se recomienda darle preferencia para el curado húmedo de concretos hechos con bajas relaciones agua/cemento (menos de 0.45); sin embargo, el impedimento de asegurar su continua aplicación en superficies verticales o de difícil acceso, o sobre superficies de concreto recién colocado, ha favorecido el uso del segundo procedimiento, ya sea mediante la utilización de telas plásticas o de compuestos líquidos que forman membrana.

En el caso de pisos y pavimentos de concreto hidráulico, y otros revestimientos similares, su durabilidad depende en gran medida de que la capa superficial de concreto posea una adecuada resistencia a la abrasión; pero debido a su gran superficie expuesta por unidad de volumen, son estructuras proclives a perder mayor cantidad de agua por evaporación, particularmente cuando se cuelan en un ambiente cálido, seco y con viento. Por tal motivo, la ejecución de un buen curado resulta de vital importancia en estos casos, para mantener húmedo el concreto recién colocado y así evitar que sufra agrietamientos por contracción plástica y la capa superficial se vea reducida en su resistencia mecánica, especialmente a la abrasión. La elección del procedimiento apropiado para curar estas estructuras requiere tomar en cuenta su oportunidad y eficacia, es decir, que pueda aplicarse a la mayor brevedad posible después del acabado superficial del concreto y que resulte efectivo para restringir la pérdida de agua por evaporación.

En una investigación de campo para definir el procedimiento de curado que debería aplicarse al revestimiento de concreto de los canales vertedores de una presa en el Estado de Chiapas (12) se ensayaron seis sistemas de curado cuyos efectos sobre la resistencia a compresión del concreto superficial se indican en la Fig 7 (12). Con base en estos resultados, el sistema elegido consistió en la aplicación inmediata de una membrana de curado sobre el concreto recién acabado (para cumplir con el aspecto de oportunidad) seguido por la colocación de una tela de polietileno al cabo del fraguado final (para complementar el requisito de eficacia). Procede hacer notar que en estas pruebas se juzgó la eficacia del curado mediante la resistencia a compresión del concreto superficial, al considerar ésta como índice de sus propiedades mecánicas en general; cuya inferencia también resulta válida para la resistencia a la abrasión, según se observa en la Fig 8 (13) que representa la mejoría que se obtiene en este aspecto cuando el concreto se cura convenientemente.

En cuanto a la permeabilidad, también existen numerosas evidencias del beneficio que se obtiene en este aspecto en el concreto superficial de las estructuras como consecuencia de un buen curado húmedo. A manera de ejemplo, en la Fig 9 (14) se compara la permeabilidad superficial del concreto cuando se expone al ambiente sin protección o humedecimiento y cuando se conserva continuamente húmedo; cuyo efecto positivo reafirma la importancia que tiene el curado para la durabilidad de las estructuras de concreto de todo tipo que deben prestar servicio en contacto con fluidos potencialmente agresivos al concreto y al acero de refuerzo, como es el caso de las que tienen contacto con aguas freáticas o suelos con alto contenido de sulfatos y/o cloruros, y de las que permanecen expuestas al agua de mar y sus salpicaduras, o simplemente al aire marino, ya que el efecto dañino de estos fluidos depende en buena medida de su grado de penetración en el concreto superficial.

Cambios Volumétricos

El concreto experimenta normalmente cambios volumétricos de diversa índole, desde que se encuentra recién colocado en la estructura hasta el final de su vida de servicio. Dichos cambios, que pueden ser predecibles, no suelen afectar la durabilidad de las estructuras cuando son moderados y se toman adecuadamente en cuenta en el diseño estructural; sin embargo, cuando se trata de contracciones que resultan mayores de lo previsto, y/o no se previenen las medidas estructurales necesarias, pueden ocurrir agrietamientos que con cierta frecuencia se convierten en puntos débiles por donde se inicia el deterioro de las estructuras de concreto.

