

# APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ EN CASOS REALES

GRAHAM, Joaquín<sup>1</sup>, DOMINGUEZ RUBEN, Juan Francisco<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> IOT PROVOLETA, C1643, Bs As, Argentina, info@iotprovoleta.com

## RESUMEN

La propiedad por excelencia que mejor define a un hormigón es su resistencia a compresión. Por un lado se establece la resistencia potencial o resistencia de laboratorio bajo condiciones normalizadas y, por otro, dado que el hormigón colocado en una estructura va a contar con diferentes características respecto de las condiciones normalizadas debido a la colocación, compactación, terminación, protección y curado efectuado en obra; es relevante poder contar con la resistencia real de ese hormigón. Existen varias formas de conocer o estimar la resistencia real de la estructura y el **objetivo del presente trabajo es validar el método de madurez contrastando con las otras dos formas de obtención de la resistencia real o resistencia in situ del hormigón** en diferentes elementos estructurales con características disímiles. Adicionalmente se moldearon probetas para la obtención de la resistencia potencial asociada y su correlación con la resistencia real.

**Palabras claves:** *madurez, resistencia real, resistencia in situ, resistencia potencial*

## INTRODUCCIÓN

La resistencia a compresión es la propiedad que mejor define a un hormigón. Resumiendo, y teniendo en cuenta los aspectos normativos relacionados, analizaremos dos tipos de resistencia: la resistencia potencial o de laboratorio bajo condiciones normalizadas (humedad y temperatura) y la resistencia efectiva o “real” de la estructura de hormigón.

Existen varias formas de conocer la resistencia real de la estructura ya sea calando testigos de hormigón, dejando probetas junto a los elementos estructurales que representan y sometiéndolas al mismo curado o utilizando el método de madurez. Los dos primeros métodos mencionados tienen grandes desventajas respecto al valor estimado de resistencia que pretenden obtener.

Los testigos de hormigón no solo generan un deterioro en la estructura, sino que también son muestras que están afectadas por una cantidad importante de variables como el daño generado al material por el proceso de aserrado incluyendo la microfisuración y la ondulación en la superficie aserrada (ACI 214.4R) además de las condiciones propias del ensayo.

Por otro lado, las probetas en el mismo “ambiente” de la estructura representan condiciones distintas del elemento hormigonado, ya que fueron moldeadas en condiciones normalizadas diferentes a las existentes en obra. Asimismo, las dimensiones de las mismas, en la mayoría de los casos, difieren en volumen y superficie expuesta respecto de la estructura por lo que la interacción hormigón-ambiente es muy distinta comparada con el hormigón en obra.

Es importante aclarar que el hormigón colocado en una estructura va a contar con diferentes características respecto de las condiciones normalizadas debido a la colocación, compactación, terminación, protección y curado efectuado en obra; por lo tanto es relevante poder contar con la resistencia real de ese hormigón.

Por otro lado, el método de madurez es un concepto que existe desde la década del 50. El primer método denominado factor temperatura-tiempo, conocido también como función de madurez Nurse-Saul, fue desarrollado gracias al trabajo de Nurse [1], McIntosh [2] y Saul [3]. En el año 1978 este método fue estandarizado por la norma ASTM 1074 [4]: “Estimación de la resistencia del hormigón por el método de madurez”. El Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201 [5] permite utilizar este mismo método para juzgar el grado de endurecimiento del hormigón (desarrollo de resistencia in situ).

*“El método de madurez es una técnica para estimar la resistencia a la compresión y está basado en la suposición de que las muestras de una mezcla de hormigón dada alcanzan resistencias iguales si éstas alcanzan valores iguales del índice de madurez” (ASTM C1074).*

En resumen, en el presente trabajo analizaremos las siguientes resistencias:

