



## Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas

Néstor F. Ortega, Marianela Ripani  
Departamento de Ingeniería  
Universidad Nacional del Sur  
Av. Alem 1253 - 8000 Bahía Blanca  
Fax (54-291) 459 5110  
nfortega@criba.edu.ar

### Resumen

En este trabajo se presentan una serie de experiencias con el empleo de ensayos no destructivos, para el estudio de estructuras de hormigón armado afectadas por diferentes situaciones patológica, que degradan sus propiedades mecánicas, por lo que disminuye su vida útil. Se presentan experiencias de laboratorio y de campo en el empleo de Ensayos no Destructivos: Impulsos Ultrasónicos, Esclerometría, Potenciales de Corrosión y Frecuencias Naturales de Vibración.

Con el empleo de estos Ensayos se puede realizar el diagnóstico, con un grado de precisión que varía de una técnica a otra, del estado de servicio, tal que una medición sistemática puede dar una idea de la vida residual de la estructura, con el fin de programar tareas de reparación o directamente, el retiro de servicio sin la necesidad de correr riesgos importantes. También se aprecia la importancia, para la durabilidad, del espesor del recubrimiento y de las fisuras del hormigón de la estructura.

### 1. Introducción

El empleo de los Ensayos no Destructivos (END) en las distintas ramas de la Ingeniería, es de vieja data. En las aplicaciones referidas a la construcción, su uso está cada vez más difundido en el estudio de estructuras de hormigón, principalmente, por ser mínima la afectación al funcionamiento de las mismas. Durante los ensayos, esto es muy importante, por ejemplo para el caso de los puentes o estructuras industriales, los cuales fuera de servicio pueden ocasionar importantes repercusiones económicas y/o sociales.

Las aplicaciones de estos ensayos se dividen en dos grupos, según su finalidad:

- Establecer las propiedades de la materia; en este grupo se incluyen los ensayos de Ultrasonidos, los Esclerométricos, de Resistividad del Hormigón o Potenciales Electroquímicos de Corrosión, y
- Determinar el comportamiento mecánico de piezas; este es el caso de la Extensometría, medición de flechas o de las Frecuencias Naturales de Vibración.

Los ensayos que emplean impulsos ultrasónicos y los Esclerométricos, tienen por objeto estimar la resistencia del hormigón, sin la necesidad de romper la pieza. La determinación de la resistividad del hormigón, establece la predisposición que existe al

desarrollo de procesos corrosivos en las armaduras que están embebidas en el hormigón, mientras que los potenciales de corrosión dan una idea del grado de avance del proceso corrosivo en las armaduras. En ninguno de los ensayos es necesario alterar la armadura. Algo similar ocurre con la determinación de los parámetros del comportamiento, ante acciones estáticas, por ejemplo; Extensometría y deflexiones verticales (flechas); y en el análisis del comportamiento ante acciones dinámicas, a través de la determinación de los modos de vibración y de las Frecuencias Naturales de vibración.

En este trabajo se presenta una recopilación de experiencias, en su mayoría de laboratorio y algunas de campo, que se han realizado en el Laboratorio de Modelos Estructurales de la Universidad Nacional del Sur, estudiando estructuras o piezas de hormigón armado afectadas por distintas situaciones patológicas. Los END incluidos son: Ultrasonidos, Esclerometría, Potenciales de Corrosión y Frecuencias Naturales de Vibración.

## **2. Método Esclerométrico**

El método Esclerométrico permite determinar la dureza superficial del hormigón. Para ello, una masa conocida, es impulsada con una determinada energía, golpea al hormigón y rebota. La cantidad de energía recuperada en el rebote es un índice de la dureza superficial y se cuantifica con el Índice Esclerométrico, parámetro que varía entre 20 y 50.

En el Esclerómetro Schmidt, la energía es proporcionada por un mecanismo de resorte, mientras que el Esclerómetro de Péndulo utiliza, exclusivamente, la energía potencial gravitatoria. El primer tipo de esclerómetro es utilizado en estructuras de hormigón, mientras que el segundo, cuyo impacto superficial posee menos energía, se emplea en mamposterías. En estas investigaciones se utilizó el Esclerómetro Schmidt.

Estos métodos de dureza superficial se pueden aplicar en las siguientes áreas:

- Estudio de la homogeneidad de un hormigón;
- Comparación de la calidad de un hormigón con otro de referencia, cuya calidad se conoce por otros medios; por ejemplo, rotura de probetas; y
- Estimación de la resistencia del hormigón "in situ".

El método Esclerométrico es el END más difundido en Ingeniería Civil, siendo relativa la calidad de sus resultados, debido a diversos motivos. Las correlaciones empíricas que se pueden establecer entre el Índice Esclerométrico y la resistencia a compresión de los hormigones, son modificadas por ciertos factores, siendo los principales: tipo y cantidad de cemento, tipo de áridos, condiciones de curado (en agua, o al aire seco), humedad de superficie, carbonatación, tipo de superficie, u otros factores tales como edad del hormigón, compactación, aditivos utilizados, estado tensional del elemento ensayado, espesor, curvatura, etc. Las alteraciones más evidentes se producen cuando el hormigón se carbonata (endurecimiento superficial) o la pieza en estudio, está sometida a cargas importantes (por ejemplo, columnas de los primeros pisos de un edificio), se obtienen valores superiores a los reales, no obstante en combinación con Ultrasonidos, tiene una potencialidad importante.