Las causas de los principales cambios volumétricos del concreto son sus variaciones de humedad y temperatura, de modo que al referirse en particular a las contracciones, éstas se relacionan con la disminución de la humedad y el descenso de la temperatura. En tal concepto, las condiciones ambientales más desfavorables son las que propician la evaporación del agua, como sucede en los sitios de clima caluroso y seco, y las que manifiestan grandes intervalos de variación entre las temperaturas máximas y mínimas.

La primera contracción importante del concreto es la que ocurre en el curso de la etapa de fraguado, que como se ha dicho se denomina contracción plástica y se acrecienta cuando el concreto recién colocado en las formas pierde agua por evaporación con demasiada rapidez. Se ha dicho también que la velocidad de evaporación se torna crítica cuando se aproxima a 1 kg/m²/hr porque la contracción plástica alcanza magnitudes que fácilmente agrietan el concreto, ya que éste carece en esta etapa de capacidad para resistir los esfuerzos de tensión que se generan. Tales agrietamientos pueden evitarse normalmente con el uso de la medidas precautorias que más adelante se mencionan; pero cuando se producen y son detectados antes del fraguado final, pueden ser corregidos mediante la recompactación por apisonamiento enérgico del concreto en la superficie agrietada, cuidando de restablecer su integridad.

En la etapa de endurecimiento, que propiamente se inicia a partir del fraguado, el concreto sigue contrayéndose en la medida que continúa disminuyendo su contenido de humedad. Esta contracción que se conoce como contracción por secado, tiene una evolución relativamente rápida durante las primeras semanas, y después se hace más lenta pero continúa manifestándose en el curso del tiempo, incluso al cabo de 30 años, mientras el concreto permanece seco. Dicha contracción por secado, que es causa frecuente del agrietamiento de numerosas estructuras, depende significativamente de las características de los agregados y del contenido de pasta de cemento en el concreto, pero también puede ser incrementada por aspectos inherentes al clima caluroso, tales como el contenido de agua de mezclado del concreto y la humedad relativa del medio ambiente en que presta servicio la estructura.

En el primer aspecto, hay que tomar en cuenta que la demanda de agua de mezclado del concreto tiende a incrementarse en clima caluroso, por lo cual resulta útil toda medida que permita contrarrestar esa sobredemanda de agua en el mezclado de concreto, como puede ser por ejemplo el uso de aditivos reductores de agua, y en particular los llamados

reductores de alta eficiencia (superfluidificantes) que permiten lograr reducciones hasta de 30 por ciento en el requerimiento de agua de mezcla. En cuanto al segundo aspecto, es un hecho evidente que al disminuir la humedad relativa del ambiente se intensifica la pérdida de agua por evaporación del concreto, y esto repercute en la magnitud de su contracción por secado según se indica en la Fig 10 (15). Para moderar los efectos que en este aspecto producen las condiciones ambientales cálidas y secas, también ejerce influencia positiva la ejecución de un buen procedimiento de curado húmedo, conforme se hace notar en la Fig 11 (16). Aquí es oportuno señalar que una medida importante para reducir los agrietamientos debidos a la contracción por secado (y por los cambios volumétricos en general) consiste en definir juntas de servicio adecuadas (contracción y/o expansión) en las estructuras, para lo cual dicha contracción debe evaluarse conforme a los métodos de predicción de uso aceptado, como por ejemplo el ACI 209 (17).

La contracción debida al primer descenso de temperatura del concreto se produce en el curso del tiempo que el concreto de la estructura tarda en igualar su temperatura con la del medio ambiente; y su magnitud depende básicamente del coeficiente de expansión térmica del concreto y de la diferencia que existe entre la temperatura máxima del concreto y la del ambiente. El coeficiente de expansión térmica del concreto lo determina principalmente la naturaleza de los agregados que lo constituyen, de modo que en un caso dado no es un factor susceptible de maniobra; por consiguiente, para moderar la contracción de origen térmico el recurso básico consiste en restringir la sobreelevación de temperatura del concreto en la estructura.

