

Determination of the datum temperature for applying maturity in cold weathers

Determinación de la temperatura datum para la aplicación de la madurez en climas fríos

L. Ebensperger ^{1*}, J. Oyarzún ^{**}, R. Torres ^{***}

* Construtechnik Ltda. – Santiago, CHILE

** Concremag S.A. – Punta Arenas, CHILE

*** UMAG, Depto. de Ingeniería de Construcción – Punta Arenas, CHILE

Fecha de Recepción: 28/01/2020

Fecha de Aceptación: 03/03/2020

PAG 84-99

Abstract

The recently approved Chilean standard NCh3565 for the use of Concrete Maturity to estimate the Concrete Strength has greatly facilitated the technological transfer of new wireless measurement technologies with online connection (IoT), represented by the maturity sensors. In this sense, preliminary on-field tests carried out on pavements incorporating sensors in the city of Punta Arenas made it possible to detect that the assignment of the value of the Datum Temperature to the fixed value of 0 °C does not deliver the real resistance results determined by means of control cylinders and concrete cores. This work deepens on this topic proposing as a conclusion the use of a variable value of Datum Temperature for cold climates.

Keywords: Concrete, pavements, cold climate, maturity, datum temperature

Resumen

La reciente entrada en vigencia de la norma chilena NCh3565 sobre el uso de la Madurez del Hormigón para estimar la Resistencia del hormigón, ha facilitado enormemente la transferencia de nuevas tecnologías inalámbricas de medición con conexión en línea, representada por los sensores de madurez. En este sentido que, pruebas preliminares de terreno realizadas en pavimentos de prueba con sensores en la ciudad de Punta Arenas permitieron detectar que la asignación del valor de la Temperatura Datum al valor fijo de 0°C no entrega los resultados de resistencia real determinados mediante cilindros de control y testigos. Este trabajo profundiza sobre este tema proponiendo como conclusión el uso de un valor variable de Temperatura Datum en climas fríos.

Palabras clave: Hormigón, pavimentos, clima frío, madurez, temperatura datum

1. Introducción

Después de sesionar durante un año, el Comité Técnico de la Norma NCh3565 terminó de redactar la norma que rige el procedimiento de uso del concepto de Madurez del Hormigón para estimar la Resistencia del Hormigón. Mediante la participación de representantes de empresas cementeras, de hormigón premezclado, laboratorios, consultores y proveedores de tecnología, esta norma basada en la norma ASTM C1074, representó un novedoso e interesante avance en la obtención de una norma dirigida al uso práctico de la metodología en terreno, más que al uso adscrito solamente a laboratorios. Por ejemplo, considera que, para la ejecución de la Curva de Calibración, denominada como “Relación Resistencia-Madurez” debe utilizarse el mismo tipo de hormigón que será usado en obra, y debe provenir de una planta de premezclado (confeccionado según NCh1934). Sólo en casos de tratarse del inicio de la obra, este hormigón podrá ser confeccionado en laboratorio según NCh1018.

Además, establece que deben definirse 5 edades de medición de la resistencia, que cubran adecuadamente el período de estudio, manteniendo la edad de 7 y 28 días como control. Por ejemplo, para tareas de descimbre o tensado este período debiese estar comprendido entre 1 a 5 días, para control de procesos a mayores edades deben contemplarse edades de 14 y/o 28 días.

Es de interés para este estudio la definición que plantea la norma en relación al valor que debe tomar la “Temperatura Datum” del método, la cual se define como aquella temperatura bajo la cual el hormigón deja de ganar resistencia debido a la detención de la reacción química del cemento. Este Temperatura se ha definido con el valor $T_0=0^{\circ}\text{C}$, dejando claramente acotado que, para condiciones de endurecimiento en clima frío, se debe considerar un valor adaptado a esta situación. Este trabajo pretende entregar lineamientos para el uso del Método de Madurez en condiciones de colocación en clima frío.

¹ Autor de correspondencia:

Construtechnik Ltda. – Santiago, CHILE
E-mail: luis.ebensperger@gmail.com



2. Antecedentes

La Resistencia de una mezcla de hormigón que ha sido apropiadamente colocada, compactada y curada dependerá de la edad de ésta y de la historia de temperatura que desarrolle debido a la hidratación del cemento. El efecto combinado del tiempo y la temperatura en la ganancia de resistencia puede ser cuantificada mediante la función de Madurez, la cual indica que, para dos mezclas de un mismo hormigón, se cumple que, para igualdad de Madurez, generadas en condiciones de temperatura diferentes, la Resistencia debiera ser la misma. Ya en el año 1951 (Carino, 2001) Saul resumió las investigaciones de esa época, en especial en hormigones curado a vapor, sugiriendo la necesidad del uso de una “Temperatura Datum” para una aplicación correcta del Método ver (Figura 1):

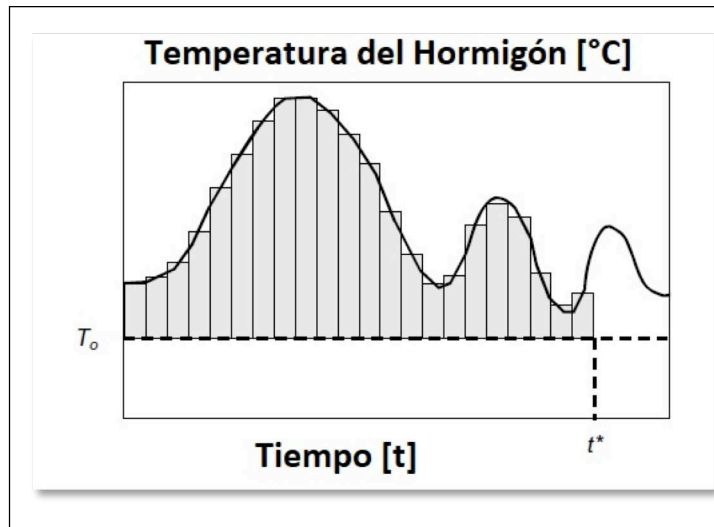


Figura 1. La Función Nurse-Saul de Madurez

La ecuación desarrollada ver (Ecuación 1) se conoce como la función de “Nurse-Saul”. En esta función, considerada lineal, sólo los intervalos de tiempo en que la temperatura sea superior a T_0 contribuyen a la ganancia de Resistencia. Además, determinó que una vez que el hormigón fragua, éste seguirá generando resistencia y endureciéndose incluso a temperaturas bajo 0°C . Las investigaciones de Saul y otros investigadores de aquellos años llevaron a definir $T_0 = -10^{\circ}\text{C}$.

$$M(t) = \sum [T - T_0] * \Delta t \quad (1)$$

Dónde:

$M(t)$ = Función de Madurez ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)

T = promedio de la temperatura en cada intervalo de tiempo ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = temperatura Datum ($^{\circ}\text{C}$)

Δt = intervalo de tiempo (horas)

Investigaciones posteriores demostraron que al utilizar la función de “Nurse-Saul” se producía un efecto de cruce en el desarrollo de la resistencia y madurez temprana y tardía, influenciado principalmente por la temperatura del hormigón a edad temprana y a la diferencia en el tipo de productos químicos que se generan en cada caso. Así es que algunos autores (Carino, 2001) proponen en estos casos el uso de la Función de Arrhenius (Ecuación 2), a modo de suplir las deficiencias que mostraba la (Ecuación 1). Esta ecuación utiliza el concepto de “Edad Equivalente”, que equivale al tiempo requerido para obtener una misma Madurez, pero a una temperatura distinta a la temperatura de Referencia.

$$t_{eq} = \sum \exp \left[-\frac{E_{Act}}{K} * \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right) \right] x \Delta t \quad (2)$$

Dónde:

t_{eq} = Edad Equivalente (días; horas)

E_{Act} = Energía de Activación; (J/mol)

K = constante de los gases; 8,314472 (J/mol*K)

T_a = promedio de temperatura en el intervalo; $273+T_a$ (°K)

T_s = temperatura de referencia especificada: 20°C; $273+20 = 293$ (°K)

Δt = intervalo de tiempo (horas)

Ambas formas de determinar la Función de Madurez fueron incorporadas en la primera versión de la ASTM C1074 (ASTM, 1989), entregando incluso procedimientos de laboratorio para determinar la Energía de Activación de un determinado cemento, y poder así aplicar adecuadamente la (Ecuación 2). Para la determinación de la Energía de Activación se pueden utilizar varios métodos, como la medición de la resistencia de cubos de mortero, la medición del Calor de Hidratación o de Retracción Química en pasta de cemento.

