

RADI REVISTA ARGENTINA DE INGENIERÍA

Publicación del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería • República Argentina • Año 6 • Volumen 12 • Noviembre de 2018





**UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA NACIONAL**
FACULTAD REGIONAL
RESISTENCIA



FACULTAD DE
CIENCIAS EXACTAS,
INGENIERIA Y AGRIMENSURA



FACULTAD REGIONAL
GENERAL PACHECO



Instituto de Desarrollo
Económico e Innovación



Universidad Nacional de Tierra del Fuego,
Antártida e Islas del Atlántico Sur



FACULTAD DE INGENIERÍA
Universidad Nacional de La Pampa



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE
CIENCIAS APLICADAS
A LA INDUSTRIA



FACULTAD
DE INGENIERÍA



INGENIERÍA



EST
Desde 1936



Facultad de
Ingeniería
Universidad Nacional de Mar del Plata



UNIVERSIDAD
FASTA FACULTAD DE
INGENIERÍA



Universidad Nacional
de General Sarmiento



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA



UNIVERSIDAD NACIONAL
DEL COMAHUE
FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE TRES DE FEBRERO



Universidad Abierta Interamericana
El futuro sos vos



UdeMM
Universidad Privada

ISSN 2314-0925

Revista Argentina de Ingeniería

Publicación del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina
Año 6 - Volumen 12 - Noviembre de 2018





COMITÉ EJECUTIVO 2017-2018

GIORDANO LERENA, Roberto

Presidente
Decano UFASTA – FI
presidente@confedi.org.ar

GARIBAY, María Teresa

Vicepresidente
Decana UNR – FCEyN
vicepresidente@confedi.org.ar

RECABARREN, Pablo

Secretario General
Decano UNC – FCFN
secretariogeneral@confedi.org.ar

DEL GENER, Jorge Omar

Secretario Permanente
Decano UTN -FRA
secretariopermanente@confedi.org.ar

CUENCA PLETSCH, Liliana R

Presidente Saliente
presidentosaliente@confedi.org.ar

LOMBERA, Guillermo

Presidente Comisión de Ciencia, Tecnología
y Extensión.
Decano UNMdP – FI
cienciaytecnologia@confedi.org.ar

LORES, Gustavo Alberto

Presidente Comisión de Enseñanza
Decano UNJU – FI
ensenanza@confedi.org.ar

KALOCAI, Guillermo

Presidente Comisión de Interpretación y
Reglamento
Decano UNS – DIEyC
reglamento@confedi.org.ar

GARCÍA, José Luis

Presidente Comisión de
Presupuesto e Infraestructura
Decano UTN-FRGP
presupuesto@confedi.org.ar

PASCAL, Oscar

Presidente Comisión de Posgrado
Decano UNLZ – FI
postgrado@confedi.org.ar

SOSA, Miguel Ángel

Presidente Comisión ad-hoc de Relaciones
Interinstitucionales e Internacionales
Decano UTN – FRD
internacionales@confedi.org.ar

MORAN, Daniel

Presidente Comisión ad-hoc de Nuevos
Alcances de Carreras de Ingeniería
Decano UNSL – FICA
nuevosalcances@confedi.org.ar

DE VINCENZI, Marcelo

Miembro Titular Órgano de Fiscalización
Decano UAI – FI
fiscalizacion@confedi.org.ar

OLIVETO, Guillermo

Secretario de Comunicaciones
Decano UTN – FRBA
comunicacion@confedi.org.ar

AUTORIDADES RADI 2018

Director

Néstor Ortega
(Ex Decano UNS
Miembro adherente CONFEDI)

Secretaría Ejecutiva
Mercedes Montes de Oca

Editor

Alfredo Pintos
Paraná. Entre Ríos

CONSEJO EDITORIAL

María Teresa Garibay
Decana Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Rosario

Liliana Cuenca Pletsch
Ex Decana UTN FRRe
Miembro adherente CONFEDI

Gabriel Gentiletti
Ex Decano UNER
Miembro adherente CONFEDI

Néstor Ortega
Ex Decano UNS
Miembro adherente CONFEDI

Jorge Pilar
Ex Decano UNNE
Miembro adherente CONFEDI

Roberto Giordano Lerena
Decano Facultad de Ingeniería, UFASTA

Guillermo Lombera
Decano Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Mar del Plata

EDITORES ASOCIADOS

Ariel A. Braidot (UNER)
Eduardo A. Romero (UTN - FRVM)
José A. Cano (UNR - FCEIA)
Marcelo J. Karanik (UTN - FRR)
Marcelo T. Piovan (UTN - FRBB)
Roberto E. Cáceres (UNSJ - FI)
Elena B. Durán (UCSE - FMA)
Liz G. Nallim (UNSa - FI)
Rosanna Costaguta (UNSE - FCEyT)
Susana L. Vidales (UNL - DT)
Fernando O. Martínez (UNR - FCEIA)
Gloria E. Alzugaray (UTN - FRSF)
Silvia del Carmen Rodrigues (UNSE - FCAyA)

RADI - Revista Argentina de Ingeniería

Publicación del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina - ISSN 2314-0925