La temperatura máxima del concreto después de ser colocado en estructuras ordinarias (no voluminosas) se produce en el término de pocos días (Fig 12) y su magnitud es consecuencia de diversos factores entre los que destacan: la temperatura inicial del concreto, el tipo y consumo unitario de cemento, y las condiciones de acumulación y disipación de calor que son propias de cada estructura. De estos factores el que propiamente guarda relación con el medio ambiente se refiere a la temperatura inicial del concreto, de manera que la disminución de ésta es un medio adecuado para reducir el intervalo en que debe descender la temperatura, según se muestra en la Fig 12, y por consiguiente para reducir también la magnitud de la contracción térmica y su correspondiente riesgo de agrietamiento. Para disminuir la temperatura inicial de colocación del concreto en clima caluroso existen diversas medidas aplicables que se hallan descritas con detalle en el informe del Comité ACI 305 (3) y de las cuales se hace un resumen más adelante.

De igual manera que en el caso de la contracción por secado, una medida necesaria para prevenir los agrietamientos por contracción térmica consiste en la adecuada definición de juntas en la estructura que permitan absorber los cambios volumétricos de origen térmico: tanto la primera contracción debida al enfriamiento inicial del concreto a edad temprana, como las expansiones y contracciones subsecuentes que se producen en el curso de la vida de servicio de la estructuras por efecto de las variaciones de temperatura ambiental, particularmente las que se localizan en regiones como la zona A del territorio nacional en que los cambios estacionales son extremosos, para cuyo objeto debe hacerse la correspondiente evaluación anticipada de dichos cambios volumétricos de origen térmico

(17). Es asimismo pertinente señalar que las juntas de servicio no solamente deben ser motivo de una adecuada localización y diseño, sino también de una apropiada construcción y mantenimiento, pues de no ser así pueden convertirse en sitios localizados de debilidad en la estructura, especialmente susceptibles al deterioro prematuro.

MEDIDAS PREVENTIVAS Y CORRECTIVAS

Las medidas para prevenir y corregir los efectos perjudiciales del clima caluroso sobre el concreto, y sus correspondientes repercusiones adversas a la durabilidad de las estructuras, deben adoptarse en las etapas de diseño y construcción y complementarse en la etapa de servicio con un adecuado mantenimiento. La aplicación de estas medidas, cuya eficacia guarda cierta relación con su grado de dificultad y costo, se define normalmente en función de las características e importancia de la estructuras y de las condiciones climáticas en que éstas deben construirse y prestar servicio. Muchas de estas medidas van encaminadas principalmente a evitar o por lo menos restringir los agrietamientos del concreto, ya que éstos suelen dar motivo al deterioro anticipado de la estructuras (18).

Previsiones de Diseño Estructural

En las estructuras que se justifique, debe preverse la instalación de juntas de servicio para absorber en la mayor medida posible las contracciones y/o expansiones del concreto, debidas a las variaciones de humedad y temperatura; sin menoscabo del acero de refuerzo necesario para tomar los esfuerzos inducidos por estos cambios volumétricos. (Conviene prever el refuerzo adecuado para distribuir las grietas, a modo de no exceder en éstas una abertura máxima especificada). Para tal fin deben estimarse adecuadamente dichos cambios de volumen, de acuerdo con las características de la estructura (dimensiones, forma, espesores), del concreto (naturaleza de los agregados, tipo de cemento, proporciones) y del clima y ambiente de servicio (temperatura, humedad relativa), conforme a los procedimientos y criterios usuales (17).

Diseño de la Mezcla de Concreto

El diseño de la mezcla de concreto no sólo debe ser adecuado para lograr las propiedades especificadas en el concreto endurecido, sino también para obtener un adecuado comportamiento del concreto en estado fresco y en curso de endurecimiento, mediante una acertada selección de sus componentes. Dado que la fuente de suministro de los agregados frecuentemente no es opcional, las posibilidades selectivas se refieren principalmente al cemento y los aditivos.

