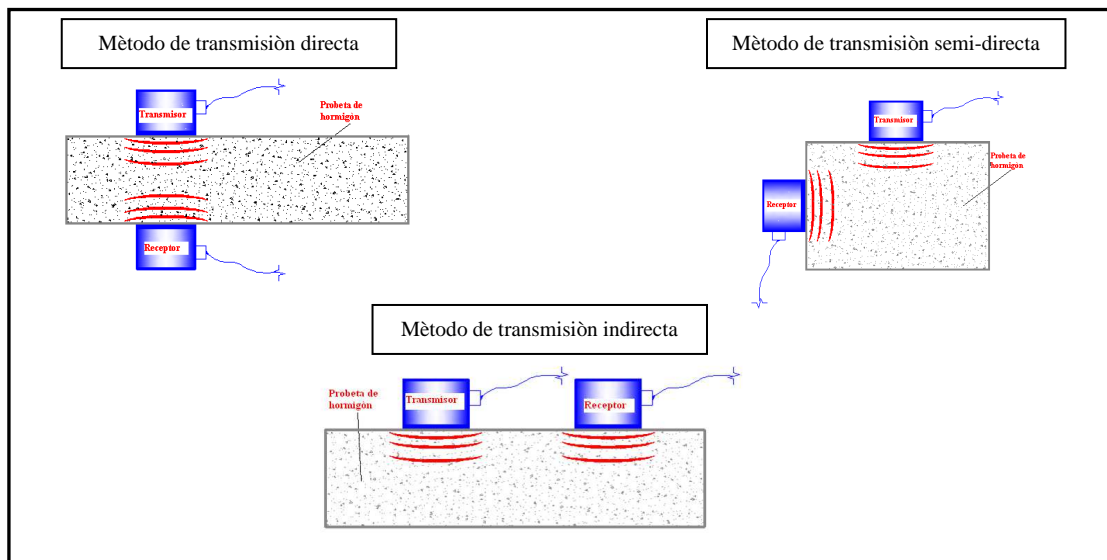


Figura 5. Métodos de lectura de la técnica de ensayo con ultrasonidos.

2.3 Técnicas de ensayos “in situ” de estructuras de mampostería

La caracterización mecánica de la mampostería es a menudo un problema difícil de resolver debido a la heterogeneidad de los materiales “in situ”. La solución a este problema, podría ser proporcionada por las investigaciones llevadas a cabo en el laboratorio en probetas tomadas en la estructura considerada. Esta solución, sin embargo, en general, parece ser prohibitiva en términos de costos y poco fiable debido a las perturbaciones causadas a la probeta durante la extracción y el transporte al laboratorio. Además, este tipo de procedimiento es imposible de aplicar cuando se trata de estructuras de valor histórico, una característica que impide cualquier daño, aunque de carácter diagnóstico. En este contexto, así esbozado, las técnicas END o semi-destructivas, emergen como las más adecuadas para la caracterización de mampostería “in situ” ⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾.

2.3.1 Medición del eco producido por impacto

La investigación se basa en el uso de un martillo instrumentado (Fig. 6) (es decir, equipado con una celda de carga en la parte que impacta conectada a un sistema de adquisición, que permite el ajuste de la función de tiempo-amplitud de la fuerza ejercida en el impacto) que es la fuente de la onda acústica, que generalmente ofrece una gama de frecuencias por debajo de 10 kHz, generada por el impacto del martillo sobre la superficie de ensayo.



Figura 6. Medición del eco producido por impacto.

La energía mecánica se transforma en energía acústica y vibratoria y la onda se propaga en la mampostería investigada. Las ondas de compresión, por su mayor velocidad que la de corte y por su mayor energía en la dirección del impacto, son las que generalmente se miden en las pruebas sónicas.

La propagación de la onda en el material será influenciada por la geometría de la sección y por las características físico-mecánicas del material atravesado.

Cada prueba consiste, por lo tanto, en una lectura detallada y localizada alrededor de la región de material, donde se coloca la estación transmisora y la estación receptora. Para superar esto, en materiales fuertemente no homogéneos, tales como unidades de mampostería, se predisponen más estaciones de medición dentro de las zonas homogéneas, dando el pulso en los nudos de redes con un tamaño de malla adecuado (Fig. 7).



Figura 7. Ejemplo de medición del eco producido por impacto.