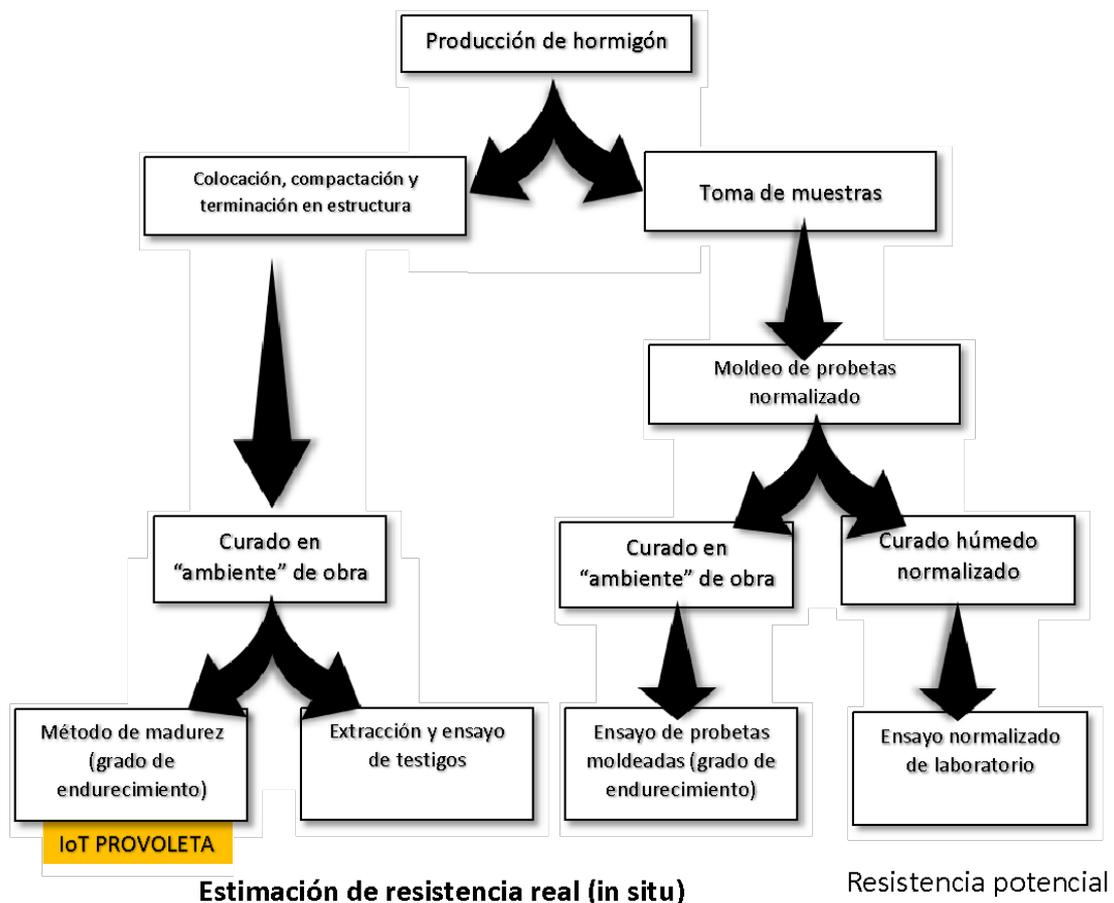
**RP:** resistencia potencial

**REP:** resistencia efectiva mediante probetas

**RET:** resistencia efectiva mediante testigos de la estructura de hormigón

**REM:** resistencia efectiva por madurez

En el diagrama que sigue (**Fig. N° 1**), se resumen las distintas formas de determinar la resistencia efectiva o real de la estructura de hormigón por un lado y la resistencia potencial o de laboratorio por otro.



**Fig N°1**

## DESARROLLO DEL TRABAJO

Los principales objetivos del presente trabajo se resumen a continuación:

- 1) Validar el método de madurez contrastando con las otras dos formas de obtención de la resistencia real o resistencia in situ del hormigón,
- 2) Comparar los resultados obtenidos en 1) con las determinaciones de resistencia potencial,
- 3) Analizar la influencia del tamaño del elemento estructural en las resistencias efectivas estimadas con el método de madurez,
- 4) Analizar la influencia de la profundidad de inmersión del sensor en el elemento estructural, en la evolución de la resistencia efectiva estimada con el método de madurez (efecto del curado).

### Características de la obra

La obra está emplazada en un barrio privado de zona norte de la provincia de Buenos Aires, consiste en una vivienda familiar.

Las mediciones se realizaron en la fundación de la misma, consistente en una platea de 20 cm de espesor.

Las dimensiones en planta de la platea son: 20,7 m x 18,71 m.

El terreno fue mejorado mediante una compactación con suelo seleccionado de un espesor de 30 cm en toda la superficie.