Con relación a los factores mencionados anteriormente, se puede decir que, en experiencias realizadas en distintas construcciones, tal es el caso de algunos puentes y edificios estudiados en la zona de Bahía Blanca, se han detectado errores que llegan a producir subestimaciones de hasta el 20 %, al realizar determinaciones en superficies

muy húmedas. Estas diferencias se han detectado en hormigones, cuya resistencia característica a compresión es inferior a  $200 \text{ kg/cm}^2$ , los cuales poseen una estructura de poros no muy cerrada. Por ello, no conviene realizar mediciones después de una lluvia, y hay que tenerlo muy en cuenta cuando se estén estudiando torres de enfriamiento, u otras instalaciones donde la humedad relativa del ambiente es elevada y no es posible dejarlas fuera de servicio, para permitir el secado de la superficie.

Otra situación donde se pueden cometer errores importantes, en este caso de sobreestimación, se presenta cuando la superficie del hormigón está carbonatada. Esta alteración físico-química del hormigón, además de producir un descenso del pH, genera un endurecimiento superficial. Se han encontrado Índices Esclerométricos superiores a 40; medidos en hormigones, cuya resistencia característica a compresión es inferior a  $200 \text{ kg/cm}^2$ , en general, esta situación se presenta en estructuras de cierta edad (20 años o más). Esto da lugar, a sobreestimaciones de hasta 50%. Por lo tanto, si existen sospechas carbonatación, se deberá determinar su importancia, y si resulta conveniente, previamente, se debe eliminar la capa de carbonatación de la zona de ensayo, o solo emplearse los resultados para comparar calidades de hormigón.

### **3. Método de la velocidad de ultrasonidos**

El principio de funcionamiento de esta técnica consiste en un transductor transmisor electro-acústico, que produce ondas de alta frecuencia, en contacto con la superficie del hormigón. Estas ondas atraviesan una distancia conocida, hasta alcanzar a otro transductor receptor, que convierte la señal acústica en electrónica. Un circuito electrónico mide el tiempo de tránsito, pudiéndose obtener la velocidad del impulso. En algunos aparatos, el impulso recibido es amplificado y llevado a un tubo de rayos catódicos, donde se compara la forma y amplitud de las ondas recibidas, con respecto a las emitidas. En el hormigón se generan tres tipos de ondas: longitudinales, transversales y de Rayleigh.

La velocidad de propagación ultrasónica, es proporcional al contenido de cavidades y estructura de poros del hormigón. Además, durante el proceso de fraguado, se demuestra experimentalmente que dicha velocidad se incrementa rápidamente, a medida que el hormigón gana resistencia. En términos generales se puede decir que, a mayores Velocidades, corresponden mayores resistencias mecánicas. Por este motivo, esta técnica es una de las más confiables y utilizadas, como END, aplicado a estructuras de hormigón.

Los inconvenientes encontrados en la utilización de este método, derivan de: heterogeneidad del hormigón, edad, tipo de cemento, condiciones de curado, etc. Estos inconvenientes son de tal importancia que hacen que la técnica, que está totalmente desarrollada para metales, se encuentre, todavía en plena investigación y mejora en el hormigón.

El método de ultrasonidos se ha empleado, en el hormigón, para el estudio de:

- Identificación de zonas débiles en su estructura (test de homogeneidad);
- Defectoscopía (medida y dimensiones de defectos), espesores de capas dañadas por frío o fuego, ataques químicos, acción del fuego / calor, etc.;
- Medidas de las constantes físicas, tales como el Modulo de Elasticidad Dinámico;
- Evolución de procesos de fisuración y microfisuración, bajo carga; y
- Determinación de la resistencia a compresión y tracción.

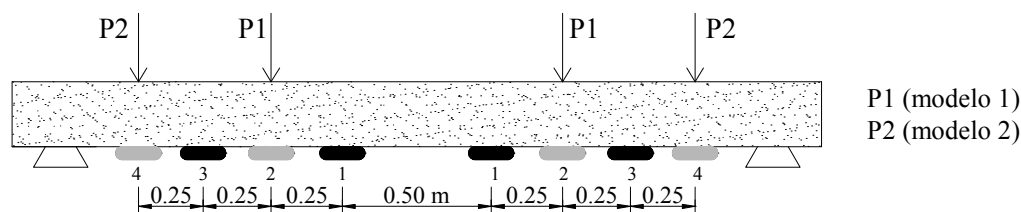
Se pueden utilizar métodos combinados, que permitan obtener más exactitud en la estimación de la resistencia del hormigón. Frecuentemente, se combina el método de la Velocidad de Impulsos de Ultrasonidos con el método Esclerométrico.

