

Capítulo 8

Concreto con Aire Incluido

Uno de los grandes avances en la tecnología del concreto fue el desarrollo del concreto con aire incluido (incorporado) en la mitad de la década de 30. Hoy en día, la incorporación del aire se recomienda para casi todos los concretos, principalmente para mejorar la resistencia a congelación-deshielo de concretos expuestos al agua y a los descongelantes. Sin embargo, la inclusión de aire presenta otros beneficios para el concreto fresco y el concreto endurecido.

El concreto con aire incluido se produce con el uso de un cemento con inclusor (incorporador) de aire o con la adición de aditivo inclusor de aire durante el mezclado. El aditivo inclusor de aire estabiliza las burbujas formadas durante el proceso del mezclado, realiza la incorporación de burbujas de varios tamaños con la disminución de la tensión superficial del agua de mezcla, impide la coalescencia de las burbujas y ancla las burbujas en el cemento y en las partículas de agregados.

Los aditivos inclusores de aire aniónicos son hidrófobos (repelen el agua) y están cargados eléctricamente (los aditivos no iónicos también están disponibles). La

carga eléctrica negativa es atraída hacia los granos de cemento cargados positivamente, lo que ayuda la estabilización de las burbujas. El aditivo inclusor de aire forma una película resistente, repelente al agua, similar a una película de jabón, con resistencia y elasticidad suficientes para contener y estabilizar las burbujas de aire y prevenir que se junten. La película hidrófoba también mantiene el agua fuera de las burbujas. La agitación y el amasamiento promovidos por el mezclado mecánico dispersan las burbujas de aire. Las partículas de agregado fino también actúan como rejilla tridimensional para ayudar a sostener las burbujas en la mezcla.

Las burbujas de aire incluido no son como los vacíos de aire atrapado (aire ocluido), que ocurren en todos los concretos como resultado del mezclado, manejo y colocación (colado) y que dependen en gran parte de las características de los agregados. Las burbujas de aire intencionalmente incorporado son extremadamente pequeñas, con diámetro entre 10 y 1000 μm , mientras que los vacíos atrapados en el concreto convencional son normalmente mayores que 1000 μm (1 mm). La mayoría de los vacíos de aire incluido tienen de 10 a 100 μm de diámetro. La Figura 8-1 enseña que las burbujas no se conectan, están bien dispersas y uniformemente distribuidas. El concreto sin aire incluido con un tamaño máximo de agregado de 25 mm (1 pulg.) tiene un contenido de aire de aproximadamente 1½ %. La misma mezcla con aire incluido necesita un contenido de aire de 6% (incluyendo vacíos “atrapados” mayores y vacíos “incorporados” menores) para resistir a las condiciones de exposición a congelación severa.

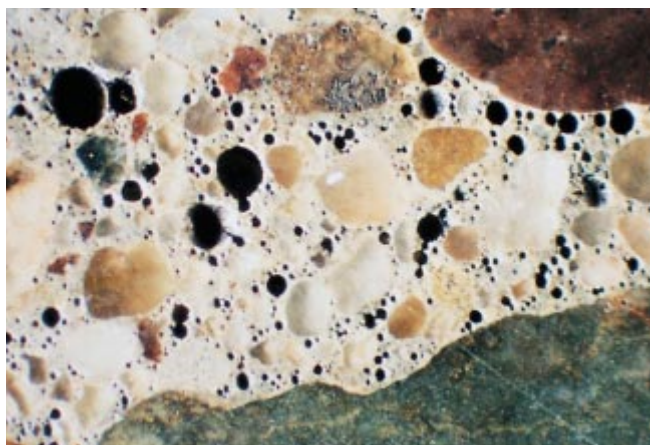


Fig. 8-1. Sección pulida de un concreto con aire incluido, como se ve a través del microscopio. (IMG12328)

PROPIEDADES DEL CONCRETO CON AIRE INCLUIDO

Las principales propiedades influenciadas por la incorporación de aire se enseñan en las secciones siguientes. Un breve resumen de otras propiedades se presenta en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1. Efecto del Aire Incluido sobre las Propiedades del Concreto

Propiedades	Efecto
Abrasión	Poco efecto; el aumento de la resistencia, aumenta la resistencia a abrasión
Absorción	Poco efecto
Acabado	Reducción debido al aumento de cohesión
Adherencia al acero	Disminución
Calor de hidratación	Poco efecto
Calor específico	Sin efecto
Cohesión	Aumento de la cohesión, dificultando el acabado
Conductividad térmica	Disminuye cerca del 1% al 3% para el aumento de cada punto porcentual del aire.
Demanda de agua del concreto fresco para un mismo revenimiento (asentamiento)	Disminuye con el aumento del contenido de aire aproximadamente de 3 a 6 kg/m ³ (5 a 10 lb/yard ³) por cada punto porcentual del aire.
Descascaramiento	Reducción significativa
Descascaramiento por descongelantes	Reducción significativa
Difusividad térmica	Disminuye cerca del 1.6% con el aumento de cada punto porcentual del aire.
Estanquidad	Aumenta un poco por la disminución de la relación agua/cemento
Fatiga	Poco efecto
Fluencia	Poco efecto
Masa específica	Reduce con el aumento del aire
Módulo de elasticidad (estático)	Con el aumento del aire, reduce aproximadamente de 7,300 a 14,100 kg/cm ² o 720 a 1380 MPa (105,000 a 200,000 lb/pulg ²) para cada porcentual de aire
Permeabilidad	Poco efecto, la disminución de la relación agua-cemento reduce la permeabilidad
Reactividad álcali-sílice	La expansión disminuye con el aumento del aire
Resistencia a compresión	Reduce aproximadamente del 2% al 6% para el aumento de cada punto porcentual del aire. Mezclas pobres pueden tener un aumento de la resistencia
Resistencia a congelación-deshielo	Aumento significativo de la resistencia al deterioro por congelación-deshielo en estado saturado
Resistencia a flexión	Reduce aproximadamente del 2% al 4% por el aumento de cada punto porcentual de aire
Resistencia a los sulfatos	Mejoría considerable
Retracción (secado)	Poco efecto
Revenimiento (asentamiento)	Aumenta con el incremento de aire aproximadamente 25 mm (1 pulg.) para cada ½ a 1 punto porcentual de aumento del aire.
Sangrado (exudación)	Disminuye considerablemente
Temperatura del concreto fresco	Sin efecto
Trabajabilidad	Aumenta con el aumento de aire

Nota: La información de la tabla puede no ser aplicable a todas las situaciones.

Resistencia a la Congelación-Deshielo

La resistencia del concreto endurecido a la congelación y al deshielo en la condición húmeda se mejora muchísimo con el uso intencional de aire incluido, aun cuando varios descongelantes están involucrados. Una prueba convincente de la mejoría de la durabilidad por la incorporación del aire se presenta en las Figuras 8-2 y 8-3.

Como el agua de los concretos en medios húmedos se congela, se producen presiones osmótica e hidráulica en las capilaridades y poros de la pasta de cemento y en el agregado. Si la presión supera la resistencia a tracción (tensión) de la pasta o del agregado, la cavidad va a dilatarse y romperse. El efecto acumulativo de los ciclos sucesivos de congelación-deshielo y la ruptura de la pasta y del agregado puede causar una expansión significativa y el deterioro del concreto. Este deterioro es visible en la forma de fisuras (agrietamiento), descascariamiento y desmoronamiento (Fig. 8-3). Powers (1965) y Pigeon y Pleau (1995) revisaron extensivamente el mecanismo de acción de la congelación.

Las presiones hidráulicas se causan por la expansión de 9% del agua congelada. En este proceso, los cristales de hielo en crecimiento sustituyen al agua que no se ha congelado. Si la saturación de los capilares es mayor que la saturación crítica (91.7% llenos de agua) las presiones

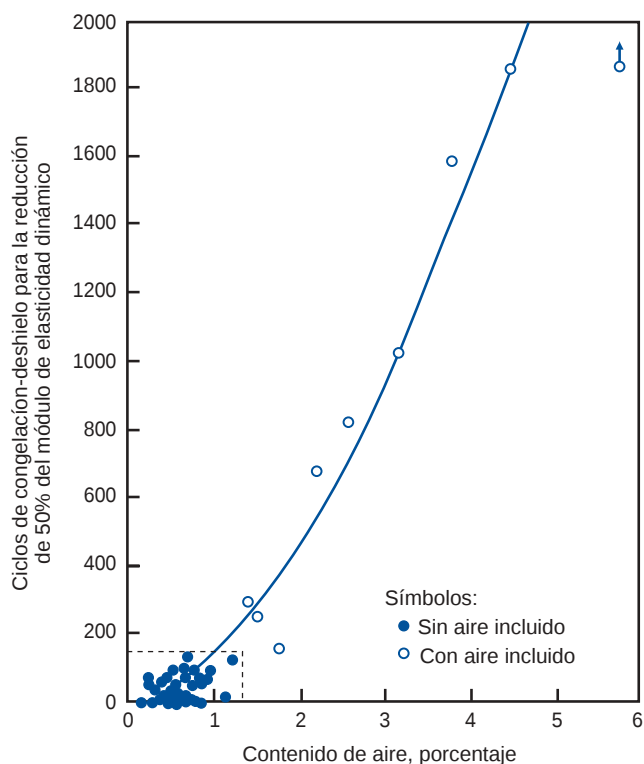


Fig. 8-2. Efecto de la inclusión de aire sobre la resistencia a la congelación-deshielo del concreto en ensayos de laboratorio. El concreto se elaboró con cementos de finuras y composiciones diferentes y varios contenidos de cemento y relaciones agua-cemento (Bates y otros 1952 y Lerch 1960).



Fig. 8-3. Efecto del envejecimiento en cajas y losas sobre el terreno en una investigación de larga duración en ambiente externo, proyecto 10, PCA, Skokie, Illinois. Los especímenes de arriba se produjeron con 335 kg (564 lb) de cemento ASTM tipo I por metro cúbico (yarda cúbica). Periódicamente, se aplicó, sobre las losas, el descongelante de cloruro de calcio. Las fotos muestran especímenes con 40 años de edad (véase Klieger 1963 para información sobre la mezcla de concreto). (IMG12408, IMG12406, IMG12407, IMG12405)

hidráulicas se producirán a medida que progrese la congelación. Si el contenido de agua es menor, no debe haber presión hidráulica.

Las presiones osmóticas se desarrollan por la diferencia de concentración de las soluciones de álcalis en la pasta (Powers 1965a). A medida que el agua pura se congela, la concentración de álcali aumenta en el agua líquida adyacente. Una solución con alta concentración de álcali, a través del mecanismo de ósmosis, extrae el agua de las soluciones en los poros con bajo contenido de álcali. Esta transferencia osmótica del agua continúa hasta que se alcance el equilibrio de la concentración de álcali en los fluidos. La presión osmótica se considera un factor de menor importancia, si acaso esté presente en la acción de congelamiento de los agregados, mientras que puede ser el factor dominante en algunas pastas de cemento. Las presiones osmóticas, como se describen anteriormente, se consideran como el principal factor para el descascaramiento (descascarillado, astilladura, desonchadura, despostilladura, engalletamiento, desmoronamiento, escamación, descamación, descantilladura) debido a los descongelantes.