La Metodología ASTM C1074 para determinar T_o y E_a , a través de la medición de la resistencia, se presenta gráficamente en la (Figura 2). Con los datos de resistencia a 3 temperaturas de curado y distintas edades se debe ajustar una ecuación a una serie de datos (Resistencia Límite S_u , Edad de inicio del desarrollo de la resistencia T_o y tasa constante de desarrollo de resistencia k) mediante una regresión lineal, la cual permite graficar la inversa del valor k en función de las temperaturas de curado. El punto de cruce con el valor 0 del eje Y corresponde a T_o . En un segundo gráfico, el cual incluye el logaritmo natural del valor k y la inversa de la temperatura absoluta, se determina la pendiente de la curva para calcular E_a .

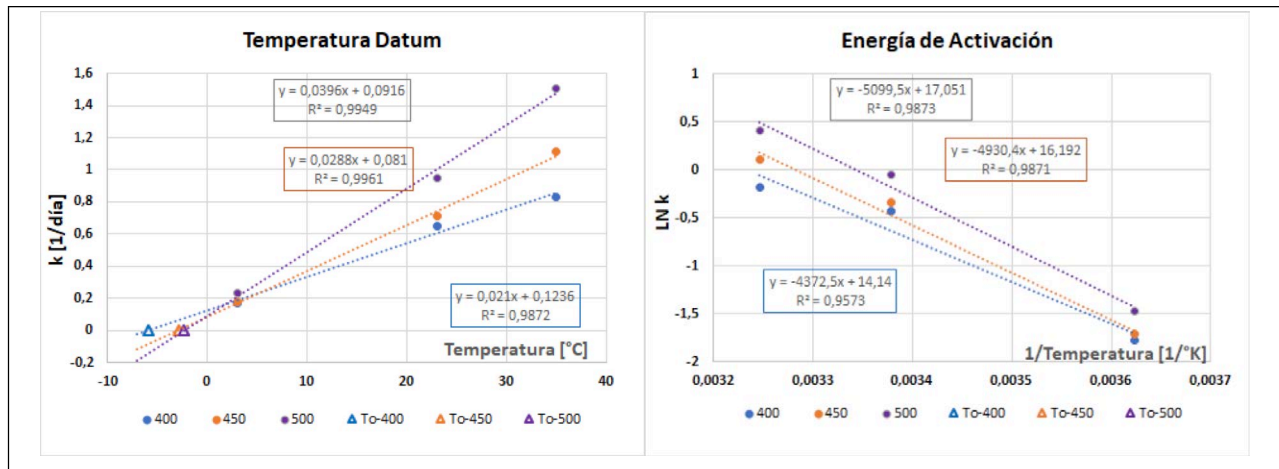


Figura 2. Determinación de Temperatura Datum y Energía de Activación según ASTM C1074

Los datos graficados en la (Figura 2) (Ebensperger, 2019) permitieron determinar los siguientes valores de T_o y E_a para un cemento nacional de Alta Resistencia con distintos contenidos de cemento ver (Tabla 1).



Tabla 1. Valores de T_o y E_a determinados en un cemento puzolánico de Alta Resistencia

Contenido de Cemento [kg/m ³]	Temperatura Datum [°C]	Energía de Activación [J/mol]
400	-5,9°	36.400
450	-2,8°	41.000
500	-2,3°	42.400

La otra forma de determinar el valor de la Energía de Activación E_a consiste en realizar mediciones del Calor de Hidratación de la pasta de cemento con un calorímetro adiabático o semi-adiabático tipo Langavant, a 3 temperaturas, por lo general 10, 20 y 30°C. Los resultados de esta medición entrega diversos parámetros (Xu et al., 2010) representados por la (Ecuación 3). El instrumento ajusta automáticamente los valores según cada curva de Desarrollo de Calor, para finalmente entregar el valor de E_a , graficando el valor de $\ln(\tau)$ con la inversa de la temperatura absoluta.

$$\alpha(t_{eq}) = \alpha_u * \exp \left[- \left(\frac{\tau}{t_{eq}} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

Dónde:

- α = Grado de Hidratación a cierta Edad Equivalente (-)
- T_{eq} = Edad Equivalente (horas)
- α_u = Grado Último de Hidratación; (-)
- τ = parámetro del tiempo de hidratación (horas)
- β = parámetro de forma de la hidratación (-)

Resultados de ensayos ejecutados con esta técnica en el cemento Portland Puzolánico de Alta Resistencia utilizado en esta investigación se muestran como ejemplo en la (Figura 3) y (Figura 2).

Teniendo en consideración que tanto T_o como E_a están referidos a la misma mezcla de hormigón, es esperable que ambos valores estén relacionados y sean compatibles entre sí. Los autores (Lee y Hover, 2015) y (Lee y Hover, 2016) presentan en dos trabajos recientes un detallado trabajo sobre este tema, cuyo resultado final del análisis realizado se muestra en (Figura 4)

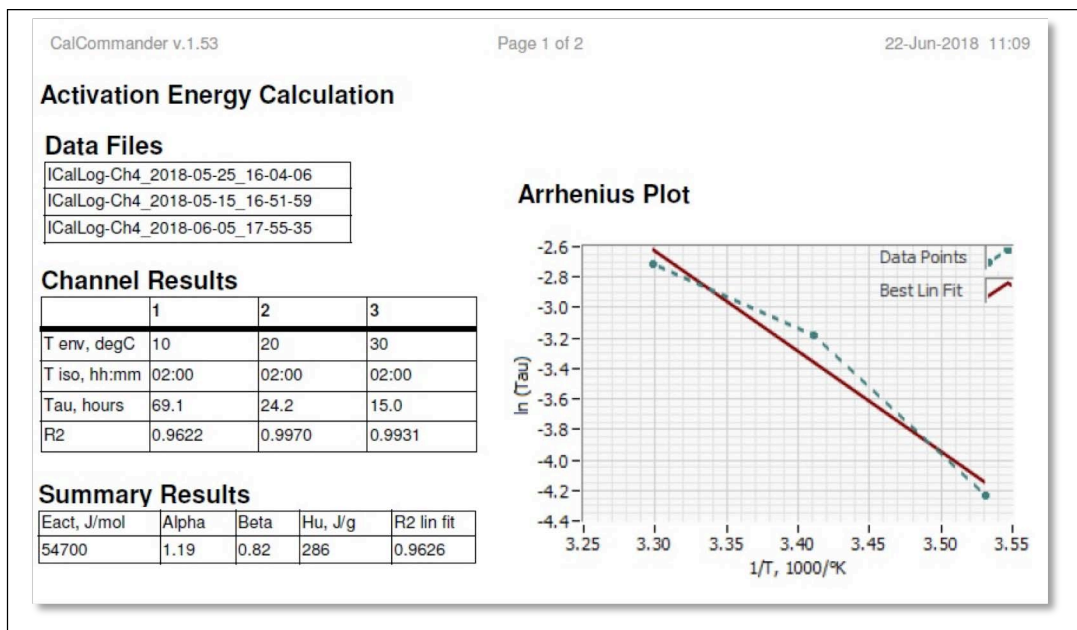


Figura 3. Determinación de Energía de Activación mediante calorimetría

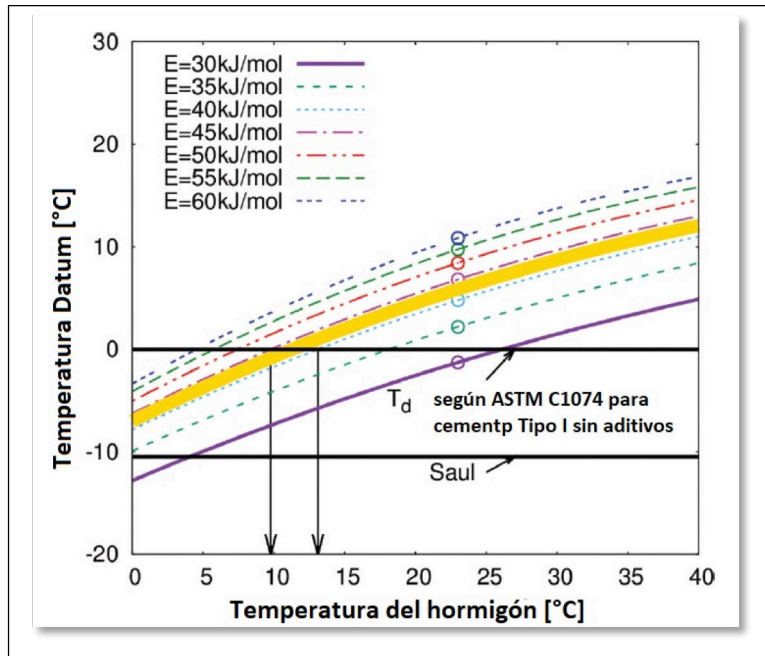


Figura 4. Temperatura Datum en función de la Energía de Activación y de la Temperatura de curado del hormigón