Año 6 - Volumen 12 - Noviembre de 2018

COMITÉ DE EVALUADORES

Acevedo, Rubén C. - UNER - FI
Aguirre, Roberto J. - UNLu-DT
Albanesi, Eduardo A. - UNER - FI
Aldalur, Beatriz - UNSur - DI
Alzugaray, Gloria E. - UTN - FRSF
Ardissone, Daniel E. - UNSL - FI
Braidot, Ariel A.A. - UNER - FI
Cáceres, Roberto E. - UNSJ - FI
Cano, José A. - UNR-FCEIA
Cayssials, Ricardo L. - UTN-FRBB
Chamorro, Ester R. - UTN-FRRe
Costaguta, Rosanna N. - UCSE - FMA
Depettris, Carlos A. - UNNE - FI
Di Paolo, José - UNER - FI y UTN - FRSF
Durán, Elena B. - UCSE - FMA
Elaskar, Sergio - UNC - FCFyN
Escalante, Mario R. - UTN - FRCU
Faggi, Ana - UFlo - FI
Fernández, Sandra - UNS - DI
Francisca, Franco M. - UNC - FCFyN
Godoy, Luis A. - UNC - FCFyN
Guarnieri, Fabio A. - UNER - FI
Hueda, Mario R. - UNC - FCFyN
Karanik, Marcelo J. - UTN - FRRe
La Red Martínez, David L. - UNNE - UTN FRRe
López Sardi, Estela M. - UP - FI
Lorefice, Ricardo H. - UNSE FCEyT
Machado, Sebastián P. - UTN - FRBB
Marchisio, Susana T. - UNR - FCEIA
Martínez, Fernando O. - UNR - FCEIA
Medina, Mabel A. - UNR - FCEIA
Möller, Oscar - UNR - FCEIA
Nallim, Liz Graciela - UNSA - FI
Nicola Siri, Leonardo C. - UNER - FI
Pérez, Carlos A. - UTN - FRRe
Pérez, Raúl César - UTN - FRM
Pilar, Claudia A. - UNNE - FI
Piovan, Marcelo Tulio - UTN - FRBB
Preidikman, Sergio - UNC - FCFyN
Puliafito, Salvador E. - UTN - FRM
Ratazzi, Alejandro - UNS - DI
Redolfi, Emilio R. - UNC - FCFyN
Robles, Sandra I. - UNSur - DI
Rodríguez, Silvia del Carmen - UNSE - FAyA
Romero, Eduardo A. - UTN - FRVMA
Rufiner Di Persia, Hugo L. - UNER - FI
Sampallo, Guillermo M. - UTN - FRR
Sánchez, Diana - DIEC - UNS
Sapag, Luis - UTN - FRN
Sauchelli, Victor H. - UNC - FCFyN
Schiavon, María I. - UNR - FCEIA
Sobrero, María T. - UNSE - FA y A
Todorovich, Elías - FASTA
Toncovich, Adrian - UNSur - DI
Torres, María E. - UNER - FI
Tymoschuk, Ana R. - UTN - FRSF
Vera, Luis - UNNE - FACENA
Vidales, Susana L. - UNLu - DT
Zavala, Gustavo R. - UNNE - FI
Zemba, Guillermo R. - UCA - BA
Garassino, Sergio - UNaM - FI
Ortega, Néstor F. - UNS - DI
Cuenca Pletsch, Liliana R. - UTN - FRRe
Gramajo, Sergio - UTN - FRRe
Pilar, Sonia A. - UNNE - FI
Roibón, María J. - UNNE - FI
Cirera, Eduardo - UNNE - FI
Ruberto, Alejandro R. - UNNE - FI
Kowalski, Víctor - UNaM - FI

CONFEDI

Ayacucho 132, 1ª (C1025AAD) CABA - Tel: 54 11 4952 4466

www.confedi.org.ar - radi@confedi.org.ar - Twitter: @confediok - FaceBook: confedi

Índice de Contenidos

Secciones Permanentes

9	EDITORIAL Comenzando a caminar la cuarta década del CONFEDI Néstor F. Ortega. Roberto Giordano Lerma.
12	OPINIÓN A 100 años de la Reforma Universitaria Guillermo Olivetto
15	PROYECTOS La importancia de la transferencia del conocimiento de los doctorados en ingeniería a los procesos productivos Marcelo De Vincenzi. Oscar Pascal. Carlos Neil. Diego Serra.
17	TEMAS DE INGENIERÍA Sensores inteligentes: características, evolución e impacto en la sociedad Gustavo Monte
19	DESARROLLO TECNOLÓGICO Y TRANSFERENCIA La investigación científica y tecnológica y la innovación como motor del desarrollo humano, social y económico para América Latina y el Caribe Roberto Giordano Lerena
22	INGENIERÍA EN ARGENTINA. El Libro Rojo: los desafíos que nos impone Sergio Pagani. Daniel Morano.
28	INGENIERÍA IBEROAMERICANA Fortaleciendo vínculos con la región Miguel Ángel Sosa. Roberto Giordano Lerena.
34	AGENDA DE INGENIERÍA AGENDA 2018 Mercedes Montes de Oca
37	HISTORIAS Y ANÉCDOTAS DEL CONFEDI. La secretaría Mercedes Montes de Oca
38	Creadores de vocaciones ¡gracias! Roberto Giordano Lerena

Proyectos de Desarrollo Tecnológico y Social (PDTS)

41	Economía en calles sin pavimentar de suelo-cemento por uso de agente estabilizante Julián Rivera. Anael Porro. Andrés Poletti. Oscar Hansen.
47	Eliminación de arsénico en agua por medio de resinas modificadas con hierro Claudia A. Neyertz. Melani A. Lucca. Bárbara S. Sanchez. Gustavo Mendow.