El hielo en los capilares (o cualquier hielo presente en los vacíos grandes o fisuras) desaloja el agua de los poros para avanzar en su crecimiento. Además, como la mayoría de los poros en la pasta de cemento y en algunos agregados son muy pequeños para la formación de los

cristales de hielo, el agua intenta migrar hacia lugares donde pueda congelarse.

Los vacíos de aire incluido actúan como cámaras huecas en la pasta, donde el agua congelada y el agua emigrante pueden entrar, aliviando la presión descrita arriba y previniendo daños al concreto. Bajo la descongelación, la mayoría del agua retorna hacia los capilares debido a la acción capilar y a la presión del aire comprimido en las burbujas. Por lo tanto, las burbujas están preparadas para proteger el concreto del próximo ciclo de congelación-deshielo (Powers 1955, Lerch 1960 y Powers 1965).

La presión desarrollada por el agua, a medida que se expande durante la congelación, depende principalmente de la distancia que el agua debe recorrer hacia el vacío de aire más cercano para aliviarse. Por lo tanto, la distancia entre los vacíos debe ser suficientemente pequeña para reducir la presión hasta valores menores que la resistencia a tensión (tracción) del concreto. La magnitud de presión hidráulica también se relaciona con la tasa de congelación y la permeabilidad de la pasta.

El espaciamiento y el tamaño de los vacíos de aire son factores importantes que contribuyen para la eficiencia de la incorporación de aire en el concreto. La ASTM C 457 y la NTC 3791 describen métodos para la evaluación del sistema de vacíos de aire en el concreto endurecido. Muchas autoridades consideran las siguientes características de los

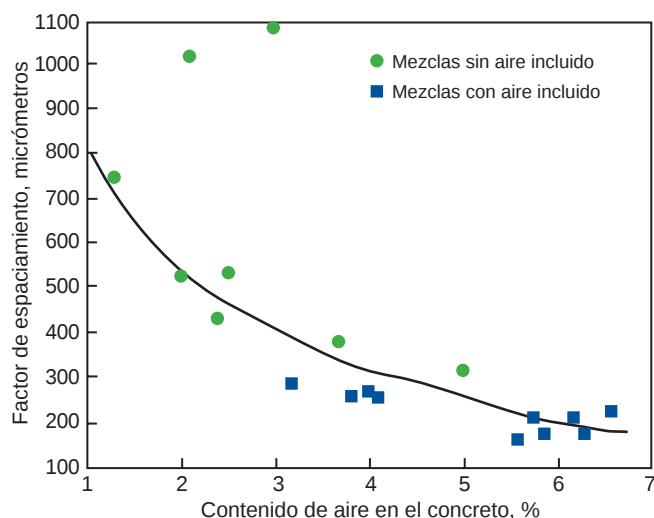


Fig. 8-4. Factor de espaciamiento en función del contenido total de aire en el concreto (Pinto y Hover 2001).

vacíos de aire como representativas de un sistema con resistencia adecuada a congelación-deshielo (Powers 1949, Klieger 1952, Klieger 1956, Mielenz y otros 1958, Powers 1965, Klieger 1966, Whiting y Nagi 1998 y Pinto y Hover 2001).

1. Factor de espaciamiento calculado, $\bar{L}$, (un índice relacionado con la distancia entre las burbujas pero no con el promedio del espaciamiento real del sistema) menor que 0.200 mm (0.008 pulg.) (Powers 1954 y 1965)
2. Superficie específica, α , (área superficial de los vacíos de aire) igual o mayor que 24 mm² por mm³ del volumen de los vacíos de aire (600 pulg² por pulg³).

La práctica usual de control de calidad normalmente comprende sólo la medida del volumen total de aire en el concreto recién mezclado. Este método no distingue, de ninguna forma, el tamaño de los vacíos de aire.

El contenido de aire del concreto, con tamaño máximo del agregado igual a 19 mm (¾ pulg.), debe ser aproximadamente 6% para que tenga una buena resistencia a congelación-deshielo.

Taylor presenta (1948) la relación entre el contenido de aire de un mortero y un concreto estándar, mientras que Pinto y Hover (2001) presentan el contenido de aire en la pasta versus la resistencia al congelamiento. El contenido total de aire necesario para una durabilidad adecuada aumenta con la disminución del tamaño máximo del agregado, debido al mayor volumen de pasta, y con el aumento de la severidad de exposición (consulte "Contenidos de Aire Recomendados" más adelante en este capítulo).

También se puede aumentar la resistencia a congelación-deshielo con el empleo de: (1) agregado de buena calidad, (2) baja relación agua-material cementante (máximo de 0.45), (3) contenido mínimo de material cementante de 335 kg/m³ (564 lb/yardas³), (4) técnicas

apropiadas de acabado y curado y (5) resistencia a compresión de 290 kg/cm² o 28 MPa (4000 lb/pulg²) cuando haya exposición del concreto a ciclos repetidos de congelación-deshielo. Incluso, hasta los concretos sin aire incluido van a ser más resistentes a congelación-deshielo si tuvieran baja relación agua-cemento. La Figura 8-5 ilustra el efecto de la relación agua-cemento sobre la durabilidad de los concretos sin aire incluido.

Los elementos de concreto deben ser correctamente drenados y mantenidos secos lo máximo posible, pues grados mayores de saturación aumentan la probabilidad de fallas por ciclos de congelación-deshielo. El concreto seco o que contenga sólo una pequeña cantidad de humedad no se ve substancialmente afectado, aun bajo a un gran número de ciclos de congelación-deshielo. Para consideraciones relativas a la dosificación, consulte "Resistencia al Descascaramiento por Descongelante" y "Contenidos de Aire Recomendados" en este capítulo y en el Capítulo 9.

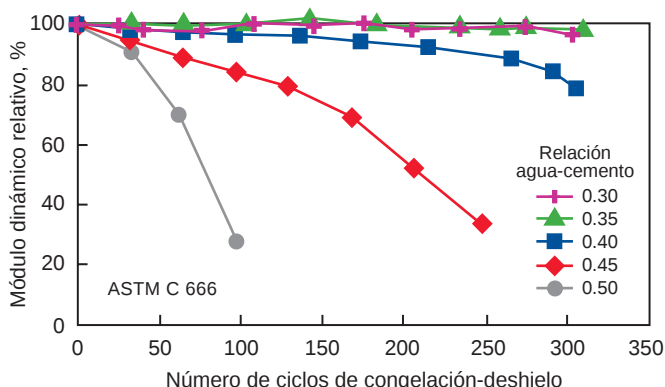


Fig. 8-5. Factores de durabilidad versus número de ciclos de congelación-deshielo de concretos seleccionados sin aire incluido (Pinto y Hover 2001).

Resistencia al Descascaramiento por Descongelante

Los productos químicos descongelantes (anticongelantes) usados para la remoción de la nieve pueden causar y agravar el descascaramiento de la superficie. Este daño es principalmente una acción física. Se cree que el descascaramiento por descongelantes, durante el congelamiento, en concretos con cantidad inadecuada de aire incluido o sin aire incluido, es resultado de la elevación de las presiones osmótica e hidráulica, superando las presiones hidráulicas normalmente producidas cuando el agua del concreto se congela. Estas presiones se vuelven críticas y resultan en descascaramiento, a menos que haya aire incluido en la superficie y en la masa del concreto para aliviar las presiones. Las propiedades higroscópicas (absorción de agua) de las sales de deshielo también atraen agua y mantienen el concreto más saturado,

aumentando la probabilidad de deterioro por congelación-deshielo. Sin embargo, el concreto con aire incluido adecuadamente dosificado y colocado va a resistir a los descongelantes por muchos años.

Estudios también han demostrado que, cuando no hay congelamiento, la formación de cristales de sales en el concreto (de fuentes externas de cloruros, sulfatos y otras sales) puede contribuir para el descascaramiento del concreto y para su deterioro de la misma manera que la fragmentación que ocurre en las rocas por el intemperismo a las sales. Los vacíos de aire incluido en el concreto crea espacios para el crecimiento de los cristales de sales, aliviando así las tensiones internas, de manera semejante al que ocurre con las tensiones causadas por la congelación del agua en el concreto (ASCE 1982 y Sayward 1984).

Los descongelantes pueden tener muchos efectos sobre el concreto y el medio ambiente cercano. Todos los descongelantes pueden agravar el descascaramiento del concreto que no tenga suficiente aire incorporado. Cloruro de sodio (sal de roca) (ASTM D 632 o AASHTO M 143), cloruro de calcio (ASTM D 98 o AASHTO M 144 y NMX C 356) y urea son los descongelantes más utilizados. En ausencia de congelación, el cloruro de sodio tiene poco o ningún efecto químico sobre el concreto, pero puede dañar a la vegetación y corroer metales.

El cloruro de calcio, en soluciones débiles, generalmente tiene poco efecto químico sobre el concreto y la vegetación, pero corroe los metales. Sin embargo, estudios han mostrado que el cloruro de calcio concentrado puede atacar químicamente al concreto (Brown y Cady 1975). La urea no daña químicamente al concreto, ni a la vegetación, ni a los metales. Descongelantes sin cloruro se usan para minimizar la corrosión de la armadura de acero y minimizar la contaminación del agua subterránea. El empleo de descongelantes que contengan nitrato de amonio y sulfato de amonio debe ser estrictamente prohibido, pues atacan y desintegran el concreto.

Los descongelantes a base de cloruro de magnesio vienen siendo criticados, más recientemente, por aumentar el descascaramiento. Un estudio descubrió que el cloruro de magnesio, el acetato de magnesio, el nitrato de magnesio y el cloruro de calcio dañan más al concreto que el cloruro de sodio (Cody, Cody, Spry y Gan 1996).

El grado de descascaramiento depende de la cantidad de descongelante empleada y la frecuencia de la aplicación. Concentraciones relativamente bajas de descongelantes (del orden de 2% a 4% en masa) producen más descascaramiento de la superficie que concentraciones mayores o la ausencia de descongelantes (Verbeck y Klieger 1956).

