

METODOLOGIA DE EVALUACION DEL HORMIGON ARMADO  
PARA LA RESTAURACION ESTRUCTURAL — TEATRO LUIS ESPINAL

Oscar Luis Pérez Loayza  
Américo Rubén Hilaquita Ramos  
Victor Sarzuri Quispe

RESUMEN

El Instituto de Ensayo de Materiales IEM, en el afán de responder a las necesidades de nuestra sociedad, y en este caso específico, apoyar a otras facultades de la Universidad Mayor de San Andrés, ha realizado el Proyecto de Restauración del Sistema Estructural del Teatro "Luis Espinal" de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas. Para esto, previamente se realizan diferentes ensayos que son parte de la Metodología con el objetivo de determinar las características iniciales de la estructura, mismas que se resumen en el presente artículo.

1. INTRODUCCION

Para el Proyecto de Restauración de una estructura, además de los trabajos relacionados con el Relevamiento, Análisis y Diseño estructural se realizan ensayos previos relacionados con las Propiedades y la Patología del Hormigón, que son parte de una metodología de trabajo que el IEM ha desarrollado.

La estructura del Teatro "Luis Espinal" tiene una vida aproximada de 80 años, no se disponen de planos estructurales y por el paso del tiempo el hormigón armado ha desarrollado ciertas patologías en los diferentes elementos, especialmente en losas y vigas que han sido demolidas y se pretende reemplazarlas por otras.

Las condiciones del material en el momento de la intervención se han establecido mediante ensayos que se han coordinado y supervisado para el análisis y diseño de la losa sobre la que se asienta el Teatro: Pacometría, Ultrasonido, Profundidad de Carbonatación, Esclerometría y Extracción de Núcleos.

2. OBJETIVO

Resumir la Metodología del Instituto de Ensayo de Materiales para la Evaluación Patológica y Determinación de las Propiedades del Hormigón necesarios

para el Análisis y Diseño Estructural de una estructura a rehabilitarse, en este caso aplicado al proyecto de restauración del sistema estructural que soporta la losa del Teatro "Luis Espinal" de la Facultad de Derecho y Ciencia Políticas.

3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento se ha discretizado en las siguientes actividades:

- a) Visitas a Obra
- b) Levamiento Estructural Preliminar
- c) Ensayo de Pacometría
- d) Ensayo de Ultrasonido
- e) Ensayo de Profundidad de Carbonatación
- f) Ensayo de Esclerometría
- g) Extracción de Núcleos

3.1. Visitas a obra

Se realizaron varias visitas para establecer las condiciones iniciales de la estructura y posteriormente realizar un levantamiento preliminar de la estructura para ubicar e identificar los elementos ensayados Para el caso particular se muestran algunas fotografías de la obra en el momento de su intervención.



*Fotografía 1. Vista general de los ambientes inferiores y del estado Inicial de la estructura*



*Fotografía 2. Losa demolida, viga interna y uno de los sistemas de arco*

La losa prácticamente se encontraba demolida, quedaban algunas vigas interiores y un sistema de arcos, aspectos que se observan en las fotografías 1 y 2.



*Fotografía 3. Columna con alto grado de degradación*

En la fotografía 3, se puede apreciar en una columna que se encuentra al lado de una bajante sanitaria, que la carbonación ha sobrepasado el hormigón llegando hasta las barras de acero con su posterior corrosión, siendo crítica en la cara adyacente a la bajante.



*Fotografía 4. Viga sin recubrimiento*

En la fotografía 4 se observa que una de las vigas del sistema de la losa se encuentra sin recubrimiento debido a la carbonatación del hormigón. Producto del ataque químico del medio ambiente, la armadura incrementa su volumen, el hormigón se fisura y desprende, y el refuerzo se corroe.

Las patologías anteriormente mostradas en columnas son puntuales, en general, el sistema de columnas visualmente se encuentran en buen estado, en cambio el sistema **de vigas de la losa**, estructuralmente, se aprecia que ya no trabaja adecuadamente.

Verificadas las condiciones iniciales e identificados los problemas patológicos, se procede a realizar los ensayos respectivos.

### 3.2. Levamiento Estructural Preliminar

En principio, con el objetivo de identificar la ubicación de los elementos del sistema estructural sobre los cuales se debían realizar **los diferentes ensayos** y considerando como referencia los planos arquitectónicos **facilitados por el Departamento de Infraestructura de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas**, se realizan las mediciones pertinentes para establecer un sistema de ejes en planta que será útil, también, en el posterior análisis y diseño estructural para la reconstrucción y refuerzo del entrepiso.