53	Desarrollo de una planta piloto de materiales magnéticos M.R Pagnola; H.M. Sirkin.
58	Desarrollo de un sistema inalámbrico para adquisición de señales EEG Gabriel E. Cañadas Fragapane. Carlos R. Dell'Aquila. Eric Laciari Leber.
Artículos presentados a la RADI	
68	Experiencia de integración vertical de conocimientos entre asignaturas de ingeniería química M.C. Gely. A. Pagano.
73	Mejoras en el uso racional y eficiente de la energía en las universidades Gustavo E. Kazlauskas. Carlos J. Verucchi. Fermín Acuña.
81	Efectos dinámicos de la corrosión de armaduras en vigas de hormigón reciclado Juan M. Moro. Romina Menese. Néstor F. Ortega.
90	Estudio de la lentificación en estudiantes de ingeniería. Comparativo entre la UNMDP y la UFASTA. María Velia S. Artigas. Adolfo Onaine. Luciana Santille. Bárbara Corleto.
100	Gestión ágil del conocimiento en un entorno de aprendizaje colaborativo Silvia Lanza Castelli. Valeria Ortiz Quiroz. Fernanda Rodríguez Aleua.
110	Mecanismos de promoción y participación de las mujeres en la Ingeniería Marta Panaia
119	Ciclones de alta eficiencia optimizados por geometría y condiciones de operación Leonel O. Pico
129	Estudio de casos en familias del NEA: consumo familiar de agua virtual Alejandro Ruberto. Marcelo Gómez. Katherina Dzysiuk
138	Sustentabilidad edilicia. Comparación de métodos de evaluación y su aplicabilidad en Argentina Lucia Rumi. María C. Montero. Néstor F. Ortega.
146	PAUTAS PARA LA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS.

Efectos dinámicos de la corrosión de armaduras en vigas de hormigón reciclado

Juan M. Moro¹⁻²

Romina Menese¹⁻²

Néstor F. Ortega¹⁻³

¹ Instituto de Ingeniería, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur-CIC.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

³ Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
E-mail: nfortega@criba.edu.ar

RESUMEN

La utilización de hormigones reciclados es una opción sustentable en la construcción. Sin embargo, este tipo de hormigones, presentan diferente comportamiento durable y mecánico que los elaborados en forma tradicional. En este trabajo se presenta un análisis dinámico de vigas de hormigón armado, expuestas a un proceso de corrosión acelerada de sus armaduras. Se efectuó la medición de las frecuencias naturales de vibración de las vigas, a medida que la corrosión avanzaba. Paralelamente, se efectuó un seguimiento del proceso de fisuración del recubrimiento. Se emplearon distintos tipos de hormigones, reemplazando el 50 % del agregado natural, por agregado reciclado con y sin tratamientos previos. Además, se varió la relación recubrimiento de hormigón/diámetro de las barras con el objeto de estudiar la influencia de distintos recubrimientos de las armaduras. Se observó un descenso en las frecuencias naturales en las vigas afectadas, apreciándose diferencias en la mayoría de los casos estudiados.

ABSTRACT

The use of recycled concrete is a sustainable option in construction. However, this type of concrete present different durable and mechanical behavior than conventional concrete. In this paper, was present a dynamic analysis of reinforced concrete beams exposed to an accelerated corrosion process of their reinforcements. The dynamic study consisted in measuring of natural frequencies vibration of the beams, as corrosion progressed. At the same time, were monitored the cracking process of the cover. Were used different types of concrete, replacing 50% of the natural coarse aggregate with previously treated and untreated recycled aggregate. Besides was varied the relationship of concrete cover / bar diameter in order to study the influence of different covers. Were found a decrease in natural frequencies of the affected beams, obtaining differences between most of the studied cases.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reciclado, durabilidad, corrosión, análisis dinámico

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre la utilización del hormigón reciclado, ya sea como agregado fino o grueso, para la elaboración de un nuevo hormigón [1-3], con el fin de ser utilizado en estructuras resistentes.

Sin embargo, los hormigones elaborados utilizando agregados reciclados, presentan mayor porosidad y una interface más débil entre agregado y pasta de cemento, que los hormigones elaborados en forma tradicional. Estos aspectos hacen que este tipo de hormigones, presenten algunos inconvenientes en lo que respecta a su durabilidad, pues lo hacen más susceptible al ataque de agentes externos. Por este motivo, algunas investigaciones están destinadas al mejoramiento de esos puntos débiles del material [3-4].

La durabilidad de las estructuras de hormigón armado, muchas veces es afectada por procesos de corrosión sobre sus armaduras, produciendo fisuras en el recubrimiento como consecuencia de la acción expansiva de los productos de corrosión, esto reduce la sección útil del hormigón [5-6], y de la sección transversal de las armaduras, disminuyendo así, el momento resistente del elemento estructural. Además genera la pérdida de adherencia entre el hormigón y el acero y la fragilización de este último [6-8], teniendo consecuencias negativas en la capacidad portante de la estructura afectada [9-10].

Las estructuras sometidas a procesos de corrosión, sufren daños que afectan fundamentalmente, a la rigidez de las mismas. Esto se puede observar en el comportamiento dinámico de la estructura, produciéndose una disminución de sus Frecuencias Naturales de Vibración. Por lo tanto, la medición de las mismas sería representativa del grado de daño que posee la estructura. La ventaja de este tipo de análisis experimental, es que se trata de ensayos no destructivos, que pueden ser realizados en la estructura en servicio [11-12].

