

elaboración y posterior tratamiento del hormigón a bajas temperaturas

Dr. Ing. A. MEYER, Beekum (Westfalia)

**Conferencia pronunciada en la reunión sobre «Hormigonado en invierno» celebrada en octubre de 1961
en el Centro Técnico de Essen (Alemania).**

El hormigonado en ambiente frío con heladas requiere un especial cuidado y un control mejor que en el caso de temperaturas normales. En la obra cerrada de invierno, los diferentes elementos o el total de la obra y la preparación del hormigón se efectúan con calefacción y protección. Esto, generalmente, sólo se hace para temperaturas exteriores muy bajas. Las instalaciones especiales en una obra crean un mayor gasto y, en consecuencia, solamente resultan rentables en obras especialmente importantes. En la obra cerrada de invierno, el hormigón se elabora a temperaturas normales, condiciones que se mantienen durante el tratamiento posterior. En este caso, no aparece nada especial al hormigonar bajo estas condiciones.

Un caso distinto es el hormigonado en obra a la intemperie, donde la elaboración del hormigón y de los elementos constructivos se efectúan más o menos bajo la influencia de las condiciones atmosféricas. Como la atmósfera fría y la helada influyen sobre las propiedades del hormigón será necesario prever medidas especiales para la elaboración y tratamiento posterior del hormigón. Este conocimiento no es nada nuevo. Ya en el calendario del hormigón de 1915 se publicaron las siguientes recomendaciones:

«Reduciendo la aportación de agua se puede levantar fábrica de ladrillo y hormigonar incluso con frío, llegando a obtener buenos resultados. En estos trabajos hay que tener en cuenta que el fraguado y endurecimiento del cemento tiene lugar más lentamente, en comparación con las épocas de calor. Los trabajos de cemento realizados en tiempo de heladas muestran, por consiguiente, una resistencia inicial más reducida, pero, posteriormente, llegan a conseguir su resistencia normal. La adición de sal común al mortero en una obra con mucho frío representa una protección frente a los perjuicios de la helada, pero tiene la desventaja de originar desagradables consecuencias.

«Cuando se ve uno obligado a trabajar con helada es preferible calentar el agua y la arena y emplear poco agua con el fin de acelerar el fraguado del mortero. Si se cuida que en el mortero y hormigón no aparezca un exceso de agua, por ejemplo, al levantar fábrica de ladrillo o trabajar con bloques absorbentes, entonces no se debe temer nada haciendo mucho frío. Al realizar trabajos con cemento en tiempo de helada se aconseja, en general, no emplear cementos de fraguado lento.»

Es asombroso que estas indicaciones son acertadas en la actualidad a pesar de haber transcurrido más de 40 años.

A continuación trataremos sólo del hormigonado en la obra de invierno a la intemperie. Por las observaciones generales sobre solidificación y endurecimiento del hormigón a bajas temperaturas y por el efecto de las heladas en el hormigón se dan, finalmente, unos consejos para la confección del hormigón fresco, para su colocación y para el tratamiento posterior del mismo. Y, por último, resumimos las medidas más importantes con unas indicaciones prácticas.

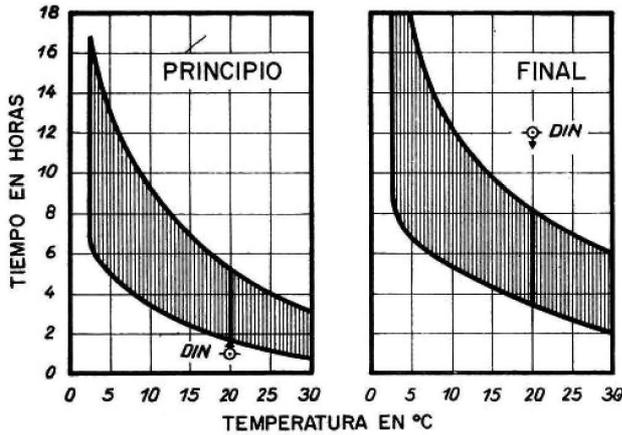


Gráfico 1.—Influencia de la temperatura sobre el fraguado de cemento según DIN 1164.

En la zona rayada se encuentran los tiempos de fraguado obtenidos en el ensayo de 30 cementos diferentes según DIN 1164. Los tiempos de fraguado se desplazan considerablemente a bajas temperaturas. Además, se aprecia que la sensibilidad del cemento a bajas temperaturas es diferente. Los tiempos determinados por DIN 1164 a +20°C para comienzo y final de fraguado del mismo se duplican a +5°C y, en casos aislados, todavía aparece un mayor retraso.

1. Solidificación y endurecimiento del hormigón a bajas temperaturas

La velocidad del fraguado y endurecimiento del hormigón dependen de la temperatura como ocurre con cualquier transformación química. A bajas temperaturas, el hormigón fragua y endurece con mayor lentitud que en el caso de temperaturas normales. En la gama de +20 a +15°C, es reducida la influencia de la temperatura. Por debajo de este intervalo, especialmente con una temperatura inferior a +10°C, puede aparecer un retraso considerable. Con una temperatura ligeramente inferior al punto de helada, el proceso de hidratación prácticamente se anula. Los resultados de ensayos de cemento y hormigón en elementos tratados a una temperatura de 20°C no permiten generalmente sacar conclusiones sobre el comportamiento a bajas temperaturas. Para estos ensayos de comprobación es interesante disponer de una temperatura de +5°C.

La influencia que ejerce la temperatura sobre el fraguado del cemento se aprecia en el gráfico 1.

Sin la práctica de la construcción, la relación de la temperatura con el fraguado es todavía de mayor importancia. En el desarrollo de la resistencia se comprueba lo mismo que en el fraguado un comportamiento distinto del cemento. La influencia de la temperatura depende, además, de la dosificación del hormigón y de las dimensiones de los elementos constructivos. Las mezclas ricas en cemento y los elementos de grandes dimensiones son menos sensibles que las mezclas pobres en cemento y los elementos de pequeña dimensión. Haciendo ensayos en probetas de 20 cm de arista con hormigones de calidades B 160 hasta B 300 con 6 tipos diferentes de cemento según DIN 1164, rea-

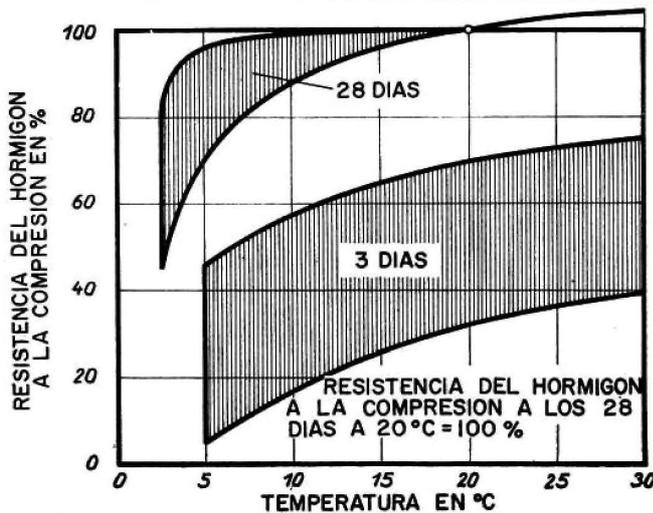


Gráfico 2.—Influencia de la temperatura sobre el endurecimiento del hormigón. Cemento B 160/B 300, según DIN 1164.