La zona achurada en amarillo representa las condiciones que estipula ASTM C1074 para la aplicabilidad del Método de Madurez, lo cual correspondería a temperaturas del hormigón entre 10 a 13°C y E_a entre 40.000 a 45.000 J/mol. Sobre estas temperaturas T_o debiera ser incluso mayor que 0°C, y para temperaturas cercanas a 0°C T_o se acerca al valor de -10°C. La principal conclusión de esta figura radica en que la Temperatura Datum depende de la temperatura de curado del hormigón, y no es un valor único dependiente sólo del tipo y contenido de cemento. Esto concuerda con lo indicado en (Neville, 2012), donde se menciona que $T_o = -10$ °C es habitualmente utilizado para edades hasta 28 días con temperaturas del hormigón entre 0 a 20°C.

Por un largo período se utilizó el valor de $T_o = -10$ °C, y a modo de facilitar la aplicación del Método en sus ambas variantes, éste fue estandarizado a través de la ASTM C1074-87, recomendando luego en el año 1989 para el caso de uso de cemento Tipo I (cemento Portland puro), sin aditivos y con una temperatura de curado en el rango entre 0 a 40°C, el valor de $T_o = 0$ °C. Para otras condiciones y donde se requiera una mayor exactitud en la estimación de la resistencia, T_o debe determinarse según la metodología propuesta en su Anexo 1. No existe claridad en las razones que llevaron a la ASTM establecer el valor de $T_o = 0$ °C en vez de $T_o = -10$ °C, pero es muy probable que fue debido a que en Estados Unidos por muchos años el único cemento utilizado era el Tipo I. Por otro lado, según el autor ya mencionado (Lee, 2018), indica que no existiría una base teórica para el uso de $T_o = 0$ °C. El valor de $T_o = -10$ °C fue propuesto por observaciones que mostraban que el desarrollo de la resistencia es insignificante bajo tal temperatura; sin embargo, este valor no garantiza la precisión de la estimación de Resistencia por el Método de Madurez. La selección del valor de T_o depende de la mezcla (es decir, tipo de cemento, relación a/c, materiales cementicios) y la temperatura del hormigón in-situ. Incluso si no hay una tendencia clara, el análisis de datos múltiples revela que el uso de un T_o mayor en clima cálido y un T_o menor en clima frío proporciona una mayor precisión al Método.

Estudios realizados en Chile respecto a la Madurez han sido limitados. A fines de los años 80, (Covarrubias, 1988) indica el uso de $T_o = -10$ °C, tal como lo hacen (Videla y Parada, 1988) al señalar un valor entre -10 a -12°C para cementos puzolánicos. Posteriormente en el trabajo de (Videla et al., 1995) se aplica el valor de $T_o = -10$ °C en hormigones fabricados con distintos cementos nacionales. En un trabajo más reciente (Carrillo, 2011) con 3 cementos nacionales y 2 contenidos de cemento determina valores de T_o y E_a según metodología de ASTM C1074, que indican un notorio efecto del tipo de cemento utilizado y del contenido de cemento, lo cual indicaría que para una mezcla de hormigón en valor de T_o dependería directamente de la dosificación de la mezcla.

La actual NCh3565 incluyó solamente el uso del Método "Nurse-Saul" debido a su simpleza en su uso, en comparación al Método de Arrhenius que requiere mediciones complejas en laboratorio. Se ha limitado su uso para el caso de hormigones con temperaturas sobre 40°C de forma prolongada (hormigones masivos y curados en vapor), por probables efectos de disminución de resistencias a mayor edad. La Temperatura Datum T_o



recomendada fue de 0°C para todos los casos, dejando explícitamente indicado que sólo para el caso de Clima Frío podría usarse un valor adecuado a estas condiciones. Esta indicación fue incorporada una vez que se presentaron los primeros avances de este mismo estudio al Comité de Norma (Ebensperger, 2018).

En esta misma norma se indica el modo en que se debe calcular la Relación Resistencia-Madurez (Curva de Calibración), utilizando la siguiente ecuación (Ecuación 4).

$$R(t) = A + B * \ln [M(t)] \quad (4)$$

Dónde:

$R(t)$ = Función de Estimación de Resistencia [MPa]

$M(t)$ = Función de Madurez [°C-h];

A, B = parámetros de la ecuación semi-logarítmica

La normativa entrega requisitos adicionales, como la exactitud de la curva de correlación ($r2 > 0,95$), rango de edad de interés y procedimiento de verificación de la Curva de Calibración en el tiempo, según la desviación de la resistencia con respecto a los valores iniciales de calibración.

Es importante destacar que el uso de un valor constante de T_0 podría estar afectando seriamente la estimación de resistencia, como demostró un estudio (Carrillo, 2011), donde se detectaron diferencias importantes dependiendo si se trata de Resistencia Temprana o Tardía. Lo anterior lleva a pensar en la imposibilidad de pretender con una Relación Resistencia-Madurez única estimar la Resistencia tanto a Temprana Edad como Tardía. Sobre este mismo aspecto (Abdel-Jawad, 2006) determinó que el uso de la Ecuación “Nurse-Saul” en las condiciones establecidas en ASTM C1074 subestimaré la resistencia para el curado a bajas temperaturas, y sobre estimará para temperaturas de curado mayores.

En su trabajo práctico en clima frío (Torres, 2019) procedió a comparar el efecto de considerar la ejecución de la Curva de Calibración en condiciones normalizadas de laboratorio (probetas en cámara de curado) como en condiciones de terreno (probetas a la intemperie). La comparación de las resistencias estimadas con ambas Curvas de Calibración con las resistencias reales obtenidas en testigos tomados desde el pavimento, mostraron que la utilización de los datos de resistencia de cilindros mantenidos en obra para generar la Curva de Calibración entregó resultados menos satisfactorios que al usar la Curva de Calibración en condiciones normalizadas. En esta investigación la Temperatura Datum se mantuvo fija en $T_0=0^\circ\text{C}$, lo cual sin dudas influyó fuertemente en los resultados obtenidos.

3. Desarrollo

3.1 Condiciones Climáticas

Se preparó en las instalaciones productivas de la empresa Concremag S.A. en la ciudad de Punta Arenas una cancha de prueba. Las condiciones climáticas durante los meses de la experiencia se muestran en la (Figura 5). La menor temperatura ambiental registrada correspondió a -4°C .