Investigaciones realizadas sobre este tema [13], muestran la variación de las Frecuencias Naturales de vigas de hormigón armado

elaboradas con la variación de algunos parámetros relacionado con las características del hormigón, como lo son: el tipo de curado y el origen y la forma de los agregados. Se demostró que en todos los casos, la disminución de la rigidez de las vigas, provocada por el proceso de corrosión, ocasionó el descenso de sus Frecuencias Naturales.

En este trabajo se presentan resultados, que tienen como objetivo evaluar la variación de las Frecuencias Naturales de Vibración de vigas atacadas por corrosión de sus armaduras, elaboradas con diferentes tipos de hormigones, ya sea sin reemplazo de agregados naturales por agregados reciclados o con ellos, y estos últimos, sometidos o no a tratamientos previos a su utilización. También se analizó dicho fenómeno para vigas elaboradas con diferentes relaciones recubrimiento/diámetro de las armaduras. Estos ensayos no destructivos, permiten evaluar la magnitud del daño de elementos afectados, pudiendo ser un elemento estructural en uso, por ejemplo, un puente.

TRABAJO EXPERIMENTAL

Se fabricaron vigas de hormigón armado, y se moldearon probetas cilíndricas, con el objeto de caracterizar su comportamiento mecánico (compresión y tracción indirecta) y determinar su porosidad (ensayo de absorción capilar).

Se emplearon distintos tipos de hormigones, reemplazando el 50 % del agregado natural, por agregado reciclado sin tratamiento previo, o sometido a diferentes tratamientos previos a su utilización, con el fin de disminuir su porosidad. Además se elaboró una viga con un hormigón patrón, sin el uso de agregados reciclados. En el caso del hormigón realizado con agregados reciclados sin tratamiento previo, se varió la relación recubrimiento de hormigón/diámetro de las barras (r/ϕ) entre 2,40 y 6,00 con el objeto de estudiar la influencia del espesor del recubrimientos de las armaduras.

El hormigón fue elaborado manteniendo constante la relación agua/cemento (a/c) en

0,50, valor adoptado por la normativa argentina [14], para estructuras resistentes que se encuentren a más de 1 Km de la costa, en zona influenciada por vientos con sales marinas.

Materiales y mezclas

Los materiales utilizados en las mezclas fueron los siguientes:

Agua: se empleó agua corriente de red.

Cemento: Se empleó Cemento Portland Normal proveniente de una fábrica ubicada en la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Agregado Fino: constituido por arena natural silíceo, procedente de un yacimiento ubicado al sur de la Provincia de Buenos Aires, que cumple con las especificaciones de calidad dadas por la norma IRAM 1627 [15].

Agregados gruesos, se emplearon tres tipos:

a) Agregado Natural: constituido por canto rodado, cuyo Tamaño Máximo Nominal era 25 mm. Este agregado cumple con los límites granulométricos indicados en la Norma IRAM 1627 [15].

b) Agregado Reciclado: se obtuvo de la rotura de probetas de hormigón elaborado con canto rodado proveniente de obras realizadas en la zona. Se molió el material a reciclar con el empleo de una trituradora de mandíbulas.

c) Agregado Reciclado con Tratamiento Previo: parte del material reciclado, como indica el inciso b), que fue sometido a tres tratamientos diferentes: una lechada de cemento y dos soluciones con la incorporación de aditivos químicos, de marcas reconocidas en el mercado de la construcción.

Muestras

Se fabricaron 8 vigas de hormigón armado, las cuales se detallan a continuación, de acuerdo al hormigón y características con las que fueron elaboradas:

1 - Patrón (P): en su elaboración no hubo reemplazo del agregado natural, por agregado reciclado.

2 - Reciclado sin tratamiento previo (R): en su elaboración se reemplazó un 50 % del agregado grueso natural por agregado reciclado,

proveniente de la trituración de hormigones. De esta forma, se fabricaron 4 vigas con un recubrimiento de 10 mm, 15 mm, 20 mm y 25 mm, respectivamente.

3 - Reciclado con Tratamiento Previo: en su elaboración se reemplazó un 50% del agregado grueso natural por agregado reciclado, sometido a distintos tratamientos:

a - Lechada de Cemento (L);

b - Solución con Aditivo A (impermeabilizante por cristalización); y

c - Solución con Aditivo B (mortero cementíceo modificado con polímeros).

Características de las muestras

Las vigas de hormigón, tenían unas dimensiones de: 8 x 16 x 110 cm, armadas con barras de acero de dureza natural ADN 420 [16], de diámetro nominal 4,2 mm y estribos de acero liso, de diámetro 2,1 mm, con un recubrimiento de 20 mm (excepto en las vigas de hormigón reciclado sin tratamientos previos, donde el mismo varió entre 10 y 25 mm).

El llenado de los moldes se hizo en dos capas, compactándose mediante el uso de un vibrador y el curado se realizó en ambiente húmedo, durante 28 días en laboratorio, con las siguientes condiciones ambientales: 20 ± 2 °C y HR \approx 50%.

Las probetas cilíndricas de hormigón (15 x 30 cm), fueron empleadas en los ensayos de capacidad y velocidad de succión capilar [17] y mecánicos: resistencia a compresión [17] y a tracción indirecta [19]. Se moldearon y curaron de acuerdo con la normativa vigente en nuestro país [20].