La resistencia a la compresión del hormigón, a los 28 días, determinada en probetas con 20 cm de arista, a una temperatura de +20°C, se ha tomado en este caso como 100 por 100. Esta resistencia del hormigón a la compresión es decisiva, como ya sabemos, para clasificar los tipos de hormigón. En el gráfico se aprecia que a los 28 días el hormigón conservado a +5°C, a igualdad de otras condiciones, adquiere una resistencia en un 30 por 100 inferior a las probetas conservadas a +20°C. La influencia de la temperatura es todavía mayor en la resistencia inicial. A la edad de 3 días de conservación a 20°C, y según el tipo de cemento empleado, es de esperar de un 30 a un 70 por 100 de la resistencia a compresión a los 28 días y, a una temperatura de conservación de +5°C, aproximadamente la mitad. En la parte alta de la banda de dispersión indicada aparecen los resultados obtenidos con los hormigones preparados con cemento de alta resistencia inicial y en la inferior los valores para hormigones de cementos con desarrollo de resistencia más lento. Los resultados para hormigones elaborados con cementos de buena resistencia inicial aparecen aproximadamente en el centro de la banda de dispersión.

lizados con temperaturas de + 2°C y + 20°C y curando las probetas a la misma temperatura, se obtuvieron las relaciones entre temperaturas y resistencias representadas en el gráfico 2.

Saul, Rastrup, Nykänen y otros han intentado abordar expresiones matemáticas que relacionen la temperatura con el transcurso del endurecimiento. Saul parte del estado de madurez R:

$$R = A (T + 10)$$

donde A es la edad de los hormigones en días, y T, la temperatura de conservación en °C. Por ejemplo para un hormigón, a los 7 días de conservación a 20°C:

$$R = 7 (20 + 10) = 210 \text{ [}^\circ\text{C día]}$$

Para una temperatura de conservación de + 5°C, la edad necesaria para conseguir el mismo grado de madurez sería:

$$\begin{aligned} 210 &= x(5 + 10) \\ x &= 14 \text{ días} \end{aligned}$$

La fórmula de Saul permite, para cementos Portland normales y un intervalo concreto de temperaturas, calcular de antemano la resistencia del hormigón para cualquier temperatura de conservación si se conoce el desarrollo de la resistencia a temperaturas normales. Para otros cementos esta fórmula es muy limitada o no se puede emplear, según deducen Brand y el autor de este trabajo.

Durante el endurecimiento del hormigón, la temperatura se mantiene constante durante un largo plazo sólo en casos excepcionales. Si varía ligeramente, se puede partir de una temperatura media en el proceso de endurecimiento. Un hormigón conservado inicialmente a baja temperatura, endurece bien si surge posteriormente un aumento de temperatura cuando no se le ha quitado por secado el agua necesaria para la hidratación. Por este motivo se tiene que mantener largo plazo con humedad. Su resistencia final es, frecuentemente, mayor que la de un hormigón conservado constantemente a temperatura normal.

2. Efecto de la helada sobre el hormigón

Los cambios de temperatura conducen en los hormigones frescos y endurecidos a dilataciones térmicas. La magnitud de esta dilatación se puede deducir de la suma de la dilatación térmica de sus componentes. La influencia de los áridos es predominante. Para la zona prácticamente importante de temperaturas de - 20 a + 40°C se debe considerar para la arena de río rica en cuarzo una dilatación lineal de 9 a 11 × 10⁻⁶/°C. El valor de dilatación térmica lineal de granito, gneis, escoria de alto horno, caliza y cementos no hidratados es inferior y se encuentra entre 4 y 9 × 10⁻⁶/°C. El agua tiene a + 4°C su mayor densidad y se dilata al subir o bajar la temperatura. En la transformación en hielo aparece un aumento brusco de volumen del 9 por 100 aproximadamente, que puede ser el origen de la destrucción del hormigón por la helada. La formación del hielo que aparece en el agua pura a 0°C, en el hormigón comienza unos pocos grados debajo de 0°C como consecuencia de las sales solubles en el agua. El coeficiente térmico lineal de la «piedra de cemento», que es la que aglomera los áridos entre sí, depende, principalmente, del contenido de humedad de los mismos. En estado de saturación de agua resulta ser del orden de 10 × 10⁻⁶; en estado de secado al aire, 20 × 10⁻⁶/°C. El mayor valor de la dilatación térmica del mortero de cemento tiene como consecuencia que, bajo las mismas condiciones, un hormigón rico en cemento tiene un coeficiente térmico de dilatación más elevado que una mezcla pobre en cemento.

La diferente dilatación térmica de los componentes del hormigón puede conducir a tensiones del conjunto en los cambios de temperatura, debiendo tenerse en cuenta que los hormigones bien dosificados no sufren un perjuicio notable con las condiciones climatológicas por aparecer un cambio de temperatura que transcurre relativamente lento. Los cambios de temperatura se reflejan, especialmente, en los elementos constructivos de gran espesor, entre el núcleo y el exterior. Las tensiones propias que resultan de esto dependen de la composición del elemento, de la caída de la temperatura y, también, del comportamiento elástico y plástico del hormigón. Las tensiones pueden llegar a sobrepasar la resistencia a la tracción del hormigón formando grietas en la capa externa, cuya in-

fluencia se tiene en cuenta respecto a la durabilidad. Las grietas en esta capa exterior se pueden aminorar por una reducción en la caída de temperatura y aumento de la resistencia.

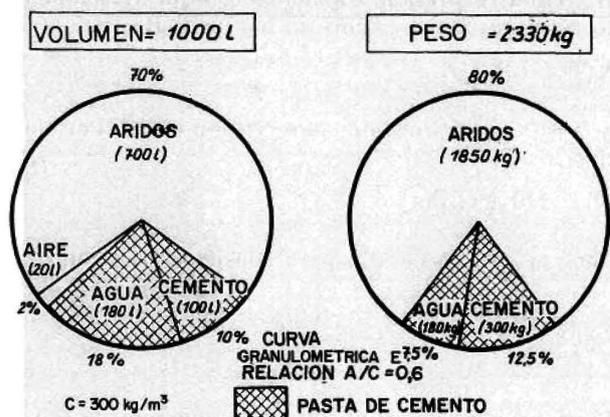


Gráfico 3.—Composición esquemática de 1 m³ de hormigón fresco.

La influencia del cambio de temperaturas normal en nuestro clima (Alemania), respecto a la durabilidad del hormigón, no tiene gran importancia, a excepción de los efectos de la helada.

Los hormigones elaborados en una obra de invierno a la intemperie tienen que ser resistentes a las heladas en un breve plazo de endurecimiento, es decir, que su calidad no se debe variar notablemente con pequeños cambios en el punto de rocío y ligeras alternancias en la helada. La resistencia al rocío se consigue más fácilmente que la resistencia a la helada, la cual exige suficiente capacidad de resistencia frente a numerosos cambios para llegar a temperaturas finales bajas.

El hormigón fresco, compuesto de lechada de cemento, áridos y poros de aire, no es resistente a las heladas. El gráfico 3 muestra la composición esquemática de 1 m³ de hormigón fresco de composición normal, tanto en volumen como en peso. Al pasar por debajo del punto de congelación se forman en el hormigón fresco, de forma similar a como ocurre en suelo húmedo y según la velocidad de enfriamiento y composición del hormigón, lentejas y agujas de hielo. El agua de amasado aumenta su volumen del orden del 9 por 100, apareciendo desconchamientos por helada. Con esto se perturba la adherencia entre los áridos y la parte de cemento, descomponiendo el conjunto. Se interrumpe la hidratación del cemento, y el hormigón colocado y deshelado posteriormente antes del comienzo del endurecimiento se ha de compactar a tiempo, si no ha de estar expuesto a una influencia continua. Este caso no tiene una importancia práctica.

