

Análisis y recomendaciones de hormigonado en climas rigurosos

Juan Pablo Covarrubias T.

Profesor. Departamento Ingeniería de Construcción. Pontificia Universidad Católica de Chile. Casilla 6177, Santiago, Chile.

RESUMEN: las variaciones de temperatura del hormigón hacen variar las características del hormigón fresco y endurecido. La tecnología del hormigón basa todas sus pautas generales para temperaturas del hormigón de 20 °C. Cuando la temperatura del hormigón es más alta o más baja, se empiezan a producir variaciones en su comportamiento. Este trabajo analiza la razón de estos cambios de comportamiento para temperaturas altas y bajas del hormigón. Al tener la explicación de los fenómenos, se pueden tomar decisiones lógicas sobre la forma de actuar en faena ante estos problemas. Se discuten, también, soluciones para enfrentar algunos problemas que se pueden presentar en faena.

I. INTRODUCCION

El presente trabajo sobre hormigonado en climas rigurosos, incluye hormigón en tiempo frío y en tiempo caluroso. El tema es muy amplio, el presente trabajo presenta principalmente el efecto de la temperatura en el material hormigón.

Este trabajo discute la acción de la temperatura en las propiedades del hormigón fresco y en su endurecimiento. En base a este análisis se entregan recomendaciones para el hormigonado en climas rigurosos.

Primeramente, se verá lo que se entiende por tiempo frío o caluroso. Luego, se analizará el efecto de la temperatura en el hormigón. Finalmente, se darán recomendaciones para el hormigonado en tiempo caluroso y tiempo frío.

II. DEFINICIONES DE TIEMPO FRIO Y CALUROSO

2.1 Tiempo frío

De acuerdo a la norma chilena NCh 170 (1), tiempo frío se define como: "Cuando a los 7 días previos al hormigonado haya uno o más días con temperatura media inferior 5°C".

El ACI (2) define tiempo frío como: "Cuando la temperatura media diaria por más de 3 días sucesivos es menor de 5°C. Cuando la temperatura sube de 10°C por más de medio día ya no se considera

hormigonado en tiempo de frío"; (esto significa que hay que tener otros 3 días sucesivos con temperatura media diaria menor de 5°C).

El autor considera más razonable la definición de tiempo frío de ACI, cuya justificación se desprende del análisis del presente trabajo.

2.2 Tiempo caluroso

De acuerdo a la norma chilena NCh 170 (1), se considera tiempo caluroso: "cuando las condiciones ambientales induzcan una evaporación igual o mayor de 1 kg. de agua por m² de superficie por hora".

El ACI (2) define tiempo caluroso como: "Cualquier combinación de alta temperatura del aire, baja humedad relativa, y velocidad del viento que tiendan a afectar la calidad del hormigón fresco o endurecido, o que de alguna manera resulten en propiedades anormales".

2.3 Recomendaciones de norma NCh 170

Las definiciones anteriores llevan asociadas en la norma NCh 170, condiciones de temperatura mínima y máxima del hormigón fresco. Estas recomendaciones son similares a las de ACI. El ACI no da recomendaciones de temperatura máxima, sino que dice que para temperaturas del hormigón entre 24 °C y 38 °C existe una temperatura óptima que debe determinarse en cada faena.

Para tiempo frío se recomiendan las temperaturas indicadas en la Tabla N°1.

Tabla N°1 Temperaturas recomendadas para tiempo frío

Espesor Elemento (cm)	Temperatura Mínima (°C)
menor que 30	13
entre 30 - 80	10
mayor que 80	5

Según norma NCh 170, para tiempo seco, caluroso o ambiente con viento, la temperatura del hormigón en el momento de ser colocado debe ser menor que 30 °C en elementos corrientes, y menor que 16 °C en elementos cuya menor dimensión exceda de 0,80 m.

III. ANALISIS DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL HORMIGON

Los requisitos de temperatura indicados en la norma NCh 170 y el ACI tienen una razón y se explican a través de tres efectos importantes que tiene la temperatura en el hormigón:

- Variación de la cantidad de agua de amasado en el hormigón
- Madurez del hormigón
- Variación de la resistencia del hormigón

3.1 Variación de la cantidad de agua de amasado en el hormigón

La Figura N°1 muestra como varía la necesidad de agua por metro cúbico de hormigón y el cono de Abrahm obtenido con una dosis constante de agua, para diferentes temperaturas del hormigón (2).