### 3.1. Experiencia de laboratorio

Esta experiencia de laboratorio, se realizó en conjunto con docentes de la Facultad de Ing. de la UNCPBA y fue realizada en el laboratorio estructural de esta universidad <sup>(1)</sup>. La misma consistió en ensayar dos vigas de hormigón armado, de 3m de luz (Tabla 1), a las que se aplicaron cargas crecientes hasta llegar a la rotura, donde se detiene el ensayo. Se realizan mediciones de Flechas, Frecuencias Naturales de Vibración y Velocidades de los impulsos ultrasónicos; siendo estos últimos los valores que se presentan en este trabajo. Los puntos de medición estaban en la cara inferior de la viga; comparándose el valor de estas velocidades sin deterioro y con distintos valores de carga.

**Tabla 1: Modelos analizados**

Modelo	Resist. Caract. H° (MPa)	Geometría		Armaduras		
		Ancho [cm]	Alto [cm]	Superior	Inferior	Estribado
Modelo 1	21	15	30	2 $\phi$ 8	3 $\phi$ 12	1 $\phi$ 6 c/ 24 cm
Modelo 2	21	15	30	2 $\phi$ 8	3 $\phi$ 20	1 $\phi$ 6 c/ 18 cm



**Figura 1. Configuración del ensayo para las mediciones de Impulsos.**

Las Velocidades de Propagación de los Impulsos Ultrasónicos, medidos en los cuatro puntos, indicados en la Figura 1, en el estado con cargas y sin fisuras (exceptuando las que se registraron por retracción del hormigón), deberían ser iguales. Esto no ocurre debido a que la viga no está realizada en hormigón simple, sino que posee armaduras, y la zona donde se colocaron los transductores es un lugar fuertemente armado, produciéndose disminuciones de la velocidad de propagación, que tendría en el hormigón sin armaduras. No obstante, los resultados obtenidos son útiles, porque el análisis se realiza en términos relativos, para una misma ubicación de los palpadores. (ver Tabla 2)

**Tabla 2: Velocidades de Propagación de Impulsos Ultrasónicos en Modelo 1 (rotura por flexión) y Modelo 2 (rotura por corte).**

	Carga (kN)	Velocidad (m/seg)							
		Modelo 1				Modelo 2			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Sin Carga	0	2750	2000	1600	2140	3130	2500	1840	1960
Primer Escalón	50	1320	1670	1300	1470	3030	1920	1760	1820
Segundo Escalón	100	900	1100	1150	1050	2940	1920	1720	1820
Tercer Escalón	140	530	650	660	.....	2750	1170	1250	1090

El descenso de las Velocidades de Propagación de los Impulsos Ultrasónicos registradas, para las distintas cargas, que se observa para las posiciones 1 y 2, es indicativo de la existencia de una mayor densidad de fisuras, en el tercio medio de la viga producida por la flexión. Se observa un leve descenso de las velocidades para cada posición de los sensores en los distintos escalones de carga. Por el contrario, se tiene un fuerte descenso entre las diferentes posiciones de los sensores para cada escalón de carga. Esto está indicando que existe una fisuración importante, en la zona de corte, más cercana a los apoyos, obteniéndose la falla de la viga por tensión diagonal.

Las mediciones de las Velocidades de Propagación permiten detectar la influencia de las fisuras por flexión y/o corte en el elemento analizado, pudiéndose detectar la diferencia entre fisuras superficiales (por ejemplo, provenientes de la retracción, donde no se registrarían diferencias significativas en la velocidad de propagación de los ultrasonidos), con las fisuras profundas que afectan a toda la sección transversal (producidas por los esfuerzos flexionales o el corte).

Comparando la disminución de las Velocidades de Propagación de los Impulsos Ultrasónicos, se aprecia que en el Modelo 1, hay un mayor descenso de estas velocidades, a consecuencia de un cuadro de fisuración importante, en la zona central de la viga, originada por la presencia de Momentos Flectores más importantes, respecto de los que presenta el Modelo 2, que llega a la rotura por corte.

#### **4. Potenciales de Corrosión**

Existen distintos métodos para realizar el seguimiento del proceso corrosivo en armaduras dentro de estructuras de hormigón. La técnica aquí presentada es muy difundida, consiste en hallar la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de las armaduras y un electrodo de referencia, que se encuentra en la parte exterior del hormigón. Este ensayo está normalizado mediante la norma ASTM C 876-91 <sup>(2)</sup> y en Argentina, con la IRAM 738 <sup>(3)</sup>, que es muy similar a la anterior. Se emplean electrodos de referencia de cobre – sulfato de cobre, observándose que a medida que disminuyen los potenciales, se incrementa el riesgo de corrosión. Cuando los potenciales son menores que  $-350$  mV, hay una probabilidad que exista corrosión superior al 90%, entre  $-350$  y  $-200$  mV, la situación es incierta y cuando el potencial es mayor a  $-200$  mV, la probabilidad es inferior al 10 %.