### 3.3. Ensayo de Pacometría

El recubrimiento actúa como una barrera física entre la armadura y el medio ambiente en que se encuentra expuesta la estructura. La velocidad de acceso de **agentes químicos agresivos que provocan la corrosión del acero de refuerzo** depende de las características de este recubrimiento, y el tipo de daño provocado está también influenciado por su espesor y relación con el diámetro de la armadura. Mediante este ensayo se determina el diámetro y la localización de la armadura en el elemento estructural.

La medida del espesor de recubrimiento es importante en dos momentos de la vida de una estructura: durante su construcción, para comprobar que se

ajusta a las especificaciones de diseño, y cuando se presentan patologías de un proceso de corrosión.

Para evaluar las características del hormigón en estado actual, el ensayo de pacometría permite evitar la presencia de la armadura de refuerzo, ubicar espacios donde sólo exista hormigón y realizar sobre ellos las respectivas pruebas de ultrasonido, profundidad de carbonatación, **esclerometría** ✓  
extracción de núcleos

Este ensayo es importante para la identificación completa de la armadura de refuerzo en los diferentes elementos para el relevamiento estructural y posterior análisis y diseño.



*Fotografía 5. Ensayo de Pacometría en uno de los elementos del sistema de arcos*

En la fotografía 5 se muestra la ubicación, en uno de los arcos, para realizar el ensayo de pacometría y los posteriores **de ultrasonido** ✓  
carbonatación.

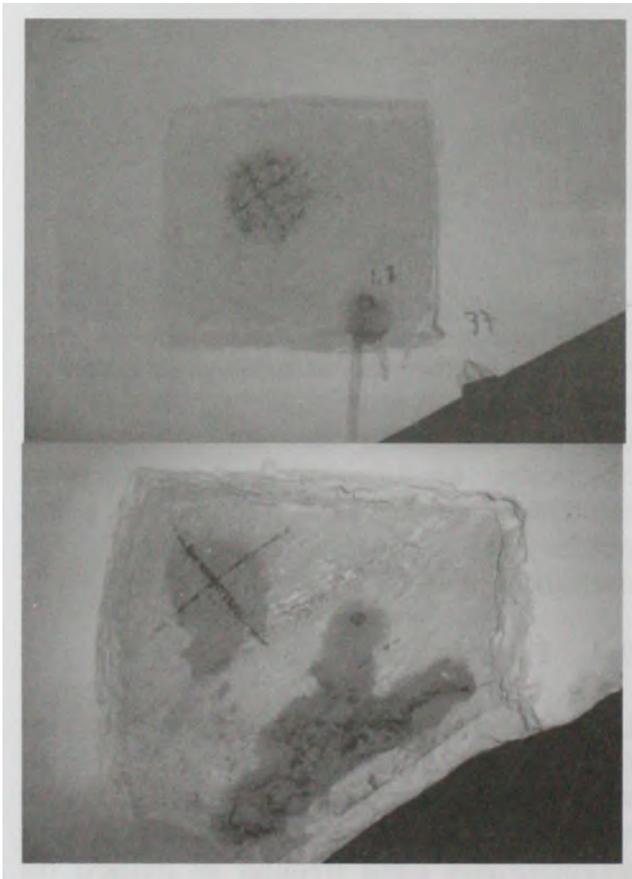
### 3.4. Ensayo de Ultrasonido

La inspección mediante ultrasonido es un método no destructivo en base a la velocidad de ondas a través del material analizado y se emplea en aplicaciones estructurales para evaluar el estado de materiales como el hormigón. Este método se describe en detalle en normas como la ASTM C 597-83 y BS 1881-203.

Este método se emplea en la evaluación de la uniformidad y calidad relativa del hormigón y en la localización de defectos como fisuras o coqueas de elementos estructurales que presentan dos caras accesibles como vigas, losas y soportes.

El procedimiento del ensayo es relativamente simple, siempre y cuando se tenga el equipo y el entrenamiento necesarios para su uso. Una vez localizada la posición de las armaduras mediante la pacometría, se identifica un espacio libre de este refuerzo, donde se procede a quitar el revestimiento de yeso, para luego pulir dejando una superficie de hormigón expuesto y ligeramente liso.

El ensayo se realizó de manera paralela en las columnas y de manera frontal en los arcos.



