

ABSORCION DE CO₂ POR CARBONATACION DURANTE EL CICLO DE VIDA DE PUENTES DE HORMIGÓN UBICADOS EN LA PROV. DE BUENOS AIRES

RUMI, LUCIA^{1,2,3}; MONTERO, MA. CECILIA²; ILORO FABIÁN H.^{4,5} Y ORTEGA, NÉSTOR F.^{3,4}

1: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas
e-mail: lucia_rumi@hotmail.com

2: UTN, Facultad Regional Bahía Blanca
11 de Abril 461, 8000-Bahía Blanca
e-mail: monteromc@gmail.com

3: UNS, Dep. Ingeniería
Av. Alem 1253, 8000-Bahía Blanca
nfortega@criba.edu.ar

4: Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires

5: Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica
Calle: 52 e/ 121 y 122, B1900AYB-La Plata
e-mail: fhiloro@gmail.com

Resumen. *La extracción y la fabricación de los componentes del hormigón generan importantes emisiones de CO₂ a la atmósfera, en especial en la fabricación del cemento. Pero el hormigón, durante su vida de útil absorbe CO₂, en un proceso llamado carbonatación, que desde el punto de vista de la durabilidad de las estructuras de hormigón es un problema. En este trabajo, se analiza el aspecto positivo de la carbonatación, que es la absorción del CO₂ atmosférico, gas que está muy relacionado con el efecto invernadero. En particular, a partir de mediciones de campo realizadas en puentes de la Prov. de Buenos Aires, se presenta un estudio teórico de la absorción por carbonatación en dos tipologías de puentes de hormigón que están entre las más utilizadas en nuestro país, tal que una vez cumplida su vida útil se demuele, ese hormigón se tritura y se lo expone a una absorción natural de CO₂, con el fin de ponderar adecuadamente el impacto de las obras de hormigón, de una forma adecuada.*

Palabras clave: Hormigón, Absorción de CO₂, Carbonatación, Puentes.

1. INTRODUCCIÓN

El cemento es el aglomerante que mayor uso tiene en la construcción, independientemente, de la envergadura de las obras. Se han llevado a cabo estudios que determinaron que, a nivel mundial, el volumen anual de consumo es solo superado por el agua. La industria del cemento es una de las fuentes industriales que generan más emisiones de CO₂ a nivel mundial, correspondiéndole aproximadamente el 5% de las emisiones globales de CO₂ [1]. Según datos recientes, obtenidos del I.P.C.C. (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), la producción mundial de cemento se encuentra segunda en la lista de los procesos

que emiten CO₂ a la atmósfera, después de la generación de energía. [2]

La fabricación del cemento se basa en la trituración de la piedra caliza y su calcinación a elevadas temperaturas, generando como producto intermedio del proceso, el clinker. Durante la descomposición de esta roca, al producirse la reacción química que transforma a la piedra en clinker, se genera CO₂, que es liberado a la atmósfera. Estas emisiones representan el 60% del total generado por la fabricación del cemento, siendo el 40% restante producido por la quema de los combustibles utilizados en los procesos de las plantas cementeras [3].

El cemento Pórtland mezclado con otros elementos (escorias, filler calcáreo, etc.) es el material elegido para la mayoría de las estructuras en el mundo, por su bajo costo. Otro aspecto positivo es el bajo mantenimiento que requiere el hormigón. Su fácil empleo en la construcción y la durabilidad de este producto, ha generado avances significativos, logrando que la industria cementera impulse estrategias, en cuanto a nuevas tecnologías.

El hormigón es un material compuesto, fabricado con áridos gruesos y finos, cemento, aditivos y agua, es el más empleado mundialmente, tanto por su versatilidad como por las características técnicas que posee. De estos componentes, el material que más impacta al ambiente es el cemento, conformando alrededor del 15% de su composición, medida en volumen, y generando, aproximadamente, el 90% de las emisiones de CO₂ [4].

1.1 Carbonatación del Hormigón

La carbonatación se produce cuando el CO₂ presente en la atmósfera ingresa a través de los poros interconectados del hormigón y reacciona con los productos hidratados del cemento, principalmente, con el hidróxido de calcio, formando carbonato de calcio (CaCO₃). Esta reacción disminuye la alcalinidad del hormigón, reduciendo el pH de 13,5 hasta valores próximos a 9. La absorción del CO₂ es un proceso difusivo y la cantidad de CO₂ fijado dependerá del volumen de material carbonatable (tipo y contenido de cemento), existente en el hormigón. La velocidad del proceso estará condicionada por factores atribuibles al material, en particular, la porosidad vinculada directamente con la razón agua/cemento, el tipo de cemento y los procesos de compactación y curado, como así también factores propios del ambiente donde este ubicado (temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂) [5][6].

Este proceso es conocido por las consecuencias adversas en estructuras de hormigón armado, debido a que la reducción de pH, provoca la despasivación de las armaduras, con su consecuente corrosión. Esta patología no afecta a hormigones sin armar, incluso puede considerarse como un efecto positivo, ya que incrementa la resistencia superficial del material [7].

La técnica más empleada para determinar la profundidad del frente carbonatado, por su sencillez, es la coloración con una disolución de fenolftaleína al 1% en alcohol etílico, que vira al color rosado al alcanzar un pH de 9, correspondiente a una zona totalmente carbonatada. [8].

La condición para que este fenómeno se produzca, es la presencia de humedad en sus poros (el óptimo está entre 50% y 80%), ya que sin ella el CO₂ no reaccionará. Pero si la estructura

se encuentra totalmente saturada, el avance será mucho más lento, ya que disminuye la solubilidad del CO₂ en el medio acuoso.

Como se señaló anteriormente, otro parámetro importante es la porosidad del hormigón, ya que los poros capilares de menor tamaño están generalmente saturados de humedad y por tanto inaccesibles a la carbonatación. Otros factores que afectan a la velocidad de avance de la carbonatación son la concentración de CO₂, la temperatura ambiente, las precipitaciones y las condiciones y tiempo de exposición de la estructura.

Ya que la carbonatación es un proceso de difusión, su progreso en el interior del hormigón se atenúa con el tiempo. La velocidad de avance del frente carbonatado es de vital importancia para calcular el tiempo que tardará éste en llegar hasta la armadura y dar inicio a la despasivación de la armadura, como consecuencia de la disminución del pH [6].

Según un estudio realizado en los países nórdicos [9], aproximadamente, el 0,5% del total de las emisiones de CO₂ generadas en Dinamarca, Suecia y Noruega serán reabsorbidas por el hormigón, y el 1% en Islandia. De acuerdo con los cálculos de absorción de CO₂ de dicho estudio, serán reabsorbidos en unos 100 años, entre el 20% y 35% de la cantidad total de CO₂ emitido en la producción de cemento, en los países nórdicos. Sin embargo, en la bibliografía no hay acuerdo sobre la potencial captura de CO₂, por medio de la carbonatación del hormigón. Estas discrepancias se deben, esencialmente, a los diversos factores que influyen en el fenómeno, ya nombrados anteriormente, como también a la metodología empleada por los investigadores [10].

Por los motivos antes mencionados, donde se aprecia que existen muchas variables que condicionan el poder determinar la potencialidad de la reabsorción del CO₂ por parte de las estructuras de hormigón, resulta necesario realizar estudios, basados en mediciones de campo, como los que se presentan en este trabajo. Estas determinaciones, sirvieron de base para los análisis teóricos realizados, con el fin de estimar la potencial absorción de CO₂, por parte de estructuras de hormigón. En particular, en este estudio se trabaja con dos tipologías de puentes realizados en hormigón pretensado, porque los mismos, al igual que en las obras viales, están en contacto directo con el ambiente, a diferencia de lo que ocurre, por ejemplo, con las estructuras de los edificios, donde están revestidas por mampostería y/o revocadas, teniendo un porcentaje muy bajo o nulo, de su superficie en contacto directo con el ambiente [11], por lo que sus posibilidades de carbonatación están muy limitadas.

Una vez que los puentes hayan cumplido su vida útil, estimada en 50 años, podrían ser demolidos y triturados, para obtener un nuevo material para su reúso, previo a lo cual serían expuestos al ambiente, alcanzando una mayor absorción natural de CO₂.

2. MÉTODOS

En este trabajo se plantea un estudio comparativo de dos puentes diferentes, de tipologías características de la zona y del país, a fin de determinar el potencial de absorción de CO₂ por carbonatación, durante todo el ciclo de vida de la estructura.

Dichos puentes, si bien tienen las mismas longitudes (25 m) y cumplen las mismas funciones en servicio, presentan secciones de geometría diferente, involucrando así

distintos volúmenes de hormigón y superficies expuestas (Fig. 1 y 2).