Los descongelantes pueden llegar a la superficie del concreto de manera diferente que su aplicación directa, tal como por la salpicadura de los vehículos y el goteo de las partes inferiores de los vehículos. El descascaramiento es más severo en las áreas poco drenadas, porque más solución de descongelante permanece sobre la superficie del

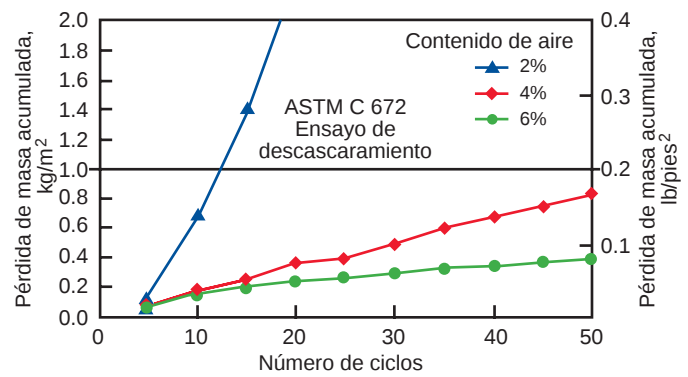


Fig. 8-6. Pérdida de masa acumulada de mezclas con relación agua-cemento de 0.45 y acabado inmediato (Pinto y Hover 2001).

concreto durante la congelación-deshielo. El aire incluido es eficiente en la prevención del descascaramiento y se lo recomienda para todos los concretos que puedan entrar en contacto con productos químicos de deshielo (Fig. 8-6).

Un buen sistema de vacíos de aire, con bajo factor de espaciado (máximo de 200 micrómetros), tal vez sea más importante en los ambientes donde se aplican los descongelantes, que en los ambientes saturados congelados donde no haya presencia de descongelantes. La relación entre el factor de espaciado y el descascaramiento por descongelantes se muestra en la Figura 8-7. La relación agua-cemento portland baja ayuda a disminuir el descascaramiento, pero no es suficiente para controlarlo, cuando se usan relaciones agua-cemento normales (Fig. 8-8). La Figura 8-8 ilustra el impacto del contenido de aire sobre la eficiencia de la relación agua-cemento en el control del descascaramiento.

Para proporcionar durabilidad y resistencia adecuadas al descascaramiento en ambientes con exposición severa y presencia de descongelantes, los concretos con aire incluido deben ser elaborados con materiales durables y deben tener: (1) baja relación agua-materiales

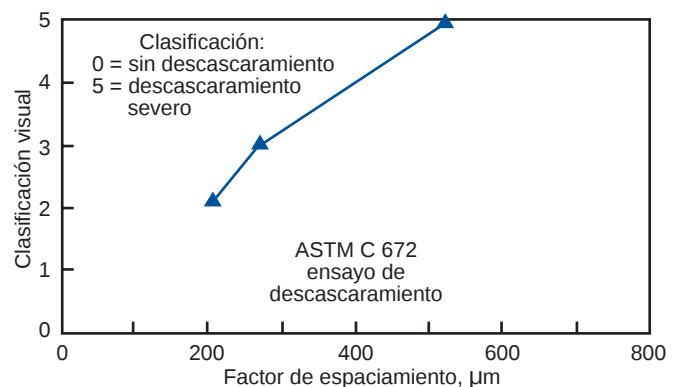


Fig. 8-7. Clasificación visual en función del factor de espaciado, para una mezcla de concreto con relación agua-cemento de 0.45 (Pinto y Hover 2001).

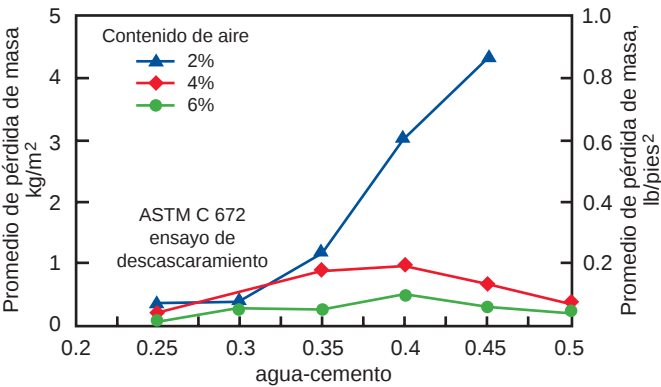


Fig. 8-8. Pérdida de masa del concreto medida después de 40 ciclos de exposición al descongelante y al congelamiento en mezclas con varias relaciones agua-cemento (Pinto y Hover 2001).

cementantes (máximo 0.45), (2) revenimiento (asentamiento) igual o menor que 100 mm (4 pulg.), a menos que se usen plastificantes, (3) contenido mínimo de materiales cementantes de 335 kg/m³ (564 lb/yardas³), (4) acabado adecuado después de la evaporación del agua de sangrado (exudación), (5) drenaje adecuado, (6) curado húmedo por lo menos 7 días, con temperatura superior a 10°C (50°F), (7) resistencia a compresión mínima de 290 kg/cm² o 28 MPa (4000 lb/pulg²), cuando se va a exponer a ciclos repetidos de congelación-deshielo y (8) mínimo de 30 días de secado, después del curado húmedo, si el concreto se va a exponer a ciclos de congelación-deshielo y descongelantes cuando esté saturado. Las metas de contenido de aire se discuten en “Contenidos de Aire Recomendados” al final de este capítulo.

Dosificaciones normales de material cementante no deben afectar la resistencia al descascaramiento de concretos adecuadamente proporcionados, colados y curados (Tabla 8-2). El ACI 318 código de la construcción permite hasta 10% de humo de sílice, 25% de ceniza volante y 50% de escoria como parte del material cementante en elementos expuestos a descongelantes. Sin embargo, el

exceso de estos materiales, conjuntamente con prácticas inadecuadas de colocación y curado, pueden empeorar el descascaramiento. Consulte las directrices locales sobre la dosificación y las prácticas permitidas para el uso de estos materiales en ambientes con descongelantes, pues pueden ser diferentes de los requisitos del ACI 318.

Secado al Aire. Se mejora mucho la resistencia del concreto con aire incluido a los ciclos de congelación-deshielo con un periodo de secado al aire después del curado húmedo inicial. El secado al aire remueve el exceso de humedad del concreto, reduciendo la tensión interna causada por las condiciones de congelación-deshielo y por los descongelantes. Los concretos saturados de agua se deterioran más rápidamente que los concretos secados al aire, cuando son expuestos a ciclos de congelación-deshielo y descongelantes. El concreto colado (colocado) durante la primavera o el verano tiene un periodo de secado adecuado. Sin embargo, el concreto colocado en el otoño normalmente no se seca suficientemente antes que se usen los descongelantes. Esto ocurre principalmente en los pavimentos curados con compuestos formadores de membranas durante el otoño. Éstas permanecen intactas hasta que se desgasten por el tráfico, por lo tanto el secado adecuado puede no ocurrir hasta antes del comienzo del invierno. Los métodos de curado, tales como el uso de hojas de plástico, que permiten el secado con el término del curado, son preferibles en los pavimentos colados en el otoño en obras donde se vayan a emplear descongelantes. Se debe permitir un secado al aire de por lo menos 30 días después del curado húmedo del concreto colocado en el otoño. El tiempo suficiente para el secado, puede variar con el clima y las condiciones del tiempo.

Tratamiento de Superficies Descascaradas. Si se presenta descascaramiento de la superficie durante la primera temporada de hielo (una indicación de un sistema de vacíos de aire inadecuado o prácticas incorrectas de acabado) o si el concreto tiene una mala calidad, se puede aplicar al concreto seco un tratamiento superficial respirable para ayudar a protegerlo contra daños subse-

Tabla 8-2. Resistencia al Descascaramiento por Descongelantes (Clasificación Visual) del Concreto con Materiales Cementantes Seleccionados

Mezcla	Control	Ceniza volante (Clase F)	Escoria	Esquisto calcinado	Esquisto calcinado
Masa de cemento remplazada, %	0	15	40	15	25
Clasificación después de 25 ciclos	1	1	1	1	1
Clasificación después de 50 ciclos	2	2	1	2	1

El concreto tenía 335 kg de material cementante por metro cúbico (565lb/yd³), cemento tipo I ASTM, relación agua-cemento 0.50, revenimiento nominal de 75 mm (3 pulg.) y un contenido nominal de aire de 6%. Método de ensayo ASTM C 672. Los resultados son para materiales específicos ensayados en 2000 y pueden no ser representativos de otros materiales. Escala de clasificación: 1 = muy poco descascaramiento (3 mm de profundidad máxima), 2 = descascaramiento de pequeño a moderado.

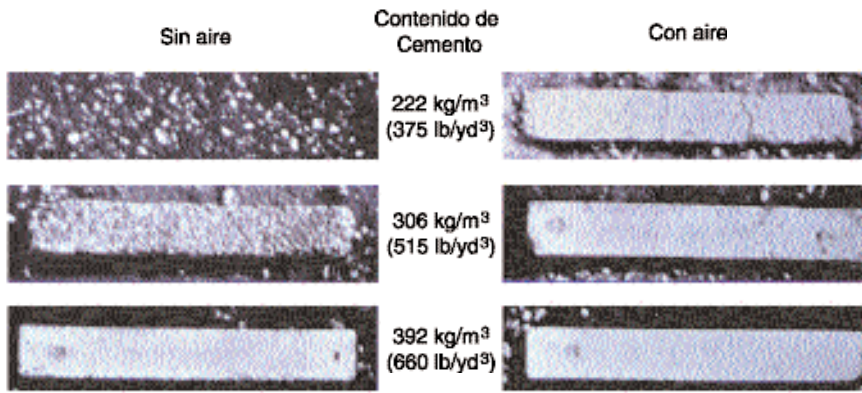


Fig. 8-9. Efecto del aire incluido y del contenido de cemento (Tipo II ASTM) sobre el desempeño de probetas expuestas a suelos con sulfatos. Sin aire incluido, las probetas producidas con el menor contenido de cemento se deterioraron gravemente. La adición de aire incluido mejoró aún más las probetas elaboradas con el mayor contenido de cemento y la menor relación agua-cemento. Las fotos muestran probetas con cinco años de edad (Stanton 1948 y Lerch 1960).a

cuentas. El tratamiento normalmente consiste en un sellador penetrable producido con aceite de linaza hervido (ACPA 1996), metacrilato respirable u otros materiales. Las formulaciones no respirables se las deben evitar, pues pueden causar desprendimientos de láminas.

El efecto del diseño de la mezcla, del tratamiento de la superficie, del curado o de otras variables sobre la

resistencia al descascaramiento de la superficie se puede evaluar a través de la ASTM C 672.

Resistencia a los Sulfatos

La resistencia a los sulfatos del concreto se mejora con la incorporación del aire, como se muestra en las Figuras 8-9 y 8-10, desde que se aproveche la ventaja de la reducción de la relación agua-cemento, producida por la inclusión del aire. El concreto con aire incluido (incorporado) producido con baja relación agua-cemento, un contenido adecuado de cemento y un cemento resistente a los sulfatos va a resistir al ataque de los sulfatos presentes en el suelo o en el agua.