En contacto con el suelo, se colocó un polietileno de 200 micrones.

El hormigón fue bombeado por medio de una bomba pluma a pistones.

El asentamiento de llegada fue de 15 cm, y se utilizó superfluidificante para poder tener un asentamiento apto para bombear; el asentamiento de colocación fue de 18 cm.

La compactación se realizó mediante un vibrador de aguja.

La dosificación utilizada se adjunta en la **tabla N°1**.

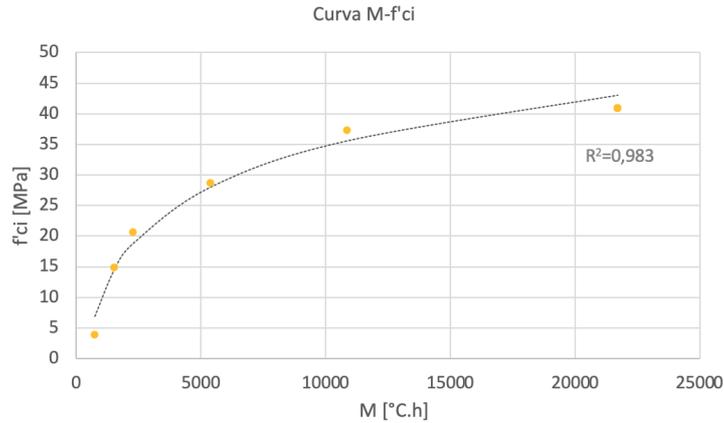
**Tabla N°1**

<b>Peso de los materiales [kg]</b>	<b>H30-As 15 cm</b>
Cemento	320
Agua	167
Arena fina	585
Arena 0-6	342
PP 6-20	980
Aditivo	2.72 (0,85%)

### Procedimiento

Dado que el método de madurez requiere una calibración previa en laboratorio con el objetivo de obtener la correlación índice de madurez-resistencia a compresión, se adjunta la gráfica resultante de los resultados de resistencia a compresión potencial

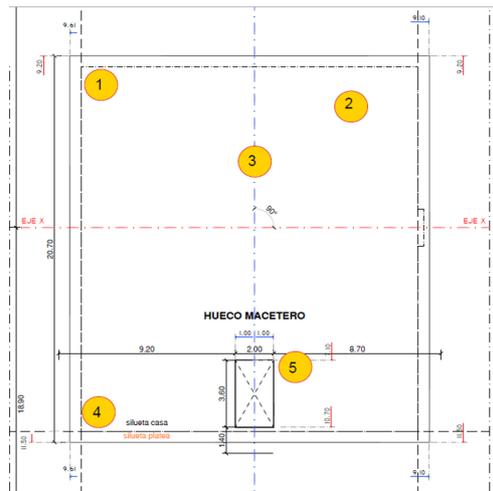
versus índice de madurez obtenido a través del registro de un sensor inmerso en la zona central de una probeta bajo curado normalizado (**fig. N°2**).



**Fig. N°2**

En base a los objetivos planteados en el presente trabajo, se utilizaron 8 sensores en 3 elementos (platea, cajones para la extracción de testigos y probeta curada en ambiente de obra).

La posición de los sensores se esquematiza a continuación (**fig. N°3**) y se resume en la **tabla N°2**:



**Fig. N°3**

**Tabla N°2**

Elemento	Ubicación del sensor	Profundidad [cm]	Denominación sensor
Platea	Centro	10	P3-10
Platea	Superior izquierdo	4	P1-04
Platea	Superior derecho	10	P2-10
Platea	Inferior izquierdo	2	P4-02
Platea	Inferior derecho	10	P5-10
Cajón para testigos	Centro	10	C-10
Probeta en obra	Centro de probeta	10	Probeta

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para analizar los resultados, nos enfocaremos en los objetivos planteados precedentemente.

### Validación del método de madurez y comparativa de resistencias efectivas o reales versus resistencias potenciales

Para analizar este apartado contrastaremos las resistencias reales o in situ, o sea, **REM** (Resistencia Efectiva por Madurez) versus REP (Resistencia Efectiva mediante Probetas) y RET (Resistencia Efectiva con Testigos).