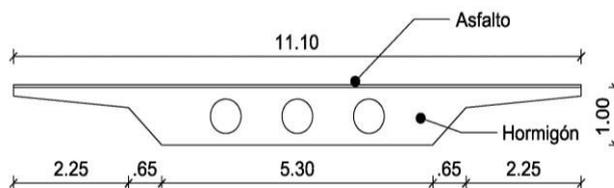


Fig. 1: Sección del puente losa analizado.

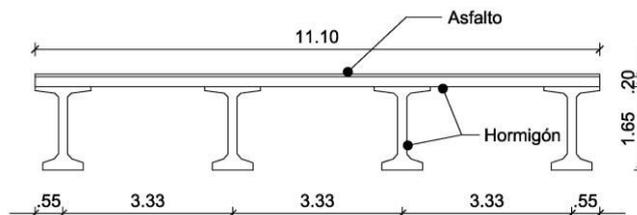


Fig. 2: Sección del puente viga analizado.

Para calcular el potencial de absorción del CO₂, primeramente, se establecen las profundidades de carbonatación. Estas determinaciones se basaron en el análisis de mediciones realizadas en diversas estructuras de puentes de la provincia de Buenos Aires [12], de características similares a los propuestos en este trabajo (Tabla 1).

A continuación se presentan los datos de los registros de campo en los que se basan los cálculos:

- Según clasificación del CIRSOC 201, se hallan en un ambiente Clase A2 - Ambiente Rural (corrosión por carbonatación).
- El clima predominante en la zona del emplazamiento puede considerarse como templado, con una temperatura media entre 13 y 17 °C, un promedio de lluvias anuales de 1.100 mm y una humedad relativa elevada, del orden de 68 a 74%. Las temperaturas medias y las humedades relativas corresponden a la estación meteorológica ubicada en Azul, que puede considerarse como el centro geográfico de los puentes inspeccionados.
- La vida en servicio de estas estructuras se estima en alrededor de 50 años, dado que han sido construidas entre las décadas del 60 y 70.
- La técnica colorimétrica utilizada para determinar la profundidad del frente carbonatado es la explicada en 1.1.

En la Tabla 1 se emplean las siguientes abreviaturas: x : profundidad de carbonatación; Enp : Elemento estructural en contacto con agua de lluvia (no protegido); Ep : Elemento estructural sin contacto con agua de lluvia (protegido); CO_2 : Concentración de CO₂ atmosférico, determinado en campo con equipo de zonda infrarrojo.

Tabla 1: Profundidades de carbonatación medidas en puentes de la prov. de Buenos Aires.

Puente	x (mm)		CO_2 (ppm)
	Enp	Ep	

1	5	20	386
2	10	15	357
3	5	31	359
4	5	20	356
5	0	15	373
6	1	13	339
7	5	30	385
8	0	15	367
9	1	13	365
10	0	10	370
11	7	30	386
12	8	25	360
13	4	15	367
14	3	14	356
15	5	23	368
16	1	20	375
17	5	18	373
18	5	23	365
19	6	21	368
20	3	28	363
21	5	22	370
22	8	27	358
23	6	24	365
24	3	25	372
25	4	28	375
26	6	20	367
27	5	23	375
28	3	25	364
29	4	27	371
30	4	25	374
Promedio	4,2	21,5	368

2.1. Cálculo de la absorción de CO₂ durante la vida útil de las estructuras

A partir de los datos de Tabla 1 se calcula la profundidad de carbonatación para ambos ambientes de exposición (protegido y no protegido de la lluvia). Considerando una vida servicio, al momento de la toma de muestras de 50 años y con los datos promedio de profundidad de carbonatación (x) obtenidos en las mediciones de campo, se determinó la velocidad de carbonatación (w en $m/años^{0,5}$) y la tasa de carbonatación (k_c) del hormigón para ambos ambientes de exposición, a través de la ecuación desarrollada por Tutti [11]:

$$w = k_c \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

Donde t es el tiempo transcurrido (años) desde la construcción hasta la medición.

De esta manera, se estableció la relación entre la profundidad de carbonatación, en función del tiempo, para cada ambiente de exposición analizado (Fig. 3).