##### **4.1. Experiencia de Laboratorio**

Para relacionar la influencia del avance del proceso corrosivo, con las deflexiones de los elementos estructurales sometidos a flexión, se construyeron cinco vigas de hormigón armado de 200 cm de longitud útil, 8 cm de ancho y altura variable, para que, una vez impuestas las deflexiones, las armaduras expuestas al proceso corrosivo tengan aproximadamente la misma tensión inicial (210 MPa). Se tomó esta tensión constante debido a la influencia que tiene en la velocidad del proceso, el fenómeno conocido como “Corrosión Bajo Tensión”. La duración del ensayo fue aproximadamente 1800 días (5 años). Desde que se impusieron las deflexiones a las vigas, éstas fueron sometidas a un proceso de corrosión natural, con el fin de cuantificar su actividad. Se midieron los Potenciales Corrosión en nueve puntos de cada viga (Figura 2). Se realizaron probetas cilíndricas de hormigón, para caracterizar sus propiedades mecánicas <sup>(4) (5)</sup>. Luego de 28

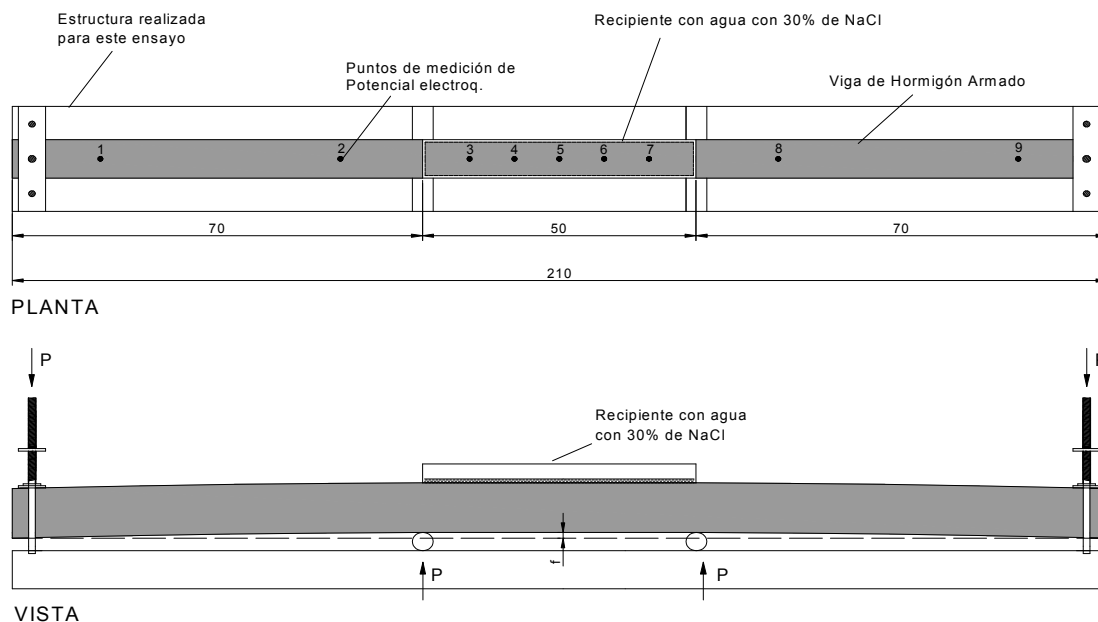
días de curado <sup>(6)</sup> fueron ensayadas, obteniéndose los siguientes resultados: Resistencia Media a Compresión: 47,6 MPa y Resistencia Media a Tracción Indirecta: 5,6 MPa.

En la Tabla 3 se presentan las características geométricas de las vigas, sus armaduras, cargas aplicadas en los extremos de las mismas (Figura 1) y Deflexión Máx. impuesta, medida en el punto medio. La relación recubrimiento/diámetro de la barra fue constante en todas las vigas, igual a 2,5. Se colocaron estribos de 4,2 mm de diámetro cada 10 cm.

**Tabla 3. Características de las vigas ensayadas.**

Viga N°	Altura (cm)	Armadura flexión	Recubrim. (cm)	Carga (N)	Deflexión Máx. (cm)
1	5	2 Ø 8 mm	2	800	$L / 200 = 1,00$
2	7	2 Ø 8 mm	2	1350	$L / 300 = 0,67$
3	8,2	2 Ø 8 mm	2	1710	$L / 400 = 0,50$
4	9,4	2 Ø 8 mm	2	2020	$L / 500 = 0,40$
5	10,4	2 Ø 8 mm	2	2300	$L / 600 = 0,33$

En la Figura 2 se presenta un esquema del ensayo, donde se aprecia que en los 50 cm centrales de las vigas se colocó un recipiente, que contiene agua con un 30 % de NaCl en peso. Esta zona, limitada por las Reacciones de valor P, posee una tensión constante. La zona central humectada simula un sector de una estructura que se encuentra en contacto con agua de mar, no totalmente sumergida, al que el oxígeno tiene acceso, este puede ser el caso de una estructura ubicada en la zona de mareas. Allí, el hormigón se encuentra con un porcentaje de humedad elevado, hay presencia de cloruros, y por los laterales de la zona sumergida ingresa oxígeno, y considerando el estado tensional de las armaduras, se tienen las condiciones necesarias para producir corrosión bajo tensión. En dicha zona central sumergida, se establecieron cinco puntos de medición, mientras que se determinaron otros cuatro fuera de la misma.