Es deseable emplear preferentemente un cemento portland tipo II, porque su moderado calor de hidratación resulta útil para restringir la sobreelevación de temperatura del concreto en sus primeras edades y su correspondiente cambio volumétrico. Una alternativa viable para el mismo fin consiste en utilizar un cemento portland-puzolana; pero

como hay cementos de esta clase que incrementan la demanda de agua de mezclado y/o aceleran la pérdida de revenimiento del concreto recién mezclado, es recomendable efectuar pruebas al concreto en condiciones de obra con el cemento propuesto. Otra condición que debe evitarse es el uso de un cemento con falso fraguado.

Los aditivos para concreto de uso más frecuente en clima caluroso son los que tienen la doble función de ser reductores del agua de mezcla y retardadores del fraguado. El primer efecto tiene utilidad para compensar el incremento en la demanda de agua que ocurre al mezclar el concreto en tiempo caluroso, en tanto que el segundo suele ser necesario para contrarrestar la aceleración del fraguado que se produce al aumentar la temperatura. Existen dos categorías de aditivos de esta índole: los reductores de agua normales y los de alta eficiencia; actualmente hay la tendencia a preferir los segundos, no obstante que su costo unitario es más alto. En cualquier caso es recomendable verificar en obra el comportamiento de la mezcla de concreto con el cemento y el aditivo propuestos, pues hay cementos y aditivos que no son compatibles porque generan reacciones inmediatas que rigidizan rápidamente el concreto recién mezclado.

La mezcla de concreto debe diseñarse con el mínimo consumo de cemento que sea posible, con el fin de reducir los cambios volumétricos por sobreelevación de temperatura y por secado. Si la estructura se construye en donde ocurren muy bajas temperaturas invernales (como hay sitios en la zona climática A del territorio nacional) debe prevenirse el uso de un aditivo inclusor de aire, no obstante que la construcción se efectúe en condiciones de clima caluroso.

Elaboración del Concreto

Conforme se ha dicho, la temperatura inicial del concreto es uno de los factores que determina la temperatura máxima que alcanza el concreto en la estructura. Por tal motivo, para moderar esta sobreelevación de temperatura, un medio eficaz consiste en disminuir al mínimo posible la temperatura inicial del concreto, lo cual en clima caluroso requiere la adopción de una serie de medidas con diverso grado de eficacia, cuya aplicación depende de la diferencia entre la temperatura natural del concreto sin el uso de estas medidas y el nivel de temperatura que se pretende darle. También se ha mencionado que no hay un tope único para la temperatura inicial de colocación del concreto porque deben tomarse en cuenta las condiciones de generación, acumulación y disipación de calor de cada estructura en particular. Así, en términos generales, para estructuras voluminosas los requerimientos son muy estrictos, por lo que se especifican temperaturas máximas de colocación del concreto (en cualquier clima) que suelen variar entre 12 y 24°C, aproximadamente, de acuerdo con su espesor y otros aspectos. Para estructuras no voluminosas, pero de grandes dimensiones y/o con importantes requisitos de servicio, es frecuente cuando se construyen en clima caluroso especificar para la temperatura de colocación del concreto un valor máximo comprendido entre 24 y 32°C, aproximadamente, según el caso. Finalmente en estructuras menores y/o de poca importancia no es común que se especifique una temperatura máxima permisible de colocación del concreto, aun cuando es deseable no sobrepasar los 38°C durante tiempo caluroso.

Para conseguir que la temperatura del concreto recién mezclado no rebase el límite máximo que se especifique, cuando la temperatura ambiente es del mismo orden o mayor que éste, existen diversas medidas aplicables que se mencionan a continuación, cuya complementación debe intentarse gradualmente a fin de obtener la temperatura requerida al menor costo posible:

En los componentes--Regar continuamente con agua por aspersión el agregado grueso, para mantenerlo superficialmente húmedo. Proteger con aislamiento térmico el depósito y las tuberías de circulación del agua para el mezclado del concreto. No utilizar cemento caliente (no más de 60°C, aproximadamente). Proteger del sol los depósitos de agregados para uso inmediato, adjuntos a la planta de concreto.