*Fotografías 6. Ensayos de ultrasonido y profundidad de carbonatación en los arcos*

### 3.5. Ensayo de Profundidad de Carbonatación

La velocidad del frente de carbonatación, es de vital importancia para calcular el tiempo en que tardará en llegar hasta la armadura, está en función de la porosidad, la humedad en el hormigón y su contenido en materia alcalina carbonatable.

El dióxido de carbono de la atmósfera (generalmente en concentraciones entre 600 y 800 mg/m<sup>3</sup>) reacciona con el calcio y los hidróxidos alcalinos que existen en el hormigón. El producto de la reacción es mayoritariamente carbonato cálcico. Este efecto reduce el pH en la solución de los poros hasta valores cercanos a neutros (7 — 8), dejando a la armadura en unas condiciones que permiten la corrosión activa de la misma.

La carbonatación es un proceso de difusión y por lo tanto su avance en el interior del hormigón progresa atenuándose en el tiempo.

El objetivo del ensayo es determinar la profundidad de carbonatación del hormigón, parámetro necesario para evaluar su estado en cuanto a la durabilidad del material. Para su realización, se aprovecha los espacios donde se efectuaron los ensayos de ultrasonido, previa la pacometría, pues se tiene que tener el cuidado de no perforar sectores donde exista armadura.

Se aplica una solución de fenolftaleína cada 0,5 cm de profundidad, perforando de manera sistemática hasta encontrar el frente no carbonatado identificado por el no cambio en la coloración de la superficie. En las figuras 6 se puede apreciar el estado en que se encuentra la superficie de hormigón después de realizado los ensayos de pacometría, ultrasonido y carbonatación

### 3.6. Ensayo de Esclerometría

Este ensayo evalúa la dureza superficial del hormigón mediante la cual se obtienen resistencias del hormigón que sirven de comparación con los obtenidos por compresión de probetas. Los ensayos de esclerometría no son sustitutos de los ensayos de resistencia, **sino que son** complementarios y de correlación, tienen un carácter tan sólo comparativo, por lo que el índice esclerométrico o número de rebote no se convierte en un valor exacto de la resistencia a compresión, sino más bien, en un rango de donde se obtiene un valor mínimo y un valor máximo en el cual se encuentra la resistencia probable. El índice esclerométrico no debe ser tomado como un valor absoluto, sino más bien de referencia cualitativa o preferentemente comparativo **con** respecto de otros hormigones, cuya calidad haya sido aceptable.

De la misma manera que para los ensayos descritos anteriormente se evita la presencia de armadura, se retiran los revoques se pulen las superficies y se aplica el eje del martillo de manera perpendicular al elemento, realizando por lo menos 15 disparos de acuerdo a especificaciones de normas para la posterior depuración de resultados por la existencia de excesiva dispersión. En las fotografías 7, se observa la realización del ensayo de esclerometría en vigas y columnas del sistema estructural en análisis.



*Fotografía 7. Ensayo de esclerometría en vigas y columnas*

### 3.7. Extracción de Núcleos

Los núcleos se extraen para luego realizar el ensayo de compresión sobre ellos y determinar la resistencia característica del hormigón que se empleará en el análisis y diseño estructural. En este caso del sistema estructural del Teatro "Luis Espinal", fueron extraídos tres núcleos en vigas, previo nuevamente el ensayo de pacometría para no cortar o dañar la armadura de refuerzo.



*Fotografía 9. Extracción de núcleo. Viga A entre ejes A5-A6. Auditorio*



*Fotografía 8. Extracción y testigo obtenido. Arco 4 entre ejes C4-D4. Auditorio.*



*Fotografía 10. Extracción y testigo obtenido. Viga 8 entre ejes B4-B5. Segundo semisótano.*



En las fotografías 8, 9 y 10 se pueden observar la extracción de núcleos y los testigos obtenidos en diferentes elementos del sistema estructural analizado.

## 4. RESULTADO

### 4.1 Relevamiento estructural

Descrito el procedimiento desarrollado, que se inicia con las visitas a obra, se presentan de forma resumida resultados obtenidos de las diferentes actividades y ensayos realizados.

En principio, en la figura 1 se muestra el plano de ejes en planta que se repite en toda la estructura por debajo de la losa en análisis, que es donde se realizaron los ensayos y que se emplea en el modelo para el análisis y diseño para la reconstrucción. Se puede observar, además la identificación de columnas

que tienen que reforzarse, que ya es parte del análisis del diseño final correspondiente. En nuestro caso se empleará para identificar la posición de los elementos ensayados

### 4.2 Ensayos de Pacometría.

Para la realización de ensayos y el relevamiento estructural es necesario conocer la localización y características de la armadura. En el cuadro 1 se muestra un ejemplo de resultados obtenidos para las columnas de uno de los pisos del Teatro, donde se detalla las armaduras obtenidas.