Cuando el hormigón fresco se coloca a temperatura superior al punto de congelación, se forma en la pasta por hidratación del cemento el gel soporte de la resistencia. A la vez, se libera calor, llamado «calor de hidratación». De la pasta de cemento se forma, poco a poco, la piedra de cemento que une entre sí los áridos, impidiendo, a la vez, la formación de lentejas y cristales de hielo. En el caso de haber empleado áridos resistentes a las condiciones atmosféricas, el efecto de las heladas sobre la piedra de cemento es de gran importancia en la constancia del hormigón sólido. Esto se ha investigado con detenimiento. En el comportamiento de la pasta de cemento al helarse es de importancia decisiva la cantidad de agua que puede helar y el conjunto de los poros; ambos factores están sometidos durante el transcurso de la hidratación a una variación continua. La formación de los productos de hidratación está ligada a una unión química y física de agua. A la vez aparece una contracción, ya que los productos de hidratación formados tienen un volumen menor que las materias iniciales cemento y agua. Esto conduce a un autosecado de la pasta de cemento, que en parte se anula al conservar los bloques en agua que se absorbe. La velocidad de hidratación depende de la temperatura y del cemento empleado. Mientras que la hidratación progresa aparecen, además de los productos de hidratación, partículas de cemento no hidratadas. Hasta la hidratación total, el cemento consume aproximadamente un 20 por 100 de agua respecto a su peso. Esta agua sólida no se puede evaporar ni helar. Además de esto, aproximadamente un 15 por 100 de agua finamente repartida se encuentra en el gel creado por la hidratación. El agua de gel unida físicamente aparece en un estado pseudosólido formando los poros de gel y solamente se puede helar a temperaturas muy bajas. En el caso de una pasta de cemento con una relación agua/cemento del orden de 0,35, toda el agua se une química y físicamente hasta la hidratación completa. Por el contrario, con un valor $A/C > 0,35$ permanece en la pasta de cemento, después de la completa hidratación, formándose poros capilares, tantos más, cuanto mayor sea el valor A/C . El agua capilar es la única que se puede helar a las bajas temperaturas que surgen en la práctica.

En el gráfico 4 se representa la composición de una pasta de cemento recién amasada y de una pasta de cemento completamente hidratada con una relación agua/cemento de 0,6.

En la pasta de cemento recién preparada aparece un 64 por 100 en volumen de agua capilar congelable, y en la pasta completamente hidratada sólo un 27 por 100. El agua capilar congela, primeramente en la superficie fría y aísla el resto. Aumenta su volumen y empuja el agua todavía sin helar a mayor profundidad en el hormigón. Si la presión hidráulica supera a la resistencia a tracción de la pasta de hormigón se perjudica éste. En la pasta de cemento completamente hidratada el agua capilar sometida a presión puede escapar por los poros capilares llenos de aire creados por contracción, sin que el conjunto del hormigón perciba daño alguno. Estas condiciones favorables no aparecen siempre. La cantidad de agua capilar congelable depende, generalmente, de la relación A/C, del grado de hidratación y de la posible evaporación de agua que haya podido tener lugar. Se debe emplear una relación A/C reducida y conseguir un grado de hidratación elevado en el momento de aparecer la primera helada. El hormigón saturado de agua presenta un peligro mayor que un hormigón seco en parte. El hormigón que no tiene o casi no tiene agua capilar es resistente a las heladas.

GRADO DE HIDRATACION % (PASTA DE CEMENTO) GRADO DE HIDRATACION % (PIEDRA DE CEMENTO)

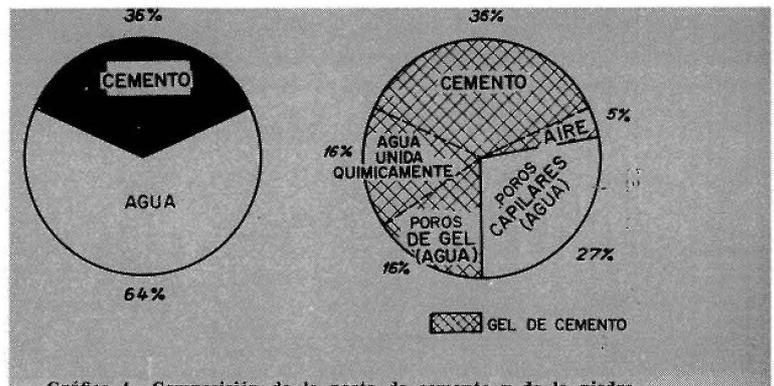


Gráfico 4.—Composición de la pasta de cemento y de la piedra de cemento con relación A/C 0,6, en % en volumen.

En invierno no siempre se puede descartar la congelación del hormigón con un grado de hidratación relativamente bajo. Es importante conocer cuándo el hormigón fresco es resistente a la congelación. Es norma, como se ha demostrado en la práctica, que un hormigón de composición favorable conservado en aire sin introducción de humedad, con una resistencia a la compresión de más de 50 kg/cm² y una relación A/C por debajo de 0,70, no puede sufrir daños al producirse la congelación. Además, es posible mejorar la resistencia a la congelación y a las heladas creando microporos en la pasta de cemento muy próximos unos a otros. Los microporos esféricos se producen por aditivos creadores de poros de aire. En oposición a los poros capilares y a los del conjunto, éstos no se cargan de agua ni aun sumergidos en ella a presión normal. El agua en congelación, escapa a los microporos antes de que la presión hidráulica pueda conducir a una descomposición del conjunto. En la tabla 1

TABLA 1.—Poros en un hormigón con relación A/C=0,6

	Diámetro μ	Diámetro relativo	Poros en % volumen grado de hidratación	
			0 %	100 %
Poros del gel... ..	1/100	1	0	4,5
Poros capilares	1-10	≥ 100	18	9
Microporos de aire ..	10-1.000	≥ 1.000		0-4
Poros del conjunto...	100-5.000	≥ 10.000		1-2

aparecen los diámetros para los diferentes tipos de poros que aparecen en el hormigón, así como su proporción aproximada en % en volumen en un hormigón de composición corriente con un grado de hidratación del 0 y 100 por 100. Las restantes burbujas de aire que aparecen en el hormigón corriente después de la compactación crean los llamados poros del conjunto. Estos no son suficientes para el escape del agua capilar al actuar la presión del hielo, por no estar suficientemente distribuidos y por ser la distancia entre ellos demasiado grande. El efecto de los microporos en la pasta de cemento se puede deducir del gráfico 5.

En resumen, se puede decir lo siguiente en relación con el peligro del hormigón a los efectos de las heladas:

Es de decisiva importancia para la capacidad resistente de un hormigón frente a los efectos de las heladas, el empleo de áridos insensibles a las heladas, la relación A/C, el grado de hidratación

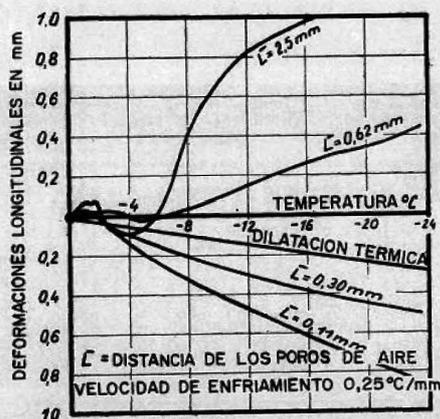


Gráfico 5.—Variaciones longitudinales al enfriarse una piedra de cemento con relación A/C=0,6, en relación con la distancia entre poros, según Powels y Helmuth.

