

ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA CARACTERIZAR LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN EN ESTRUCTURAS EXISTENTES Y ANALIZAR SU DETERIORO CON EL PASO DEL TIEMPO

Lucas Emanuel Crespi, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales, lcrespi@unc.edu.ar

Narciso Novillo, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y
Naturales, narciso.novillo@unc.edu.ar

Agustín Fragueiro, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y
Naturales, afragueiro@unc.edu.ar

Resumen— Para llevar a cabo la verificación de estructuras existentes, es necesario conocer no solo las cargas a las que puede estar sometida la estructura, sino también las condiciones de uso, las propiedades de los materiales, el nivel de daño actual, los escenarios de cargas imprevistos, el grado de deterioro con el paso del tiempo, y todos los aspectos relacionados a la evaluación de la estructura. Dado que este trabajo aún se encuentra en proceso de desarrollo y experimentación, a la fecha se pudieron establecer las propiedades mecánicas del hormigón pero no el comportamiento conjunto del edificio a través de estudios tales como pruebas dinámicas que permitirían arribar a conclusiones más realistas sobre el estado actual de la estructura.

Palabras clave—*estructuras, hormigón, ensayos.*

1. Introducción

A pesar de que el hormigón es un material durable y su desempeño a lo largo del tiempo es adecuado, las experiencias indican que la degradación del hormigón frecuentemente es causada (o acelerada) por factores tales como un situaciones imprevistas, un diseño defectuoso, un uso inadecuado o una calidad pobre de los materiales intervinientes.

Las estructuras de hormigón armado casi desde el inicio de la construcción comienzan a deteriorarse en una u otra forma debido a sus condiciones de carga (por ejemplo cargas cíclicas) como así también a la exposición con el medioambiente (por ejemplo, elevadas temperaturas, alta humedad relativa, exposición a ambientes agresivos, etc.).

El envejecimiento de la estructura marca la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón y del acero con la edad a causa de reacciones químicas y/o cambios microestructurales continuos tales como la hidratación del cemento, la cristalización de

componentes amorfos, la reacción entre la pasta de cemento y los agregados, el ataque de sulfatos, la carbonatación y la oxidación del acero, entre otros.

La velocidad de la degradación depende fundamentalmente del diseño de los componentes estructurales, de la sección de los materiales, de la calidad de la construcción, del curado del hormigón y de los agentes ambientales agresivos [1].

La Figura 1 muestra el envejecimiento del hormigón con el paso del tiempo y que este puede ser restituido en parte mediante técnicas de reparación y mantenimiento, permitiendo cumplir con el nivel de servicio mínimo requerido para operar durante los años de vida previstos.

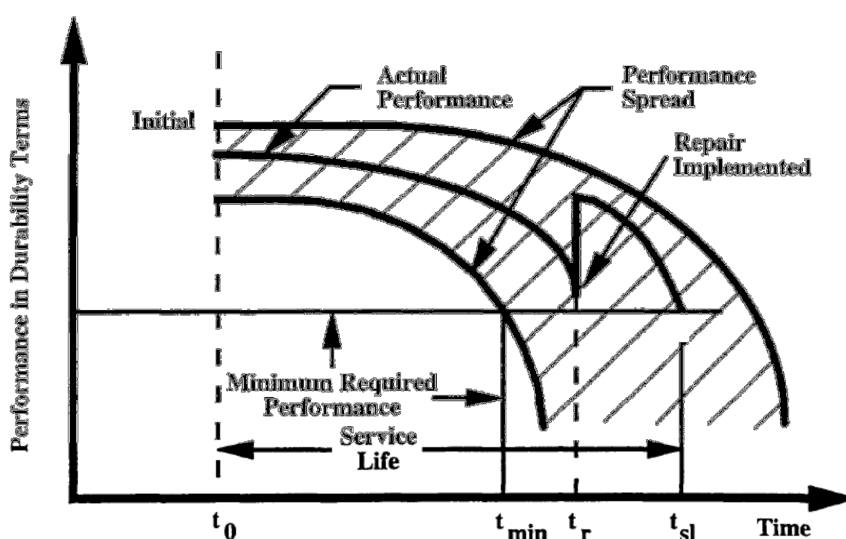


Figura 1. Relación entre el rendimiento y el tiempo del hormigón, incluyendo el efecto potencial de una reparación [1].