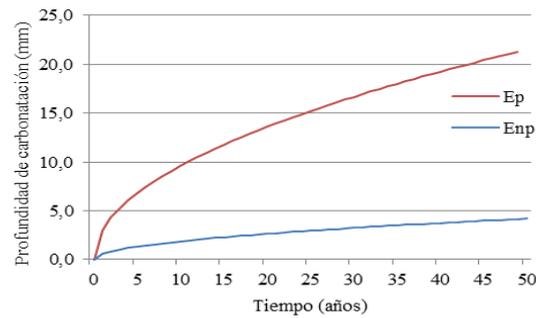


Fig. 3: Profundidad de carbonatación, en función del tiempo para las estructuras relevadas.

El volumen de carbonatación se calcula a partir de la profundidad de carbonatación, teniendo en cuenta las superficies expuestas de cada puente, evaluando cuáles están protegidas de la lluvia y cuáles no.

Para finalizar esta parte del estudio, se estimó la absorción de CO₂ durante el período correspondiente a la vida útil de cada puente, a partir de la siguiente fórmula [7]:

$$AbsCO_2 = x * A * C * CaO * \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (2)$$

Donde:

$Abs CO_2$: CO₂ capturado por carbonatación.

A : Superficie expuesta.

C : Cantidad de cemento por m³ de hormigón, en peso.

CaO : Fracción de la masa de CaO en el cemento, normalmente 65%.

M_{CO_2} : Masa molar de CO₂.

M_{CaO} : Masa molar de CaO.

3. RESULTADOS

Las estructuras de hormigón durante su vida útil están absorbiendo CO₂, al finalizar la misma esta puede ser demolida y triturada para su reúso. Si se cuenta con la posibilidad de acopiar ese material, durante un período determinado de tiempo, podría incorporarse a este análisis la carbonatación de ese material triturado.

La fragmentación en cuerpos más pequeños, genera un aumento de la superficie específica del material, ampliando el área expuesta al aire, permitiendo una mayor carbonatación.

Para calcular el tiempo de carbonatación del material triturado se asume que las partículas son esféricas, determinando así las superficies expuestas y los volúmenes de carbonatación. Cuando la profundidad de carbonatación sea igual al radio de la partícula, se habrá carbonatado totalmente. De manera similar puede estimarse el porcentaje de carbonatación de la partícula, para un determinado tiempo, conociendo el tamaño de la misma.

Se obtuvieron los porcentajes de carbonatación para el hormigón triturado en ambientes

protegido y no protegido de la lluvia. A modo de ejemplo se presentan los resultados del porcentaje de carbonatación para el material triturado para un ambiente no protegido de la lluvia (ver Tabla 2). Los cálculos se han desarrollado para un período máximo de 30 años después de la demolición. Las estimaciones se han hecho en base a un material homogéneo en cuanto al tamaño de sus partículas, las cuales se han fijado entre 5 mm y 25mm de diámetro [13].

Tabla 2: Porcentajes de carbonatación del material triturado en un ambiente no protegido de la lluvia.

Tiempo (años)	Diámetro de partícula del material triturado				
	D=5mm	D=10mm	D=15mm	D=20mm	D=25mm
0	0	0	0	0	0
1	56	32	22	17	14
2	71	42	30	23	19
3	80	50	36	28	23
4	86	56	40	32	26
5	90	60	44	35	29
6	93	64	48	38	31
7	95	68	51	40	33
8	96	71	53	42	35
9	98	73	56	44	37
10	98	76	58	46	39
11	99	78	60	48	40
12	99	80	62	50	42
13	100	81	64	51	43
14	100	83	65	53	44
15	100	84	67	54	46
16	100	86	68	56	47
17	100	87	69	57	48
18	100	88	71	58	49
19	100	89	72	59	50
20	100	90	73	60	51
21	100	91	74	61	52
22	100	91	75	62	53
23	100	92	76	63	54
24	100	93	77	64	55
25	100	93	78	65	56
26	100	94	79	66	56
27	100	94	80	67	57
28	100	95	80	68	58
29	100	95	81	69	59
30	100	96	82	69	60

La absorción de CO₂ es calculada a través de una ecuación similar a la ecuación (2), diferenciándose únicamente en la manera en que se determina el volumen carbonatado [5]:

$$AbsCO_2 = \%Carb * Vc * C * CaO * \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (3)$$

Donde:

$Abs\ CO_2$: CO₂ capturado por carbonatación.

$\%Carb$: Porcentaje de material carbonatado.