Resistencia a la Reactividad Álcali-Sílice

La rotura por la expansión causada por reactividad álcali-sílice se reduce a través del uso de aire incluido (incorporado) (Kretsinger 1949). Los hidróxidos de álcali reaccionan con la sílice de los agregados reactivos para formar productos expansivos, provocando la expansión del concreto. La expansión excesiva va a romper y deteriorar el concreto. La Figura 8-11 muestra que la expansión de

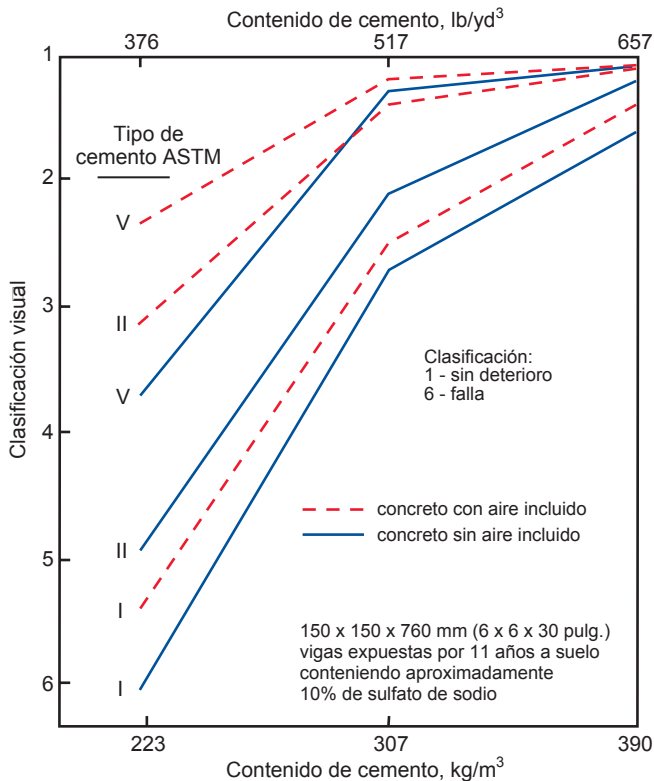


Fig. 8-10. Desempeño de varios concretos con y sin aire incluido expuestos a suelos con sulfatos. La resistencia a los sulfatos se mejora con el uso de los cementos II y V (ASTM), un mayor contenido de cemento, menor relación agua-cemento y aire incluido (Stark 1984).

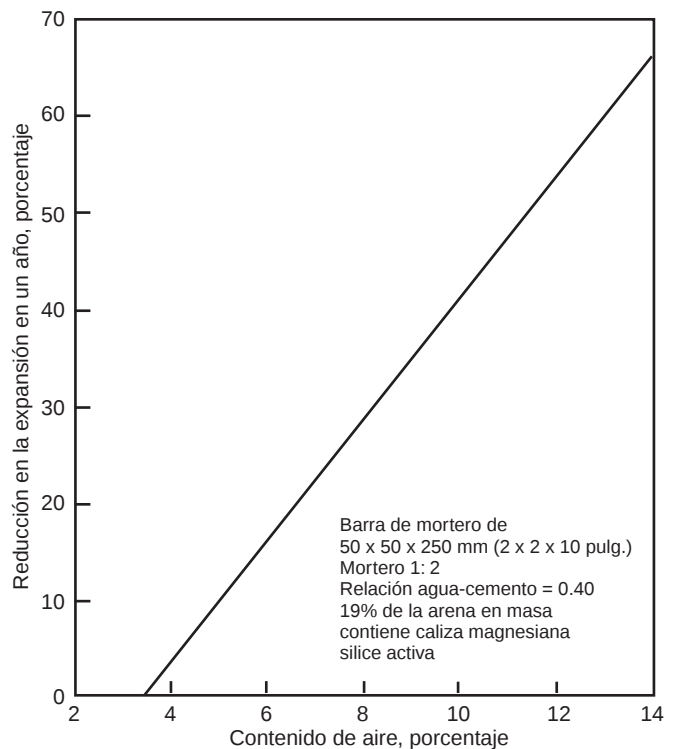


Fig. 8-11. Efecto del contenido de aire sobre la reducción de la expansión álcali-sílice (Kretsinger 1949).

barras de mortero elaboradas con materiales reactivos se reduce con el aumento del contenido de aire incluido.

Resistencia

Cuando el contenido de aire se mantiene constante, la resistencia del concreto varía inversamente con el aumento de la relación agua-cemento. La Figura 8-12 presenta una relación típica entre la resistencia a compresión a los 28 días y la relación agua-cemento para un concreto que tiene el contenido de aire adecuado. A medida que el contenido de aire aumenta, normalmente se puede conservar la misma resistencia, si se mantiene constante la relación vacíos (aire + agua) – cemento, pero esto puede requerir un aumento del contenido de cemento.

Tanto el concreto con aire incluido (incorporado) como el concreto sin aire incluido se los pueden proporcionar para que tengan resistencias moderadas similares. Ambos generalmente deben contener la misma cantidad de agregado grueso. Cuando se mantienen el contenido de cemento y el revenimiento (asentamiento), la incorporación del aire reduce los requisitos de arena y agua como muestra la Figura 8-13. Por lo tanto, los concretos con aire incluido pueden tener menor relación agua-cemento que los concretos sin aire incluido, que minimiza los efectos de la reducción de la resistencia que generalmente acompañan la incorporación del aire. Con una relación agua-cemento constante, el aumento de aire va a reducir la resistencia proporcionalmente (Fig. 8-14).

En el trabajo de Pinto y Hover (2001) un concreto con 4% de contenido de aire tuvo una disminución de la resistencia de 100 kg/cm² o 10 MPa (1450 lb/pulg²). Para

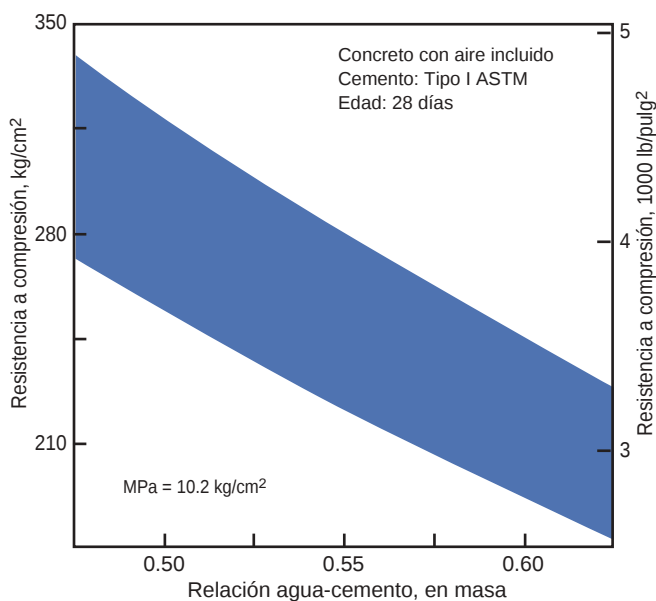


Fig. 8-12. Relación típica entre la resistencia a compresión a los 28 días y la relación agua-cemento en una gran variedad de concretos con aire incluido usando el cemento tipo I (ASTM).

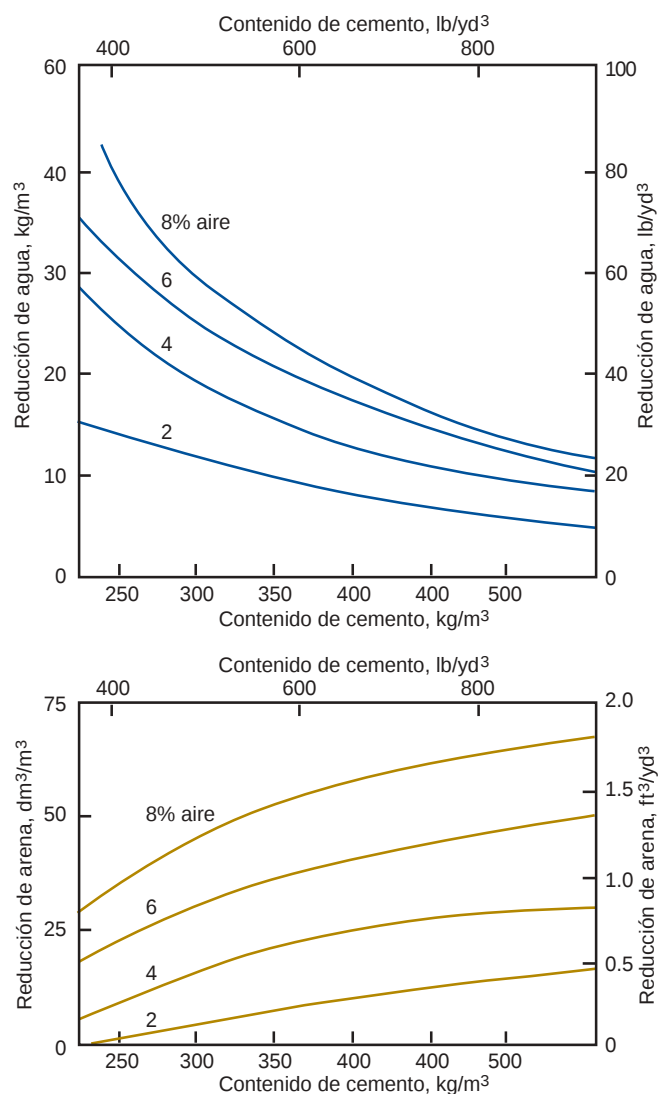


Fig. 8-13. Relación entre el contenido de agua y el contenido de arena obtenidos en varios niveles de contenidos de aire y cemento (Gilkey 1958).

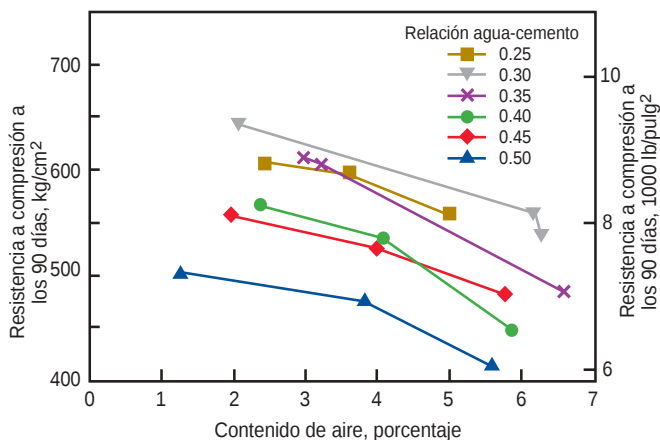


Fig. 8-14. Relación entre la resistencia a compresión a los 90 días y el contenido de aire (Pinto y Hover 2001).

mantenerse constante la resistencia de este concreto, la relación agua-cemento tuvo que bajar 0.14. Alguna reducción de la resistencia se puede tolerar en vista de otros beneficios que el aire puede ofrecer, tales como el aumento de la trabajabilidad. Las reducciones de resistencia se vuelven más significativas en mezclas de alta resistencia, como se presenta en la Figura 8-15. En mezclas ásperas, con bajo contenido de cemento, normalmente la resistencia aumenta con la incorporación de aire en cantidad adecuada, debido a la reducción de la relación agua-cemento y al aumento de la trabajabilidad. En concretos con resistencia de moderada a alta, el aumento de cada punto porcentual de la incorporación de aire reduce la resistencia en aproximadamente 2% a 9% (Cordon 1946, Klieger 1952, Klieger 1956, Whiting y Nagi 1998 y Pinto y Hover 2001). La resistencia real varía y se afecta por la fuente de cemento, aditivos y otros ingredientes.