Para asegurar una aptitud en servicio durante toda la vida útil de las estructuras, se requiere un manejo efectivo del envejecimiento físico de las mismas. Para ello, se desarrollan técnicas de gestión que implican tareas de inspección que permiten predecir y/o detectar cuando un componente de la estructura se ha degradado hasta el punto en que los márgenes de seguridad requeridos se ven amenazados, para luego llevar a cabo actividades de mantenimiento preventivo, correctivo y de reparación, evaluando la condición actual y realizando estimaciones a futuro del estado de las estructuras [1].

Uno de los ensayos no destructivos que forma parte de un plan de mantenimiento es el ensayo de propagación de ondas que permite medir indirectamente el módulo de elasticidad actual del hormigón en pequeñas deformaciones, estimar la calidad del hormigón, como así también detectar vacíos y/o fisuras características [2].

El ensayo de propagación de ondas suele ir acompañado de extracciones y roturas a compresión de testigos de hormigón con el objeto de correlacionar las velocidades medidas in-situ sobre los distintos elementos estructurales y los valores de rotura a compresión del hormigón.

Para la extracción de testigos es necesario establecer la ubicación de la armadura de acero dispuesta en los elementos estructurales. Para ello se emplean ensayos de

pachometría y georadar que a su vez permiten determinar la profundidad del recubrimiento de hormigón de los elementos estructurales.

Otra técnica usada para evaluar el comportamiento conjunto de la estructura es a través de mediciones dinámicas que permiten arribar a conclusiones realistas sobre el estado actual y el comportamiento global de la estructura. Mediante éstos ensayos se pueden estimar las frecuencias naturales del edificio. Estas frecuencias constituyen una característica fundamental de la estructura ya que permiten, mediante comparación de mediciones similares a lo largo del tiempo, evaluar la evolución de la rigidez de la estructura. Esto aporta importante información acerca de eventuales reducciones en la capacidad resistente de los elementos principales debido a fisuras, grietas, u otras patologías que pudieran aparecer con el tiempo y el uso o, simplemente, alguna afectación que se traduzca en un cambio en la rigidez del conjunto.

2. Objetivos y Alcance

Este trabajo se centra principalmente en el estudio de los resultados obtenidos para las propiedades mecánicas y elásticas del hormigón en silos de hormigón armado para almacenaje de la harina de crudo que forma parte del sistema de producción de cemento portland. Estas estructuras se muestran en la Figura 2.

El objetivo del presente trabajo es presentar los resultados de las mediciones de velocidad de propagación de ondas y de los ensayos de rotura a compresión de testigos de hormigón realizados en los silos de hormigón armado que se muestran en la Figura 2.

El alcance del estudio propuesto es documentar las características mecánicas y elásticas del hormigón que conforman las estructuras, a los efectos de verificar su homogeneidad y calidad.

Este estudio se lleva a cabo en dos etapas. En la primera de ellas, se realiza el ensayo in-situ y se registran los valores de velocidades de manera ordenada y discriminada por cada elemento estructural. La segunda etapa se desarrolla en Laboratorio y consiste en realizar el mismo ensayo en condiciones controladas sobre testigos de hormigón extraídos de las paredes de los silos que forman parte del presente estudio.

Los resultados encontrados se correlacionan con las tensiones de rotura de dichos testigos, de manera de obtener una relación entre la resistencia medida del hormigón y la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas. Esta relación puede usarse para extender las conclusiones al resto de los elementos estructurales utilizando los registros de la primera etapa del ensayo.

A su vez, los ensayos de propagación de ondas buscan establecer el grado de uniformidad de las velocidades registradas en diversos puntos de la estructura.