**Figura 2. Esquema del ensayo.**

En los Puntos 1 y 9, puede decirse que se produce una corrosión sin tensión, por ser mínimas las tensiones de las armaduras. Cabe acotar que la cara de la viga que se ha

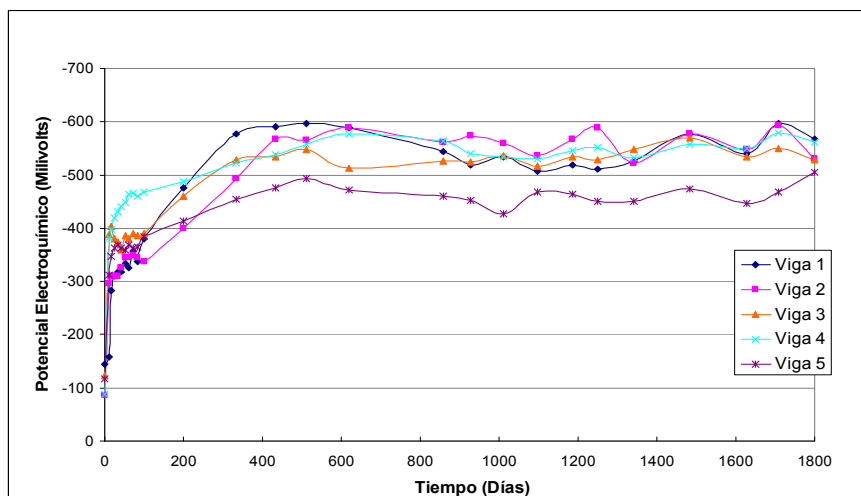
ensayado es la inferior, teniendo en cuenta el sentido de colocación del hormigón dentro del encofrado. Esta cara es la que posee un hormigón con una menor porosidad, producida por una leve segregación de material durante el colado del hormigón, considerándose que este modelo es representativo de la realidad que se está simulando.

En la Figura 3 se presenta una comparación entre los potenciales, calculados como el promedio de los cinco puntos sumergidos. Puede verse que en las Vigas 1 a 4 los potenciales se mantienen en valores similares, que varían entre -500 y -600 mV, mientras que en la Viga 5 (la de menor deflexión), los potenciales no alcanzan a -500 mV, es decir, el proceso es menos activo, debido a que la fisuración del hormigón es más reducida, por la menor deflexión de esta viga. También se aprecia que a los 90 días, todas las vigas superan los -350 mV, valor sobre el cual se puede asegurar que existe un 90 % de probabilidad de tener un proceso de corrosión en las armaduras. <sup>(2)</sup> Esto indica que en estructuras en condiciones ambientales extremas, con fisuración permanente en el hormigón y tensión en las armaduras, se presenta un proceso activo de corrosión a partir de aproximadamente 3 meses, pese a que la calidad del hormigón es buena (aprox. H-40), por ello, se debe tratar de disminuir al máximo las deflexiones permanentes, que generan fisuras, si se pretende prolongar la vida útil de la estructura.

Las fisuras por corrosión aparecieron al cabo de un año, a partir del cual se inició el seguimiento de las mismas y pudo observarse un crecimiento constante de las mismas.

En el último año se notó un deterioro importante del hormigón, en especial en las dos vigas con las mayores deflexiones (L/200 y L/300), observándose el desprendimiento de capas delgadas del hormigón del recubrimiento, en el tercio central de estas vigas. Las vigas sometidas a las mayores deformaciones son las que experimentaron la mayor fisuración.

Cabe acotar que los primeros indicios observables de la corrosión de las armaduras, fueron manchas en la superficie externa del hormigón, luego aparecen fisuras que van evolucionando con el transcurrir del tiempo. No obstante, se observan que en las zonas donde aparecen manchas externas de óxido, normalmente corresponden con los puntos más activos del proceso corrosivo (mayores Potenciales de Corrosión).



**Figura 3. Comparación de los Potenciales Electroquímicos de Corrosión promedio considerando únicamente los puntos sumergidos.**

En función de los datos obtenidos experimentalmente, se puede concluir que:

- Se deben tratar de reducir los desplazamientos (deflexiones) permanentes de los elementos estructurales expuestos a condiciones ambientales severas, debido a que se presentan procesos corrosivos desde pocos meses después de puesta en servicio.
- Todas las vigas parecen estar estabilizadas en sus procesos corrosivos, no obstante la Viga 5 con la deflexión mínima ( $L/600$ ), presenta menor actividad corrosiva que las restantes, con una baja fisuración, por lo tanto, este puede ser un límite aconsejable de deflexiones, para estructuras de hormigón armado en ambiente marino.

#### **4.2. Mediciones de campo**

Se realizaron determinaciones de campo en distintos lugares, tales como puentes, estructuras en ambientes muy húmedos, etc. En este trabajo se comentarán mediciones realizadas en columnas, las cuales muestran la importancia que posee el espesor del recubrimiento de hormigón, en la protección ante la corrosión de las armaduras. Estas columnas están en un ambiente bastante húmedo, aledañas a una torre de enfriamiento, en una de las empresas del Polo Petroquímico de Bahía Blanca.