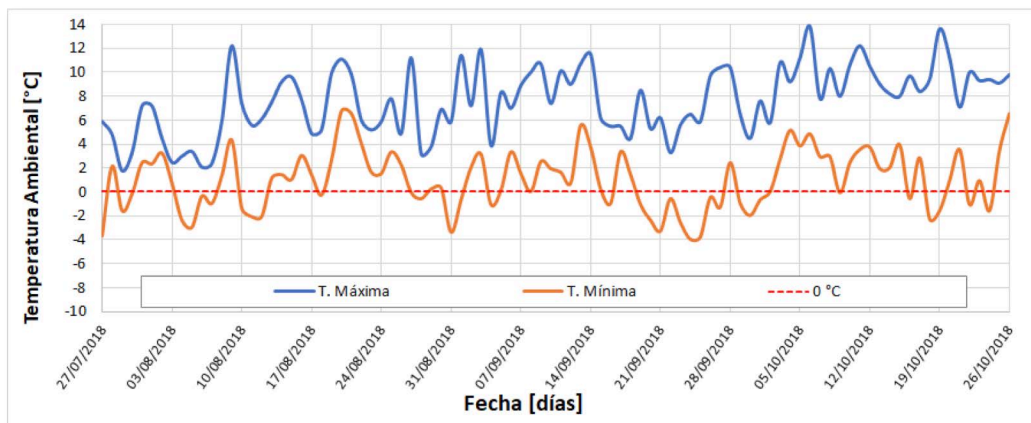


Figura 5. Condiciones ambientales durante el proceso de endurecimiento inicial del hormigón

Según la NCh170:2016 se considera tiempo frío cuando durante los tres días previos al hormigonado, se registre una temperatura media diaria menor que 5°C y la temperatura ambiente sea menor o igual que 10°C por más de 12 h, continuas o acumuladas, en un período de 24 h. La (Figura 6) muestra claramente que estas condiciones se cumplían cabalmente, incluso las 2 semanas previas a la colocación del hormigón. Lo anterior llevó a tener que calentar el agua a ser añadida al hormigón, con el objeto de contar con una temperatura de hormigón fresco al momento de la colocación mayor a 5°C.

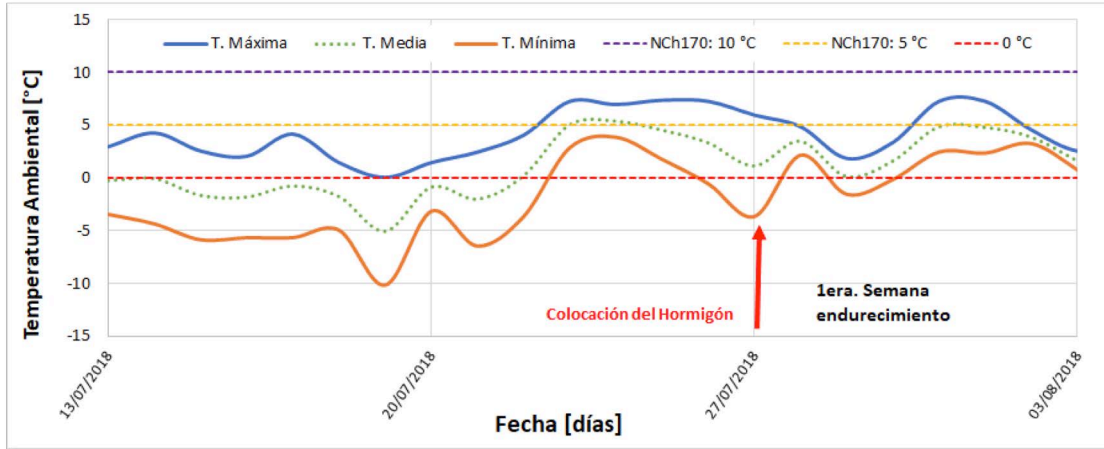


Figura 6. Análisis de Condiciones de Clima Frío según NCh170:2016

3.2 Equipamiento utilizado

El equipamiento considerado en la fabricación del hormigón y ensayos asociados fue el siguiente:

- Planta de Mezclado, con un mezclador vertical de una capacidad de 4 m³/hora.
- Camiones mixer, que transportan en forma inmediata el hormigón ya mezclado desde la planta al punto de ejecución de la prueba.
- Moldes cilíndricos de 100x300mm y prismáticos de 150x150x500mm de acero para el control de Resistencia a la Compresión y Flexotracción.
- Sensores SmartRock 2™, utilizados para la ejecución de la Curva de Calibración y luego para la medición de la temperatura en las canchas de prueba.

3.3 Materiales utilizados

Los materiales utilizados y su dosificación se presentan en la (Tabla 2):

Tabla 2. Dosificación de la mezcla de hormigón tipo HF 4.6 (80) 25/6

Material	Contenido [kg/m ³]
Cemento PCR Portland-Puzolánico-Alta-Resistencia	320
Agua Neta	144
Arena Normal 5mm	796
Grava Rodada 25mm	493
Grava Chancada 25mm	606
Ad. Plastificante Polyheed 710 al 0,55% peso-cem.	1,76
Ad. Incorporador de Aire Master Air 100 al 0,035% peso-cem.	0,112
Razón agua/cemento	0,45

3.4 Actividades en Terreno

Las actividades ejecutadas siguieron el siguiente cronograma:

Preparación de Cancha de Prueba

Las dimensiones del sector fueron de 1 paño de 3,5m de ancho y un largo de 5,0m con 12cm de espesor del pavimento. Para los bordes se utilizaron cerchas de contención.

Fabricación del hormigón

Se fabricó en la planta 1,8 m³ de hormigón.

Ensayos a Hormigón Fresco

Se ejecutaron los ensayos al Hormigón Fresco habituales, como:

- Temperatura del hormigón y ambiental.
- Docilidad mediante Cono de Abrams según NCh1019.
- Densidad del hormigón.
- Contenido de Aire.

Confección de Probetas

Se confeccionaron 2 series de probetas, según lo indicado en la NCh1017:

Serie A) Probetas cilíndricas para ejecución de la Curva de Calibración según NCh3565:2018, en condiciones de curado según NCh1017, a la edad de 1, 3, 5, 7 y 28 días.

Serie B) Probetas cilíndricas de control en condiciones de curado a la intemperie.

Adicionalmente se confeccionaron probetas prismáticas según lo indicado en la NCh1017 para ensayos a la Flexotracción, con la finalidad de verificar la resistencia de Diseño a 28 y 90 días.

Confección de Cancha de Prueba

Una vez fabricadas la totalidad de las probetas se procedió a verter el hormigón en las canchas, compactarlo con vibrador mecánico y enrasarlo. Un sector de la cancha fue cubierto con una manta de protección contra el frío consistente en un geotextil y lana mineral, y la otra se dejó libre sin protección. Todos los cilindros mantenidos en terreno también fueron protegidos del mismo modo.

Instalación de Sensores de Madurez

Se colocaron sensores tipo SmartRock2 en 2 cilindros de cada serie. En el pavimento se instalaron 4 sensores, 2 en cada sector, protegido y sin protección. Este tipo de sensores de última generación permiten ingresar como parámetro el valor de la Temperatura Datum, entregando cada 15 minutos un registro.

Ensayos a Hormigón Endurecido

A la edad de 2 días la serie A) de cilindros fueron transportados al laboratorio para su curado en condiciones normalizadas bajo agua. Los cilindros de la serie B) se mantuvieron en terreno hasta el día previo a la edad de cada ensayo. Los ensayos de compresión se ejecutaron en el laboratorio de la Univ. de Magallanes del Depto. de Ingeniería en Construcción.

Extracción de testigos

Se extrajeron testigos de 4" a distintas edades según NCh1171/1 y evaluados según NCh1171/2 y ensayados a la edad de 1, 3, 5, 7, 14, 28 y 90 días en el mismo laboratorio.

La (Figura 7) incluye una serie de fotografías mostrando el proceso completo ejecutado en terreno.