Al elaborar el concreto--Efectuar los colados en las horas de menor temperatura ambiental (de ser posible por la noche). Pintar de blanco exteriormente la revolvedora central y proteger del sol el sitio de mezclado. Evitar el exceso de tiempo de mezclado. Utilizar hielo en escamas o molido en substitución de una fracción del agua neta de mezclado, o bien utilizar en su totalidad agua preenfriada como agua de mezcla, o bien inyectar nitrógeno líquido en la revolvedora en movimiento para enfriar la mezcla de concreto en curso de elaboración.

Transporte, Colocación, Compactación y Acabado

Durante colados en clima caluroso, estas operaciones requieren ser planeadas cuidadosamente debido a la influencia adversa que estas condiciones climáticas ejercen sobre la pérdida de revenimiento y la rigidización prematura del concreto recién mezclado, de modo que dichas operaciones se realicen de manera expedita y con la debida protección al concreto contra la acción directa del sol y del viento. Cuando el concreto se transporta en mezcladoras en tránsito, es útil pintarlas exteriormente de blanco, y cuando se coloca con bomba, es conveniente cubrir las tuberías con aislamiento térmico. Atención especial requieren las operaciones de acabado de las superficies libres, a fin de que se lleven a cabo oportuna y rápidamente para poder darle protección inmediata contra la evaporación a estas superficies.

Protección al Concreto recién Colocado

Al término del acabado, las superficies libres deben protegerse contra la pérdida de agua por evaporación. A fin de poder hacerlo de inmediato, es conveniente el uso de una membrana de curado de buena calidad, aplicada por aspersión muy fina sobre la superficie recién terminada. Es también conveniente complementar dicha protección cubriendo estas superficies ya fraguadas con una tela de polietileno o manteniéndolas continuamente humedecidas. En las superficies moldeadas, las cimbras no soportantes deben retirarse lo más pronto que permita el endurecimiento del concreto, a fin de proteger éste con la citada membrana de curado o por humedecimiento continuo. Las cimbras soportantes deben retirarse cuando el concreto alcance la resistencia requerida para ello, y las

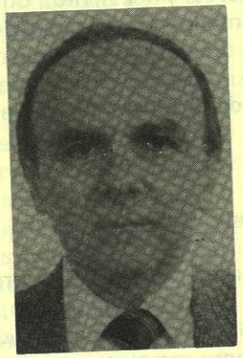
superficies recién desmoldadas deben protegerse del mismo modo; de ser posible, el concreto debe conservarse húmedo en el lapso anterior al descimbrado mediante la aplicación de agua a las cimbras, o cubriéndolas con lienzos húmedos.

Mantenimiento de las Estructuras

El mantenimiento más eficaz es el que se realiza de manera preventiva, es decir, corrigiendo las causas más que los efectos. En relación con las estructuras que prestan servicio en ambiente cálido, y en especial si es húmedo (como prevalece en la zona climática C del territorio nacional) merece particular atención la existencia de agrietamientos, porque éstos son motivo frecuente de efectos deteriorantes como la corrosión del acero de refuerzo por ejemplo. Por tal consideración es muy necesario detectar oportunamente la aparición de grietas y darles el tratamiento correctivo adecuado a su origen (19), a fin de prolongar la vida útil de las estructuras.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Gerencia de Ingeniería Experimental y Control de la Comisión Federal de Electricidad las facilidades brindadas para la elaboración de este artículo, y a la Srita. Martha Gómez Toledo la eficiente transcripción del manuscrito.



Manuel Mena Ferrer,
Ingeniero Consultor,
México, D.F.