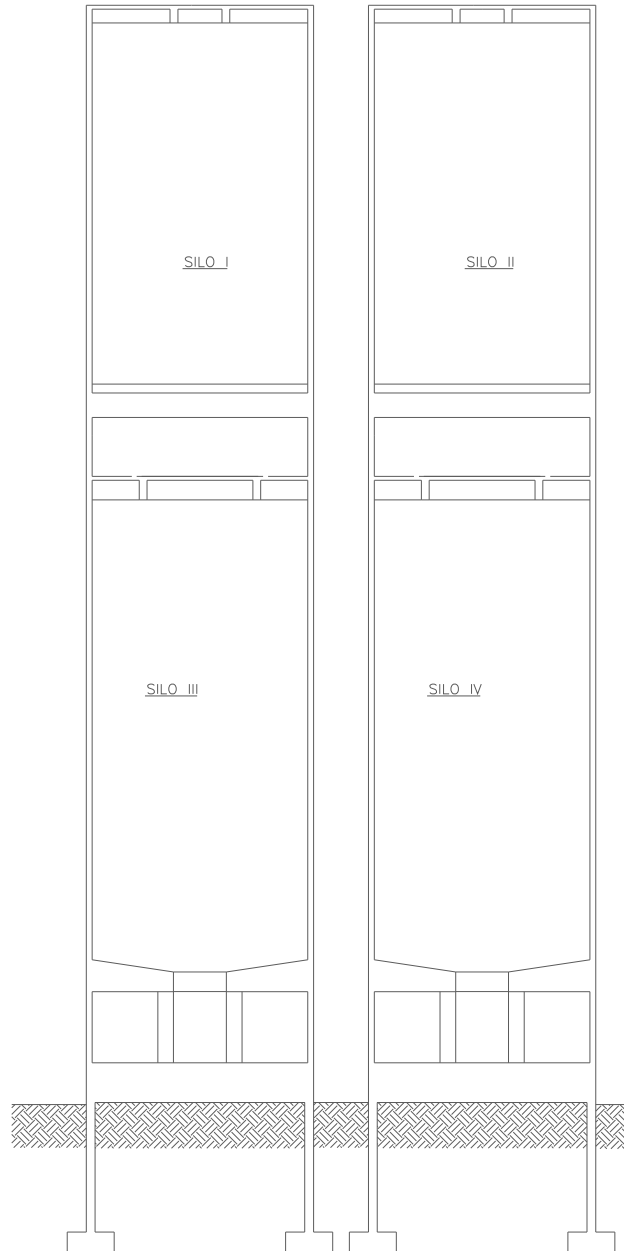


Figura 2. Silos en estudio. Elaboración propia.

3. Descripción del Ensayo de Propagación de Ondas

Este ensayo permite medir la velocidad de ondas ultrasónicas en la masa de hormigón. Para ello se emplea un equipo diseñado especialmente para esta tarea que consta con un sensor que emite ondas y otro sensor que las recibe. El aparato registra el tiempo que tarda la onda en recorrer el espacio entre los dos sensores (el emisor y el receptor). Usando este tiempo y la geometría de la pieza se calcula la velocidad de transmisión de la onda. Este valor es un dato fundamental para conocer la calidad y homogeneidad del hormigón ya que la velocidad se encuentra estrechamente vinculada al módulo elástico del concreto, parámetro que se utiliza para el cálculo de deformaciones y permite estimar la resistencia de este material [3].

Ensayos destructivos y no destructivos para caracterizar las propiedades del hormigón en estructuras existentes y analizar su deterioro con el paso del tiempo

De este modo se arriba a una estimación tanto de las propiedades mecánicas como de las propiedades resistentes sin afectar el elemento estructural, por lo que no es necesario realizar reparaciones o refuerzos una vez concluido el estudio.

La repetición de este ensayo a lo largo de los elementos a estudiar permite conocer la homogeneidad de la masa de concreto, lo que permitirá elaborar conclusiones acerca de la calidad general de las piezas estudiadas y su incidencia en los ensayos de rotura a compresión realizados. Esto se lleva a cabo comparando las velocidades que se registran en los distintos puntos de los elementos y en los testigos de hormigón extraídos del edificio.