Con el objetivo de comparar el comportamiento de las vigas, de acuerdo al tipo de hormigón y recubrimiento con el que fueron elaboradas, se empleó la nomenclatura que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de las vigas.

Elem.	Denom.	Características
Viga 1	R10	50% agregado grueso reciclado sin tratamiento previo. Recubrimiento = 10 cm
Viga 2	R15	50% agregado grueso reciclado sin tratamiento previo. Recubrimiento = 15 cm
Viga 3	R20	50% agregado grueso reciclado sin tratamiento previo. Recubrimiento = 20cm
Viga 4	R25	50% agregado grueso reciclado sin tratamiento previo. Recubrimiento = 25 cm
Viga 5	P	100% agregado grueso natural
Viga 6	L	50% agregado grueso reciclado con tratamiento previo: lechada de cemento
Viga 7	A	50% agregado grueso reciclado con tratamiento previo: Aditivo A
Viga 8	B	50% agregado grueso reciclado con tratamiento previo: Aditivo B

0,032: factor de conversión de unidades;

i_{corr} : valor medio de la densidad de corriente ($\mu A/cm^2$);

t : tiempo del ensayo (días).

La zona afectada por la corrosión fue definida por un contraelectrodo, realizado con una malla de acero inoxidable y colocado en la parte superior de la viga, cubriendo los 50 cm centrales. El contacto de estos contraelectrodos con el hormigón, se efectuó mediante una esponja mojada con una solución con cloruro de sodio (3 gr/litro de solución). El objeto de emplear esta solución fue aumentar la conductividad del medio. No se usó una concentración mayor, a los efectos de reducir el ataque localizado de los cloruros, sobre las barras.

Es conocido que los óxidos poseen un volumen mayor que el acero original, difundiendo dentro del hormigón, por su estructura de poros, hasta que los llenan, originando presiones internas, que terminan por fisurar al recubrimiento de hormigón.

Método acelerado de corrosión

Con el fin de acelerar el proceso de corrosión de las armaduras de las vigas, se aplicó externamente una corriente constante a través de las mismas, para hacerlas actuar como ánodo, mediante un galvanostato. La densidad de corriente empleada fue $i_{corr} = 100 \mu A/cm^2$, valor correspondiente a unas diez veces el valor máximo de la densidad de corrosión, medido en estructuras de hormigón altamente corroídas y contaminadas con cloruros [21]. Se empleó esta corriente con el objeto de obtener, en un período de aproximadamente 90 días, con una penetración media teórica de la corrosión en las armaduras, del orden de 0,30 mm.

La profundidad del ataque sobre las barras metálicas se determinó, en forma aproximada, a partir de la Ley de Faraday [21]:

$$P = 0,032.i_{corr}.t \quad (1)$$

donde:

P : pérdida de radio o profundidad del ataque (mm);

Medición de Fisuración

La evolución de las fisuras se efectuó mediante inspecciones visuales, realizadas diariamente en la primera etapa, determinándose el inicio de la fisuración. Luego, cada 7 días aproximadamente, se midió su crecimiento con escalas graduadas (en el largo, con precisión de 1mm y en el ancho, con precisión de 0,05 mm). Posteriormente, se registró gráficamente la evolución de las Áreas de Fisuración, obtenidas como el producto del largo por ancho de las fisuras.

Medición de Fisuración

A los efectos de poder determinar las Frecuencias Naturales de Vibración en las distintas vigas, se procedió a utilizar el método de excitación forzada. Para ello, fue necesario someter a las vigas estudiadas en este trabajo, a un impulso de corta duración de magnitud (F_0), el cual fue aplicado en este caso en el centro de la viga según muestra la Figura 1.

Para analizar el comportamiento dinámico

de las vigas, en los momentos de aplicación de la excitación externa, fue utilizado como elemento transductor de vibraciones, un acelerómetro piezoeléctrico marca Vernier, modelo LGA-BTA. Es de destacar que el mismo es del orden de los 45 gramos de peso, de tal manera que su influencia sobre las Frecuencias Naturales de la viga es despreciable, se colocó en la zona central de la viga.

La señal obtenida del acelerómetro fue enviada a un analizador espectral (FFT) Lab-Quest, donde se obtuvieron las distintas frecuencias y amplitudes de los modos de excitación de las vigas. El ensayo consistió en hallar las frecuencias naturales de primer modo flexional normal de vibración de las vigas, mediante el método de excitación forzada, procediéndose tal como se indica ante

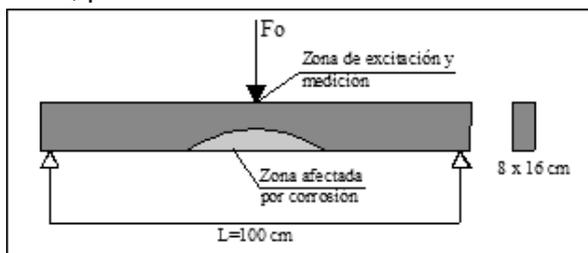


Figura 1: Detalle de la viga y ubicación de la zona afectada por la corrosión.

RESULTADOS

Caracterización del Hormigón

En la Tabla 2 se puede apreciar un detalle de los resultados obtenidos en los ensayos sobre la caracterización de las propiedades mecánicas de todos los hormigones elaborados y se muestra una comparación porcentual de los valores que se desprenden del ensayo de absorción capilar tomando como referencia, los valores obtenidos para el hormigón reciclado sin tratamiento previo.