REFERENCIAS

1. Mays, G.C. "The Behavior of Concrete". Durability of Concrete Structures, Chapter 1. E and FN Spon Publishers. London, UK. 1992
2. ACI Committee 306. "Cold Weather Concreting". Report ACI 306R. American Concrete Institute. Detroit, USA. 1988.
3. ACI Committee 305. "Hot Weather Concreting". Report ACI 305R. American Concrete Institute. Detroit, USA. 1991
4. U.S. Bureau of Reclamation. "Concrete Manual". Eighth Edition. U.S. Department of the Interior. Washington, D.C., USA. 1975. p 255.
5. Lerch, W. "Plastic Shrinkage". ACI Journal. Vol. 53, No. 8. American Concrete Institute. Detroit, USA. 1957.
6. Tamayo, J.L. "Geografía Moderna de México". Editorial Trillas. Novena Edición. México, D.F., MEX. 1980.
7. Portland Cement Association. "Design and Control of Concrete Mixtures". Eleventh Edition. Skokie, Ill., USA. 1968.
8. Verbeck, G. and Copeland, L.E. "Some Physical and Chemical Aspects of High Pressure Steam Curing". ACI SP-32, Paper 1. American Concrete Institute. Detroit, Mich., USA. 1972.
9. Price, W.H. "Factors Influencing Concrete Strength", ACI Journal. Vol. 47, No. 7 American Concrete Institute. Detroit, Mich. USA. 1972.
10. ACI Committee 308. "Standard Practice for Curing Concrete". American Concrete Institute. Detroit, Mich., USA. 1986.
11. Carrier, R.E. "Concrete Curing Tests". Concrete International, Design and Construction. Vol. 5. No. 4. American Concrete Institute, Detroit, Mich. 1983.
12. Comisión Federal de Electricidad. "Control del Concreto Durante la Construcción de Grandes Obras". Instituto de Ingeniería, UNAM. México, D.F. MEX. 1976.
13. Kettle, R. and Sadegzadeh, M. "The Influence of Construction Procedures on Abrasion Resistance". ACI SP-100, Paper 71. American Concrete Institute. Detroit, Mich. USA. 1987.

14. Montgomery, R.E., Basheer, P.A.M. and Long, A.E. "Influence of Curing Conditions on the Durability Related Properties of Near Surface Concrete and Cement Mortars". ACI SP-131, Paper 5. American Concrete Institute. Detroit, Mich. USA. 1992.

15. Troxell, G.E., Raphael, J.J. and Davis, R.E. "Long-Time Creep and Shrinkage Tests of Plain and Reinforced Concrete". ASTM Proceedings, Vol. 58. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, Pa. USA. 1958

16. Senbetta, E. and Malchow, G. "Studies on Control Durability of Concrete Through Proper Curing". ACI SP-100, Paper 7. American Concrete Institute. Detroit, Mich. USA. 1987.

17. ACI Committee 209. "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures". American Concrete Institute. Detroit, Mich. USA. 1986.

18. The Concrete Society. "Non-Structural Cracks in Concrete". Concrete Society Technical Report No. 22. London, UK. 1982.

19. Comisión Federal de Electricidad. "Manual de Mantenimiento para Concreto". Subdirección de Producción. Gerencia de Generación. Subgerencia de Ingeniería Civil. México, D.F. MEX. 1991.

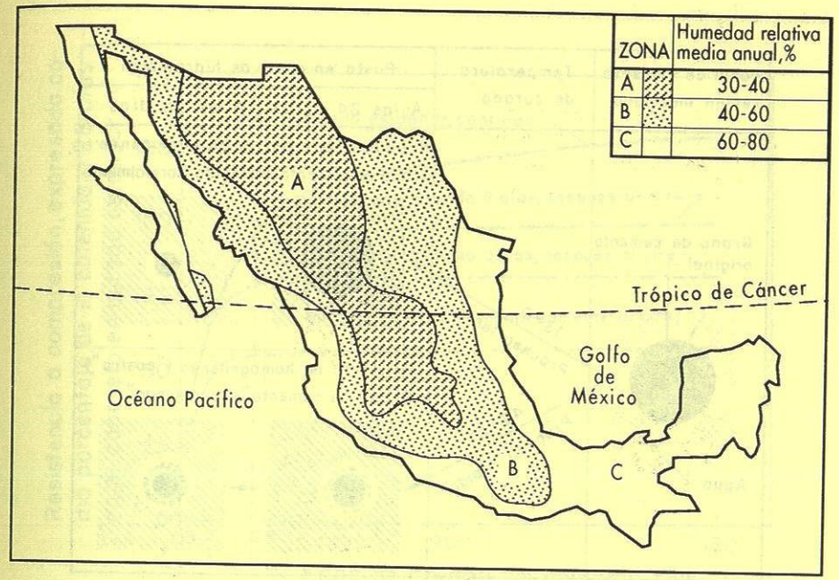


Fig. 1--Zonas locales definidas por humedad relativa (6)