A una distancia de 2,5 mm los microporos no evitan la dilatación permanente y, en consecuencia, la destrucción de la pasta de cemento. A distancias de 0,30 mm o menos, la dilatación se mantiene por debajo del valor de la dilatación térmica. Estos valores por debajo del límite se originan por la simultánea contracción del gel de cemento. En el caso de crear un contenido adicional del 3 por 100 de poros de aire en el hormigón fresco, se puede suponer que se ha conseguido la distancia mínima necesaria entre los microporos.

y el contenido de poros de aire. Una congelación total del hormigón antes del comienzo del fraguado, no es posible en la práctica. Entre el comienzo del fraguado y el final del mismo, así como también durante la creación de resistencia inicial, el hormigón sufre al helarse un perjuicio constante de mayor o menor importancia. Con hidratación más avanzada y secado también más avanzado se reduce considerablemente el daño de las heladas. Los hormigones de composición favorable conservados en aire sin penetración de humedad, con una relación A/C inferior a 0,7, son ya resistentes a las heladas con una resistencia a la compresión de 50 kg/cm².

3. Composición del hormigón fresco

La composición del hormigón se debe de atender, aun en tiempo fresco, a los métodos de trabajo clásicos de colocación y compactación, considerando las condiciones de calidad exigidas. El hormigón preparado en una obra de invierno a la intemperie debe ser resistente a la helada en un período corto y endurecer lo más rápidamente posible aun en el caso de bajas temperaturas. Estos requisitos o exigencias adicionales se deben de considerar en la elección de los materiales, así como también en la dosificación de la mezcla y en relación con la temperatura del hormigón fresco.

Son ventajosos los cementos con rápido desarrollo de calor y resistencia a bajas temperaturas. Estos hacen que el hormigón sea resistente a las heladas en un plazo breve y evitan con el calor de hidratación liberado un rápido enfriamiento de la masa introducida en el encofrado.

Hummel y Wesche ensayaron mortero normal según DIN 1164 a los 7 y 28 días (tabla 2). Ensayos del autor con morteros y hormigones conservados a +5 y +20°C dieron resultados similares. Mientras que las relaciones A/C se mantenían aproximadamente iguales, hormigón y mortero se comportaban de forma análoga.

Casi todos los cementos estudiados se pueden reunir en tres grupos, I, II y III, en cuanto al desarrollo de resistencia a una temperatura de +5°C, representándose la resistencia media a la compresión en % a los 3, 7 y 28 días en la tabla 3. En ésta se representa el caso a +20°C.

Más informativa que la resistencia a la compresión en % del hormigón preparado y conservado a +5°C para su determinación a fechas fijas es la edad que es necesaria para conseguir con +5°C y 20°C la resistencia mínima a la congelación, es decir, la resistencia a la compresión de 50 kg/cm². En la tabla 4 se encuentran estos tiempos necesarios expresados en días.

Aunque, en general, los cementos con adiciones de escoria de alto horno y trass son más sensibles a las bajas temperaturas que los Portland, pueden encontrarse puntos de contacto entre los di-

TABLA 2.—Resistencia media a la compresión en % de mortero normalizado a +5°C, según Hummel y Wesche [2].—Resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días a 20°C=100 %

Cemento	Resistencia a compresión en %		
	3 días	7 días	28 días
PZ 475	66	90	105
PZ 375	50	70	84
PZ 275	— *	73	89
HOZ 375	25	48	79
HOZ 275	33	48	70
SHZ 275	9	22	62

* No comprobado.

TABLA 3.—Resistencia a la compresión en % de hormigones a 5 y 20°C, cifras orientativas para B 160/ B 300, resistencia a la compresión a los 28 días a 20°C=100

Cemento	Desarrollo de resistencia	Resistencia a la compresión en %					
		A + 5°C			A + 20°C		
		3 días	7 días	28 días	3 días	7 días	28 días
I	Muy rápido	45	65	95	65	80	100
II	Rápido	30	55	90	45	70	100
III	Lento	10	35	75	35	60	100

para el que se considera la resistencia a compresión del hormigón=100 por 100. Los cementos Portland estudiados Z 475 correspondieron todos al grupo I, la mayoría de los cementos Portland Z 275 al grupo II y la mayoría de los cementos de alto horno Z 275 al grupo III.

TABLA 4.—Edad mínima del hormigón para conseguir la resistencia a la congelación a +5°C y +20°C.

Cemento	Desarrollo de resistencia	Edad mínima en días					
		A + 5°C			A + 20°C		
		B 160	B 225	B 300	B 160	B 225	B 300
I	Muy rápido.	2	1	1	1	1	1
II	Rápido.	3	3	2	2	2	1
III	Lento.	6	5	4	3	3	2

TABLA 5.—Calor de hidratación en kcal/kg de cemento a los 3 días con +5 y +20°C.

Cemento	Desarrollo de calor	Calor de hidratación * a los tres días a	
		+5°C	+20°C
I	Muy rápido.	Sobre.	Sobre
II	Rápido.	Aprox.	Aprox.
III	Lento.	Por debajo.	Por debajo.

* Según el procedimiento del calor de disolución.

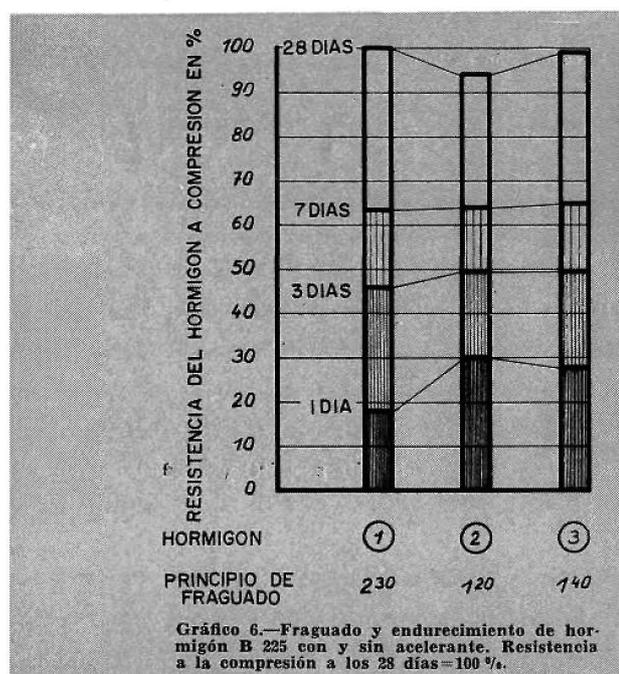
ferentes tipos y calidades de cemento como consecuencia de la gran experiencia que relaciona la finura de molienda y la composición de los cementos. En obras importantes la elección del cemento se debería efectuar, en consecuencia, basándose en una comprobación de su aptitud para trabajar a +5°C.

En los primeros días no solamente es distinto el desarrollo de resistencia, sino también el desarrollo de calor en los cementos. En la tabla 5 se encuentran los valores para el calor de hidratación que se libera en el transcurso de los tres primeros días a +5 y +20°C.

Son valores medios de un gran número de medidas realizadas por el método del calor de disolución. El calor de hidratación liberado a plazo más largo sólo es importante en los elementos constructivos de gran masa. El aumento de temperatura que se crea en el hormigón al liberarse el calor de hidratación depende del contenido de cemento por metro cúbico y del acceso de calor a la superficie. Si suponemos que no se pierde calor y el contenido de cemento por m³ es aproximadamente de 300 kg va bien la fórmula:

$$\Delta T \approx \frac{H}{2} \quad [1]$$

en la que ΔT es la elevación de la temperatura en el hormigón en °C, y H, el calor de hidratación del cemento en kcal/kg de cemento.



Los áridos que contienen arcilla, limo y poros son sensibles a las heladas y no pueden emplearse. Las impurezas orgánicas que retardan la hidratación son más peligrosas a bajas temperaturas que con temperaturas normales. Los áridos que se han congelado o cubierto por la nieve deben deshelarse antes de su empleo. Por otra parte, no deben calentarse a temperatura superior a 50°C. Para evitar una congelación posterior, solamente deben deshelarse los áridos de empleo inmediato.