Proceso de Corrosión

En la Figura 2 se muestra una vista general de dos de las vigas ensayadas, donde se pueden observar las fisuras generadas en el recubrimiento de hormigón, como consecuencia del proceso de corrosión al que estaban sometidas las armaduras.

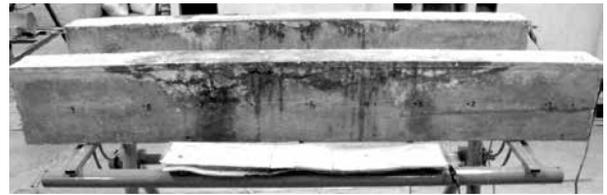


Figura 2: Vigas al final del ensayo.

Por su parte, en la Figura 3 se aprecia el avance del Área de Fisuración de las vigas elaboradas con hormigón reciclado sin tratamiento previo, con diferentes espesores de recubrimiento de sus armaduras, en función de la Profundidad Media del Ataque de las Armaduras. Se observa que el Área de Fisuración es menor en aquellas vigas que poseen una relación r/ϕ superior, hasta llegar a una profundidad media de ataque de 0,4 mm aproximadamente, donde la diferencia entre el Área de Fisuración de todas las vigas comienza a ser muy reducida.

Además, como era previsible, el inicio de la fisuración se manifestó más tarde en las vigas con mayor recubrimiento.

En la Figura 4 se muestra la evolución del Área de Fisuración de las vigas, elaboradas con diferentes hormigones y con un espesor de recubrimiento de las armaduras de 20 mm, en función de la Profundidad Media del Ataque de las Armaduras.

En esta serie de vigas ensayadas no se aprecian grandes diferencias en el momento de la aparición de las primeras fisuras visibles, que en general ocurre entre los 10 y 15 días, sin embargo se produjeron con anterioridad en las Vigas 3 y 8. También pudo registrarse que, tanto las Áreas de Fisuración como los Anchos Máximos de Fisura, resultaron claramente superiores en Vigas 1, 3 y 4. Estas vigas fueron elaboradas con hormigones que tienen una mayor resistencia mecánica y menor absorción capilar que las restantes. Esto se debe a que, a que tienen una estructura de poros más cerrada, el inicio del proceso de corrosión de las barras es más lento, pero una vez que se inicia, los productos generados por el mismo, cuentan con menor espacio para alojarse, generando mayores tensiones en el hormigón circundante, y por lo tanto, aparece una mayor fisuración.

Tabla 2: Propiedades mecánicas de los hormigones utilizados en las vigas.

Hormigón	Compresión [MPa]	Tracción Indirecta [MPa]	Módulo de Elasticidad [Kgr/cm ²]	Capacidad de Succión Capilar [%]	Velocidad de Succión Capilar [%]
R	32,6	2,8	208.000	100	100
P	36,4	3,6	215.000	57	53
L	36,0	3,5	212.000	60	49
A	34,5	3,4	210.000	67	53
B	25,5	2,7	201.000	86	88

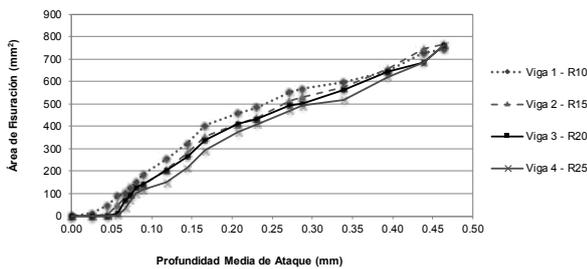


Figura 3: Área de Fisuración de las Vigas 1 a 4, en función de la Profundidad Media del Ataque a las Armaduras.

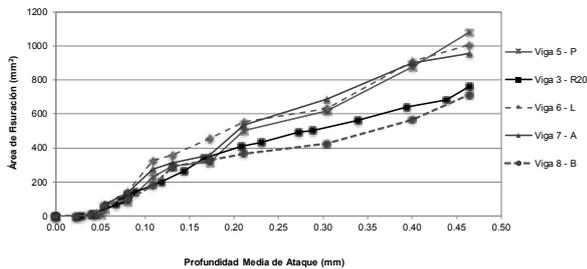


Figura 4: Área de Fisuración de las Vigas con igual recubrimiento, en las distintas vigas.

tradas en estas dos figuras.

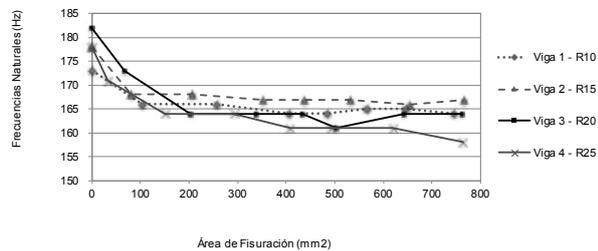


Figura 5: Variación de la Primera Frecuencia Natural de Vibración en función del Área de Fisuras para las Vigas 1 a 4.

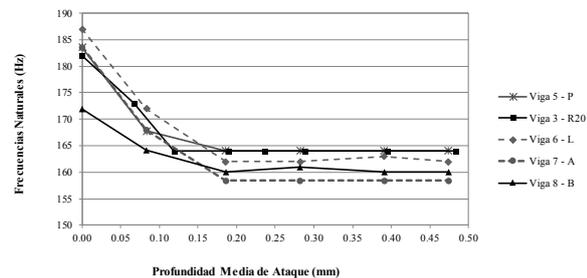


Figura 6: Variación de la Primera Frecuencia Natural de Vibración en función de la Prof. Media del Ataque a las Armaduras, en vigas elaboradas con diferentes hormigones.