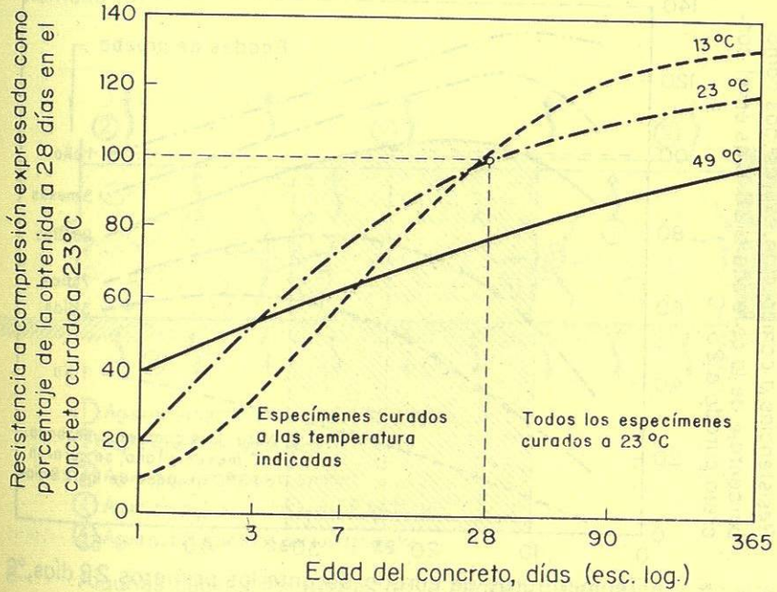


Fig. 2--Evolución de resistencia según la temperatura (7)

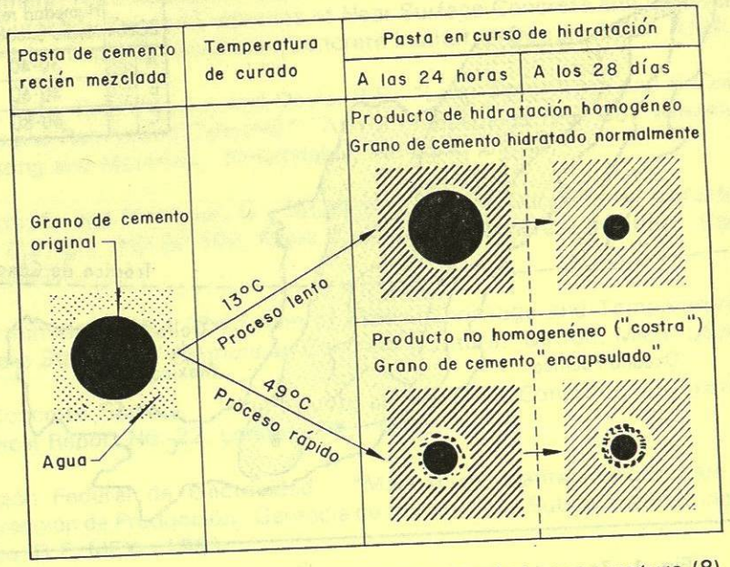


Fig. 3-- Hidratación del cemento en alta y baja temperatura (8)