Finalmente, el ensayo permite conocer la continuidad del elemento de hormigón en el punto auscultado, ya que la presencia de una fisura, oquedad u otra discontinuidad interrumpiría el tránsito de la onda desde el sensor emisor al receptor, impidiendo una lectura clara o definida. Esta situación también podría advertirse al registrar tiempos de tránsito excesivamente elevados, en comparación con casos similares, ya que la onda se transmitiría por un camino más largo, evitando la discontinuidad presente.

El objeto de este trabajo no es detectar las anomalías que pudiera evidenciar el edificio en estudio, sino contrastar los resultados de las mediciones de velocidad de propagación de onda in-situ con aquellas medidas en laboratorio antes de someterlas a rotura en el ensayo a compresión que permite caracterizar la resistencia del hormigón. Es por eso que en los resultados de los ensayos que se muestran más adelante en este trabajo las mediciones consideradas atípicas fueron descartadas y serán evaluadas en trabajos futuros.

El equipo utilizado para realizar los ensayos de propagación de ondas es el Controls Modelo 58-E4800 y se ilustra en la Figura 3.



Figura 3. Equipo para ensayo de propagación de ondas.
Elaboración propia.

Se remarca que en este método de ensayo, como en cualquier otro procedimiento basado en la propagación de ondas, la variable medida es el tiempo transcurrido entre dos pasos sucesivos de una onda, y la velocidad se calcula a partir de los valores nominales de las dimensiones de cada elemento. Por lo tanto, si la distancia entre la sección en la que se produce la reflexión de las ondas y la superficie desde donde se ejecutan los ensayos

fuese menor a la longitud del elemento, la velocidad aparente de propagación será superior a la real, y por el contrario si la velocidad medida resulta inferior al valor correspondiente a la calidad del hormigón especificado, esto puede deberse a que la calidad del hormigón no es la esperada.

4. Resistencia a Compresión y Ensayos de Propagación de Ondas en Testigos de Hormigón

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos a compresión realizados en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, para trece testigos de 63 mm de diámetro. En la Tabla 1 se indica la resistencia a compresión (f_c) que resultó de los ensayos.

Tabla 1. Resistencia a compresión de testigos.

Testigo N°	Elemento Estructural	f_c[Kg/cm²]
1	Losa Silo N°1	147
2	Losa Silo N°1	199
3	Tabique Silo N°1/3	182
4	Tabique Silo N°2/4	194
5	Tabique Silo N°2	162
6	Tabique Silo N°1	462
7	Tabique Silo N°3	207
8	Tabique Silo N°4	313
9	Viga Entrepiso 1°/2°	300
10	Tabique Silo N°4	286
11	Tabique Silo N°3	156
12	Tabique Silo N°4	148
13	Tabique Silo N°1	127

Elaboración propia.

Previo a la realización de los ensayos de rotura a compresión, se realizaron ensayos de velocidad de propagación de ondas en los testigos. En la Tabla 2 se muestran los resultados de los ensayos de propagación de ondas para cada uno de los testigos.

El módulo de elasticidad del hormigón, calculado usando el ensayo de ultrasonido, se obtiene a partir de la velocidad de propagación de ondas que surge de aplicar la siguiente expresión es [4]:

$$E_d = \frac{V_p^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (1)$$

En donde E_d es el módulo elástico dinámico, ν el módulo de Poisson, ρ la densidad del hormigón y V_p es la velocidad de propagación de onda obtenida en la medición.