El agua de amasado se debe calentar casi siempre. Termoeconómicamente es favorable el empleo de agua lo más caliente posible. El agua demasiado caliente puede conducir, por otra parte, a un fraguado muy rápido. Cuando el agua de amasado se añade al cemento o a la mezcla de cemento y árido, éste no debe tener una temperatura superior a 50°C. Si el agua se calienta hasta unos 80°C debe mezclarse previamente, con los áridos durante un minuto, antes de añadir el cemento.

Los productos de adición solamente se deben emplear cuando por ensayos previos se demuestre que se mejoran las propiedades del hormigón y no aparece un retraso en la hidratación. Los aceleradores, en dosificación adecuada, pueden acortar el tiempo de fraguado, aumentar la resistencia inicial e incrementar el desarrollo de calor de hidratación en los primeros días. El punto de congelación del agua de amasado se reduce muy poco. Los aceleradores que contienen cloruros no se deben emplear para hormigón armado y pretensado, ya que estos productos favorecen la corrosión de las armaduras. Los cloruros aumentan, además, la retracción y la conductividad elástica del hormigón y reducen la resistencia final. El gráfico 6 muestra cómo se modifican fraguado y endurecimiento al emplear acelerantes.

Los aditivos creadores de poros (aireantes) pueden proporcionar, con una dosificación adecuada, una mejora considerable en la capacidad resistente frente a los efectos de la helada. Su forma de actuar ya se ha explicado anteriormente; hay que tener en cuenta que la formación de poros de aire depende de la temperatura. Si no se sobrepasa normalmente del 3 por 100 en volumen en el hormigón fresco, la caída de resistencia en la pasta de cemento es muy reducida.

La dosificación del hormigón se debe fijar, de acuerdo con las condiciones complementarias necesarias, para elaborar hormigón a bajas temperaturas, y en las obras importantes se debe fijar, de acuerdo con ensayos de aptitud realizados, a las temperaturas de comprobación de +5 y +20°C. En general, es aconsejable aumentar la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón para reducir, de esta forma, la relación A/C y, por tanto, aumentar la resistencia inicial y la cantidad de calor liberado.

Es muy importante mantener una temperatura adecuada del hormigón fresco durante su colocación en épocas frías del año. No deben reducirse las temperaturas mínimas para el hormigón fresco en relación con la temperatura exterior media indicadas en la tabla 6.

TABLA 6.—Exigencias de temperatura en el hormigón fresco.

Temperatura exterior media en °C		0	-5	-10
Temperatura del hormigón fresco en °C	Mínima	+10	+15	+20
	Máxima		+30	

No convienen temperaturas de hormigón fresco superior a +30°C, porque se reduce la calidad del hormigón por fraguado prematuro y pérdida de agua.

La temperatura del hormigón fresco depende, prescindiendo de las pérdidas de calor durante el proceso de mezcla, de la temperatura de los materiales. En un hormigón de composición normal aumenta del orden de 1°C, cuando se aumenta la temperatura del cemento 10°C o la de los áridos 1,5°C o la del agua 3,5°C. Puede calcularse por las cantidades y temperaturas de los materiales iniciales según la expresión [2]:

$$t_B = \frac{0,2 (Z \cdot t_z + G \cdot t_G) + 1 (W \cdot t_w)}{0,2 (Z + G) + 1 \cdot W} \quad [2]$$

donde t_z , t_G , t_w , t_B son las temperaturas, en °C, del cemento, árido, agua y hormigón fresco, y Z, G, W son los pesos, en kg/m³, de cemento, árido y agua.

En la expresión se considera el calor específico de los áridos y del cemento de 0,2 kcal/kg y el del agua 1,0 kcal/kg. Como G se considera el peso de árido seco. La humedad de los áridos se incluye en W.

El proceso de cálculo se demuestra con el siguiente ejemplo:

Conocidos:

$$\begin{array}{lll} t_z = 10 & t_G = 10 & t_w = 40^\circ\text{C} \\ Z = 300 & G = 1.800 & W = 150 \text{ kg/m}^3 \end{array}$$

la temperatura del hormigón fresco, t_B , será:

$$t_B = \frac{0,2 (300 \cdot 10 + 1.850 \cdot 10) + 1 (150 \cdot 40)}{0,2 (300 + 1.850) + 1 \cdot 150} = t_B = 17,8^\circ\text{C}$$

Para un hormigón de composición normal con un cemento a 5°C y una humedad normal en los áridos rigen las curvas del gráfico 7.

Estas curvas permiten hacer un cálculo rápido de la temperatura del hormigón fresco si se conocen las temperaturas del árido y del agua, o determinar la temperatura necesaria en el agua de amasado cuando se conoce de antemano la temperatura de los áridos y se fija la del hormigón fresco.

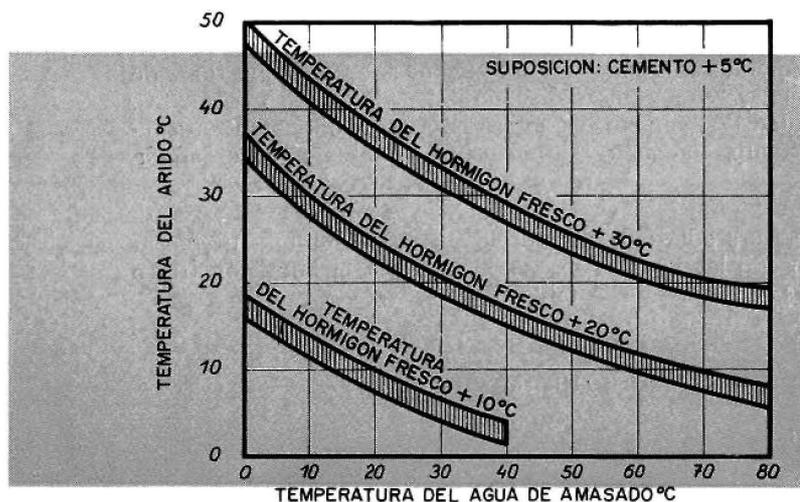


Gráfico 7.—Determinación de la temperatura del hormigón fresco.

Preparación y tratamiento posterior del hormigón

Al mezclar, transportar o colocar el hormigón fresco en el encofrado se crean unas pérdidas de calor que deben reducirse al mínimo. La magnitud de estas pérdidas depende, principalmente, de las condiciones atmosféricas, del tipo de transportador, y del aislamiento previsto para el encofrado.

El hormigón se debe amasar en zonas protegidas del viento y de la humedad. Debe trasladarse lo más rápidamente posible y en grandes cantidades, sin trasvase y sin interrupciones en la instalación de mezcla. En la obra de invierno se debe dar preferencia al transporte en cubiletes con grúa o con bombas o transportadores neumáticos. Los cubiles y las tuberías se pueden aislar fácilmente contra la pérdida de calor. No son adecuadas las cintas transportadoras abiertas. En condiciones favorables la temperatura del hormigón fresco puede descender de 1 a 2°C con temperaturas exteriores un poco inferiores del punto de congelación, y en caso desfavorable el descenso puede ser del doble o más. Si surge una pausa en el hormigonado, para compensar el posible enfriamiento de mezcladoras y de transportadores se debe subir momentáneamente un poco la temperatura del hormigón fresco.

Los encofrados, armaduras y posibles superficies de contacto con el hormigón puesto en obra se deben precalentar con vapor o aire caliente antes de verter hormigón fresco caliente. No se puede hormigonar sobre hormigón congelado porque se crea una adherencia insuficiente; primero se debe descongelar y calentar y, en ciertos casos, eliminar las partes dañadas por la helada. La zona de vertido de hormigón expuesta al aire debe protegerse con lonas u hojas de papel frente a los efectos del viento.