Como se observa de estos gráficos, a mayor temperatura mayor es la cantidad de agua necesaria para obtener igual trabajabilidad medida con cono abrahms. Esto hace variar la razón agua-cemento y por lo tanto la resistencia. En la Figura N°1 se aprecia que hasta una temperatura del hormigón de 20 °C la curva se podría considerar lineal, y que a 30 °C la tangente a la curva comienza a crecer rápidamente. Este sería el límite máximo de temperatura del hormigón para tiempo caluroso. Lo recomendado sería 20 °C, por problemas de sensibilidad y homogeneidad en la resistencia de los hormigones. Sobre 20 °C las variaciones de necesidad de agua con temperatura aumentan, introduciendo variaciones más importantes en la razón agua cemento, y por lo tanto en la resistencia.

Para temperaturas bajas del hormigón (menores a 10 °C), se observa de la Figura N°1, que la trabajabilidad del hormigón tiene una alta variación dependiendo de la temperatura. Esto exige un muy buen control de la razón agua-cemento para evitar variaciones en la resistencia. También se observa que a bajas temperaturas la cantidad de agua necesaria es menor, lo que produce un alza en la resistencia.

Lo visto explica, en parte, por que los hormigones fabricados en invierno tienen en promedio una mayor resistencia que los fabricados en verano.

3.2 Madurez del hormigón

Debido a que la resistencia del hormigón es dependiente de la edad y de la temperatura, se puede decir que la resistencia es función de la sumatoria de los intervalos de tiempo multiplicados por la temperatura del hormigón ms 10 °C. Esta sumatoria es la madurez del hormigón. Hormigones con igual

madurez tienen igual resistencia. La temperatura se considera con el origen en -10 °C. Esto último porque experimentalmente se ha determinado que el hormigón muestra pequeños incrementos de resistencia entre -12 °C y -10 °C (3). A menores temperaturas no se aprecia un aumento de resistencia.

Por otra parte, es importante no exponer al hormigón a estas temperaturas mientras se encuentre saturado de agua, porque un congelamiento del agua en el hormigón lo dañaría, si éste no tiene una resistencia mínima.

La ecuación de madurez a largo plazo es:

$$M = t \times (T + 10) \quad [1]$$

siendo : M = madurez del hormigón

T = temperatura del hormigón (°C)

t = tiempo de mantención de la temperatura T.

Es importante establecer la relación resistencia-madurez para cada hormigón específico. Esto se grafica en la figura N°2 (3). La madurez se podría asumir lineal a largo plazo. A corto plazo la relación no es lineal y existen otras ecuaciones de madurez como la de Sadgrove y Voellmy (4), que definen el incremento de madurez sobre 20 °C como:

$$\text{Sadgrove} \quad R_s = ((T + 16) / 36)^2 \quad [2]$$

$$\text{Voellmy} \quad R_v = ((T + 28) / 48)^2 \quad [3]$$

donde Rs: Razón de madurez comparado con la a 20°C según Sadgrove.

Rv: Razón de madurez comparado con la a 20 °C según Voellmy.

T: Temperatura del hormigón (°C)

A mayor temperatura, la resistencia es mayor a corto plazo y menor a largo plazo, aunque la madurez sea igual. Esto hace necesario contar con ecuaciones de madurez para diferentes temperaturas y diferentes edades del hormigón.

Este concepto de madurez es muy útil, pero tiene problemas a temperaturas extremas, como veremos en el punto siguiente.

3.3 Variación en la resistencia del hormigón

En las Figuras N° 4 y 5 (3) se muestra el efecto de la temperatura del hormigón en su resistencia a largo plazo.