En primer lugar, a modo de ejemplo, se muestra la gráfica de un punto en la platea que brinda el software de los sensores utilizados (**fig. N°4**). Cabe aclarar que, los dispositivos no solo estiman REM (Resistencia Efectiva por Madurez) cada 30 minutos representando una curva continua, sino que muestran los valores en forma remota y en tiempo real. **Esta es una diferencia importante de la utilización del método de madurez, ya que cuenta con registros continuos versus los resultados discretos de REP (Resistencia Efectiva mediante Probetas) y RET (Resistencia Efectiva con Testigos).**

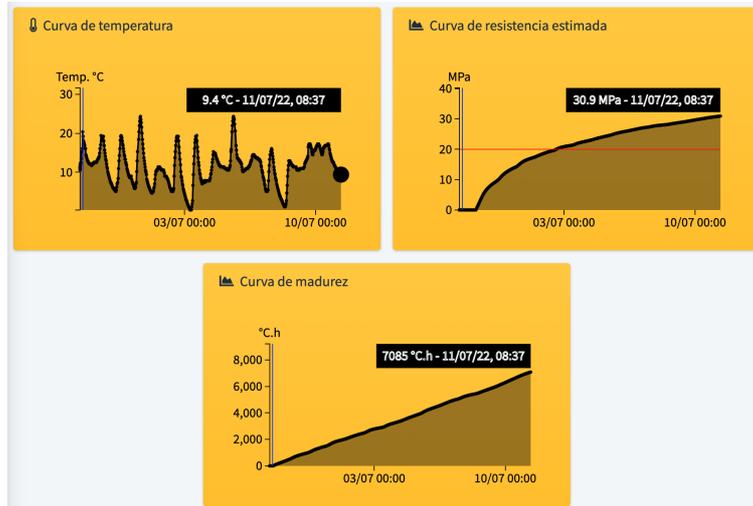


Fig. N°4

En las **siguientes figuras (Fig. N° 5, 6 y 7)** se resumen los valores determinados:

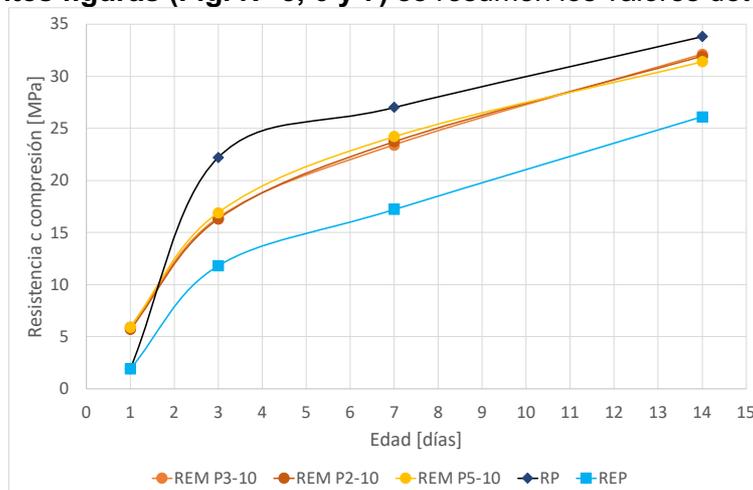
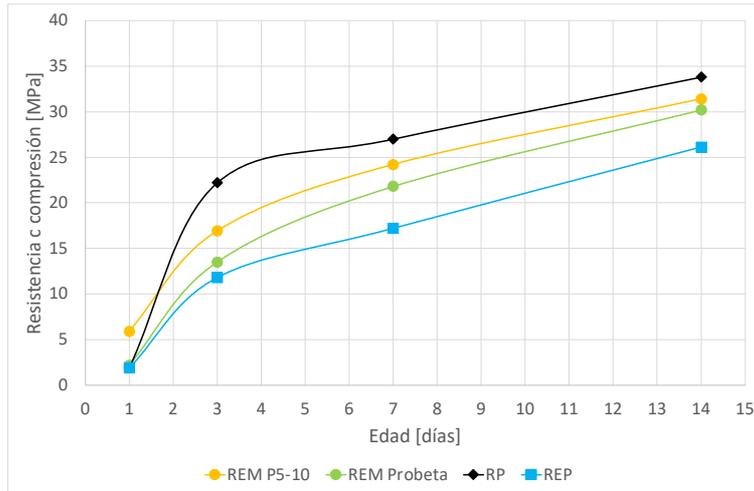
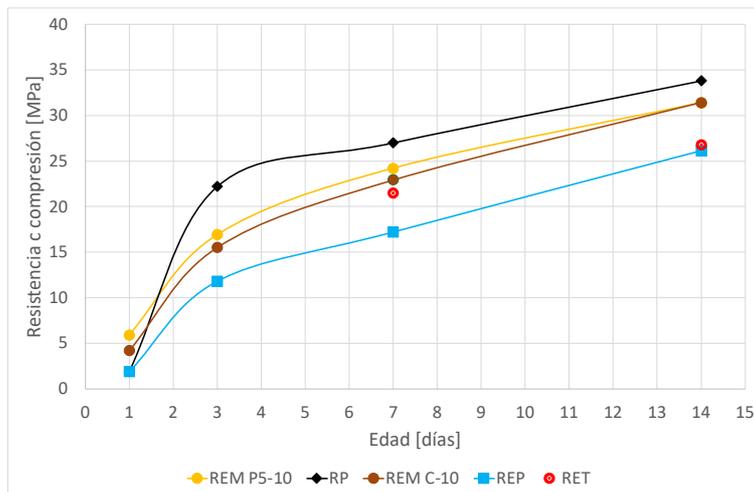