Tabla 2. Velocidad de propagación de ondas y módulo de elasticidad de testigos

Testigo N°	Elemento Estructural	V_p [m/s]	E_d [Kg/cm ²]
1	Losa Silo N°1	3601	285473
2	Losa Silo N°1	2364	123000
3	Tabique Silo N°1/3	3320	242716
4	Tabique Silo N°2/4	3815	320460
5	Tabique Silo N°2	3810	319621
6	Tabique Silo N°1	3970	347053
7	Tabique Silo N°3	3810	319621
8	Tabique Silo N°4	3761	311529
9	Viga Entrepiso 1°/2°	2796	172125
10	Tabique Silo N°4	2931	189125
11	Tabique Silo N°3	2444	131535
12	Tabique Silo N°4	2944	190823
13	Tabique Silo N°1	3417	257069

Elaboración propia.

Usando el módulo elástico, se estima la resistencia característica del hormigón usando la siguiente expresión [5]:

$$E = 15100 \sqrt{f_c} \quad (2)$$

En donde E es el módulo elástico estático y f_c es la resistencia especificada a compresión del concreto, en Kg/cm².

La relación entre el módulo de elasticidad dinámico (E_d) y el módulo de elasticidad estático (E) es un valor que depende de diversos factores. En este trabajo se adopta un valor igual a 0.76 de acuerdo con las velocidades registradas, la calibración del aparato en estudios sobre materiales similares y las correlaciones obtenidas entre los ensayos de rotura de testigos y el cálculo del módulo elástico dinámico (Tablas 1 y 2).

En la sección siguiente se ofrecen los resultados del ensayo en términos de las velocidades registradas in-situ que permiten inferir, a partir de ellas, la resistencia del hormigón en los silos luego de la calibración obtenida con los ensayos de rotura de los testigos a los cuales se les ha practicado el mismo ensayo y, por lo tanto, se cuenta con los valores de velocidad y tensión de rotura en cada muestra analizada (Tablas 1 y 2).

5. Resultados del Ensayo de Propagación de Ondas en Elementos Estructurales

Las propiedades elásticas del hormigón fueron determinadas in-situ mediante ensayos no destructivos realizados sobre los tabiques, vigas y columnas de los silos. Para ello se realizaron mediciones de la velocidad de propagación de ondas en el hormigón. En la Tabla 3 se indican los elementos ensayados, los espesores medidos, la velocidad media de propagación de ondas (V_p), el módulo elástico dinámico (E_d) y la tensión de rotura a compresión (f_c) calculada en base a la correlación obtenida en el punto anterior.

Tabla 3. Velocidad de ondas, módulo elástico y resistencia a rotura calculada

Ubicación	Elemento Estructural	Espesor medido [m]	V_p [m/s]	E_d [Kg/cm ²]	f_c [Kg/cm ²]
Silo 1	Losa	1.2	4039	359713	433
Silo 1	Losa	1.2	4103	371203	461
Entrepiso S1/S3	Tabique	0.3	3185	223680	167
Entrepiso S2/S4	Tabique	0.3	3065	207143	143
Silo 2	Tabique	0.3	3245	232187	180
Silo 1	Tabique	0.3	2704	161221	87
Silo 3	Tabique	0.3	2344	121150	49
Silo 4	Tabique	0.3	2404	127432	54
Entrepiso 1/2	Viga	0.4	3605	286562	275
Silo 4	Tabique	0.3	1923	81539	22
Silo 3	Tabique	0.3	1743	66989	15
Silo 4	Tabique	0.3	1923	81539	22
Silo 3	Tabique	1.0	3906	336413	379
Silo 3	Tabique	0.5	3906	336413	379
Silo 3	Columna	0.8	3445	261690	229
Silo 3	Viga	0.6	3425	258660	224

Elaboración propia.

Los valores atípicos y no representativos obtenidos de los ensayos no destructivos que se muestran en la Tabla 3 y que se encuentran por debajo de los 100 Kg/cm² se descartan dado que estos resultados pueden deberse a imperfecciones de la sección,

oquedades o fallas constructivas singulares sobre los elementos estructurales, y la interpretación del origen de estos resultados escapa al alcance del presente trabajo.