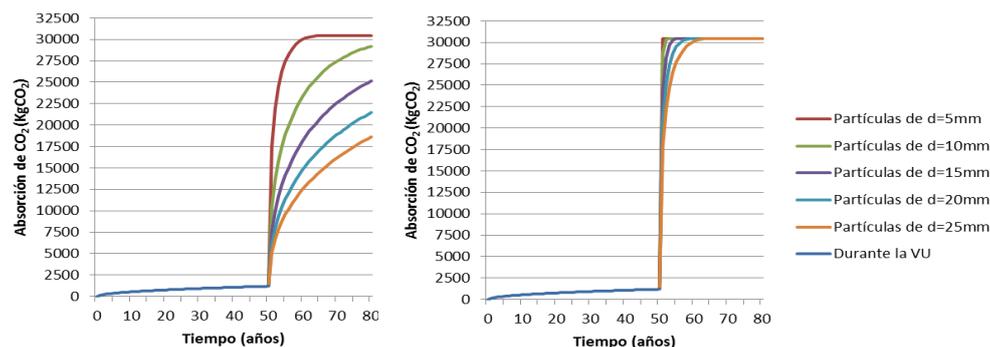
V_c : Volumen total material a carbonatar (difer. entre Vol. Total de Puente y Vol. Carbonatado)

A : Superficie expuesta del puente.

C : Cantidad de cemento por m³ de hormigón, en peso.

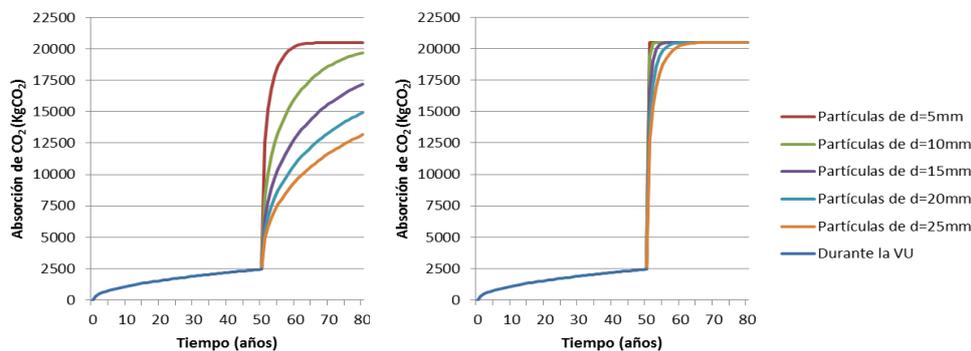
CaO : Fracción de la masa de CaO en el cemento, normalmente 65%.

M_{CO_2} : Masa molar de CO₂ y M_{CaO} : Masa molar de CaO.



a) Material triturado no protegida de la lluvia. b) Material triturado protegida de la lluvia.

Fig. 4: Absorción de CO₂ para la *puente losa* durante todo el ciclo de vida del material que lo compone.



a) Material triturado no protegida de la lluvia. b) Material triturado protegida de la lluvia.

Fig. 5: Absorción de CO₂ para la *puente viga* durante todo el ciclo de vida del material que lo compone.

Las curvas de Fig. 4 y 5 representan el potencial de absorción de CO₂ durante la vida en servicio de cada puente y después de su demolición y trituración, para diferentes tamaños de partículas. Se han estudiado dos tipos de exposición del material una vez demolido y triturado: protegido y no protegido de la lluvia.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Analizando los resultados obtenidos se aprecia que la absorción de CO₂ por carbonatación

del hormigón, durante la vida útil de los puentes, alcanza valores bajos, entre un 3 y 8 % del total de las emisiones de CO₂ en la fabricación del cemento. Sin embargo, si una vez finalizada la vida útil se realiza la demolición y la trituración del hormigón para su reúso, no solo se generan beneficios por la reducción de residuos y el reemplazo de recursos no renovables, sino que se logran valores de captación más importantes, alcanzando a absorber el total del CO₂ emitido en el proceso de calcinación, lo que representaría alrededor del 60% del total de las emisiones. Cabe aclarar que la absorción total del puente viga es menor que la del puente losa, por tener un menor volumen de hormigón.