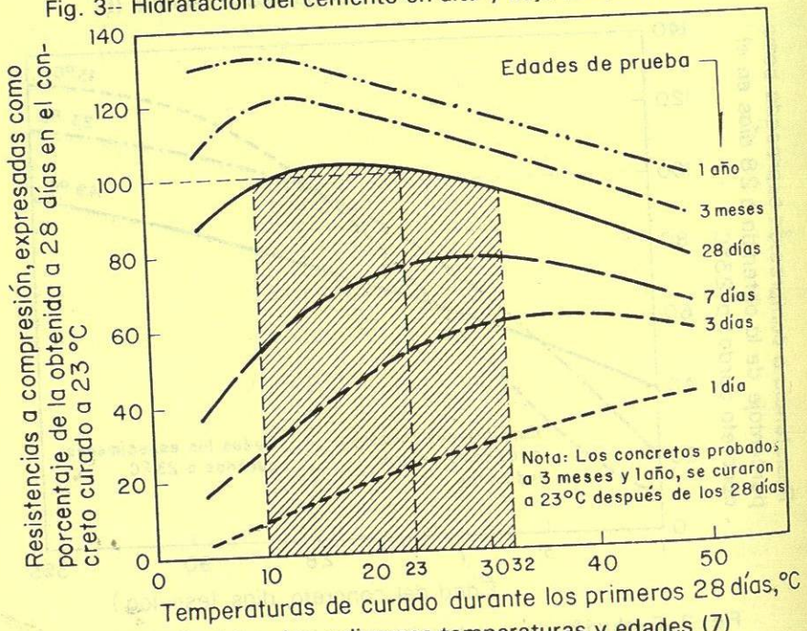


Fig. 4--Resistencias a diversas temperaturas y edades (7)

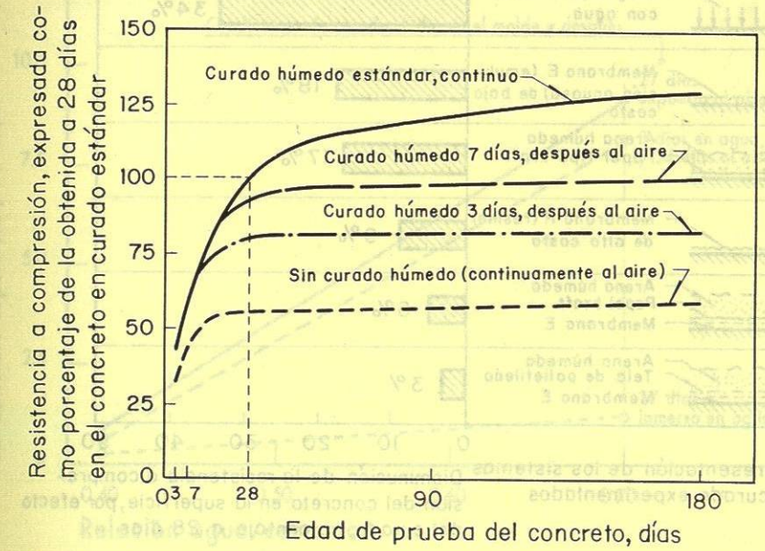
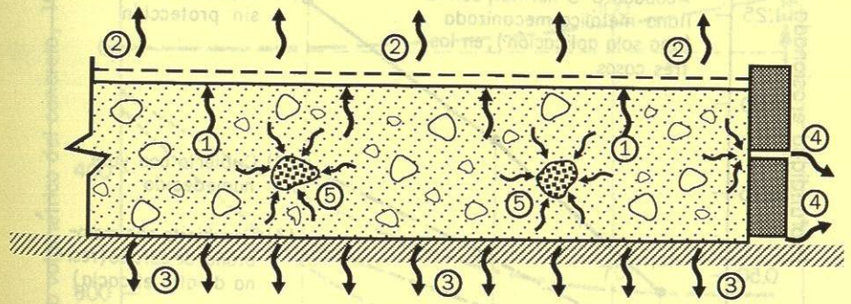


Fig. 5-- Detrimento en la resistencia a compresión del concreto por falta de curado húmedo (9)



① Agua de sangrado que asciende a la superficie
② Agua superficial que se evapora
③ Agua que se infiltra en el terreno
④ Agua que se fuga por las juntas de las formas
⑤ Agua que es absorbida por los agregados

Fig. 6-- Algunas causas frecuentes de la pérdida de agua en el concreto recién colocado.