La obtención de alta resistencia en el concreto con aire incluido (incorporado) algunas veces puede ser difícil. A pesar de la reducción en el contenido de agua de mezcla asociada con la incorporación de aire, las mezclas con alto contenido de cemento requieren más agua de mezcla que mezclas con contenido de cemento más bajo, o sea, el aumento esperado de la resistencia, debido al cemento adicional, se compensa de cierta manera por el agua adicional. Se puede compensar este efecto con el empleo de aditivos reductores de agua.

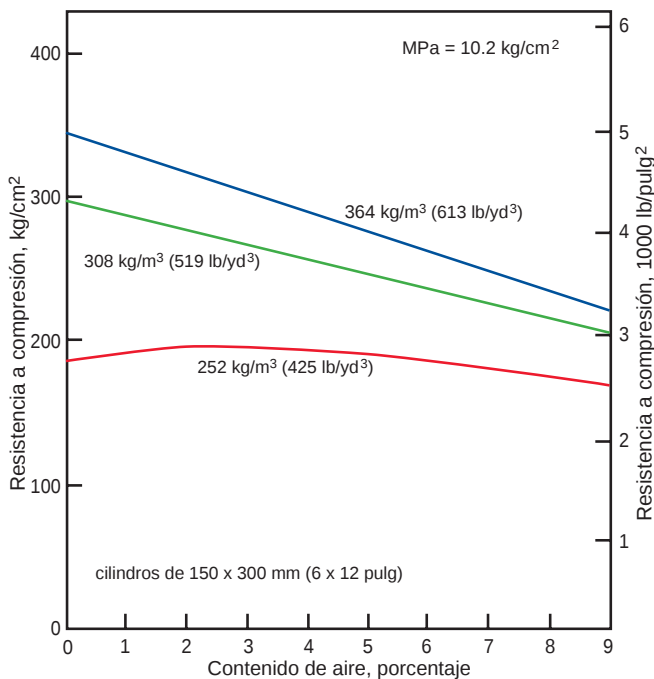


Fig. 8-15. Relación entre el contenido de aire y la resistencia a compresión a los 28 días en concretos con tres contenidos de cemento diferentes. El contenido de agua fue reducido con el aumento del aire incorporado para mantenerse el revenimiento constante (Cordon 1946).

Trabajabilidad

El aire incluido mejora la trabajabilidad del concreto. Esto es efectivo principalmente en mezclas pobres (de bajo contenido de cemento) que de otra manera serían ásperas y difíciles de trabajar. En un estudio (Cordon 1946), una mezcla con aire incluido producida con agregado natural, 3% de aire y revenimiento (asentamiento) de 37 mm (1½ pulg.) presentó la misma trabajabilidad que un concreto sin aire incluido con 1% de aire y asentamiento de 75 mm (3 pulg.), a pesar que menos cemento fue necesario en la mezcla con aire incluido. La trabajabilidad de las mezclas con agregados angulares y granulometría pobre se mejora de manera similar.

Debido a la mejora de la trabajabilidad con la incorporación de aire, se puede reducir considerablemente el contenido de agua y arena (Fig. 8-13). Un volumen de concreto con aire incluido requiere menos agua que el mismo volumen de concreto sin aire incluido, con la misma consistencia y mismo tamaño máximo del agregado. Los concretos frescos que contienen aire incluido son cohesivos, se ven y se sienten trabajables o grasosos y se los puede manejar con facilidad. Por otro lado, concretos con altos contenidos de aire pueden ser más pegajosos y difíciles de acabar. El aire incluido reduce la segregación y el sangrado (exudación) en el concreto recién mezclado y colado.

MATERIALES INCLUSORES DE AIRE

La incorporación del aire en el concreto se puede realizar con la adición de aditivos inclusores (incorporadores) de aire en la mezcladora, con el uso de cementos con inclusores de aire o la combinación de ambos métodos. Sin importar el método utilizado, el control y el monitoreo son necesarios para que se asegure el contenido de aire adecuado.

Un gran número de aditivos inclusores de aire están disponibles comercialmente, producidos de una amplia variedad de materiales. La mayoría de los aditivos inclusores de aire consisten en uno o más de los siguientes materiales: resinas de madera (resina Vinsol), hidrocarburos sulfonados, ácidos grasos y resinosos y materiales sintéticos. Las descripciones químicas y las características de desempeño de los agentes inclusores de aire más comunes se presentan en la Tabla 8-3. Los aditivos inclusores de aire normalmente son líquidos y no se deben congelar. Aditivos adicionados en la mezcladora deben cumplir con la ASTM C 260 (AASHTO M 154).

Los cementos con inclusores de aire cumplen con la ASTM C 150 y C 595 (AASHTO M 85 y M 240). Para que se produzcan estos cementos conforme la ASTM C 226, las adiciones de inclusores de aire se muelen juntamente con el clínker de cemento, durante la producción. Los cementos con aire incluido generalmente proporcionan una cantidad adecuada de aire incluido para la mayoría de las obras, sin embargo, un contenido de aire incluido especificado puede no ser necesariamente obtenido en el

Tabla 8-3. Clasificación y Características de Desempeño de los Aditivos Incluidores de Aire Comunes (Whiting y Nagi 1998)

Clasificación	Descripción química	Notas y Características de desempeño
Sales ácidas derivadas de la madera Resina Vinsol®	Sales alcalinas o alcanolaminas de: una mezcla de ácidos tricíclicos, fenólicos y terpanos.	Generación rápida de aire. Poco aumento del aire con el mezclado inicial. Pérdida de aire con mezclado prolongado. Formación de burbujas de tamaño mediano. Compatible con la mayoría de los otros aditivos.
Resina de madera	Componente principal ácido tricíclico	Mismo que el anterior.
Aceite	Componente principal ácido graso Componente minoritario ácido tricíclico	Generación lenta de aire. El aire puede aumentar con el mezclado prolongado. Las menores burbujas entre todos los aditivos. Compatible con la mayoría de los otros aditivos.
Ácidos de aceite vegetal	Ácidos grasos de coco, sales alcanolaminas.	Generación de aire más lenta que las resinas de madera. Pérdida de aire moderada con el mezclado. Burbujas de aire mayores que las formadas por resinas de madera. Compatible con la mayoría de los otros aditivos.
Detergentes sintéticos	Alkilaril sulfonato y sulfatos (ejemplo dodecilbenzenosulfonato de sodio).	Generación rápida de aire. Pequeña pérdida de aire con el mezclado. Burbujas grandes. Puede ser incompatible con algunos aditivos reductores de agua de alto rango. También aplicable en los concretos celulares.
Auxiliar de trabajabilidad sintético	Alkil-aril etoxilatos	Usado principalmente en morteros para mampostería.
Diversos	Sales de ácidos alcali-alcanolamina o lignosulfonato. Residuos de petróleo oxigenado. Materiales protaináceos. Grasa animal.	Todos ellos se usan raramente como agentes incluidores de aire.

concreto. Si se incorpora un contenido de aire insuficiente, tal vez sea necesaria la adición de los aditivos incluidores de aire en la mezcladora.

Cada método de incorporación de aire tiene ciertas ventajas. En obras donde el control cuidadoso no es práctico, los cementos con incluidores (incorporadores) de aire son muy útiles para que se asegure que una porción significativa del contenido de aire necesario se va a obtener. Ellos eliminan la posibilidad de errores humanos o mecánicos que puedan ocurrir con la adición de aditivos durante el mezclado. Con los aditivos incluidores de aire, el volumen de aire incluido puede ser fácilmente ajustado para satisfacer las condiciones de la obra, a través del cambio de la cantidad de aditivo adicionado a la mezcladora.

Se pueden esperar variaciones en el contenido de aire con la variación de la proporción y de la granulometría del agregado, tiempo de mezclado, temperatura y revenimiento. El orden de dosificación y mezclado de los componentes del concreto, cuando se usa el aditivo incluidor de aire, tiene una gran influencia en la cantidad de aire incluido. Por lo tanto, es necesaria una cierta estabilidad en la dosificación para que se mantenga el control adecuado.

Cuando se incorpora aire en exceso, se lo puede reducir con el empleo de uno de los siguientes agentes anti-espumantes (purgadores o excluidores de aire): fosfato tributilo, ftalato dibutilo, alcohol octilo, ésteres insolubles en ácidos carbónico y bórico y silicones. Sólo se debe usar

la menor dosificación posible para la reducción de contenido de aire hasta los límites especificados. Una cantidad excesiva puede tener efectos adversos sobre las propiedades del concreto (Whiting y Stark 1983).

FACTORES QUE AFECTAN EL CONTENIDO DE AIRE

Cemento

Dentro de un rango normal de contenido de cemento, a medida que se aumenta el contenido de cemento, el contenido de aire disminuye para una cierta dosificación fija de aditivo incluidor de aire por unidad de cemento (Fig. 8-16). Cuando se cambia el contenido de cemento de 240 kg/m³ (400 lb/yardas³) para 360 kg/m³ (600 lb/yardas³), podría ser necesario el doble de la dosificación del aditivo para que se mantenga el mismo contenido de aire. Sin embargo, estudios indican que cuando se lo hace, el factor de espaciamiento generalmente disminuye con el aumento del contenido de cemento y para un cierto contenido de aire, se aumenta la superficie específica, resultando en mejor durabilidad.

Un aumento en la finura del cemento va a resultar en una reducción de la cantidad de aire incluido. El cemento tipo III ASTM, un material finamente molido, puede re-

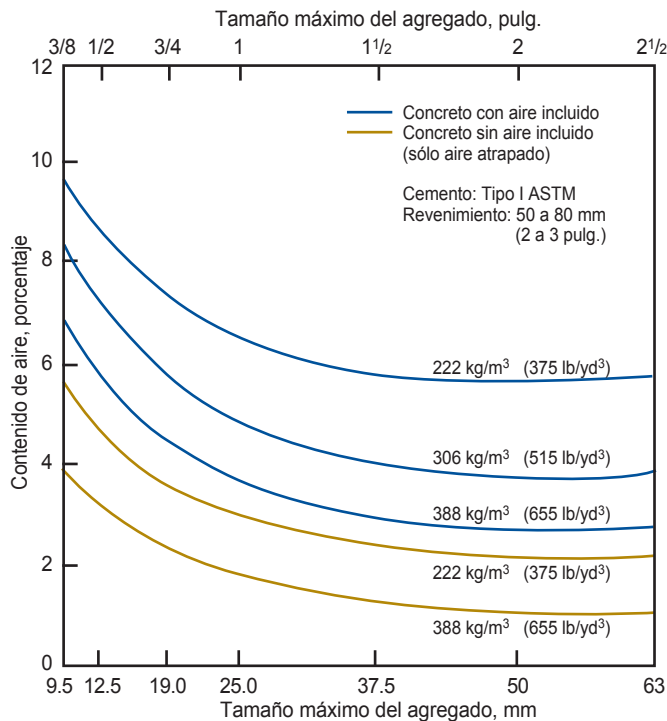


Fig. 8-16. Relación entre el tamaño del agregado, el contenido del cemento y el contenido de aire en el concreto. La dosis de aditivo inclusor de aire por unidad de cemento se mantuvo constante en los concretos con aire incluido. PCA Major Series 336.

querir dos veces o más de agente inclusor (incorporador) de aire que el cemento tipo I de la ASTM, el cual tiene una finura normal.