Dependiendo de la ubicación del transmisor y el receptor se diferencian diversas técnicas de medición del eco producido por impacto. Entre éstos, los principales son: por transmisión directa de la señal, es decir, por transparencia (cuando el transmisor y estaciones receptoras se encuentran en las dos superficies opuestas de la pared); por transmisión indirecta de la señal, es decir, por transmisión superficial, cuando se colocan las estaciones transmisora y receptora en la misma superficie de ensayo, pero

separadas; por reflexión de la señal, cuando los dos transductores se aplican en los puntos pertenecientes a dos caras adyacentes, generalmente ortogonales (Fig. 8).

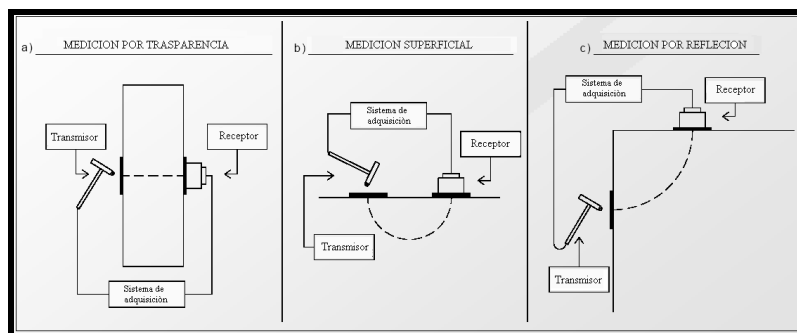


Figura 8. Técnicas de medición del eco producido por impacto.

En cualquier caso, los parámetros extraídos de esta prueba, son la atenuación sufrida por la señal a lo largo de la trayectoria de propagación y el "tiempo de vuelo", es decir, el tiempo que transcurre entre el comienzo de la señal transmitida y el comienzo de la señal recibida. Los resultados obtenidos y expresados en forma de tabla, pueden presentarse en formas gráficas diferentes, incluso como mapas de velocidad sónicas ⁽⁶⁾.

2.3.2 Martinetes planos o gatos planos

La técnica de los gatos planos, a diferencia de otros métodos de ensayos no destructivos, permite evaluar experimentalmente y directamente, algunos parámetros mecánicos de la mampostería y establecer la carga estática de los muros, en referencia al estado de tensión normal. En particular, el uso de un único gato se utiliza para determinar el estado de esfuerzo de ejercicio al que esta sometido la mampostería, mientras que el uso de dos gatos planos permite, a través de una prueba de compresión llevada a cabo "in situ", evaluar la tensión de ruptura y el módulo elástico del sistema mortero - elementos de piedra o ladrillos ⁽⁵⁾.

2.3.2.1 Ensayo de gato plano simple

Este método permite solo la evaluación de la tensión vertical presente en una pared de mampostería. La técnica del ensayo se basa de poner a cero las tensiones en la superficie de un corte hecho en la mampostería: esto produce el cierre parcial de la abertura, que se detecta a través de medidas de convergencia entre los pares de puntos puestos arriba y debajo de ella; la distancia entre estos puntos se mide antes de la ejecución del corte. Posteriormente, el gato se inserta en el corte hecho (Fig. 9, 10), a través del cual se aplica una presión a la mampostería para restaurar la distancia original, con el fin de medir, a menos de dos constantes, la tensión en la mampostería. Los factores de corrección, es decir, las constantes que deben tenerse en cuenta son: la relación entre la superficie del cilindro y la zona de corte identificada con K_a , y la constante de rigidez intrínseca del gato plano K_m , suministrado por el fabricante y determinada con prueba de calibración en laboratorio. En última instancia, la tensión media de ejercicio σ_e , en la zona del ensayo, está relacionada con la recuperación de la presión del gato plano a partir de la relación:

$$\sigma_e = p * K_m * K_a \quad (1)$$



Figura 9. Ensayo de gato plano simple.

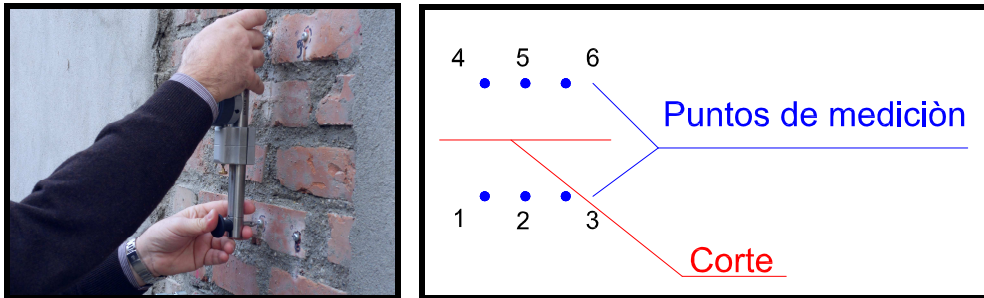


Figura 10. Ejemplo de medición del corte con deformómetro.