Como ejemplo, se presenta la situación de una columna donde se observó que en dos de sus caras existían fisuras, algunas de varios milímetros de ancho, debidas a la corrosión de las armaduras. A consecuencia de esta fisuración, en algunas zonas había desprendimiento de los recubrimientos de hormigón. En general, el mayor deterioro se produjo en la cara donde el recubrimiento era el más bajo ( $< 1,5$  cm). Aquí se midieron Potenciales de Corrosión inferiores a  $-300$  mV; mientras que en otra de las caras, donde el recubrimiento era mucho mayor (aprox.  $5,5$  cm) los Potenciales medidos eran del orden de  $-100$  mV (armadura pasivada). En las caras restantes, donde el espesor del recubrimiento es del orden de  $4$  cm, los potenciales fueron, en general, levemente inferiores a  $-200$  mV, lo que indicaría que el proceso corrosivo recién está comenzando.

Con estos ejemplos se aprecia que esta técnica, permite estudiar la actividad de la corrosión de las armaduras, dentro del hormigón, con el fin de predecir posibles intervenciones, para prolongar la vida útil de la estructura.

### **5. Frecuencias Naturales de Vibración**

Los puentes, los edificios de altura, las grandes cubiertas, etc., son estructuras que están sometidas a distintas acciones, caracterizadas por una componente dinámica de carácter aleatorio, como es el tráfico de vehículos o el viento, por ejemplo. Es por ello que el conocimiento del comportamiento dinámico de este tipo de estructuras es importante, en especial cuanto mayor sea su esbeltez o su luz. Esta forma de respuesta dinámica puede obtenerse experimentalmente, mediante la realización de ensayos.

Los daños en una estructura pueden deberse a cargas accidentales, que excedieron a aquellas para las cuales la misma fue diseñada, o simplemente, porque ha superado su Vida Útil y sus propiedades físicas y mecánicas han cambiado, deteriorándose con el tiempo, con el ataque de distintos factores, provenientes del medio ambiente.

El comportamiento mecánico de las estructuras de hormigón, dañadas por corrosión de sus armaduras, difiere del de la estructura intacta. La reducción del diámetro de las barras, la pérdida de adherencia entre el acero y el hormigón, la fragilización de las

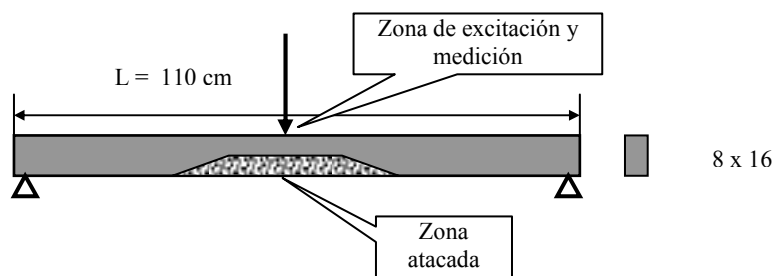


armaduras y la fisuración del hormigón, son los principales daños estructurales originados por corrosión <sup>(7)</sup>. Los óxidos producidos presionan sobre el hormigón que rodea a la barra, quedando éste sometido a tensiones biaxiales, que provocan la fisuración del recubrimiento. La pérdida de sección de las barras y la disminución de la adherencia tienen gran influencia en las barras que trabajan a tracción, mientras que los efectos que produce la fisuración del hormigón, pueden considerarse como pérdida de resistencia en la zona que trabaja a compresión, todo esto origina una disminución del Momento de Inercia efectivo, variando su comportamiento estático y dinámico. Esta variación en el comportamiento dinámico puede ser analizada mediante la identificación del cambio en el valor de las Frecuencias Naturales de la estructura.

### 5.1. Experiencia de Laboratorio

Con el fin de analizar la vinculación existente entre la degradación de vigas, por corrosión de las armaduras, y la variación de las Frecuencias Naturales de Vibración de vigas, se realizaron ensayos (Figura 4), donde se aceleró la corrosión aplicando una corriente externa constante, mediante un galvanostato, conectado a las armaduras, para que se produzca en ellas la reacción anódica. La densidad de corriente empleada fue  $i_{corr} = 100 \mu A/cm^2$ , con el objeto de obtener, en un período de unos 100 días, una penetración media de al menos 0,3mm. La zona afectada por la corrosión (zona anódica) fue definida por los contraelectrodos, (malla de acero inoxidable) colocados en la parte superior de la viga, cubriendo los 50 cm centrales. El contacto de estos contraelectrodos con el hormigón, se efectuó con una esponja humectada con solución de NaCl (3 gr./litro de solución).

La evolución de las fisuras se determinó visualmente, cada 15 días, estableciéndose el inicio de las mismas. Su crecimiento se midió con una escala graduada (precisión: 0,05 mm), y su evolución se registró en gráficos <sup>(8)</sup>. Para determinar la primera Frecuencia Natural (Frecuencia Fundamental) en las vigas, se utilizó el método de excitación forzada. La viga fue sometida a una fuerza de amplitud constante y solamente se hizo variar la frecuencia de excitación <sup>(9)</sup>.