Los cementos con alto contenido de álcali pueden incorporar más aire que los cementos con bajo contenido, para una misma cantidad de material inclusor de aire. Un cemento con bajo contenido de álcali puede necesitar del 20% al 40% (ocasionalmente hasta 70%) más agente inclusor de aire que un cemento con alto contenido de álcali para lograr un contenido equivalente de aire. Por lo tanto, para que se asegure que los requisitos adecuados de aditivo se logren para cada cemento, se hacen necesarias precauciones al emplearse más de una fuente de cemento en una planta de mezclado (Greening 1967).

Agregado Grueso

El tamaño del agregado grueso tiene un gran efecto sobre el contenido de aire de ambos tipos de concreto, con y sin aire incluido, como se muestra en la Figura 8-16. Hay un pequeño cambio en el contenido de aire cuando se aumenta el tamaño del agregado por encima de 37.5 mm (1 1/2 pulg.).

Agregado Fino

El contenido del agregado fino en la mezcla afecta el porcentaje de aire incluido (incorporado). La Figura 8-17

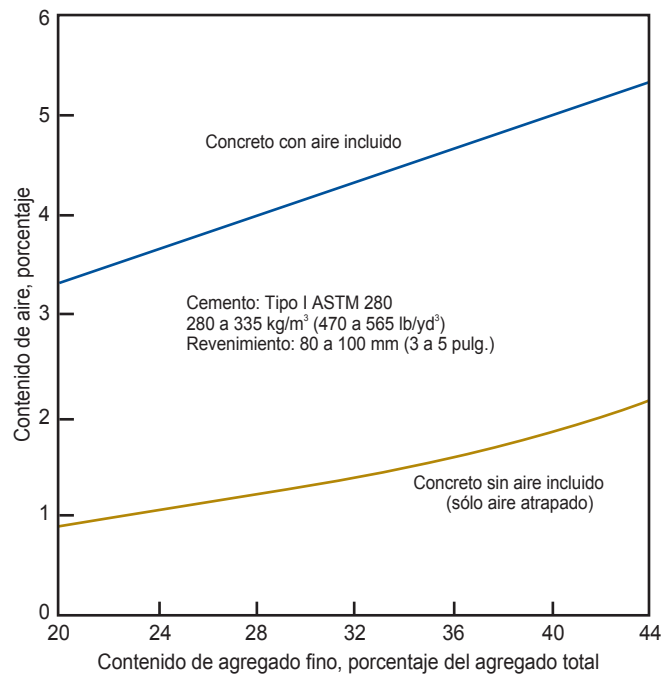


Fig. 8-17. Relación entre el porcentaje de agregado fino y el contenido de aire en el concreto. PCA Major Series 336.

muestra que la cantidad de agregado fino promueve una mayor incorporación de aire para una cantidad fija de cemento con aire incluido o de aditivo inclusor de aire (también se atrapa más aire en los concretos sin inclusores de aire).

Las partículas de agregado fino que pasan en los tamices de 600 μ m a 150 μ m (No. 30 a No. 100) atrapan más aire que agregados muy finos y agregados más gruesos. Una cantidad apreciable de material pasante en el tamiz 150 μ m (No. 100) va a resultar en una reducción significativa del aire incluido.

Los agregados finos de varias fuentes pueden atrapar cantidades diferentes de aire, aun cuando tienen la misma granulometría. Esto puede ocurrir por las diferencias en la forma y la textura superficial o debido a la contaminación por materiales orgánicos.

Agua de Mezcla y Revenimiento

Un aumento en el agua de mezcla proporciona más agua para la generación de las burbujas de aire, de este modo aumentando el contenido de aire y el revenimiento (asentamiento) hasta aproximadamente 150 o 175 mm (6 o 7 pulg.). Un aumento de la relación agua-cemento de 0.4 a 1.0 puede aumentar el contenido de aire en 4%. Parte del aumento del aire se debe a la relación entre revenimiento y contenido de aire, pues el contenido de aire crece con el revenimiento aun cuando la relación agua-cemento se mantiene constante. El factor de espaciamento, $\bar{L}$, del sistema de vacíos de aire aumenta, o sea, los vacíos se vuelven mayores con relaciones agua-cemento mayores,

de este modo reduciendo la durabilidad a congelación-deshielo (Stark 1986).

La adición de 5 kg de agua por metro cúbico de concreto (8.4 lb de agua por yarda cúbica) puede aumentar el revenimiento (asentamiento) en 25 mm (1 pulg.), aumentando el contenido de aire en aproximadamente 0.5 a 1% en concretos con revenimiento de bajo a moderado y dosificación constante de aditivo inclusor de aire. Sin embargo, esta aproximación se afecta considerablemente por la temperatura del concreto, revenimiento, tipo y cantidad de cemento y aditivos presentes en el concreto. Un concreto con bajo revenimiento y alta dosificación de aditivos reductor de agua y inclusor de aire puede sufrir incrementos del revenimiento y del contenido de aire

considerablemente altos, con la adición de pequeñas cantidades de agua. Por otro lado, un concreto bien fluido con revenimiento de 200 a 250 mm (8 a 10 pulg.) puede perder aire con la adición de agua. Consulte las Tablas 8-4 y 8-5 para más informaciones.

El agua de mezcla también puede afectar el contenido de aire. El agua contaminada con algas aumenta este contenido. Aguas de enjuague altamente alcalinas, provenientes de los camiones mezcladores, pueden afectar el contenido de aire. El efecto de la dureza del agua, en la mayoría del abastecimiento de agua municipal, es generalmente insignificante, sin embargo, aguas muy duras de los pozos, como aquéllas usadas en las áreas rurales, pueden disminuir el contenido de aire del concreto.

Tabla 8-4. Efecto del Diseño de la Mezcla y de los Constituyentes del Concreto sobre el Contenido de Aire

	Características del Material	Efectos	Consejos
Cemento Portland	Contenido de álcali	El contenido de aire aumenta con el aumento del nivel de álcali en el cemento. Se necesita de menor dosificación del agente inclusor de aire en cementos con alto contenido de álcali. El sistema de vacíos de aire puede ser menos estable con ciertas combinaciones usadas de nivel alto de álcali y agente inclusor de aire.	Cambios en el contenido de álcali o fuente de cemento requieren un ajuste de la dosificación del agente inclusor (incorporador) de aire. Disminuya la dosificación del inclusor de aire hasta 40%, para cementos con alto contenido de álcali.
	Finura	Disminución del contenido de aire con el aumento de la finura del cemento.	Use hasta 100% más aditivo inclusor de aire en cementos muy finos, como los de alta resistencia inicial. Ajuste el aditivo si la fuente o la finura del cemento cambian.
	Contenido de cemento en la mezcla	Disminución del contenido de aire con el aumento del contenido de cemento. Mayor o menor número de vacíos con el aumento del contenido de cemento.	Aumente el contenido de aditivo inclusor de aire, cuando haya aumento del contenido de cemento.
	Contaminantes	El contenido de aire se puede alterar por la contaminación del cemento con el aceite del molino.	Verifique que el cemento obedezca a los requisitos de las normas nacionales de cemento sobre el contenido de aire en las pruebas de mortero.
Materiales cementantes suplementarios	Ceniza volante	El contenido de aire disminuye con el aumento de la pérdida por calcinación (contenido de carbón) El sistema de vacíos de aire puede ser menos estable con ciertas combinaciones de ceniza volante/ cemento/ agente inclusor de aire.	Cambios en la PC (PI o PF) o en la fuente de la ceniza volante pueden requerir ajustes de la dosificación del aditivo inclusor de aire. Realice las pruebas del índice de espuma para estimar el aumento en la dosificación. Prepare mezclas de pruebas y evalúe el sistema de vacíos de aire.
	Escoria granulada de alto horno	Disminución del contenido de aire con el aumento de la finura de la escoria.	Use hasta 100% más aditivo inclusor de aire en concretos con escoria finamente molida.
	Humo de sílice	Disminución del contenido de aire con el aumento del contenido de humo de sílice.	Aumente la dosificación del aditivo inclusor de aire en hasta 100%, cuando se empleen contenidos de humo de hasta 10%.
	Metacaolinita	Ningún efecto aparente	Ajuste la dosificación del aditivo, si es necesario.

Tabla 8-4. Efecto del Diseño de la Mezcla y de los Constituyentes del Concreto sobre el Contenido de Aire (Continuación)

	Características del Material	Efectos	Consejos
Aditivos químicos	Reductores de agua	El aumento de la dosificación de materiales basados en lignina, promueve un aumento del contenido de aire. Los factores de espaciamiento pueden aumentar con el uso de reductores de agua.	Reduzca la dosificación de los aditivos inclusores de aire. Seleccione formulaciones que contengan agentes purgadores de aire. Prepare mezclas de prueba y evalúe el sistema de vacíos.
	Retardadores	Efectos similares a los de los reductores de agua	Ajuste la dosificación del aditivo inclusor de aire.
	Aceleradores	Efectos de poca importancia sobre el contenido de aire.	Normalmente no se necesitan ajustes.
	Reductores de agua de alto rango (superplastificantes)	Incremento moderado del contenido de aire cuando contienen lignosulfatos El factor de espaciamiento aumenta.	Se necesitan sólo pequeños ajustes. Sin efecto significativo sobre la durabilidad.
Agregados	Tamaño máximo	Disminución de los requisitos de contenido de aire con el aumento del tamaño del agregado. Pequeño aumento cuando el tamaño máximo es mayor que 37.5 mm (1½ plg.)	Disminuya el contenido de aire.
	Relación arena-total de agregados	El contenido de aire aumenta con el aumento del contenido de arena.	Disminuya la dosificación del aditivo inclusor de aire en mezclas con altos contenidos de arena.
	Granulometría de la arena	Fracciones medianas de arena promueven la incorporación de aire	Controle la granulometría y ajuste la dosificación del aditivo inclusor de aire.
Agua de mezcla y revenimiento (asentamiento)	Química del agua	Aguas muy duras reducen el contenido de aire. El agua de enjuague de los camiones mezcladores disminuye el contenido de aire.	Aumente la dosificación del inclusor de aire. Evite mezclar el concreto con agua de enjuague.
	Relación agua-cemento	El contenido de aire aumenta con el aumento de la relación agua-cemento.	Disminuya la dosificación del aditivo inclusor de aire, a medida que la relación agua-cemento crezca.
	Revenimiento (asentamiento)	El aire aumenta con el revenimiento hasta cerca 150 mm (6 pulg.) El aire disminuye con revenimiento muy altos. Es difícil la incorporación de aire en concretos con revenimiento muy bajo.	Ajuste la dosificación del aditivo inclusor de aire. Evite adicionar agua para el aumento del revenimiento. Use aditivos inclusores de aire adicionales, hasta 10 veces la dosificación normal.