2.3.2.2 Ensayo de gatos planos dobles

La técnica de los gatos planos permite trazar las características de deformación de la mampostería “in situ”, tales como el módulo de elasticidad E , el coeficiente de Poisson, la tensión primera y última de agrietamiento. Durante la prueba, se hacen dos cortes que permiten identificar una porción significativa de material a fin de someterla, con la inserción de dos gatos hidráulicos (Fig. 11), a una carga de compresión conocida. El aumento gradual de la presión, causa una disminución de la distancia entre los tres pares de puntos de referencia, debido a la compresión de la porción de mampostería investigada.

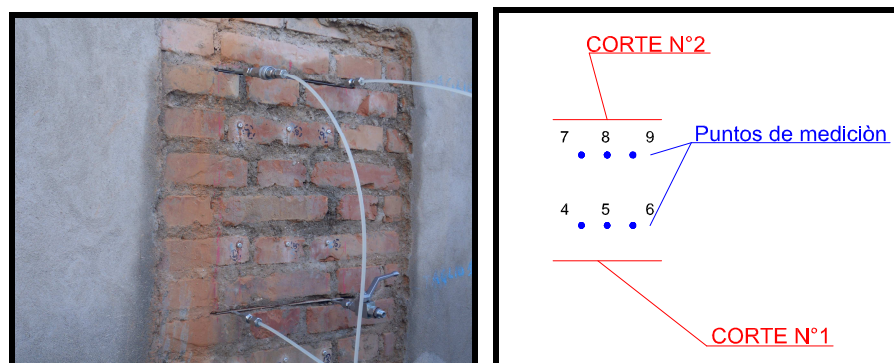


Figura 11. Ensayo de gatos planos dobles.

Las lecturas de las distancias entre los puntos permiten obtener, junto con la presión de los gatos adecuadamente correctas, las curvas de tensiones/deformaciones.

Con la ayuda de los diagramas es posible extraer los valores de los módulos de elasticidad, localizar, a la pérdida de linealidad, la tensión de primera fisuración y,

finalmente, con el crecimiento de las altas deformaciones correspondientes a incrementos de baja tensión, evaluar las tensiones ultimas.

3. Control de estructuras de nueva construcción

Las técnicas de ensayos no destructivos para estructuras de nueva construcción, tiene prioridades diferentes de las necesarias para los edificios existentes. Sin duda, presentar una metodología para el control experimental de las partes resistentes, que aún no se han construido y de los cuales se conoce la futura geometría, los materiales constituyentes y sus características de rendimiento, modifican significativamente las condiciones de frontera en relación con el problema del control de una estructura existente, que en la gran mayoría de los casos se encuentra en mal estado y se comporta en manera diferente respecto a la época de recién construcción.

Los sistemas de supervisión propuestos, actualmente, en los edificio de nueva construcción, son principalmente sensores de deformación de fibra óptica aplicados sobre una base de medición preestablecida. En la práctica, se solidariza el sensor en una barra de acero, que posteriormente se incorporará en el hormigón para formar las partes resistentes cuales vigas y pilares. Los medidores de deformación colocados en un pilar o una viga pueden ser interrogados en cualquier momento porque la transmisión de los datos es en remoto. Su versatilidad hace que sea posible contar con herramientas de medición en puntos de guía, que permiten la monitorización automática y continua en las primeras etapas de la construcción de la estructura de hormigón armado, con todas las innegables ventajas ⁽⁷⁾.

Un sistema de control para la supervisión estructural estática “in situ” está constituido, principalmente, por los elementos activos, representados por los sensores de fibra óptica, es decir, detectores de desplazamiento y por lo tanto, deformación, por elementos pasivos, representados por los cables de conexión, de una caja de recojida de los terminales de los sensores, por la unidad de lectura y por un sistema de transmisión de datos en remoto, operado la mayoría de las veces a partir de un PC (Fig. 12).