En la Figura N°3 se observa el efecto de la temperatura del hormigón durante las primeras dos horas después de colocado el hormigón en el desarrollo de la resistencia (El hormigón se mantuvo a 21 °C todo el resto del tiempo). La Figura N°4 muestra la resistencia de un hormigón curado durante todo el tiempo a la temperatura de curado indicada. Se observa que una mayor temperatura es beneficiosa a temprana edad (mayor madurez) pero perjudicial a 28 días (también mayor madurez). La Figura N°5 muestra el efecto de mantener el hormigón a la temperatura indicada y después de 28 días mantener todos los hormigones a 23 °C. Aquí de nuevo se observa un beneficio a largo plazo al tener bajas temperaturas en el inicio de la vida del hormigón.

La explicación de este fenómeno es que un aumento de la temperatura acelera la reacción química de hidratación del cemento y es beneficiosa para la resistencia a temprana edad del hormigón, pero es perjudicial para la resistencia desde aproximadamente 7 días de edad en adelante. Aparentemente esta hidratación más rápida forma productos de peor estructura física, probablemente más porosos, de forma que un gran porcentaje de los poros van a quedar siempre huecos (3).

La regla de la razón gel-espacio indica que esto producirá una resistencia menor que una estructura menos porosa. Verbech y Helmuth (5) agregan que a rápida velocidad de hidratación inicial, a mayores temperaturas se retarda la hidratación posterior y produce una distribución no uniforme de los productos de hidratación en la pasta de cemento. Esto a su vez genera puntos de mayor porosidad y por lo tanto de menor resistencia.

Este punto también explica el aumento de resistencia en los hormigones fabricados en invierno y limita las temperaturas máximas del hormigón fresco.

La influencia de la temperatura inicial del hormigón en su resistencia potencial a larga edad dificulta la aplicación del concepto de madurez a temperaturas muy diferentes de 20 °C y/o larga edad, y hace necesario estudiar estos casos en forma especial.

Una vez conocidos los efectos de la temperatura en la trabajabilidad y resistencia, se puede hablar de recomendaciones para hormigonado en tiempo caluroso y tiempo frío.

IV. RECOMENDACIONES PARA HORMIGONADO EN TIEMPO CALUROSO

Como se desprende de los puntos anteriores es indispensable colocar el hormigón a la menor temperatura posible, y mantenerlo a baja temperatura durante su primer tiempo de vida. Hay que tener en cuenta que la reacción química del cemento puede aumentar la temperatura del hormigón hasta en 30 °C. Con las temperaturas que tenemos en Chile no sería necesario el uso de hielo en el agua, aunque podría ser conveniente por el aumento de resistencia. Podría ser necesario en caso de hormigón en masa. Lo recomendable es bajar la temperatura de los áridos. Esto se logra mojándolos, aprovechando la evaporación del agua para disminuir su temperatura.

Lo que sí es importante es el uso de aditivos plastificantes y retardadores. La necesidad de uso de plastificantes se desprende de la mayor necesidad de agua a mayor temperatura del hormigón, como se aprecia en la Figura N°1. El plastificante mejora en forma importante este problema, incluso su efecto es mayor a mayor temperatura del hormigón, puesto que la necesidad de agua para variar asentamientos de cono bajos es mayor que para variar asentamientos de cono altos, como se observa en la Tabla N°2. El retardador se usa por dos razones. La primera es aumentar el tiempo para poder colocar el hormigón, puesto que sin aditivos y a mayor temperatura este tiempo se acorta. La segunda es hacer que la reacción química sea más lenta y esto es comparable con tener una temperatura menor en la primera edad del hormigón. El retardador por lo tanto mejora la estructura de los productos de hidratación y por ende la resistencia del hormigón.

Otro aspecto importante es el curado. El hormigón necesita agua para su hidratación y esta se puede proveer de dos maneras: evitando la evaporación del agua de amasado o manteniéndolo mojado por riego o diques de agua. También es muy importante evitar el resecamiento superficial que se puede producir en tiempo caluroso, especialmente cuando hay viento. Por experiencia del autor, una velocidad de viento superior a 10 km/hr en verano, causa un resecamiento superficial muy severo. Este resecamiento produce a su vez grietas de retracción plástica si el hormigón está fresco y grietas de retracción hidráulica superficiales si el hormigón está endurecido.