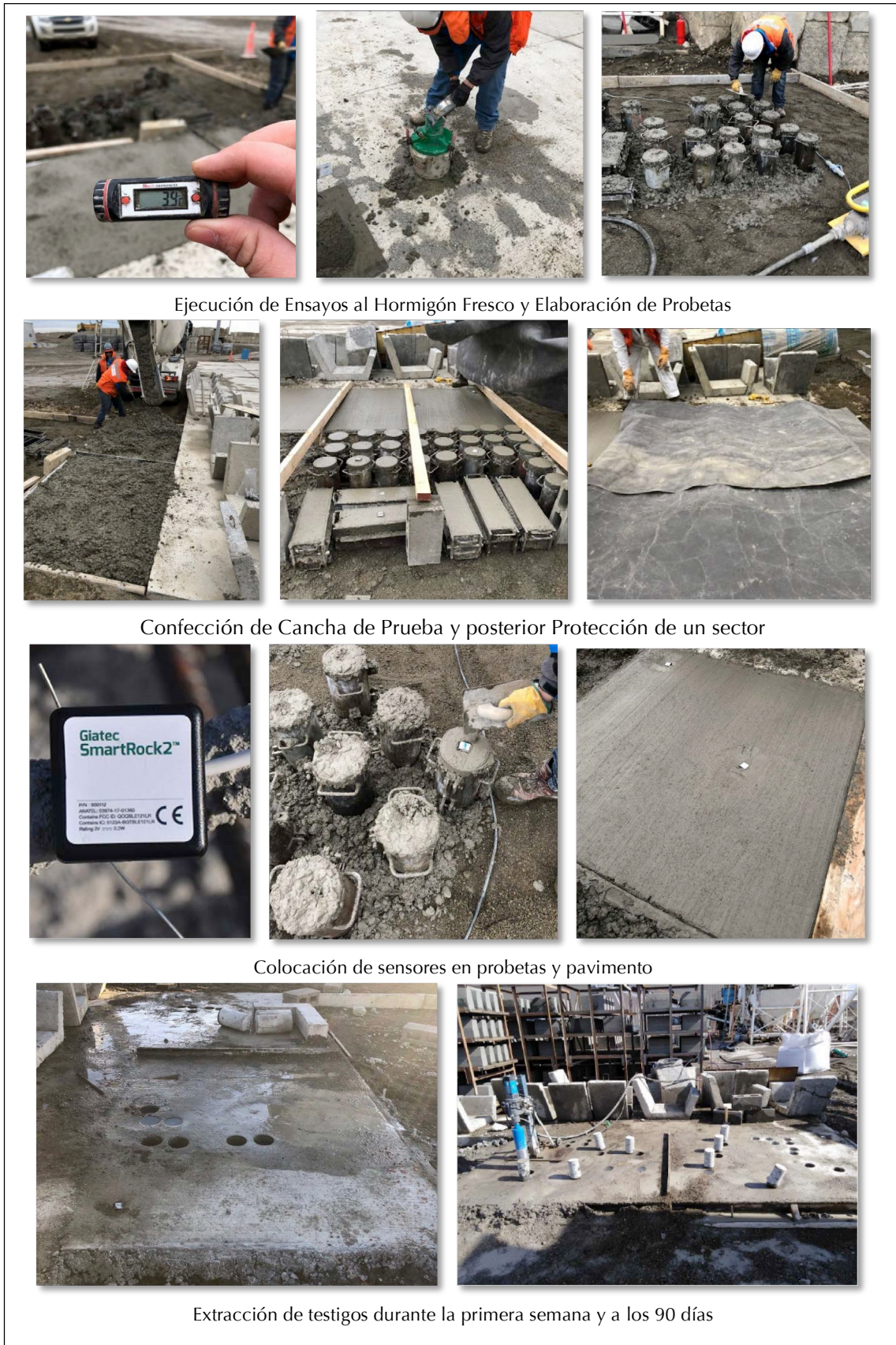


Figura 7. Proceso completo de la actividad de medición de Madurez y Estimación de Resistencia



4. Análisis de resultados

4.1 Propiedades Hormigón Fresco

Los valores obtenidos a partir del muestreo de camión se muestran en la (Tabla 3):

Tabla 3. Resultados de Propiedades Hormigón Fresco

Hormigón	Fecha Ejecución	Temperatura Ambiental	Temperatura Hormigón	Contenido de Aire	Densidad
HF4.6 (80)25/6	27.Jul.2018	3,9 °C	12,1 °C	3,8 %	2.385 kg/m ^{3*}

* Corresponde Densidad a 1 día

4.2 Medición de Temperaturas

En condiciones normalizadas de curado en agua la curva medida se muestra en la (Figura 8). En el primer día el cilindro redujo su temperatura desde 12°C y se mantuvo bajo los 5°C, a pesar de que éste fue protegido, para luego mantenerse en promedio a 20,8 °C.

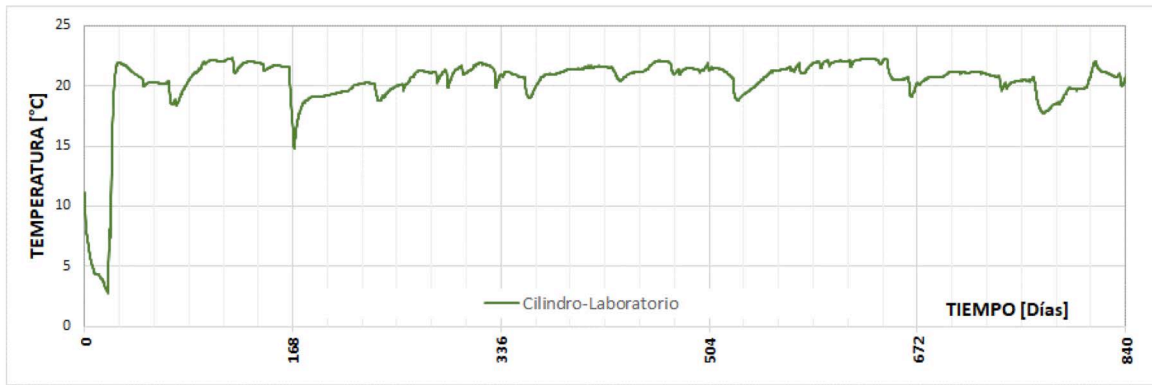


Figura 8. Desarrollo de temperaturas en cilindro curado en condiciones normalizadas

En la (Figura 9) se compara el desarrollo de temperatura experimentado por el cilindro que se mantuvo durante todo el transcurso del estudio a la intemperie, y en ambas canchas, con y sin protección. Se observa durante la primera semana un leve efecto de la protección, pero después las tres temperaturas tienden a igualarse.

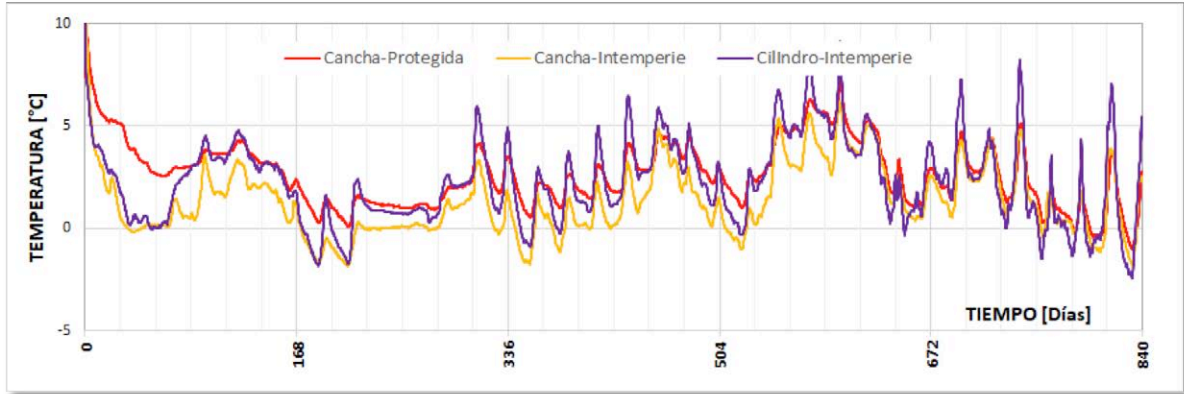


Figura 9. Desarrollo de temperaturas en cilindro en la intemperie y cancha con y sin protección

4.3 Medición de Resistencias

Los resultados de la serie de cilindros normalizados se muestran en (Tabla 4), junto a los resultados obtenidos en la serie no-normalizada, en la cancha con y sin protección, y en las viguetas de control.