El hormigón introducido en el encofrado precalentado se debe compactar con mucho cuidado para eludir la formación de zonas ricas en agua, evitando así la aparición de capas especialmente sensibles a la congelación en su superficie.

Una vez realizada la compactación, el hormigón fresco caliente debe protegerse frente a las pérdidas de calor. La caída de temperatura dependerá de la diferencia de temperatura, del aislamiento del encofrado y de las dimensiones del elemento construido. Para mantener reducidas las pérdidas de calor se aconsejan las siguientes medidas:

- Cerramiento de los huecos (ventanas, puertas, etc.) mediante tablas, telas o lonas para reducir el efecto brusco de enfriamiento producido por el viento y por la caída de temperatura.
- Instalación de encofrados aislados térmicamente; esta protección debe ser aumentada en determinados casos por una capa aislante adicional del lado que sopla el viento. Los encofrados de madera gruesa son mucho mejores que los metálicos.
- Cubrición cuidadosa del hormigón colocado con una carga termoaislante tal como cañizo, paja o fibra de vidrio, la cual debe protegerse de la penetración de humedad por lonas o telas de plástico.

Deben quedar garantizadas las medidas preventivas frente a las condiciones congelantes del hormigón antes de que en cualquier zona pueda aparecer una temperatura por debajo del punto de congelación. La resistencia mínima a la compresión de 50 kg/cm² que es necesaria para el hormigón conservado en seco con una relación A/C < 0,7, se puede conseguir en función de la dosificación y la temperatura del hormigón en un plazo más o menos largo (ver tabla 4).

Como durante este tiempo hay una pérdida continua de calor, el hormigón fresco compactado debe poseer de origen una temperatura posiblemente elevada. En el gráfico 8 vemos una placa de 12 cm de espesor de hormigón B 225, en la que se representa las temperaturas en función del tiempo. La placa se encontraba en un encofrado de madera con un espesor de 24 mm, cerrada en la parte superior por hojas y una manta de lana de vidrio de 20 mm. La temperatura exterior era de -5°C . El hormigón fresco empleado estaba a $+26$ ó $+12^{\circ}\text{C}$. El aumento en la temperatura del hormigón fresco actuó favorablemente. La temperatura de 0°C en el hormigón se consiguió a las 40 ó 28 horas.

En el gráfico 9 se muestra la capacidad de aislamiento del hormigón con una capa termoaislante en una placa de 12 cm de espesor. En este caso se trata también de hormigón B 225 con un encofrado de madera de 24 mm de espesor. Si lleva cubierta aislante el hormigón se congela a las 28 horas con una temperatura exterior de -5°C , y sin cubrición este mismo proceso acontece a las 9 horas. El hormigón sin protección mostró daños al conglomerarse, en tanto que el hormigón cubierto permanecía inalterado.

En contra de las pérdidas de calor actúa, durante la hidratación del cemento, el calor liberado en este proceso. Retrasa el descenso de la temperatura del hormigón y en elementos en masa puede incluso aumentar su temperatura inicial. En el gráfico 10 se muestran los valores medidos en función del tiempo en placas de hormigón de 12 cm de espesor compuestas con diferentes cementos.

Todos los hormigones se prepararon con el mismo contenido de cemento (270 kg/m^3) y su temperatura después de la compactación era de 12°C . En una de las placas se sustituyó el cemento por harina de cuarzo, que no crea ningún desarrollo de calor. Este hormigón sin cemento se congeló a las 14 horas, y en los hormigones de los cementos III, II y I este proceso se realizó a 18,28 y 37 horas, respectivamente. Resulta, por consiguiente, la influencia del cemento sobre la caída de temperatura para elementos constructivos de poco espesor.

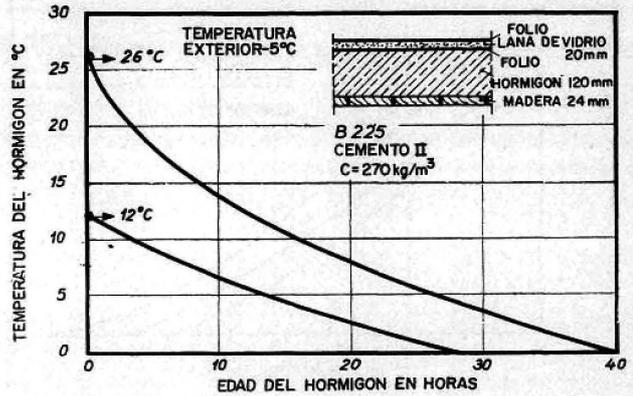


Gráfico 8.—Influencia de la temperatura del hormigón fresco sobre el enfriamiento de una placa de hormigón de 120 mm.

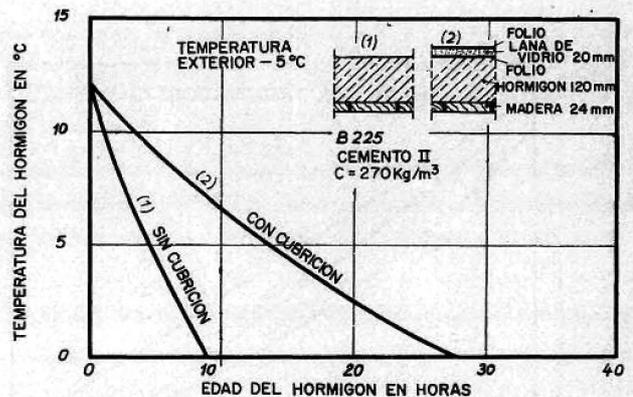


Gráfico 9.—Influencia de la cubrición sobre el enfriamiento de una placa de 120 mm de espesor.

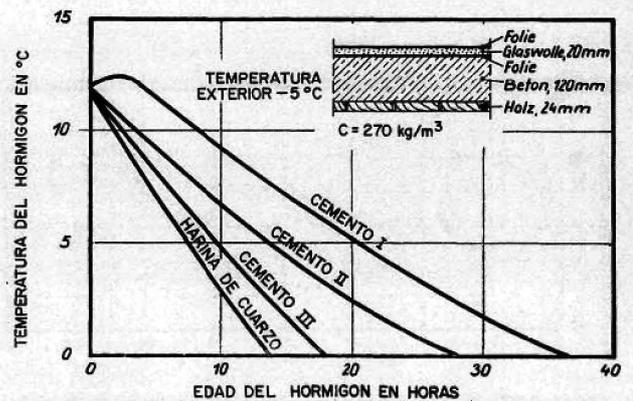


Gráfico 10.—Influencia del tipo de cemento frente al enfriamiento de una placa de hormigón de 120 mm.

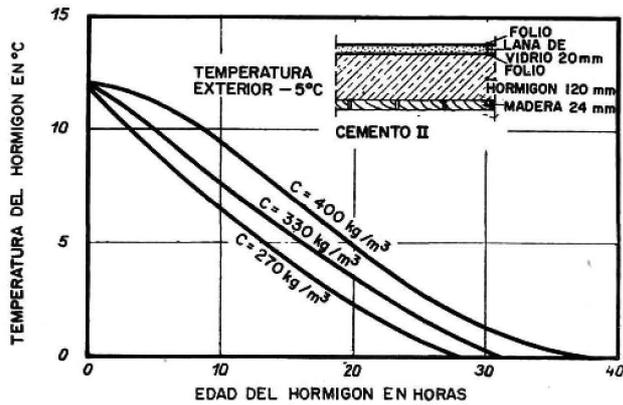


Gráfico 11.—Influencia del contenido de cemento sobre el enfriamiento de una placa de 120 mm de espesor.