Otro aspecto a considerar, es evitar gradientes térmicos en el elemento de hormigón. Esto hace necesario o enfriar el hormigón o protegerlo superficialmente para mantener un gradiente térmico aceptable, que normalmente se considera de 20 °C (6). Hay un dicho que dice: "si no se puede mantener el hormigón frío, manténgalo caliente". Normalmente las estructuras tienen moldaje, que ayuda a proteger al hormigón.

El problema más serio se presenta en losas y pavimentos. En estos casos hay que cuidar en extremo este problema de resecamiento superficial. Es importante proteger antes que la superficie se seque.

Si se usa un compuesto de curado es importante verificar que éste sea efectivo cuando se coloca en la superficie superior de hormigón fresco. Ensayos efectuados sobre compuestos de curado muestran que

algunos forman una membrana protectora al ser colocados en estas condiciones, mientras que otros no forman una membrana protectora porque en contacto con el agua quedan porosos. Este problema no se detecta con el ensayo normal para membranas de curado.

Otro problema de hormigonar en tiempo caluroso es la temperatura máxima que alcance el hormigón. El calor de hidratación del cemento también influye en este problema. Mientras mayor sea esta temperatura mayor será el acortamiento del elemento al enfriarse. Por esta razón se recomienda, por ejemplo, utilizar compuestos de curado pigmentados con color blanco, para evitar un calentamiento mayor producido por los rayos solares.

V. RECOMENDACIONES PARA HORMIGONADO EN TIEMPO FRIO

El hormigonado a bajas temperaturas tiene otros problemas. En este caso hay que elevar la temperatura del hormigón. La razón de esto es acelerar la reacción química, que a estas temperaturas es demasiado lenta, y evitar que el agua dentro del hormigón se congele.

De las Figuras N° 2, 3 y 5 se desprende que la temperatura del hormigón con la que se obtiene la mayor resistencia a largo plazo es entre 4 y 13 °C. Incluso una temperatura de -4 °C es mejor que una de 23 °C. Lo importante es evitar a toda costa temperaturas que congelen el agua en el hormigón, hasta que éste tenga una resistencia que soporte las tensiones producidas por el agua al transformarse en hielo, aumentando su volumen. Esta resistencia mínima a compresión indicada por ACI (2) es de 35 kgf/cm², por la Cement & Concrete Association (7) es de 20 kgf/cm², por BS 8110 (8) es de 50 kgf/cm² y por Sadgrove (9) es de 20 kgf/cm², estas tres últimas inglesas. Esto significa que se debe evitar el congelamiento del hormigón en su primera edad, hasta que el proceso de hidratación consuma el agua y el hormigón deje de estar saturado. En esta primera edad se debe evitar el seguir saturando el hormigón con agua, por lo tanto el curado debe ser evitando la evaporación del agua de amasado y no regando. Una vez que el hormigón logra la resistencia mínima indicada anteriormente no importa que el hormigón se sature.

La resistencia del hormigón se puede determinar por medio de la ecuación de madurez, midiendo la temperatura en la superficie del hormigón.

Para lograr una mayor temperatura en el hormigón es importante que las superficies en contacto con el hormigón no se encuentren congeladas. Por esta razón ACI (2) propone que la temperatura mínima de estas superficies de contacto sea 2 °C.

Otro problema importante es establecer la edad a la que el hormigón tiene una resistencia suficiente para soportar cargas. Esta edad también se puede establecer con la ecuación de madurez. Como el

proceso de endurecimiento es más lento a bajas temperaturas, esta edad será mayor que a temperaturas normales.

La temperatura del hormigón no debería descender de 5 °C mientras se encuentre saturado. La Tabla N°1 indica la temperatura mínima del hormigón recién colocado para lograr esto. Estos valores son para hormigón no protegido posteriormente. Es el parecer del autor, que si el hormigón se aísla térmicamente durante su primera edad, hasta que alcance la resistencia mínima indicada anteriormente, su temperatura de colocación podría ser de hasta 5 °C para cualquier espesor, siempre que la aislación térmica sea suficiente para evitar que la temperatura descienda de 5 °C.