**Figura 4. Esquema del ensayo.**

Para llevar a cabo esta excitación forzada, se empleó un equipo que estaba compuesto por un martillo de impacto Kistler, mientras que la medición de la respuesta dinámica se realizó con un acelerómetro SKF modelo CMSS732 y un analizador espectral CSI 1900.

### 5.2. Resultados Experimentales Obtenidos

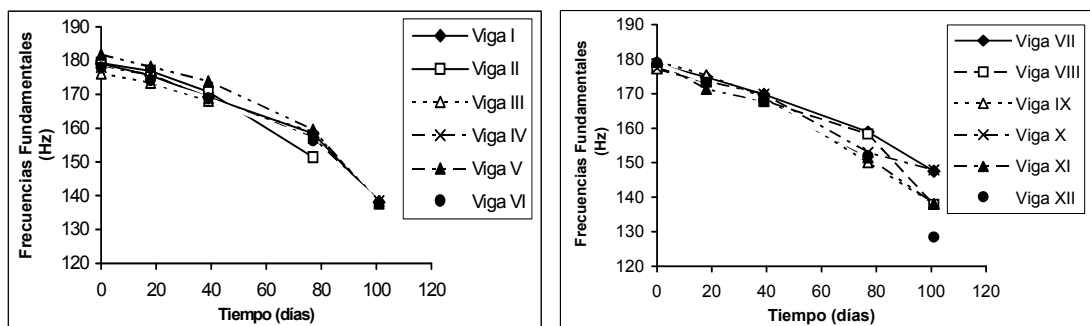
En Tabla 4 y Figura 5 se muestran los resultados obtenidos experimentalmente <sup>(8)</sup> <sup>(9)</sup>, en las 12 vigas analizadas. Se debe recordar que, las Frecuencias Naturales son proporcionales a la raíz cuadrada del producto del Módulo de Elasticidad y la inercia,

dividido la masa, por lo tanto las variaciones de la resistencia del hormigón, no se manifiestan significativamente en la Frecuencia Fundamental, debido a que, en cada viga varía simultáneamente el Módulo de Elasticidad y su masa. No obstante, se observa una tendencia al aumento de la Frecuencia Fundamental, con el incremento de la resistencia. La Frecuencia Fundamental desciende entre un 9 y 17 %, según las características del hormigón de cada viga; Este descenso posee una relación directa con el Área de Fisuración del recubrimiento de hormigón y con la penetración del ataque a las barras <sup>(9)</sup>. En vigas de puentes de hormigón armado <sup>(10)</sup>, cuya tipología es simplemente apoyadas, se registraron, experimentalmente, descensos de la Frecuencia Fundamental entre un 20 y 27 %, en función de la magnitud del daño (aparición de fisuras debidas a flexión originadas por cargas mayores a las de servicio).

**Tabla 4. Características, Frecuencias Fundamentales y Áreas Fisuración de vigas.**

Viga Nº	Mezcla Curado	Compresión (MPa)	Tracción Indirec. (MPa)	Frecuencia Fundamental		Área Fisuración Final * (mm <sup>2</sup> )
				Inicial (Hz)	Variación %	
I	2-A	23,8	2,7	179,1	13	78,7
II	4-A	26,3	4,0	179,3	9	81,7
III	1-B	17,3	2,2	176,2	12	43,6
IV	2-B	19,0	2,1	178,1	12	32,9
V	4-B	22,8	3,7	181,8	13	40,6
VI	1-C	16,5	2,2	177,9	13	196,4
VII	2-C	19,0	2,4	178,5	10	138,5
VIII	4-C	22,8	2,0	177,1	12	72,2
IX	1-D	32,8	4,0	179,3	13	245,3
X	2-D	31,6	4,0	177,4	10	195,0
XI	3-D	29,7	3,3	179,2	13	149,5
XII	4-D	28,7	3,3	178,9	17	178,7

\*El Área de Fisuración se obtiene como la sumatoria de los productos de los anchos, por la longitud de las fisuras.



**Figura 5. Frecuencias Naturales en las vigas, en función del tiempo de ensayo.**

Estos datos son de interés debido a que se puede hacer una predicción de la Vida Residual de la estructura afectada. <sup>(11)</sup>

Con el fin de disminuir el cuadro de fisuración del hormigón, y darle mayor impermeabilidad, se suelen introducir fibras plásticas o de acero, que distribuyen la fisuración producida, por ejemplo, por las retracciones plásticas del hormigón. Por este motivo se realizaron ensayos en las mismas condiciones que las anteriormente descritas, con vigas con las mismas armaduras y distintos tipos de hormigones, que poseían diferentes valores de resistencia mecánica y contenidos de fibras plásticas.