Tabla 8-5. Efecto de los Procesos de Producción, Prácticas de Construcción y Medio Ambiente sobre el Control del Contenido de Aire en el Concreto

	Procedimiento/Variable	Efecto	Consejo
Procedimientos de producción	Secuencia de mezclado	El mezclado simultáneo disminuye el contenido de aire. La adición del cemento primero, aumenta el contenido de aire.	Adicione aditivo inclusor de aire con el agua inicial o con la arena.
	Capacidad de la mezcladora	El aire aumenta a medida que alcanza de la capacidad.	Use la mezcladora cerca de su capacidad. Evite sobrecargarla.
	Tiempo de mezclado	Mezclado central: el contenido de aire aumenta el tiempo de mezclado hasta 90 segundos. Camiones mezcladores: el contenido de aire aumenta con el mezclado. Períodos de mezclados cortos (30 segundos) reducen el contenido de aire y afectan adversamente el sistema de vacíos de aire.	Establezca el tiempo óptimo de mezclado para una cierta mezcladora. Evite el mezclado excesivo. Establezca el tiempo de mezclado óptimo (cerca de 60 segundos).
	Velocidad de mezclado	El contenido de aire aumenta gradualmente hasta aproximadamente 20 rpm. El aire puede disminuir en altas velocidades.	Siga las recomendaciones de los fabricantes de los camiones mezcladores. Mantenga las palas y el camión limpios.
	Medición del aditivo	La precisión y la fiabilidad del sistema de medición van a afectar la uniformidad del contenido de aire	Evite la medición manual o los sistemas de alimentación por gravedad y los temporizadores. Bombas con dislocación positiva interconectadas con el sistema de mezclado son preferibles.
Transporte y Entrega	Transporte y entrega	Algún aire (1% a 2%) normalmente se pierde durante el transporte. La pérdida de aire en equipos sin agitación es un poco mayor.	El reemplado normal con agua para restaurarse el revenimiento (asentamiento) va a restaurar el aire. Si necesario, retemple con aditivo inclusor de aire para recuperarse el aire. Pérdidas grandes del aire se pueden deber a otros factores además del transporte.
	Tiempo de transporte y agitación	Transportes largos, inclusive sin agitación, reducen el aire, especialmente en el clima caluroso.	Optimice la programación de entrega. Mantenga la temperatura del concreto en los rangos recomendados.
	Retemplado	Recuperación de parte del aire perdido. Normalmente no afecta el sistema de vacíos de aire. El reemplado con aditivo inclusor de aire restaura el sistema de vacíos de aire.	Retemple sólo lo suficiente para restaurar la trabajabilidad. Evite la adición excesiva de agua. Se necesita de una dosificación más alta de aditivo cuando se adicionan los aditivos en la obra.
Técnicas de colocación (colado)	Estera transportadora (banda o cinte)	Reduce el contenido de aire en un promedio de 1%.	Si es posible, evite distancias largas de transporte. Reduzca el efecto de caída libre en la extremidad de la banda.
	Bombeo	La reducción del contenido de aire varía de 2% a 3%. No afecta significativamente el sistema de vacíos de aire. Poco efecto sobre la resistencia a congelación-deshielo.	El uso del diseño de mezcla adecuado da un sistema de vacíos de aire estable. Evite revenimientos (asentamientos) altos y concretos con alto contenido de aire. Mantenga la presión de bombeo lo más bajo posible. Use bucle en líneas de bombeo descendientes.
	Concreto lanzado (proyectado)	Generalmente reduce el contenido de aire en la vía húmeda.	El contenido de aire debería ser en la extremidad o la zona de aplicación del lanzado.

Tabla 8-5. Efecto de los Procesos de Producción, Prácticas de Construcción y Medio Ambiente sobre el Control del Contenido de Aire en el Concreto (Continuación)

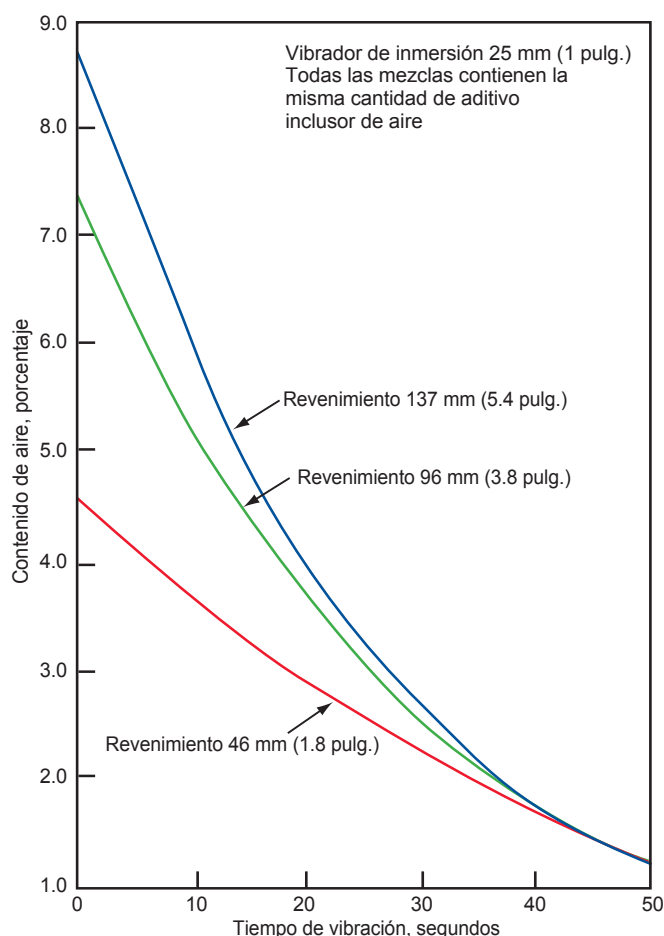
	Procedimiento/Variable	Efecto	Consejo
Acabado y medio ambiente	Vibración interna	El contenido de aire disminuye bajo vibración prolongada o en alta frecuencia. La vibración adecuada no influye el sistema de vacíos de aire.	No vibre en exceso. Evite vibradores de alta frecuencia (mayor que 10,000 vpm). Evite pasadas múltiples de las pantallas vibratorias. Las inserciones cercanas del vibrador se recomiendan para una mejor consolidación.
	Acabado (terminación)	Se reduce el contenido de aire en las capas de la superficie con el exceso de acabado.	Evite el acabado cuando aún haya agua de sangrado (exudación) sobre la superficie. Evite el acabado excesivo. No rocíe agua sobre la superficie antes del acabado. No alise losas exteriores con llanas metálicas.
	Temperatura	Se disminuye el contenido de aire con el aumento de la temperatura. Cambios de temperatura no afectan considerablemente el factor de espaciamiento.	Aumente la dosificación del aditivo inductor de aire, si hay un aumento de temperatura.

Revenimiento y Vibración

El efecto del revenimiento (asentamiento) y de la vibración sobre el contenido de aire del concreto se presenta en la Figura 8-18. Para una cantidad constante de aditivo inductor (incorporador) de aire, el contenido de aire aumenta a medida que el revenimiento (asentamiento) crece hasta 150 o 175 mm (6 o 7 pulg.). Si el revenimiento aumenta más que esto, el contenido de aire disminuye. Sin embargo, sea cual sea el revenimiento, 15 segundos de vibración (límite del ACI 309) van, incluso, a causar una reducción considerable en el contenido de aire. Se debe evitar la vibración prolongada del concreto.

Cuanto mayor es el revenimiento (asentamiento), el contenido de aire y el tiempo de vibración, mayor será el porcentaje de la reducción del contenido de aire durante la vibración (Fig. 8-18). Sin embargo, si se hace una vibración adecuada, poco del aire intencionalmente incluido será perdido. El manejo y la vibración moderada promueven normalmente la pérdida de aire de las burbujas mayores que usualmente son indeseables, bajo el punto de vista de la resistencia. Mientras el tamaño promedio de los vacíos de aire se reduce, el factor de espaciamiento de los vacíos de aire permanece relativamente constante.

Los vibradores internos reducen el contenido de aire más que los vibradores externos. La pérdida de aire debida a la vibración aumenta a medida que el volumen del concreto disminuye o se aumenta significativamente la frecuencia de vibración. La vibración con frecuencias más bajas (8000 vpm) tiene menos efecto sobre el factor de espaciamiento y el contenido de aire que la vibración con frecuencia alta (14,000 vpm). Las frecuencias altas pueden aumentar considerablemente el factor de espaciamiento y disminuir el contenido de aire después de sólo 20 segundos de vibración (Brewster 1949 y Stark 1986).

**Fig. 8-18. Relación entre revenimiento, duración de la vibración y contenido de aire (Brewster 1949).**

En pavimentos, se puede lograr el contenido de aire especificado y la distribución uniforme de los vacíos a través del uso de máquinas de pavimentación con velocidades de 1.22 a 1.88 metros por minuto (4 a 6 pies por minuto) y con un vibrador con frecuencia de 5,000 a 8,000 vibraciones por minuto. La mayor uniformidad de los vacíos de aire en la profundidad del espesor del concreto, dentro y afuera del camino del vibrador, se obtiene con la combinación de la frecuencia del vibrador (aproximadamente 5,000 vibraciones por minuto) y pavimentadoras de cimbras (encofrado) deslizantes con velocidad de 1.22 metros por minuto. Mayores frecuencias de velocidades, solas o combinadas, pueden resultar en discontinuidades y falta de contenido de aire en la parte superior del pavimento de concreto. Por otro lado, esto da una gran oportunidad para que el agua y la sal entren en el pavimento y reduzcan su durabilidad y vida útil (Cable, McDaniel, Schlorholtz, Redmond y Rabe 2000).