La temperatura del hormigón debe ser lo más cercana a las temperaturas mínimas indicadas y no deben ser más de 6 °C mayor que las temperaturas mínimas recomendadas. Una temperatura muy alta del hormigón fresco no da una mayor protección en el tiempo, puesto que la pérdida de calor es mayor mientras mayor sea el diferencial de temperatura entre el hormigón y el ambiente. Otros problemas de temperaturas altas son: mayor necesidad de agua de amasado, aumento en variaciones de cono con las consecuentes variaciones de resistencia, aumento de retracción térmica, y la evaporación rápida de agua puede producir grietas de retracción hidráulica.

La forma más sencilla de calentar el hormigón es calentando el agua de amasado, puesto que su calor específico es entre cuatro y cinco veces el de los áridos y cemento. Cuando los áridos no tienen hielo o no están en zonas congeladas, el calentar el agua puede ser suficiente. El agua se puede calentar con una batería de califonts en serie o en un estanque con calor extemo. El cemento no debe estar en contacto con agua o áridos a más de 60 °C (2).

Es difícil calentar los áridos en forma homogénea. La mejor forma de calentarlos es por medio de cañerías de vapor. El calentarlos con chorro de vapor produce puntos de mayor temperatura y humedad, haciendo variar el contenido de humedad en diferentes zonas del acopio. Por estas razones el calentamiento se debe hacer un tiempo antes de usar el árido para permitir una homogenización de la temperatura y la humedad. El acopio debe protegerse superficialmente para evitar pérdidas de calor después del calentamiento.

La forma de reducir el período mínimo de curado y el período de endurecimiento es mediante el aumento de la dosis de cemento en el hormigón, el uso de cemento de alta resistencia o usando un acelerador de endurecimiento. También la reducción de la razón agua-cemento con un plastificante ayuda en este proceso.

Es importante también cuando el hormigón va a estar sometido a ciclos de hielo y deshielo, el uso de un aditivo incorporador de aire.

VI. CONCLUSIONES

Como se ha visto el problema de hormigonado en tiempo caluroso o tiempo frío tiene su explicación en los efectos de la temperatura en la trabajabilidad del hormigón y en la velocidad de la reacción química de hidratación del cemento.

El problema se resuelve con un buen manejo de la faena, que contemple un buen control de los factores descritos.

REFERENCIAS

1. Instituto Nacional de Normalización, NCh. 170 Of. 85, Santiago, 1985.
2. ACI Manual Of Concrete Practice, 1985, Pan 2. USA., 1985.
3. A. M. Neville, "Propeniies of concrete", Pitman Books Ltd., Londres, 1983.
4. Cement & Concrete Association, TDH 4436, TDH 4440, Advanced Concrete Technology Course, Inglaterra, 1980.
5. G. J. Verbeck y R. A. Helmuth, "Structures and physical properties of cement paste", Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement; Tokyo, 1968; Pan III, pp.1-32.
6. Cement & Concrete Association, LS 3604, Advanced Concrete Technology Course, Inglaterra, 1980.
7. Pink, V.A., "Winter Concreting", Cement & Concrete Association, Londres, 1967.
8. British Standard, BS 8110: Pan 1: 1985, Structural Use of Concrete, Code of practice for design and construction, Inglaterra, 1985.
9. Sadgrove B.M., "Freezing of Concrete at an Early Age", Cement & Concrete Association, Technical Repon 42.505, Inglaterra, 1975.