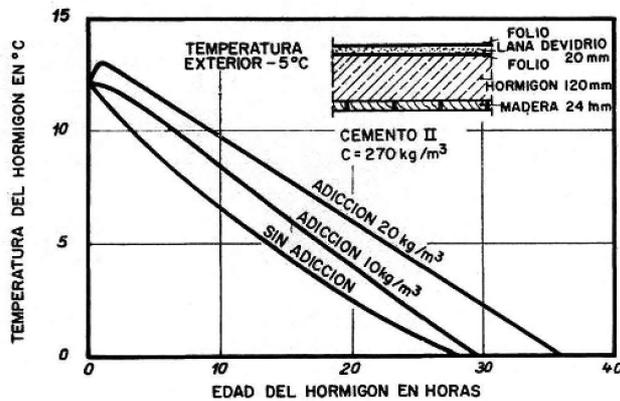


Gráfico 12.—Influencia de la adición de un acelerante sobre el enfriamiento de una placa de 120 mm de espesor.

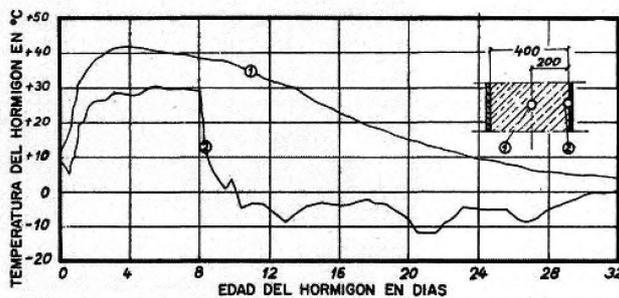


Gráfico 13.—Marcha de la temperatura en un muro de 4 m de espesor, según los ensayos de T. C. Hansen (3). Desencofrado a los ocho días.

La cantidad de calor que se libera en el hormigón durante la hidratación del cemento no depende sólo de éste, sino también del contenido del mismo. El gráfico 11 refleja las temperaturas medidas en hormigones tratados en las mismas condiciones, pero con contenidos de cemento por m³ de 270, 330 y 400 kg. El aumento en el contenido de cemento conduce a un descenso más lento de la temperatura del hormigón.

Los acelerantes pueden ejercer, de modo análogo, un efecto favorable. En el gráfico 12 se representan los resultados con un hormigón al que se le añadió por m³ 10 ó 20 kg de un acelerante libre de cloruros.

Las curvas temperatura-tiempo de los gráficos 8 a 12 se refieren a una placa de hormigón de 12 cm de espesor y encofrado de madera. Para vigas de 12 cm de ancho y más, muros de 15 cm y más, así como pilares de 30 cm de \varnothing y más, no son de esperar valores más desfavorables si se consideran análogas condiciones iniciales y aislamientos de la misma capacidad. Los elementos constructivos más gruesos no están sometidos generalmente a un peligro tan grande como los elementos finos, ya que la pérdida de calor es más reducida. Aunque en el hormigón de un mismo elemento pueden aparecer grandes diferencias de temperatura que originan grietas en la superficie, estas grietas terminan generalmente a poca profundidad y se producen de nuevo después de haberse producido la caída de temperatura.

Como ya hemos indicado anteriormente, las grietas superficiales se pueden evitar por una caída reducida de la temperatura y una elevada resistencia. Son muy interesantes las medidas de temperatura realizadas, en muros de hormigón de diferentes espesores, con hormigón B 300 y una temperatura exterior media de -10°C . Sobre este asunto ha informado T.C. Hansen y sus resultados aparecen reflejados en el gráfico 13 a 16 [3]. En el gráfico 13 se encuentran las temperaturas medidas en el núcleo y en la superficie de un muro con 4 metros de espesor. El máximo de temperatura en el núcleo del muro apareció, aproximadamente, a los 5 días. El aumento, con relación a la temperatura de colo-

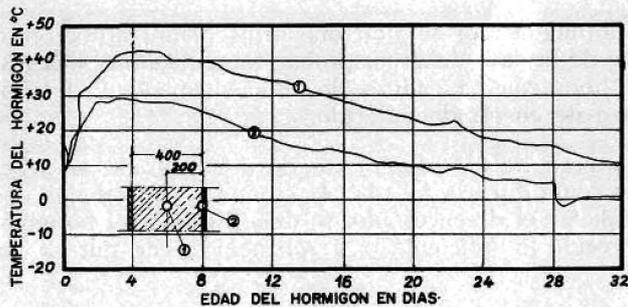


Gráfico 14.—Marcha de la temperatura en un muro de 4 m de espesor, según los ensayos de T. C. Hansen (3). Desencofrado a los veintiocho días.

cación, resultó de, aproximadamente, 30°C. El muro se desencofró a los 8 días. Después, la temperatura superficial cae bruscamente y la diferencia entre el núcleo y la superficie crece bruscamente hasta 40°C. Este muro mostró más tarde considerables grietas que solamente tenían una profundidad de 0,2 a 0,5 centímetros.

Si el mismo muro con un espesor de 4 m no se desencofra a los 8 días, sino a los 28, entonces el transcurso de la temperatura es muy diferente (ver gráfico 14). La diferencia de temperatura entre el núcleo y la superficie, poco después del desencofrado, se reduce a unos 15°C que es, más o menos, la mitad que en el caso anterior. Solamente con una permanencia más prolongada del encofrado de madera se pueden evitar los daños en el hormigón por las grietas de superficie.

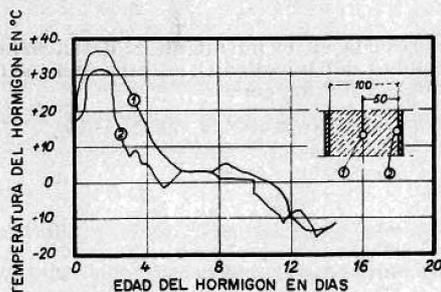


Gráfico 15.—Marcha de la temperatura en un muro de 4 m de espesor, según los ensayos de T. C. Hansen (3). Desencofrado a los dos días.

En el gráfico 15 se refleja el transcurso de la temperatura en el núcleo y en la superficie de un muro de un metro de espesor. Este muro se desencofró poco después de conseguir el máximo de temperatura a la edad de 2 días. La temperatura del núcleo aumentó solamente unos 17°C por el calor de hidratación liberado, y la diferencia máxima entre el núcleo y la superficie se mantuvo por debajo de 20°C.

El gráfico 16 representa la marcha de temperaturas registradas en el mismo muro, pero retirando el encofrado a los 11 días. La diferencia de temperatura entre el núcleo y la superficie es solamente de 10°C. En ambos muros con 1 m de espesor no se observaron grietas en la superficie.

Solamente en elementos con un espesor superior a 1 m surge, generalmente, un aumento perjudicial en la caída de temperatura por retirada prematura del encofrado.

La determinación del plazo mínimo necesario de desencofrado en las épocas frías del año, tiene además una especial importancia en el desarrollo de la resistencia. En la norma DIN 1045, párrafo 13, se indican, entre otras cosas, lo siguiente:

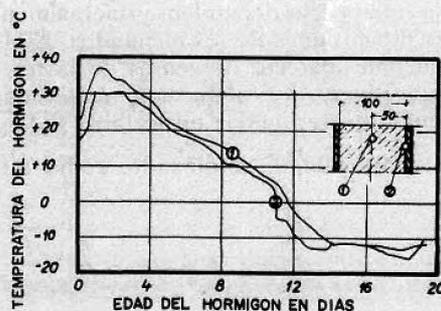


Gráfico 16.—Marcha de la temperatura en un muro de 4 m de espesor, según los ensayos de T. C. Hansen (3). Desencofrado a los once días.