Tabla 4. Resultados de Resistencia de Probetas y Testigos (MPa)

Edad [d]	Compresión				Flexotracción
	Cilindro normalizado	Cilindro intemperie	Testigo con protección	Testigo sin protección	Vigueta normalizada
1	0,25	0,30			
3	4,7	4,6			
7	26,6	18,3	18,6	17,2	3,3
14	36,7	26,8	25,4	25,5	
28	43,2	28,8	28,9*	21,3*	4,8
31	-	-	30,3	22,5	
90	48,4	35,4	43,9	39,1	5,0

4.4 Determinación de Madurez

La información recopilada fue analizada hasta la edad de 35 días con 3.360 registros. Para esta edad la Madurez determinada en cada caso, considerando un valor de Temperatura Datum $T_0=0^{\circ}\text{C}$, es la indicada en la (Tabla 5):

Tabla 5. Valores de Madurez para $T_0=0^{\circ}\text{C}$

Edad [d]	Compresión			
	Cilindro normalizado	Cilindro intemperie	Cancha con protección	Cancha sin protección
35	19.943	2.405	2.517	1.491



El efecto de considerar esta Temperatura Datum se ve reflejado en la (Figura 10). En la “Cancha-Intemperie” se observan 4 períodos de cero ganancias de Madurez, por el efecto de que la temperatura registrada en ese pavimento para esos mismos períodos fue menor a la Temperatura Datum utilizada ($T_o=0^{\circ}\text{C}$). Esta condición básica del Método de Madurez es considerada en forma automática en los sensores utilizados, dado que este valor es un Input que debe entregar el usuario.

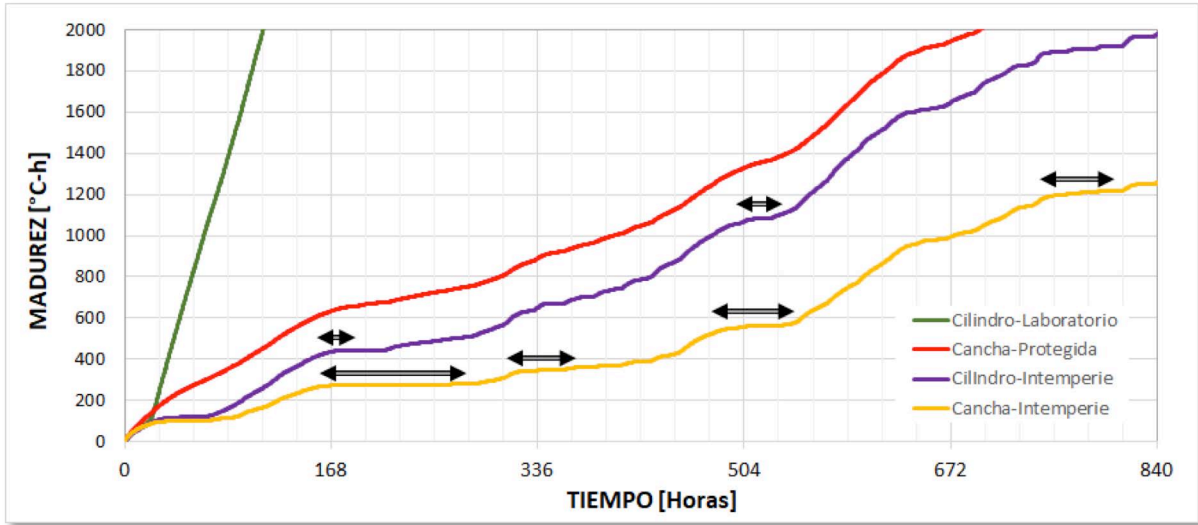


Figura 10. Desarrollo de la Madurez en las Probetas y Cancha de Prueba para $T_o=0^{\circ}\text{C}$

4.5 Determinación de la Relación Resistencia-Madurez

De acuerdo a lo indicado en la NCh3565:2018, es necesario verificar la variabilidad de los datos de resistencia obtenidos ($< 10\%$ entre pares). Para ello se utilizaron los datos a Compresión de los cilindros normalizados. Este análisis se presenta en la (Tabla 6) con la respectiva gráfica y obtención de valores A y B de la relación semi-logarítmica según (Ecuación 2), en la (Figura 11). Para ello se han considerado los valores hasta la edad de 28d. El valor del coeficiente de correlación $r^2=0,9655$ de la ecuación cumple al ser mayor que 0,95.

Tabla 6. Valores considerados para la relación Resistencia-Madurez para $T_o=0^{\circ}\text{C}$

Días	Horas	Fecha y Hora del Ensayo	Madurez [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$]	R1 [MPa]	R2 [MPa]	R Prom. [MPa]	Verificación
1*	21,0	28/07/2018 13:37	104	0,3	0,2	0,25	no cumple
3	71,4	30/07/2018 16:05	1.129	4,8	4,6	4,7	cumple
7	167,3	03/08/2018 16:00	3.178	27,1	26,0	26,6	cumple
14	336,9	10/08/2018 17:35	6.590	36,4	37,0	36,7	cumple
28	672,6	24/08/2018 17:15	13.699	42,1	44,2	43,2	cumple

* Dadas las condiciones de temperaturas menores a 0°C durante el primer día, casi no hubo desarrollo de resistencia hasta las 21h. Este dato fue eliminado de la relación



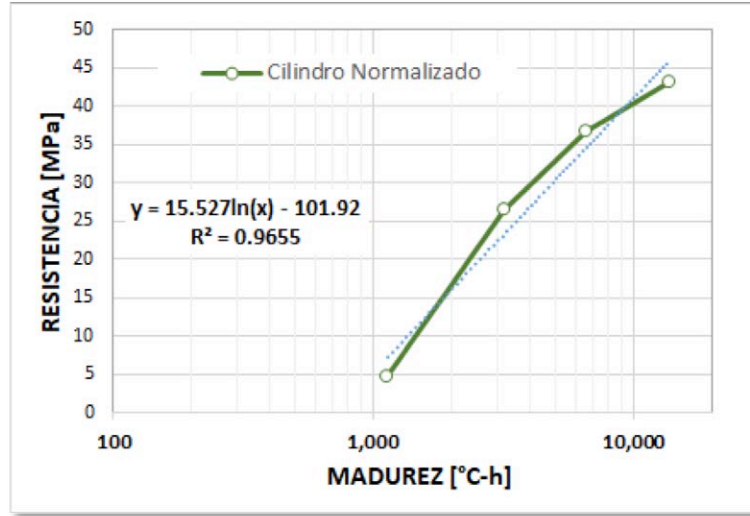


Figura 11. Relación Resistencia-Madurez del Hormigón para $T_o=0^{\circ}\text{C}$

4.6 Verificación de la Estimación de Resistencias

La comparación de los valores estimados de Resistencia mediante Madurez para $T_o=0^{\circ}\text{C}$ con los valores de Resistencia obtenidos en los cilindros a la intemperie y los testigos con y sin protección se muestran en la (Figura 12). El hecho que por importantes lapsos de tiempo el hormigón haya tenido temperaturas inferiores a 0°C , significó que no hubo aumento de la Resistencia estimada.

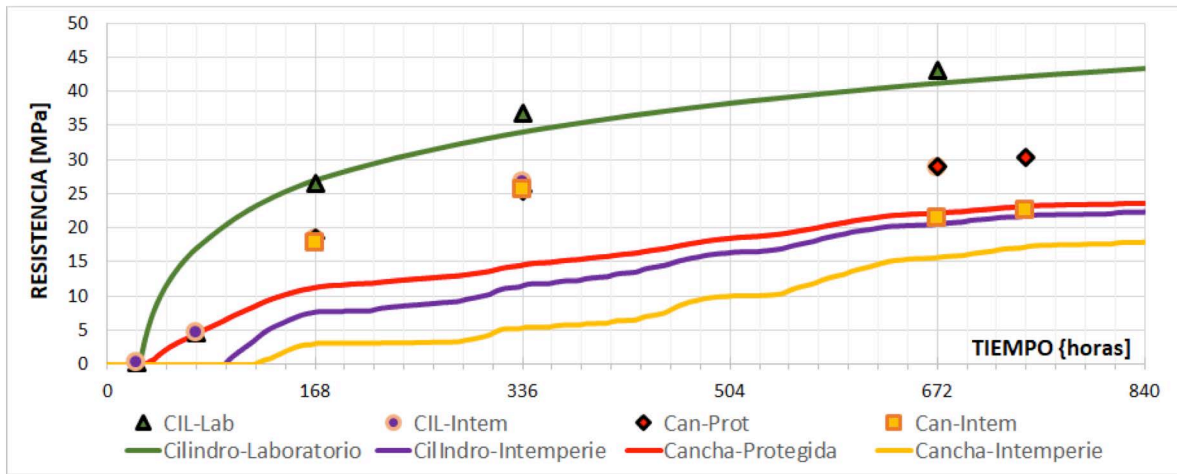


Figura 12. Desarrollo de Resistencia Estimada en comparación con Resistencia Real de testigos para $T_o=0^{\circ}\text{C}$

Queda de manifiesto que la estimación de la Resistencia utilizando un $T_o=0^{\circ}\text{C}$ no sería válida para clima frío, dado que todos los testigos sí mostraron una ganancia de resistencia, que para el caso del cilindro y la cancha protegida alcanzó a valores cercano a 30 MPa a los 28 días (672 horas), ganancia que la estimación no consideró. O sea, el hormigón es capaz de continuar con la hidratación del cemento y generar resistencia, a pesar de que su temperatura interna sea menor a 0°C . La reacción del cemento es una reacción exotérmica que aporta calor constante.