Por lo tanto, el promedio de las velocidades de propagación registradas en la Tabla 3, sin considerar los valores atípicos antes comentados, es de 3592 m/s, el valor medio del módulo de elasticidad dinámico es igual a 287366 Kg/cm² y la tensión de rotura a compresión promedio resulta de 287 Kg/cm² de acuerdo al factor de calibración calculado en el apartado anterior.

Como conclusión se desprende que estos valores son compatibles con los obtenidos en los ensayos de rotura a compresión y de velocidad de propagación de ondas sobre los testigos extraídos (Tablas 1 y 2).

6. Control Rutinario de las Propiedades del Hormigón

A los efectos de constatar periódicamente que las propiedades del hormigón se mantienen dentro de los valores aceptables y próximos a los medidos en la reciente campaña de estudio, se recomienda implementar un programa rutinario de controles del Módulo Elástico del Hormigón mediante Ensayos de Velocidad de Propagación de Ondas.

Se recomienda realizar una campaña de este tipo al cabo de 5 años del presente estudio, y en esa ocasión decidir si se mantiene esta frecuencia en el futuro, o si se hacen con mayor frecuencia de acuerdo a la evolución de los parámetros en ese primer período [6].

Cabe destacar que el valor estimado del módulo de elasticidad del hormigón será empleado en modelos de elementos finitos con vistas a la verificación actualizada de las estructuras.

La importancia de determinar el valor del módulo de elasticidad del hormigón permite emplearlo en el modelo de cálculo, dada la influencia que especialmente tiene en las tensiones de origen térmico y en las deformaciones para todos los estados de carga [7].

7. Conclusiones y Recomendaciones

Este trabajo muestra que la resistencia media a compresión obtenida de los ensayos de rotura de testigos de hormigón resultó igual a 222 Kg/cm², con una dispersión del 43%, mientras que la velocidad media de los sectores ensayados mediante velocidad de propagación de onda resultó igual a 3592 m/s, la cual es compatible con módulo elástico de 287366 kg/cm².

El coeficiente de variación de las velocidades obtenidas en todos los ensayos realizados resultó igual a 26%, valor que indica una importante variación de la calidad del hormigón y la existencia de discontinuidades o sobre-espesores en los elementos estructurales de los silos, entre otros.

A su vez se desprende que para garantizar el nivel de servicio deseado de una estructura de hormigón armado (como es el caso de los silos objeto del presente trabajo) se recomienda realizar evaluaciones periódicas a lo largo de su vida útil, que permitan mantener el nivel de servicio ofrecido por estas estructuras.

El método más comúnmente empleado y prescripto por los códigos o reglamentos es el de inspección cada intervalos de 5 y 10 años, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Inspeccionar y relevar daños en áreas potencialmente críticas donde se predicen los mayores esfuerzos.
- Evaluar discontinuidades estructurales.
- Realizar ensayos de ultrasonido acompañados con ensayos de esclerometría en el hormigón para obtener información sobre el módulo elástico, la calidad y homogeneidad del hormigón.
- Controlar el avance de la carbonatación del hormigón para evaluar la efectividad del recubrimiento contra la corrosión de las armaduras.
- Estudiar la petromineralogía del hormigón para detectar reacciones indeseadas entre la pasta cementicia y los agregados.

8. Referencias

- [1] International Atomic Energy Agency (I.A.E.A.). (1998). *Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: Concrete containment buildings*. IAEA-TECDOC-1025. Vienna, Austria.
- [2] ACI 313-97. (1997). *Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for storing Granular materials*.
- [3] ASTM C 1383-98. (1998). *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*.
- [4] Manual de uso del equipo Controls Modelo 58-E4800. (2010).
- [5] ACI 318-05. (2005). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*.
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). (2012). *Inservice Inspection of Prestressed Concrete Containment Structures with Grouted Tendons*. Regulatory Guide - Office of Nuclear Regulatory Research - Revision 2. U.S.
- [7] CRESPI, L., NOVILLO, N. y FRAGUEIRO, A (2016). *Consideraciones para el análisis de tensiones de origen térmico en el diseño de silos de hormigón armado*. 24JAIE2016-028. Bs As: p.1-15.