Ensayo Dinámico

En las Figuras 5 y 6 se muestran los gráficos correspondientes a la variación de la primera frecuencia natural de las vigas, con el avance del nivel de corrosión. En el primer caso, se compara el comportamiento dinámico de las vigas elaboradas con hormigón reciclado sin tratamientos previos, con diferentes espesores de recubrimiento de hormigón, y en el segundo caso, se analiza el desarrollo en aquellas vigas elaboradas con distintos tipos de hormigones, con un espesor de recubrimiento de las armaduras de 20 mm. Cabe acotar que no se incluyen la evolución de las restantes vigas, por ser similares a las mos-

Como forma de control del orden de magnitud de los valores de las Frecuencias Naturales de Vibración obtenidas experimentalmente, medidas con el uso del acelerómetro, se determinó en forma teórica el valor de las mismas, para vigas simplemente apoyadas, mediante la siguiente ecuación:

$$f_i = \frac{\lambda^2}{2.\pi.L^2} \sqrt{\frac{E.I}{m}} \quad (2)$$

donde:

λ :Parámetro de Frecuencia: $l_2 = \pi$ (primer modo de vibración)

L = Longitud de la viga (m)
 E = Módulo de Elasticidad (Kg/m^2)
 I = Momento de inercia de la sección de la viga (m^4)
 m = Masa por metro de longitud de la viga (kg.s^2)

Para las vigas analizadas en este trabajo, la primera Frecuencia Natural teórica es: $f_1 = 176$ Hz, considerando un $E = 20.590$ MPa.

En la Tabla 3 se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis de las vigas ensayadas, donde se pone en evidencia el deterioro de la inercia de la viga afectadas por la corrosión de sus armaduras. Se puede apreciar que no existe una sensibilidad importante de las Primeras Frecuencias Naturales, ante las variaciones de las Áreas de Fisuración, esto se debe a que la profundidad de estas fisuras no suele ser mayor que el espesor del recubrimiento, al menos con las profundidades de corrosión de las barras que se trabajó en este ensayo. Esto sugiere que la merma de flexibilidad no está mayormente relacionada con la pérdida de la sección útil de las armaduras y sólo con las fisuras del recubrimiento que aparecen sobre las caras laterales de las vigas.

Tabla 3: Comportamiento dinámico y fisuración de las vigas.

Viga	Primera Frec. Natural de Vibración (Hz)		Área Fis. Final (mm^2)	Ancho Máx. de Fisuración Final (mm)
	Inicial	Reducción		
1 (R10)	173	9	744	0,8
2 (R15)	157	11	766	0,8
3 (R20)	179	18	762	1,0
4 (R25)	188	20	764	0,9
5 (P)	184	20	1080	1,2
6 (L)	187	25	1007	1,3
7 (A)	183	25	957	1,2
8 (B)	172	12	713	0,9

Analizando las Figuras 5 y 6, se puede ver que todas las vigas presentan una disminución de su primer Frecuencia Natural, y que la

misma está más acentuada al comienzo de la fisuración que al final del ensayo. Esto puede relacionarse con el crecimiento del Área de Fisuración, que a medida que avanza la profundidad media del ataque a las armaduras se desacelera. Esta forma de variación de las frecuencias no se corresponde con los resultados obtenidos en otros estudios realizados en esta Universidad [13], en donde la tasa de disminución de la primer Frecuencia Natural, fue menor que en este caso, para la misma profundidad media de ataque a las armaduras. Esto se debe a que las áreas de fisuración en el trabajo [13], fueron del orden de la mitad de las del presente trabajo, por lo que la validez de realizar una comparación es relativa.

La forma en que varían las Primeras Frecuencias Naturales, mostrando una fuerte caída en el primer mes de ensayo, para luego continuar esta disminución a una tasa muy baja, indican que en ese primer mes, se perdió una gran parte de la adherencia entre el hormigón y la armadura. Esta inferencia se ve corroborada por los anchos de fisura máximos medidos, que estuvieron en el orden de 0.30 mm al mes de ensayo, tal que, según [6] con este ancho de fisuras, se perdió aproximadamente un 80% de la tensión de adherencia entre armadura y hormigón.

La disminución de las Primeras Frecuencias Naturales para las vigas que presentan menor relación recubrimiento diámetro, es inferior que para las restantes. Esto se debe a que la pérdida de flexibilidad, como consecuencia de la disminución de la sección útil producida por las fisuras laterales, es menor en aquellas vigas con un recubrimiento más delgado.

También se observa que en la mayoría de los casos, la disminución de la Primeras Frecuencias Naturales, es mayor en aquellas vigas que presentan valores más elevados de su Área de Fisuración. Pero es válido aclarar que esta variación también depende del modo de fisuración, como es el caso de las Vigas 3 y 7, las cuales, presentan el mismo espesor de recubrimiento de sus armaduras y

un comportamiento mecánico y de fisuración similares, pero sin embargo, la disminución de las Primeras Frecuencia Natural es más significativo en la segunda viga. Esto se debe a que la Viga 7 presentaba un alto porcentaje de sus fisuras, respecto a la Viga 3, en la cara superior de la misma, lo cual implica que su pérdida de rigidez es inferior. Analizando sólo las fisuras en las caras laterales, se observó que la Viga 7 poseía, aproximadamente, un 30% menos de Área de Fisuración que la Viga 3.