4.7 Efecto de variar la Temperatura Datum

Para profundizar en este tema se procedió a variar el valor de T_o entre 0° a -10°C . Este efecto se visualiza en la (Figura 13), donde se observa que las curvas de estimación de Resistencia del cilindro y de la cancha con y sin protección, para $T_o=-10^\circ\text{C}$, se ven aumentadas tendiendo el valor de la Resistencia a igualarse entre ellas. La mezcla de hormigón es la misma, y al desaparecer el efecto de las temperaturas negativas las 3 curvas muestran valores estimados de resistencia similares, atribuibles al hecho que la historia de temperaturas entre ellas fue muy similar.

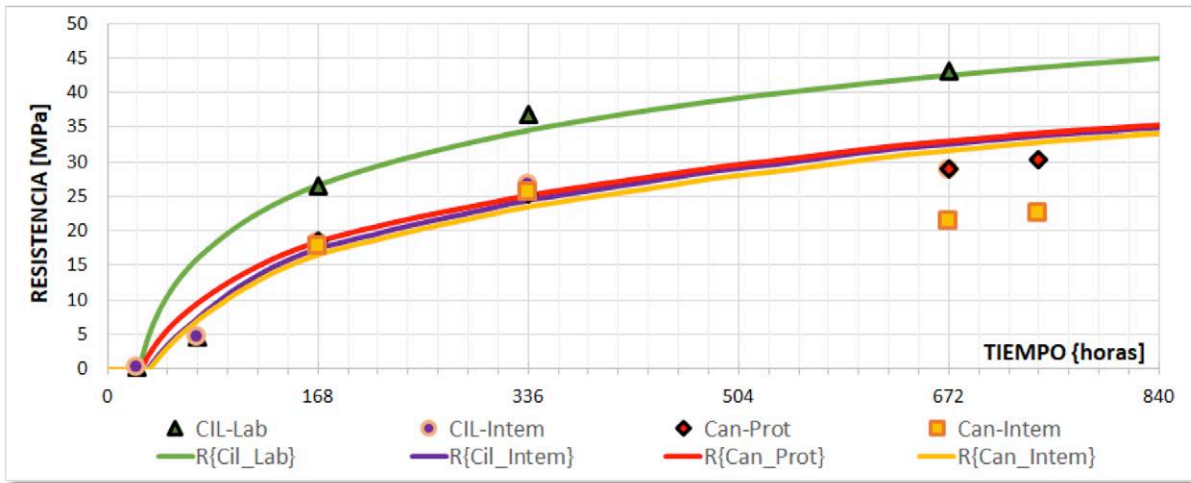


Figura 13. Desarrollo de Resistencia Estimada en comparación con Resistencia Real de testigos para $T_o=-10^\circ\text{C}$

La consideración de once valores de T_o , desde 0°C a -10°C , permitió simular mediante el desarrollo de un “Modelo de Temperatura Datum” el efecto que éste produce sobre la Estimación de Resistencia. Al depender la Madurez de T_o , cualquier elección de un valor de T_o hará variar la curva de Madurez, los factores A y B de la relación Resistencia-Madurez, y del mismo modo la curva de Madurez en obra. Lo anterior se grafica en las (Figura 14) y (Figura 15), considerando los datos de la Curva de Calibración del Cilindro Normalizado en función de cada T_o , y la Temperatura y Resistencia Real de las condiciones “Cancha-Protegida” y “Cancha-Intemperie”.

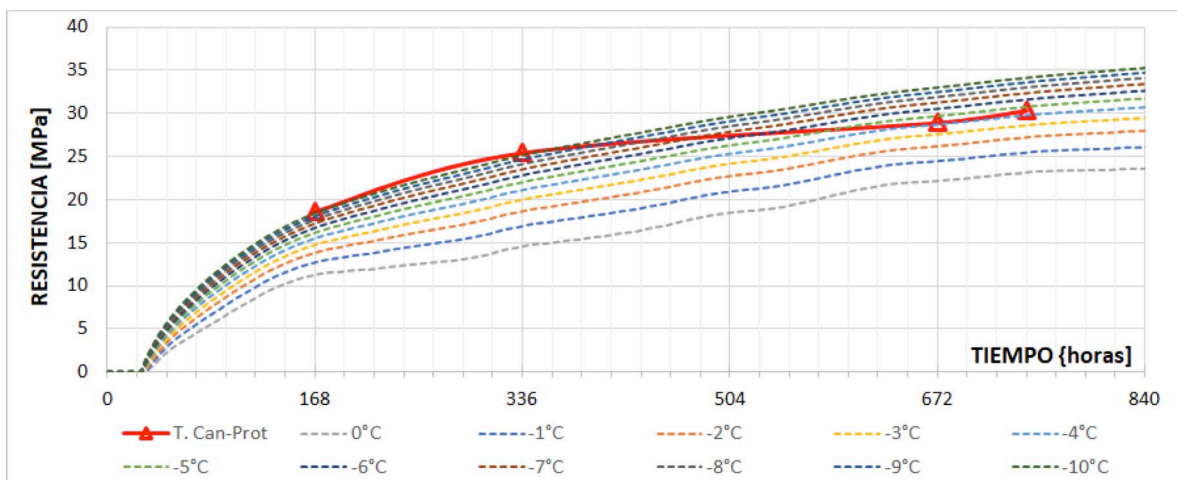


Figura 14. Desarrollo de Resistencia Estimada para distintos T_o en comparación con Resistencia Real de testigos de Cancha-Protegida

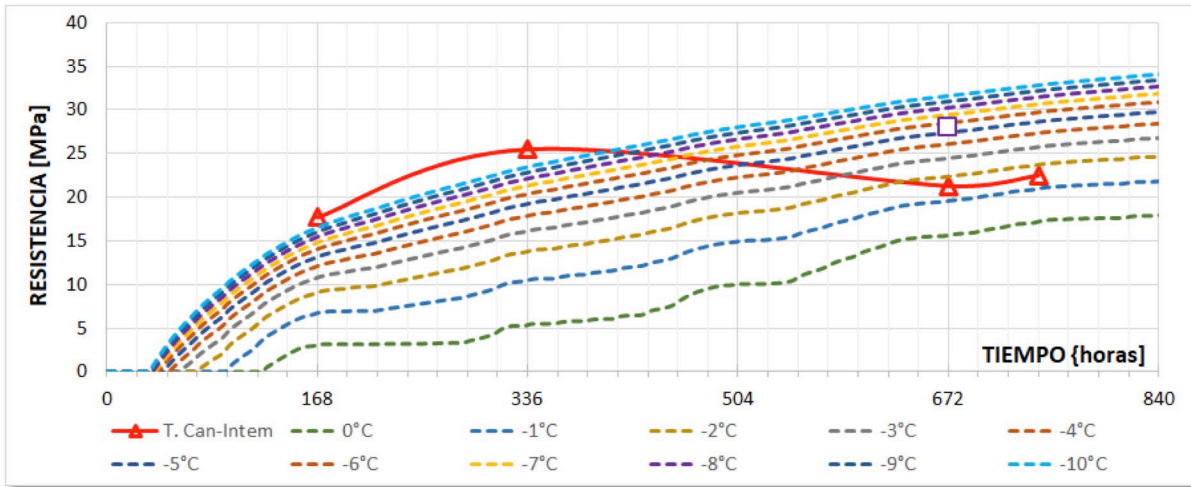


Figura 15. Desarrollo de Resistencia Estimada para distintos T_o en comparación con Resistencia Real de testigos de Cancha-Intemperie

A medida que T_o aumenta, el efecto de las temperaturas inferiores a cada T_o disminuye. La menor temperatura registrada tanto en el cilindro como en las canchas correspondió a $-2,5^{\circ}\text{C}$, lo cual significa que con $T_o = -3^{\circ}\text{C}$ la ganancia constante de resistencia mediante el Método de Madurez estaría contemplada adecuadamente en la Metodología. A partir de ambas Figuras se desprende que, si el objetivo es asegurar que la Resistencia Estimada se acerque a la Resistencia Real, debiese utilizarse un valor de T_o variable que dependerá de la edad de interés.