Fig. N°5



**Fig. N°6**



**Fig. N°7**

Se puede observar que, como era previsible, los valores de **REM** (Resistencia Efectiva por Madurez) son diferentes de acuerdo a su ubicación en la estructura y al elemento hormigonado; mientras que los resultados de **REP** (Resistencia Efectiva mediante Probetas) son únicos independientemente del elemento. Lo precedente pone en evidencia que, dado que la superficie-volumen de un elemento estructural y por consiguiente su interacción con el ambiente, es una variable fundamental en la evolución de resistencia real, el método de **REP** (Resistencia Efectiva mediante Probetas) muy pocas veces replica las condiciones a las que el hormigón está expuesto en las obras.

Por otro lado, al comparar **REM** (Resistencia Efectiva por Madurez) y **RET** (Resistencia Efectiva con Testigos) se observan diferencias en las determinaciones que podrían estar asociadas al daño generado al material por el proceso de aserrado (microfisuración y ondulación en la superficie aserrada). En línea con esta teoría, los testigos presentan resistencias levemente inferiores comparados con **REM** y **RP** (Resistencia Potencial) (cajones de 7 y 14 días).

Por último, las **RP** (Resistencia Potencial) en todas las edades presentan valores superiores a las resistencias efectivas determinadas en la estructura. Este resultado resulta coherente, dado que el hormigonado se realizó en otoño con una temperatura media de 11,8 °C (por debajo de los 23+-2°C normalizados en laboratorio).

## Influencia del tamaño del elemento hormigonado en la resistencia efectiva

En este apartado analizaremos los promedios de las resistencias efectivas en puntos centrales de la platea versus los puntos centrales en los cajones.

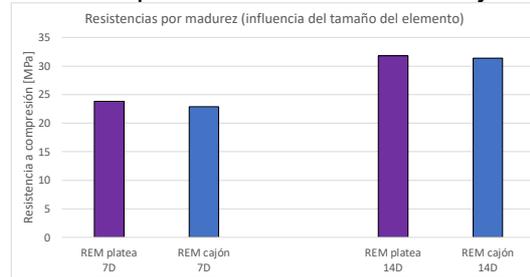


Fig. N°8

En la **fig. N°8** no se manifiesta una diferencia apreciable en la evolución de resistencias estimadas por madurez. Es probable que estos resultados se deban a que la relación superficie-volumen es la misma en ambos elementos y que ninguno se considera un hormigón masivo, descartando la posibilidad de que pueda tener influencia significativa el volumen de hormigón en la evolución de calor del elemento.

## Efecto de la humedad en el hormigón

Para este análisis, contrastaremos las **REM** (Resistencia Efectiva por Madurez) de los sensores colocados en la zona central de la platea versus los colocados en la parte superior de la misma.