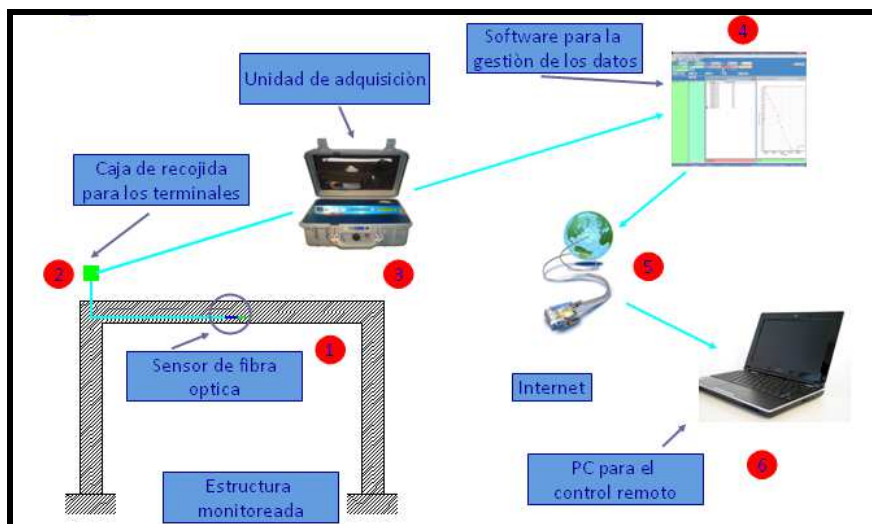


Figura 12. Esquema de un sistema de monitoreo con fibras ópticas.

El esquema muestra el concepto de cómo está formado un sistema de monitoreo, que, en cada momento, puede ser interrogado para la recopilación de información estructural útil en la verificación de fiabilidad estructural de una obra.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se han presentado las técnicas experimentales de ensayos no destructivos dirigidos tanto para el trabajo de inspección de materiales, tanto a nivel estructural, definido como el seguimiento de las estructuras de nueva construcción. En cuanto al primer punto, las técnicas de END ilustradas son actualmente las más extendidas en el campo de la ingeniería civil, ya que son fáciles de usar, tienen un bajo costo y proporcionan un soporte válido a los técnicos, tanto para la verificación de las estructuras existentes, tanto para el control en el curso de realización, verificando, en el último caso, que los materiales usados para la realización de una obra tengan efectivamente los parámetros de resistencia especificados en el proyecto y que todavía se mantengan en el tiempo. En cambio, en cuanto a la segunda cuestión, con los sistemas de supervisión in situ, el técnico puede revisar periódicamente o aguas abajo de los fenómenos extremos, la posibilidad de un uso seguro de las nuevas construcciones.

Referencias

1. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 'Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008 "Norme tecniche per le costruzioni" ',G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30.
2. Porco G., Valer Montero G.F., 'Le strutture in c.a. e muratura per la produzione di energia: manutenzione, controlli e valutazione della sicurezza secondo le NTC08',Convegno Energia sostenibile e ambiente: Il ruolo delle Prove non Distruttive nel Monitoraggio e nella Diagnostica Ceresole Reale (TO) 2012.
3. Associazione Italiana Calcestruzzo Armato e Precompresso, 'La corrosione nel calcestruzzo. Fenomenologia, prevenzione, diagnosi, rimedi ', 2005.
4. F. Morrone, G. Porco, D. Romano, 'Controllo dei livelli di sicurezza di edifici storici in stato di dissesto', La Stadia, Rassegna di informazione tecnica dei geometri di Calabria. Anno XLI n.1-2/2006.
5. Porco G., Romano D., 'Tecniche sperimentali per la caratterizzazione meccanica delle murature in situ', Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica. 11° Congresso Nazionale AIPnD, 13-15 ottobre 2005 Milano.
6. Cicchiello P., 'Diagnostica strutturale'. Progettazione Tecniche e Materiali, Maggioli S.p.A. 2010.
7. G. Porco, D. Romano, 'Sistemi di monitoraggio residenti e nuove tecniche di controllo nella realizzazione di edifici in calcestruzzo armato'. Stringhe, Quadrimestrale di divulgazione scientifico culturale dell'Università della Calabria. Anno 1 n.3-Dicembre/2011.
8. Cetraro M., De Paola S., Massaccesi M., Menditto G., Porco G., 'Curve di correlazione per il controllo della affidabilità dei calcestruzzi ordinari. Centro Studi e Ricerche Sposato P&P s.r.l.: Calcestruzzi autocompattanti e calcestruzzi ordinari: Progettazione, produzione e controlli sperimentali ', Convegno 13 Settembre 2003, Villapiana (CS).