«Si desde la puesta en obra del hormigón han surgido días fríos (temperaturas entre + 5 y 0°C), el encargado responsable de la obra debe comprobar con cuidado el desencofrado del elemento y observar si el hormigón ha endurecido suficientemente y determinar si es necesario prolongar el plazo de encofrado indicado.

Si durante el endurecimiento aparecen heladas, los plazos de desencofrado se deben prolongar por lo menos tanto tiempo como dura la helada. Al reanudar los trabajos después de las heladas y antes de completar el desencofrado, se debe estudiar el hormigón para ver si éste ha fraguado y endurecido lo suficiente o si solamente tiene dureza por congelación.

Con condiciones atmosféricas desfavorables y en tiempo de heladas, la policía de la construcción puede fijar la responsabilidad en la decisión de los plazos de desencofrado fallando por un ensayo a compresión en probetas (ver párrafo 6, cifra 3b y 3c), que han endurecido a la intemperie bajo las mismas condiciones del hormigón en la obra (comprobación de endurecimiento según parte D, observación cifra 2c).»

El encargado de la obra debe comprobar que el hormigón ha endurecido lo suficiente. Sería recomendable que en las nuevas disposiciones del hormigón armado se definiese exactamente el «hormigón suficientemente endurecido»; por ejemplo, mediante una indicación del porcentaje de la resistencia a la compresión necesaria para el desencofrado, en relación con la calidad exigida del hormigón. Los valores señalados en la tabla 7 son una propuesta en este sentido.

Disponiendo de una base de este tipo sería posible, a base de comprobaciones de endurecimiento, o por cálculo previo, limitar de un modo mucho más seguro los plazos de desencofrado necesarios.

TABLA 7.—Propuesta para fijar la resistencia a la compresión necesaria en el hormigón al desencofrar en % de la resistencia a la compresión prescrita a los 28 días (calidad del hormigón).—Resistencia a la compresión mínima del hormigón al desencofrar = 120 kg/cm²

ELEMENTO CONSTRUCTIVO	Carga existente * en % de la carga calculada		
	100	75	50
Hormigón tesado	90	80	70
Superficie inferior de vigas y placas de forjado de gran luz.	80	70	60
Placas de forjado con una luz inferior a 4,5 metros	70	60	50
Muros, columnas, pilares y paramentos laterales de vigas ...	60	50	40

* Peso propio más cargas transitorias.

Una posibilidad para fijar el plazo de desencofrado en relación con la resistencia a la compresión necesaria en el hormigón expresada en %, la temperatura media del hormigón y su composición se muestra en el gráfico 17. Los plazos de desencofrado determinados u obtenidos del diagrama se deben prolongar por la duración de los días de helada que hayan podido aparecer entre tanto. En casos de duda es decisivo, para fijar el plazo de desencofrado, el resultado de la comprobación del endurecimiento.

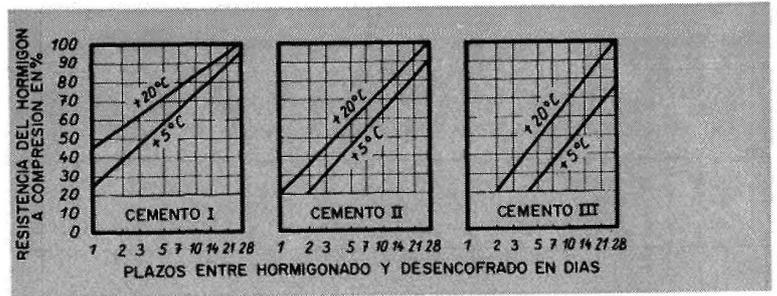
5. Resumen e indicaciones en la práctica

Las medidas que se deben prever en la obra de invierno a la intemperie dependen, principalmente, de las condiciones atmosféricas reinantes y posibles y de las dimensiones de los elementos. Estas medidas se deben prever de antemano. Cuando por la época puedan aparecer descensos de la temperatura por debajo de + 5°C, se deben tener a mano los dispositivos, de calefacción, materiales de cubrición, etc. Las medidas más importantes a tomar se encuentran resumidas en la tabla 8.

Estas rigen para los siguientes elementos de hormigón 225 y más calidad, empleando, como mínimo, un encofrado de madera:

- a) Placas con un espesor mínimo de 12 centímetros.
- b) Vigas con un mínimo de 20 cm de ancho.
- c) Muros con un mínimo de 15 cm de espesor.
- d) Columnas con un diámetro mínimo de 30 centímetros.

Gráfico 17.—Determinación aproximada del período de desencofrado.



a) y b) cubiertas en la parte superior con una capa aislante protectora contra la humedad de 2 a 4 centímetros.

En pequeñas dimensiones y en bajas calidades de hormigón se deben prever medidas efectivas. Elementos de espesor considerablemente mayor requieren, en casos determinados, medidas menos severas.

TABLA 8.—Relación de las medidas más importantes a tomar para el hormigonado a bajas temperaturas

	Suposiciones de tiempo y temperatura exterior en °C								
	Tiempo fresco			Helada breve			Helada permanente		
Agua	precalentar			precalentar			precalentar		
Aridos	—			deshelar			precalentar		
Temperatura hormigón fresco	≥ 10°C			≥ 15°C			≥ 20°C		
Contenido de cemento, A/C	normal ≤ 0,70			normal ≤ 0,65			aumentar ≤ 0,60		
Cemento aconsejable	I, II, III			I, II			I (II)		
Capa aislante	≥ 2 cm			≥ 3 cm			≥ 4 cm		
Tiempo de cubrición mínimo en días	I	II	III	I	II	III	I	II	III
	1	2	5	1-2	3	—	2	(4)	—

Hay que diferenciar entre tiempo fresco con temperaturas de +10 a -1°C, helada breve con temperaturas hasta -5°C y helada persistente alrededor y por debajo de -10°C. En el caso de temperaturas persistentes alrededor y por debajo de -10°C, se interrumpe generalmente el hormigonado en la obra de invierno a la intemperie.

El tiempo indicado para la cubrición con una capa de aislante es suficiente para asegurar la resistencia a la congelación del hormigón. En los elementos con un espesor superior a 1 m, puede ser adecuada una protección más prolongada del hormigón frente a la pérdida de calor para reducir la caída de la temperatura. Los encofrados y las armaduras no deben estar heladas en ningún caso al colocar el hormigón. Estos se deben precalentar por vapor o aire caliente. Los elementos recién hormigonados o recién desencofrados deben protegerse de las corrientes de aire para evitar un secado rápido y un enfriamiento igualmente rápido. Con objeto de tener un control sobre la efectividad del aislamiento de encofrados y cubriciones se aconseja tomar la temperatura del hormigón al colocarlo y, por lo menos, una vez al día, empleándose para esto un termómetro instalado en el interior del hormigón. Cuando durante el día solamente se toma una lectura, debe hacerse preferentemente en las primeras horas de la mañana. Los termómetros se deben montar en aquellas zonas donde es muy fuerte la influencia del viento.

La marcha del endurecimiento con bajas temperaturas en el exterior es preciso controlarla cuidadosamente por comprobación en probetas o empleando procedimientos adecuados no destructivos. Los plazos necesarios para el desencofrado se pueden determinar por apreciación cuando se conoce la temperatura media del hormigón.

bibliografía

- (1) W. BRAND: Über die Zeit-Temperatur-Abhängigkeit der Erhärtung verschiedener Zementarten, Zement-Kalk-Gips, 9 Jg (1956), Heft 7.
- (2) K. WESCHE, A. HUMMEL: Von der Erhärtung verschiedener Bindemittel bei niederen Wärmegraden, Zement-Kalk-Gips, Jg. 8 (1955), Heft 8.
- (3) T. C. HANSEN: Surface cracking of mass concrete structures at early formremoval, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Applied Studies No. 4, Stockholm 1960.