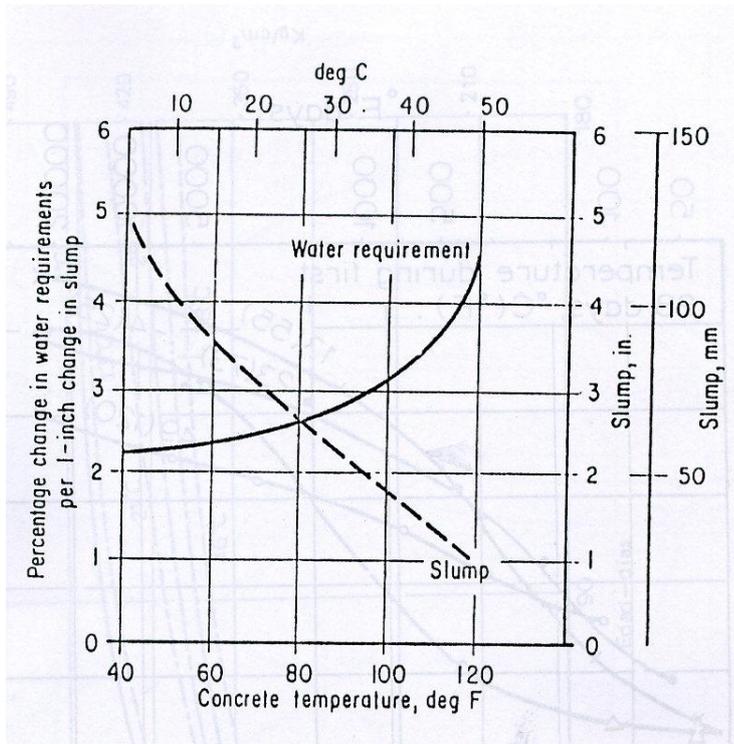


Figura 1 Efecto de temperatura con asentamiento de cono y necesidad de agua del hormigón (2)

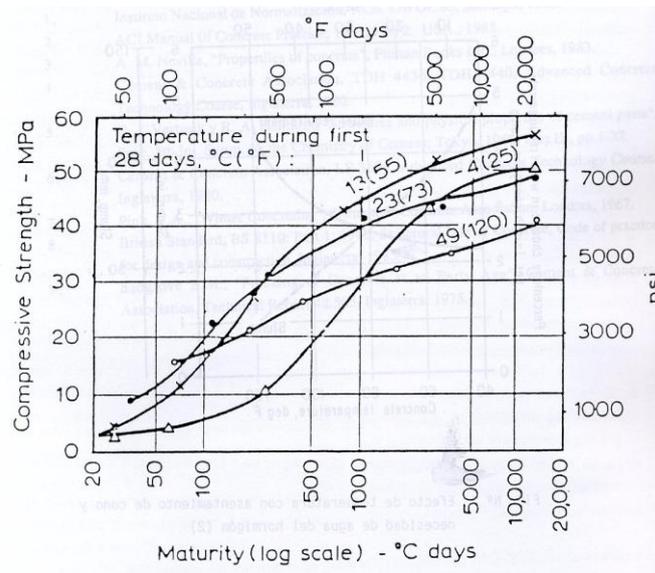


Figura 2 Influencia de la temperatura en madurez del hormigón (3)

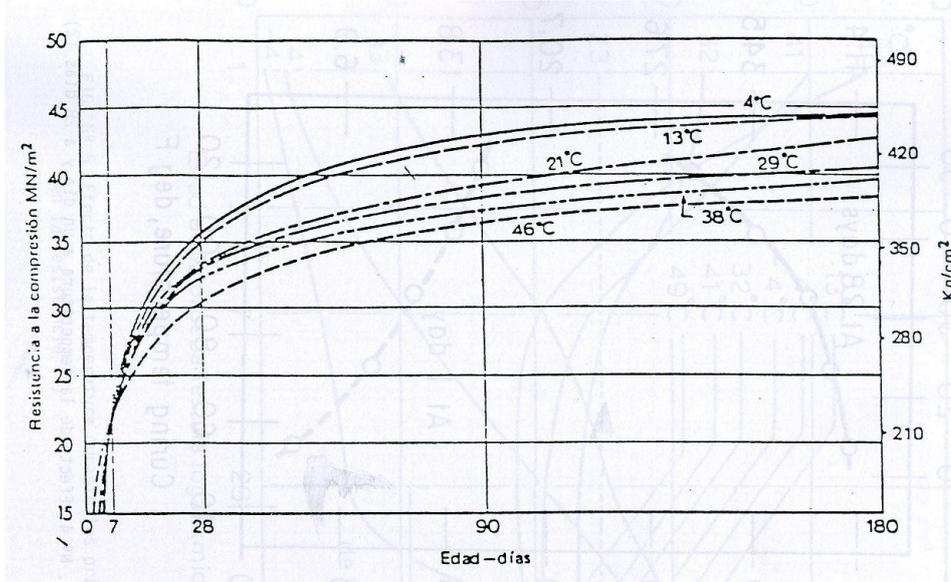


Figura 3 Efecto de la temperatura durante las primeras horas (3)