En la Tabla 4 y en las Fig. 4 y 5 se observa que, cuanto más pequeño es el tamaño del agregado proveniente de la trituración que está expuesta al aire, mayor será la velocidad de absorción del CO₂, pero requieren mayores áreas para que cada partícula esté completamente expuesta al aire, propiedad que influye principalmente en ambientes protegidos de la lluvia. Con el fin de reducir la superficie de exposición al ambiente habría que realizar investigaciones para establecer el nivel de la captación del hormigón triturado y acopiado en montículos. Para ambientes protegidos de la lluvia, se observa poca variación en la velocidad de carbonatación, para los distintos tamaños del agregado que se estudió. Los primeros cinco años de exposición del material triturado son los más importantes en cuanto a la absorción de CO₂.

Si bien la carbonatación es considerada una patología durante la vida útil de una estructura, una vez demolida, la carbonatación no solo propicia la absorción de CO₂, sino que también genera un aumento en la resistencia superficial del material reciclado [7], situación que puede favorecer ciertos reusos de este material.

5. CONCLUSIONES

Como se ha podido determinar es importante analizar integralmente la absorción de CO₂ durante todo el ciclo de vida de la estructura de hormigón. A pesar de que la absorción durante la vida en servicio no es considerable, sí resulta importante una vez triturado el material para ser reutilizado por ejemplo como agregado reciclado de un nuevo hormigón, balasto para vías férreas, material componente de bases o sub bases de carreteras, etc.

El confinamiento del CO₂ a través de la absorción por carbonatación es un proceso seguro, evitando los inconvenientes que pueden tener otros métodos de captura y almacenamiento de CO₂ como por ejemplo, por el peligro de fugas del gas.

Otra ventaja con respecto a otros métodos es la factibilidad de su puesta en práctica y el bajo costo de la misma.

Este tipo de análisis debería ser incorporado en los inventarios de emisiones de CO₂ del cemento y del hormigón, para tener análisis de ciclo de vidas más cercanos a la realidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Sec. Gral. de Ciencia y Tecnología de

UNS por su apoyo económico y al Dep. de Ingeniería de UNS, al Dep. de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Bahía Blanca de la UTN y a CIC por su apoyo institucional, necesarios para la realizar estas investigaciones.

REFERENCIAS

- [1] A. Gessa Perera, M. Sancha Dionisio, “Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación”, *Innovar*, Vol. 26, No. 60, pp. 51-66, (2016).
- [2] I.P.C.C., *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono, Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico*, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, (2005).
- [3] O.C.D.E., A.I.E., *Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, Guía para la Tecnología Cementera, reducciones de emisiones hasta el 2050*, (2009).
- [4] F.H. Iloro, J. Sota, N.F. Ortega, “Influencia del tipo de cemento en el proceso de carbonatación acelerada de morteros”. *VIII CINPAR-Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras*. La Plata, (2012).
- [5] T. Gonen, S. Yazicioglu, “The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete”. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 5, pp. 1040-1045, (2007).
- [6] C.F. Chang, J.W. Chen, The experimental investigation of concrete carbonation depth. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 9, pp. 1760-1767, (2006).
- [7] E. Possan, W.A. Thomaz, G.A. Aleandri, E.F. Felix, A.C.P. dos Santos, “CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study”, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 6, pp. 147–161, (2017).
- [8] C.F. Chang, J.W. Chen, “The experimental investigation of concrete carbonation depth”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 9, pp. 1760-1767, (2006).
- [9] M. Glavind, *CO₂ uptake during the concrete life cycle. Executive Summary*. Danish Technological Institute, Nordic Innovation Centre, 2006. <http://www.nordicinnovation.net/>
- [10] E. Possan, J.C. Fogaça, C.M. Pazuch, “Sequestro de CO₂ devido a carbonatação do concreto: potencialidades da barragem de Itaipu”, *REA – Revista de estudos ambientais* (Online), vol. 14, pp. 28-38, (2012).
- [11] D.J. Barker, S.A. Turner, P.A. Napier-Moore, M. Clark, J.E. Davison, “CO₂ Capture in the Cement Industry”, *Energy Procedia*, Vol. 1, pp. 87-94, (2009).
- [12] Eperjesi L., Iloro F., Traversa L. “Análisis de la resistencia efectiva a la carbonatación”. *VII Congreso Internacional y 21ª Reunión Técnica Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*. Noviembre. Salta, 2016.
- [13] Montero M., Rumi L., Iloro F., Ortega N.F.; “Captación de CO₂ en agregado grueso a partir de la trituración del hormigón”, *Iº Congr. Latinoam. de Ingeniería*, Paraná, 2017.