CONCLUSIONES

La disminución de la Primer Frecuencia Natural de las vigas sometidas a un proceso de corrosión, alcanzó magnitudes perfectamente detectables, con los instrumentos de medición utilizados, queda claro que la evaluación del daño por corrosión, mediante el análisis de la variación de las Frecuencias Naturales de Vibración del elemento estructural afectado, es una adecuada y útil alternativa de ensayo no destructivo, para evaluar el estado de integridad estructural de la misma.

La respuesta ante procesos de corrosión de elementos de hormigón elaborados con agregado grueso reciclado, está muy poco estudiada aún, por ello, este tipo de análisis es de gran importancia para comenzar a conocer el comportamiento de estos nuevos materiales, sobre todo, en lo relacionado a su durabilidad.

La realización de tratamientos previos al agregado grueso reciclado, tiene una clara influencia en la estructura de poros del hormigón obtenido, alterando el comportamiento de las vigas elaboradas con dicho hormigón, frente al proceso de corrosión, modificando su respuesta dinámica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al técnico Juan P. Gorordo del Laboratorio de Modelos Estructurales y al personal del Laboratorio de Estudio y Ensayos de Materiales, de la Universidad Nacional del Sur, por la colaboración en la elaboración de este trabajo. Además, se agradece a las Secreta-

rias de Ciencia y Tecnología y al Dep. de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires, por su aporte económico e institucional necesarios para la materialización de estas investigaciones.

REFERENCIAS

- [1] Ashish, D.K.; Saini, P. (2018). Successive recycled coarse aggregate effect on mechanical behavior and microstructural characteristics of concrete. *Computers and Concrete*, 21(1), 39-46.
- [2] Pepe, M., Grabois, T.M., Silva, M.A., Tavares, L.M.; Toledo Filho, R.D. (2018). Mechanical behaviour of coarse, lightweight, recycled and natural aggregates for concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Construction Materials*, 1-9.
- [3] Moro J.M., Meneses R., Ortega N.F. (2017) Chapter 1: Variants in Recycled Concrete Elaboration to Improve their Durability, *Concrete and Concrete Structures. A Review and Directions for Research*; Editors: Dorian T. and Pascual V.; Nova Publishers, 1-42, New York.
- [4] Tam Vivian, W.Y.; Tam, C.M.; Le, K.N. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, *Resources, Conservation and Recycling*, 50, 82–101.
- [5] Alonso, M.C.; Andrade, M.C.; Rodríguez, J.; Casal J.; García A.M. (1994). Evaluación experimental de la fisuración del hormigón producida por la corrosión de las armaduras, *Hormigón y Acero*, 194, 29-42.
- [6] Al-Sulaimani, J.; Kaleemullah, M.; Basunbul, I.A.; Rasheeduzafar (1990). Influence on corrosion and cracking on bond behaviour and strength of reinforced concrete members, *ACI Structural Journal*, 220-231.
- [7] Ortega, N.F.; Alonso, M.C.; Andrade M.C., López C. (2001) Análisis de la fisuración ocasionada por la corrosión de las armaduras activas de elementos pretensados, *Coloquia 2001*, Madrid, 10 pp.
- [8] Sanz, B.; Planas, J.; Sancho, J.M. (2018). Study of the loss of bond in reinforced con-

- crete specimens with accelerated corrosion by means of push-out tests. *Construction and Building Materials*, 160, 598-609.
- [9] Melchers R. (2001). Assessment of existing structures, approaches and research needs; *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 406-411.
- [10] Gheitasi, A.; Harris, D.K. (2015). Performance assessment of steel-concrete composite bridges with subsurface deck deterioration. *Structures*, 2, 8-20.
- [11] Zhang, L.; Sun, L. (2017). Effect of concrete carbonation on natural frequency of reinforced concrete beams. *Advances in Structural Engineering*, 20(3), 316-330.
- [12] Talaeia, S.; Beitollahib, A.; Moshirabadic, S.; Fallahiana, M. (2018). Vibration-based Structural Damage Detection Using Twin Gaussian Process (TGP). *Structures*, 16, 10-19.
- [13] Ortega, N.F.; Cortínez, V.H.; La Malfa, S.; Schierloh, M.I. (2002). Análisis dinámico de vigas de hormigón armado, afectadas por la corrosión de sus armaduras. *XVII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, Rosario.
- [14] CIRSOC (2005). *Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado*, Reglamento 201, Buenos Aires.
- [15] IRAM 1627 (1997). *Agregados. Granulometría de los agregados para hormigón*, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Buenos Aires.
- [16] IRAM-IAS U500-528 (1989). *Barras de acero conformadas de dureza natural, para armadura en estructuras de hormigón*. Inst. Argentino de Racionalización de Materiales—Inst. Argentino de Siderurgia. Buenos Aires.
- [17] IRAM 1871 (2005). Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Buenos Aires.
- [18] IRAM 1546 (1992). *Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Buenos Aires.
- [19] IRAM 1658 (1995). *Hormigón. Método de ensayo de tracción simple por compresión diametral*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Buenos Aires.
- [20] IRAM 1534 (2004). *Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y tracción por compresión diametral*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires.
- [21] Alonso, M.C.; Andrade M.C.; Rodríguez, J.; García, M. (1996). Cover cracking and amount of rebar corrosion: Importance of the current applied in accelerated test. *IV° Congress on concrete in the service mankind*, Dundee, U.K.