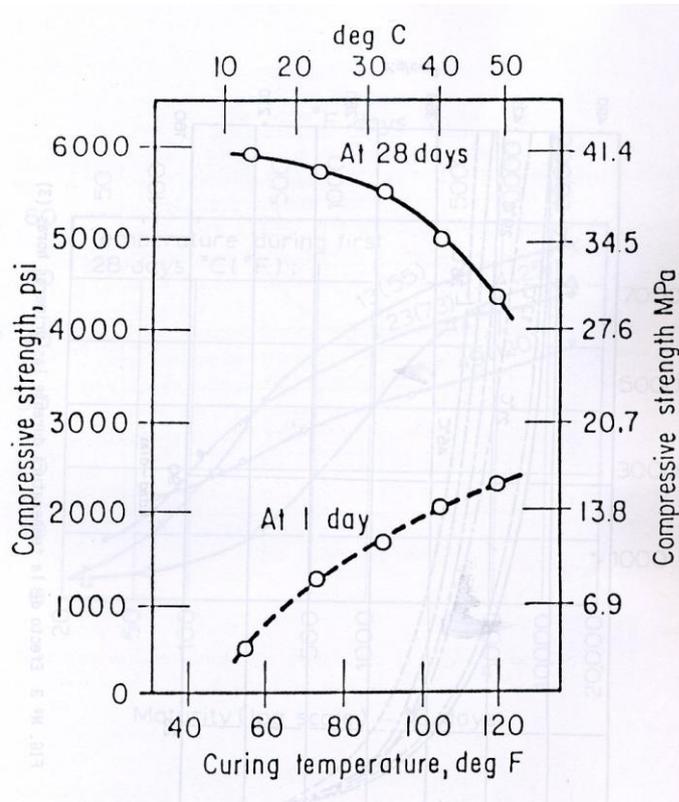


Figura 4 Efecto de la temperatura a un día y a 28 días (2)

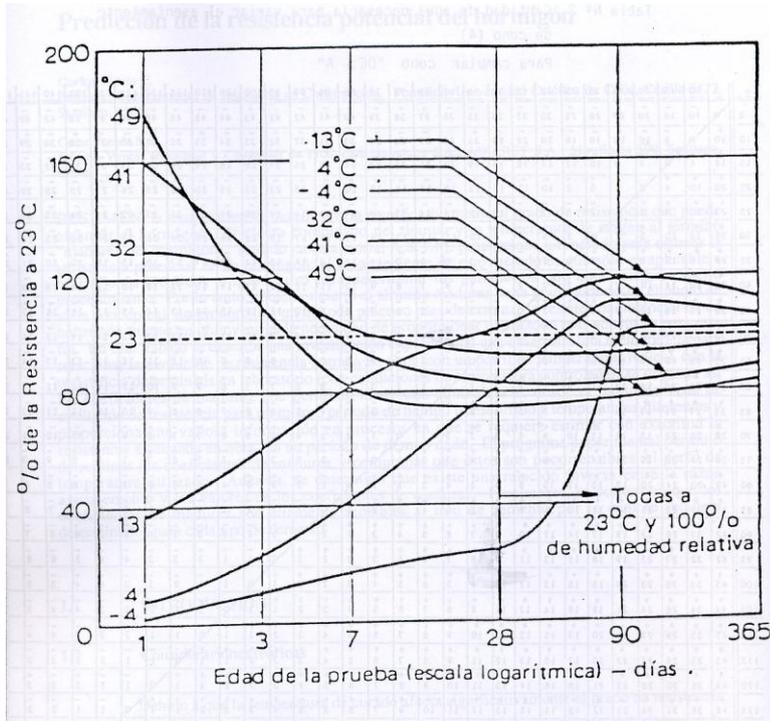


Figura 5 Efecto de la temperatura durante los primeros 28 días en la resistencia (3)

Tabla 2 Cantidad de agua necesaria para variar el asentamiento de cono (4)

mm	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
15	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
25	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
30	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
35	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
40	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
45	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
50	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
55	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
60	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
65	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
70	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
75	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
80	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
85	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
90	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
95	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
100	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
105	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
110	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
115	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
120	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
125	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
130	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
135	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
140	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
145	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
150	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10