Lo anterior se visualiza de mejor forma al graficar para distintas edades la relación entre la Resistencia Estimada y la Real, definido como Índice de Resistencia $IR = R_{Est}/R_{Real}$. La (Figura 16) muestra el caso de la Cancha Protegida en función de la Temperatura Datum. Siendo el objetivo que el valor de IR se acerque a 1,0, se observa que para la edad de 7 o 14 días el valor debiera ser $T_o = -10^{\circ}\text{C}$. En cambio, para la edad de 28 o 31 días, el valor T_o se ubica cerca de -5°C .

Se desprende de este análisis que considerar el valor $T_o = 0^{\circ}\text{C}$ en clima frío subestimaría sin dudas el valor del Índice de Resistencia IR .

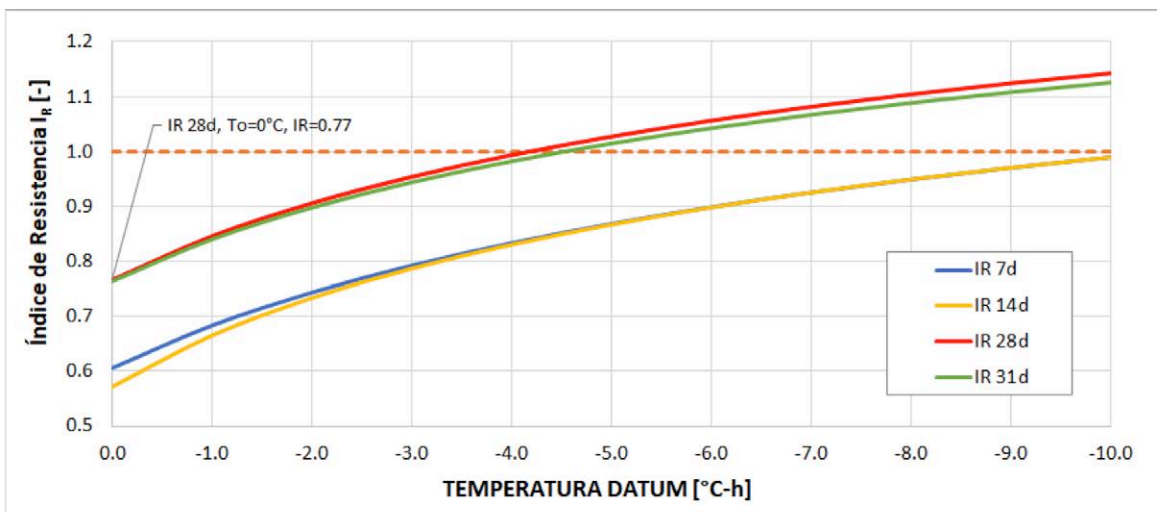


Figura 16. Índice de Resistencia en función de la Temperatura Datum



5. Conclusiones

La investigación realizada en terreno permitió contar con suficientes datos de terreno tomados en un período de temperaturas bajas ocurrido en Punta Arenas, Chile. El análisis de acuerdo con la normativa NCh3565:2018, la cual considera asignar un valor de Temperatura Datum $T_o=0^{\circ}\text{C}$ para aplicar el Método de Madurez, demostró que no es válida para ambientes con clima frío.

Del estudio se puede concluir que el uso de $T_o = 0^{\circ}\text{C}$ en climas fríos generará una subestimación importante de la Resistencia del Hormigón, cercana a un 40% para resistencias de hasta 7 días, y de un 20% para resistencias cercanas a los 28 días. De lo anterior se desprende que es necesario diferenciar entre la Estimación de Resistencia a Temprana Edad o a Edad Tardía. Para los componentes y la composición utilizada en esta experiencia se recomienda utilizar un valor de:

- $T_o = -5^{\circ}\text{C}$ si el interés se centra en Resistencias Tardías a 28 días
- $T_o = -10^{\circ}\text{C}$ si el interés se centra en Resistencias a Temprana Edad hasta 7 días.

Se recomienda ejecutar nuevos estudios de hormigones que sean curados en condiciones de clima frío, a modo de confirmar las recomendaciones indicadas. De igual modo sería de interés estudiar si en climas templados ocurre un efecto diferenciador entre Resistencias a Temprana Edad y Tardías. En ambos casos el Modelo desarrollado permitiría realizar los análisis correspondientes.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Concremag SA por facilitar sus dependencias para la ejecución de la experiencia práctica en sus instalaciones, a la empresa BDL Soluciones Estructurales por el soporte técnico y disposición en el uso de los sensores de madurez SmartRock2, y a la empresa de aditivos BASF, por la realización de ensayos de calorimetría al cemento.

7. Referencias

- Abdel-Jawad, Y. (2006).** The maturity method: Modifications to improve estimation of concrete strength at later ages, *Construction and Building Materials* 20, p 893–900.
- ASTM C1074 (1989).** Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, American Society for Testing and Materials.
- Carino, N.J.; Lew, H.S. (2001).** The Maturity Method: from Theory to Application, *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*, Washington, DC, USA.
- Carrillo, E. (2011).** Evaluación del Efecto de la Temperatura y del Tiempo de Fraguado en la Resistencia estimada del Hormigón mediante Madurez, Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Covarrubias, J.P. (1988).** Análisis y recomendaciones de hormigonado en climas rigurosos, *Revista Ingeniería de la Construcción* N°5, Chile.
- Ebensperger, L. (2018).** Comité de Norma prNCh3565, Sesión 14, Acta N°3493-0534-18.
- Ebensperger, L. (2019).** Estimación de la Resistencia del Hormigón Proyectado mediante el Uso de Sensores de Madurez, Informe Final Proyecto COTE, Corfo (uso reservado).
- Lee, C.H.; Hover, K.C. (2015).** Influence of Datum Temperature and Activation Energy on Maturity Strength Predictions, *ACI Materials Journal*, Nov-Dec 2015.
- Lee, C.H.; Hover, K.C. (2016).** Compatible Datum Temperature and Activation Energy for Concrete Maturity, *ACI Materials Journal*, Mar-Apr 2016.
- Lee, C.H. (2018).** Personal communication through ResearchGate regarding previous papers.
- INN, NCh170 (2016).** Hormigón – Requisitos Generales, Instituto Nacional de Normalización.
- INN, NCh3565 (2018).** Hormigón – Estimación de la Resistencia Mecánica - Método de la Madurez, Instituto Nacional de Normalización.
- Neville, A.M. (2012).** *Properties of Concrete*, 5th Edition, Prentice Hall.
- Torres, R. (2019).** Evaluación del Método de Madurez para estimar la resistencia del Hormigón: Aplicación en Clima Frío, Trabajo de Investigación para optar al Título de Ingeniero Constructor, Facultad de Ingeniería, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile.
- Videla, C.; Covarrubias, J.P.; Pascual, J.M. (1995).** Comportamiento de hormigones fabricados con distintas clases de cemento ante Climas Extremos, *Revista Ingeniería de la Construcción* N°14, Chile.
- Videla, C.; Parada, O. (1988).** Predicción de la Resistencia Potencial del Hormigón, *Revista Ingeniería de la Construcción* N°5, Chile.
- Xu, Q.; Hu, J.; Ruiz, M.; Wang, K.; Ge, Z. (2010).** Isothermal calorimetry tests and modelling of cement paste parameters, *Thermochimica Acta* 499, p. 91-99.