**COLUMNAS (3ra Planta Mezanine)**

Ubicación	Dimensiones [cm]		Barras Longitudinales		Estribos		Recubrimiento Mecánico	Observaciones
	X	Y	Cant.	ø [mm]	ø [mm]	Cada [cm]		
B5	ø28	ø28	6	20	4	20	4	
F5	33	35	4	20	4	20	3	
E6	ø45	ø45	6	20	4	20	4	

Cuadro 1. Ejemplo de armaduras obtenida por el ensayo de Pacometría

**4.3 Ensayo de Ultrasonido**

Como se ha indicado el ensayo es parte de la evaluación de homogeneidad del hormigón. En el Cuadro 2 se presenta un

ejemplo con los resultados obtenidos de los sistemas de arcos, dando como resultado un hormigón en general homogéneo.

	Pórtico 5		Pórtico 4		Observaciones
	Lado E5	Lado B5	Lado E4	Lado B4	
Espesor [cm]:	37	37.5	37.5	37	
Lectura ultrasonido [ms]:	137	123	138	183	

Cuadro 2. Ejemplo de resultados obtenidos por el ensayo de Pacometría

**4.4 Ensayo de Profundidad de Carbonatación**

En los Cuadros 3 y 4 se presentan los resultados de los ensayos realizados.

COL	Profundidad [cm]
D8	1.6
E6	1.2
E4	1.2
F6	3.6
E1	1.0
D3	2.5
CI	1.7
B3	1.3
B4	2.1
A4	2.1
B5	0.6
B6	2.0
A6	1.6

Cuadro 3. Profundidad de Carbonatación Columnas. (2da. Planta Auditorio)

	Pórtico 5		Pórtico 4	
	Lado E5	Lado B5	Lado E4	Lado B4
Profundidad de Carbonatación [cm]:	1.8	1.1	2.3	1.8

Cuadro 4. Profundidad de Carbonatación Pórticos. (1ra. Planta)

El recubrimiento de hormigón en la estructura está sobre los 3 cm. La profundidad de carbonatación está por los 2 cm, misma que se ha producido en los 80 años de vida que tiene la estructura.

**4.5 Ensayo de Esclerometría**

Como se indicó anteriormente, mediante este ensayo se puede determinar resistencias del hormigón, que por la mucha dispersión que presenta simplemente se considera para

evaluación de la homogeneidad del hormigón complementando los análisis realizados con los ensayos de ultrasonido.

En el Cuadro 5 se muestran algunos datos obtenidos y que se procesan en el Área de Hormigones.

N°	COL	ESCLEROMETRIA EN COLUMNAS (2do Nivel Teatro)															
1	A6	39	39	43	40	42	40	41	40	40	39	39	37	38	38	33	
2	B4	51	48	49	52	48	48	49	50	51	48	49	51	49	47	48	
3	B5	46	48	47	48	46	48	48	49	46	48	48	47	47	48	45	47
4	B6	50	49	48	51	50	52	50	52	52	52	53	54	49	50	52	55
5	C1	40	38	36	36	37	39	42	45	47	39	38	40	39	36	38	
6	C9	38	38	37	35	35	35	35	38	41	35	44	45	41	47	41	42
7	D3	47	43	45	45	36	43	42	46	44	48	49	42	41	42	42	
8	D9	34	33	34	35	33	35	33	34	37	36	33	35	34	32	31	37
9	E1	50	44	41	39	51	41	40	46	39	40	40	42	42	39	39	40
10	E4	49	50	54	50	48	52	52	53	54	49	52	51	48	52	47	
11	E6	44	43	50	45	43	48	51	49	49	43	52	53	52	50	51	43
12	F3	45	52	51	50	50	46	52	48	54	43	49	48	54	49	53	55
13	F5	50	47	52	52	47	50	51	49	49	50	48	46	51	50	45	51
14	F6	46	45	47	41	50	51	49	50	48	51	46	48	47	50	44	41

Cuadro 5. Ejemplo de datos obtenidos por el ensayo de Esclerometría

#### 4.6 Extracción de Núcleos

Se extrajeron tres núcleos del sector bloque "O" (Teatro) en fecha 9 de diciembre de 2010, de los cuales dos fueron ensayados ya que el tercero no tenía las condiciones para realizar el ensayo de compresión

N° 1: Núcleo extraído en la viga "4" entre C y Da nivel del 2° semisótano, con una dirección de extracción paralela a la del hormigonado y sin presencia de armadura.