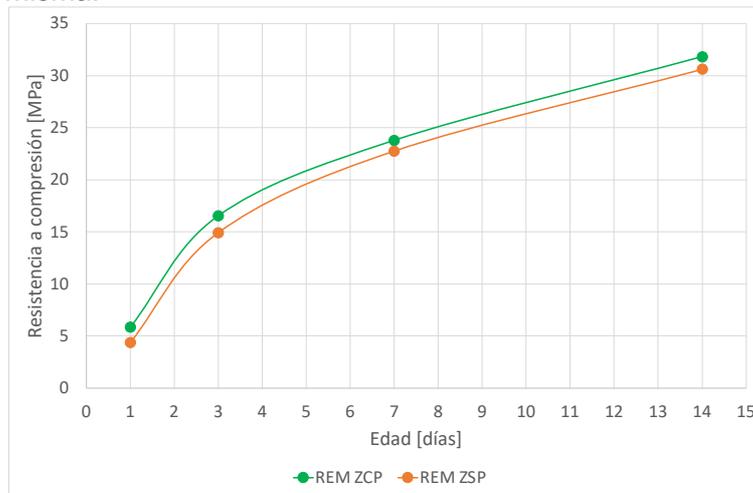


Fig. N°9

Como se puede observar en la **fig. N°9**, las REM en la parte superficial de la platea arrojaron valores menores a los de la zona central. Esto puede deberse a la influencia del curado en este elemento de elevada relación superficie-volumen. En la platea en estudio, no se realizó un curado superficial en obra por lo que es de esperar que la humedad del hormigón en la zona cercana a la superficie presente valores inferiores a los de la zona central y por consiguiente condicionan negativamente su grado de hidratación. Este efecto es mucho más evidente a edades tempranas, pasando de un 34% de diferencia a la edad de 1 día a un 4% a 14 días.

## Fotografías

En las **fig. N°10** se adjuntan algunas imágenes del hormigonado de la platea y los madurímetros utilizados.



**Fig. N°10**

## **CONCLUSIONES**

Con el advenimiento de nuevas tecnologías de transmisión de información, es de gran utilidad contar con dispositivos que puedan estimar la resistencia efectiva o real en forma remota y en tiempo real con el objetivo de tomar decisiones que permitan optimizar procesos constructivos/productivos.

Se validó la utilización del método de madurez (grado de endurecimiento) para la estimación de la resistencia real, siendo relevante destacar las ventajas de su utilización frente a los otros dos métodos analizados en el presente trabajo.

Dado que el desarrollo de temperatura en el hormigón no es uniforme, las estimaciones de resistencia en distintos puntos de una misma estructura arrojarán valores diferentes (resultado lógico validado), por lo que es relevante monitorear los puntos críticos o de interés definidos en el cálculo estructural.

El método de madurez resulta de gran utilidad para analizar el curado de una estructura, y por consiguiente, poder predecir si el grado de hidratación alcanzado es acorde con el diseño por durabilidad establecido. El efecto de la falta de curado resultó más evidente a edades tempranas.

De acuerdo a lo analizado, el método de madurez es el más representativo para la estimación de la resistencia efectiva o real dado que considera las condiciones en obra (colocación, compactación, terminación, protección y curado) y no es afectado por variables de ensayo. Asimismo, arroja valores levemente superiores a los demás métodos que determinan resistencia efectiva, lo que permite optimizar tiempos de avance de obra o producción debido a la obtención de valores objetivo de resistencia en plazos más cortos.

Invitamos al lector a pensar la cantidad de m<sup>3</sup> de hormigón despachados de los cuales no se tiene ningún valor de resistencia (ni RP, REP, etc.); este valor, es sin dudas bajísimo. Si bien esta problemática no es tema de estudio del presente trabajo, no estamos faltando a la verdad si destacamos que tenemos un problema no atendido de la manera que corresponde. Métodos y tecnologías como las que tenemos disponibles hoy día, permiten conocer la resistencia (y otras características relacionadas con la madurez del hormigón). Creemos, sin duda alguna, que estas metodologías permiten no solo mejorar procesos durante la obra, sino también asegurar la calidad de las mismas, de manera simple y sencilla.

## **REFERENCIAS**

- [1] Nurse, R. W., "Steam Curing of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 1, No. 2, 1949, pp. 79-88.
- [2] McIntosh, J. D., "Electrical Curing of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 1, No. 1, 1949, pp. 21-28.
- [3] Saul, A. G. A. , "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure", Magazine of Concrete Research, Vol. 2, No. 6, 1951, pp. 127-140.
- [4] ASTM C1074-17, Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [5] Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201-2005.