Se determinó que el comportamiento de la Frecuencia Fundamental fue errático, mientras se incrementaba el proceso de degradación, al no presentar un descenso constante (como se ve en la Figura 5), pese a que la fisuración del hormigón crecía. Esto puede deberse a que, cuando el recubrimiento de hormigón se va desprendiendo del resto de la sección, porque se superó la resistencia a tracción del material, las fibras impiden el desprendimiento total. Cuando se excita dinámicamente, estos trozos de material vibran con frecuencias distintas que el resto de la viga, introduciendo alteraciones en las mediciones y variaciones anormales en la Frecuencia Fundamental, pese a que realmente esta frecuencia está descendiendo.

### **5.3. Mediciones de campo**

Se realizó el análisis del comportamiento dinámico de un entrepiso sobre el que funciona un local bailable, en la ciudad de Bahía Blanca. Este entrepiso está compuesto por 8 losas armadas en una dirección, cuyas luces varían entre 5 y 5,50 m, soportadas sobre 7 vigas simplemente apoyadas, cuyas luces son del orden de los 18 m, existiendo muros debajo de 3 de ellas. Dos de estas vigas presentaban deformaciones muy importantes, ante las acciones dinámicas, que se generan habitualmente durante el funcionamiento del local bailable, dichas acciones eran percibidas por los concurrentes a este lugar. La falta de rigidez de estas vigas podía conducir a una falla, por fatiga del material y por ende al colapso estructural de un sector del entrepiso. A consecuencia de esta situación, la Municipalidad de Bahía Blanca toma intervención, y solicita a la Universidad Nacional del Sur la realización de un estudio, que fue realizado por el Ing. J. Pombo y el Dr. C. Filipich. Este estudio arroja como resultado que las dos vigas anteriores poseían una Frecuencia Fundamental de 7,5 y 7 Hz, mientras que las restantes que se encontraban en similares condiciones de apoyo tenían 8,5 Hz. Esta situación indicaba la existencia de una menor rigidez en esas dos vigas. Esto podría haberse originado en la construcción del entrepiso o por la fatiga producida en el material, por las importantes deflexiones. A pedido del propietario del local, surge un informe de un Estudio de Ingeniería Estructural de la ciudad, recomendando que se desafecte esta zona como bailable, convirtiéndose en un lugar de estar, debido a que la sobrecarga estática era admisible. Uno de los autores de este trabajo, en ese momento era funcionario municipal, toma contacto con el expediente, solicita la clausura del lugar y la inmediata reparación de la estructura afectada, en virtud de los peligros que entrañaba esta situación. Se procede a colocar una columna metálica en la zona media de la luz de cada una de las dos vigas afectadas, con lo que el esquema estructural cambia y las Frecuencias Fundamentales aumentan a 9,3 y 9 Hz.

## **6. Conclusiones**

Como se puede observar en este trabajo, donde se recopilan experiencias de campo y de laboratorio, vinculadas con el diagnóstico de estructuras de hormigón, las técnicas aquí presentadas son importantes herramientas en los trabajos de auscultación, sin generar afectaciones importantes al funcionamiento de la estructura afectada, ni a su integridad estructural, permitiendo realizar estimaciones de su vida residual.

### **Agradecimientos**

Los autores desean expresar su agradecimiento al Departamento de Ingeniería y a la

Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur, por el apoyo brindado para el desarrollo de estas investigaciones.

## Referencias

1. Ercolani N. L.; Peralta M. H.; Ortega N. F.; La Malfa S.; Moretti F. M.; “Técnicas Dinámicas para Ensayos no Destructivos Utilizadas para la Detección de Daño en Estructuras de Hormigón”; 16° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Mendoza, noviembre 2006, 323-331.
2. ASTM C 876-80. Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete, American National Standard.
3. Instituto Argentino de Racionalización de los Materiales, Normalización y Certificación, IRAM 738, “Corrosión electroquímica de metales. Estructuras de hormigón armado y pretensado. Método de medición de potenciales espontáneos de armaduras de acero”, (1999).
4. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. “Norma 1546. Hormigón de Cemento Portland. Método de ensayo de compresión”, (1992).
5. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. “Norma 1658. Hormigón. Método de ensayo de tracción simple por compresión diametral”, (1995).
6. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. “Norma 1534. Hormigón de Cemento Portland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio”, (1985).
7. Capozucca R., “Damage to reinforced concrete due to reinforcement corrosion”, *Construction and Building Materials*, 9 (5), (1995), 295–303.
8. Schierloh M.I., Ortega N.F., Señas L., “Relación entre algunas propiedades del hormigón del recubrimiento y su degradación, producida por los productos de corrosión de las armaduras”; 14° Reunión de Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Olavarría, Tomo II,(2001),125-132.
9. Ortega N.F., Cortinez V.H., La Malfa S., Schierloh M.I., “Análisis dinámico de vigas de hormigón armado afectado por la corrosión de sus armaduras”, XVII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Rosario, (2002), 14 pp. CDRom.
10. Capozucca R., Cerri M., “Influence of reinforcement corrosion in the compressive zone, on the behaviour of RC beams”; *Engineering Structures*, 25, (2003), 1575–1583.
11. Ortega N.F., Robles S.I.; “Modelo Numérico para Predecir la Vida Residual de Vigas de Hormigón, con sus Armaduras Afectadas por la Corrosión”; 16° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Mendoza, noviembre 2006, 291-298.