N° 2: Núcleo extraído en la viga "B" entre 4 y 5 a nivel del 2° semisótano, con una dirección de extracción perpendicular a la del hormigonado y sin presencia de armadura.

En el siguiente cuadro se muestran las dimensiones, peso y carga de rotura de los núcleos extraídos:

Probeta	Perímetro [m]	Altura [m]	Peso [g]	Carga de Rotura [kN]
N° 2	0.300	0.144	2350.8	100.50
N° 1	0.299	0.133	2131.3	94.40

Cuadro 5. Ensayo de compresión  
Fecha de Rotura: 15 de marzo de 2011

Los núcleos fueron saturados en agua durante 24 h antes de ser ensayados y la fecha aproximada de vaciado es el año 1930.

El tercer núcleo no tenía las condiciones para ser ensayado.

Realizados los cálculos respectivos se ha obtenido una resistencia característica de 12,5 MPa.



Fotografía 11. Núcleos refrentados



Fotografía 12. Ensayo a compresión de los núcleos

## 5. OBSERVACIONES

Los ensayos realizados tienen como finalidad iniciar y complementar los trabajos a realizar para el objetivo final que es el diseño estructural del sistema para la restauración del entrepiso del Teatro "Luis Espinal" de la Facultad de Derecho y Ciencia Políticas.

### 5.1 Visita a obra

Como se indicó anteriormente se realizaron varias visitas antes de los ensayos y durante su realización, complementados con algunos otros durante el trabajo en gabinete del proyecto final de diseño de restauración del Sistema Estructural.

### 5.2 Levantamiento Estructural Preliminar

Se presenta el plano de ejes de referencia para indicar la ubicación de los diferentes ensayos realizados, inclusive se muestran las columnas que tienen que ser reforzadas, producto del análisis estructural posterior para el diseño mismo de la restauración.

### 5.3 Ensayo de Pacometría.

Los datos se emplean para identificar las armaduras **en el levantamiento** estructural y su aplicación en el análisis y diseño. También fueron importantes para la ubicación de áreas libres de refuerzo donde se realizaron los ensayos de ultrasonido, carbonatación, esclerometría y extracción de núcleos.

### 5.4 Ensayo de Ultrasonido

Se realizaron en los sistemas de arcos, con la finalidad de tener información sobre la homogeneidad del hormigón. Los resultados de este ensayo, complementados **con los de la** esclerometría llevan a la conclusión de **que el hormigón, en general, es homogéneo.**

### 5.5 Ensayo de Profundidad de Carbonatación

Los ensayos realizados en sitio, importantes en la durabilidad del hormigón dan una idea de la vida remanente de la estructura desde el punto de vista del ataque químico del medio ambiente.

### 5.6 Ensayo de Esclerometría

Los datos obtenidos son procesados por el Área de Hormigones; los resultados, que son valores de resistencia, pueden correlacionarse con los obtenidos en el ensayo de compresión sobre probetas, y por otra parte, permiten determinar la

homogeneidad del material que puede ser complementado con el ensayo de ultrasonido que se realizó sobre los arcos de la estructura.

#### 5.7 Extracción de Núcleos

Se extrajeron tres núcleos de los cuales solamente se ensayaron dos. Los datos obtenidos y presentados, se procesaron en el Área de Hormigones.

Toda la información de los ensayos servirá para complementar el modelo, análisis y diseño estructural, a partir de cuyos resultados se tomarán decisiones para la rehabilitación del Teatro Luis Espinal.

La metodología descrita permite identificar **las propiedades** características del Hormigón que son necesarias en el análisis y diseño estructural del Proyecto de Restauración.

Se evidenció que después de 80 años de servicio, a la estructura del teatro Luis Espinal, todavía le queda una vida remanente.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) A. M. Neville. **Tecnología del Concreto**. Ed. Instituto Mexicano del Cemento de del Concreto. 1980
- (2) P. Jiménez Montoya y otros. **Hormigón Armado**. Edición 14. 2000
- (3) EHE. **Instrucción del Hormigón Estructural**. Ministerio de Fomento de España. 2002
- (4) J. Calavera. **Patología de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado**. INTEMAC. 2005