Temperatura del Concreto

La temperatura del concreto afecta el contenido de aire, como se muestra en la Figura 8-19. Con el aumento de la temperatura del concreto, menos aire se incorpora, princi-

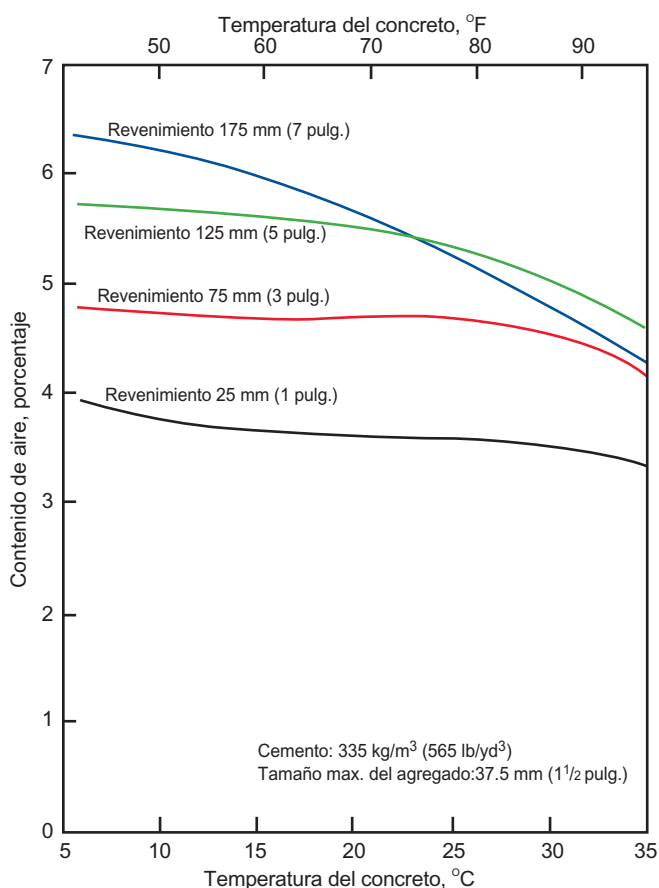


Fig. 8-19. Relación entre temperatura, revenimiento y contenido de aire. PCA Major Series 336 y Lerch 1960.

palmente al aumentar el revenimiento (asentamiento). Este efecto es especialmente importante en el caso de la colocación del concreto durante el clima caluroso, cuando el concreto posiblemente está cálido. Se puede compensar la disminución del contenido de aire, con el aumento de la cantidad del aditivo inclusor (incorporador) de aire.

En la colocación en clima frío, el aditivo inclusor de aire puede perder parte de su eficiencia, si se emplea agua caliente en la mezcla. Para compensar esta pérdida, algunos aditivos se deben adicionar a la mezcla después que la temperatura de los ingredientes se haya igualado.

A pesar que el concreto con temperatura elevada reduce el contenido de aire durante la mezcla, el factor de espaciamento y la superficie específica se afectan muy poco.

Materiales Cementantes Suplementarios

El efecto de la ceniza volante sobre la cantidad de aditivo requerida varía de despreciable hasta cinco veces mayor que la cantidad normal (Gebler y Klieger 1986). Grandes cantidades de escoria y humo de sílice pueden doblar la dosis del aditivo inclusor de aire (Whiting y Nagi 1998).

Aditivos y Agentes Colorantes

Los agentes colorantes, tal como el negro de humo, normalmente disminuyen la cantidad de aire incluido (incorporado) para una cierta cantidad de aditivo. Esto ocurre principalmente con el uso de materiales colorantes con alto contenido de carbón (Taylor 1948).

Aditivos reductores de agua y retardadores de fraguado generalmente aumentan la eficiencia de los aditivos inclusores de aire del 50% al 100%. Por lo tanto, cuando se los emplea, una menor cantidad de aditivo inclusor de aire va a resultar en el contenido de aire deseado. También el momento de la adición de estos aditivos en la mezcla va a afectar la cantidad de aditivo inclusor de aire, pues la adición retrasada aumenta el contenido de aire.

Los retardadores de fraguado aumentan el espaciamento de los vacíos de aire en el concreto. Algunos reductores de agua o retardadores de fraguado no son compatibles con algunos aditivos inclusores de aire. Si fueran adicionados conjuntamente al agua de mezcla, antes de dispersarlos en la mezcladora, se va a formar un precipitado que va a posar y resultará en una gran reducción del contenido de aire. Sólo porque algunos aditivos interactúan de esta manera, no quiere decir que no van a ser totalmente eficientes si son dispersados separadamente en la mezcla.

Los superplastificantes (reductores de agua de alto rango) pueden aumentar o disminuir el contenido de aire del concreto, dependiendo de la formulación química del aditivo y del revenimiento (asentamiento) del concreto. El superplastificante a base de naftaleno tiende a aumentar el

contenido de aire, mientras que materiales a base de melaminas a veces disminuyen y otras veces no tienen ninguna influencia sobre el contenido de aire. La pérdida normal de aire, en concretos fluidos, durante el mezclado y el transporte es cerca del 2% al 4% (Whiting y Dziedzic 1992).

Los superplastificantes también afectan el sistema de vacíos de aire del concreto endurecido, normalmente aumentando el tamaño de los vacíos de aire atrapado. Esto resulta en un factor de espaciamiento mayor que el normal, ocasionalmente mayor que el considerado aceptable para la durabilidad a congelación-deshielo. Sin embargo, las pruebas en los concretos con superplastificante, con factor de espaciamiento de aire ligeramente mayor, han presentado buena durabilidad. Esto se puede deber a la reducción de la relación agua-cemento, normalmente asociada con el uso de superplastificantes.

Una pequeña cantidad de cloruro de calcio, algunas veces, se usa en clima frío para acelerar el endurecimiento del concreto. Se lo puede usar exitosamente con aditivos inclusores de aire si se adiciona el cloruro de calcio en forma de solución al agua de mezcla. El cloruro de calcio va a aumentar levemente el contenido de aire del concreto, pero si el cloruro de calcio entra en contacto directo con el inductor de aire, ocurre una reacción química que reduce la eficiencia del aditivo.

Los aceleradores sin cloruro pueden aumentar o disminuir el contenido de aire, dependiendo de la química del aditivo, pero generalmente tienen poco efecto sobre el contenido de aire.

Efecto del Mezclado

La acción de mezclado es uno de los factores más importantes en la producción del concreto con aire incluido (incorporado). La distribución uniforme de los vacíos de aire es esencial para producir un concreto con resistencia al descascaramiento. La falta de uniformidad puede resultar de la dispersión inadecuada del inductor de aire, durante cortos periodos de mezclado. En la producción de concreto premezclado, es especialmente importante que se mantenga un mezclado constante y consistente.

La cantidad del aire incluido varía con el tipo y la condición de la mezcladora, la cantidad de concreto que esté siendo mezclado, la tasa y la duración del mezclado. La cantidad de aire incluido, en una cierta mezcla, va a decrecer apreciablemente a medida que las palas se desgastan o si se acumula concreto endurecido en el tambor o en las palas. Debido a las diferencias en el mezclado y en el tiempo de mezclado, los concretos producidos en mezcladoras estacionarias (fijas) y aquellos producidos en mezcladoras móviles pueden variar significativamente en cuanto a la cantidad de aire. El contenido de aire puede aumentar o disminuir cuando la cantidad de concreto mezclado se desvía considerablemente de la capacidad de la mezcladora. Se incorpora poco aire en cantidades de mezclas pequeñas en mezcladoras grandes. Sin embargo,

el contenido de aire aumenta a medida que se aproxima a la capacidad de la mezcladora.

La Figura 8-20 muestra el efecto de la velocidad y la duración del mezclado sobre el contenido de aire en el concreto fresco, producido en una mezcladora móvil. Normalmente, más aire se incorpora a medida que se aumenta la velocidad de mezclado hasta 20 rpm. Velocidades mayores que ésta promueven disminución del contenido de aire. En las pruebas que generaron la Figura 8-20, el contenido de aire llegó a un límite máximo durante el mezclado y sufrió una reducción gradual con el mezclado prolongado. El tiempo y la velocidad de mezclado van a tener efectos diferentes sobre el contenido de aire. Se puede perder cantidades significativas de aire durante el mezclado en ciertas mezclas y con ciertos tipos de mezcladoras.

La Figura 8-21 muestra el efecto de la agitación prolongada de una mezcladora sobre el contenido de aire. Los

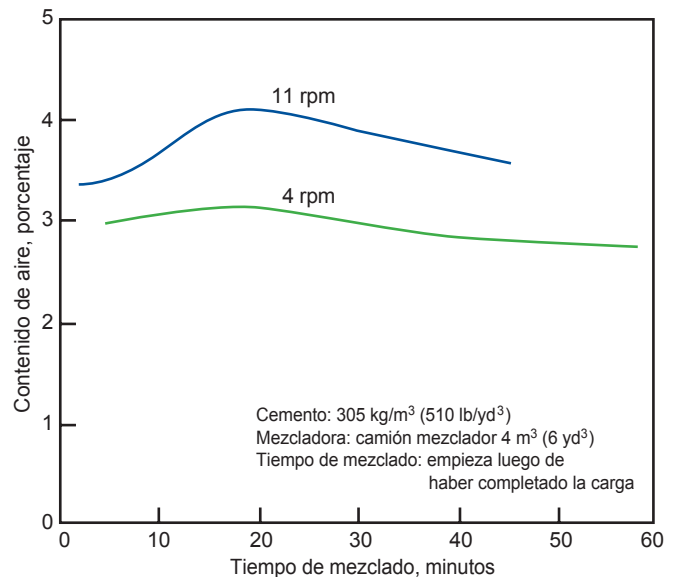


Fig. 8-20. Relación entre el tiempo de mezcla y el contenido de aire del concreto. PCA Major Series 336.

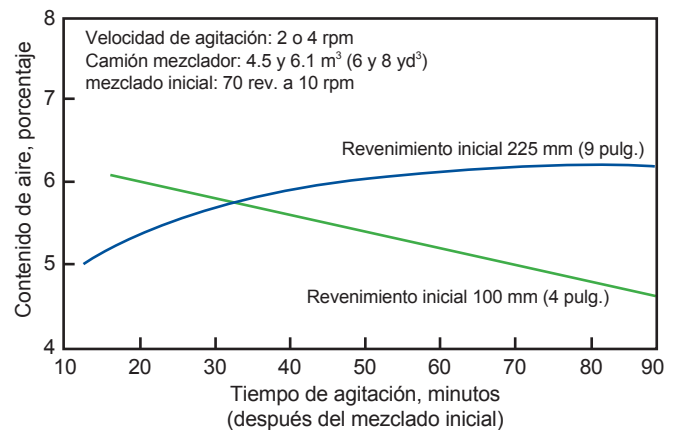


Fig. 8-21. Relación entre tiempo de agitación, contenido de aire y revenimiento. PCA Major Series 336.

cambios en el contenido de aire se pueden explicar a través de la relación entre revenimiento (asentamiento) y contenido de aire. En concretos con alto revenimiento, el contenido de aire aumenta con la agitación prolongada, a medida que el revenimiento disminuye para cerca de 150 o 175 mm (6 o 7 pulg.). Para revenimientos iniciales más bajos que 150 mm (6 pulg.), tanto el contenido de aire como el revenimiento disminuyen con la continuidad de la agitación. Cuando se retempla (adicción de agua y remezclado para que se restaure el revenimiento original), el contenido de aire aumenta. Sin embargo, después de 4 horas, el retemplado no es eficiente en el aumento del contenido de aire. El mezclado o la agitación prolongada del concreto se acompañan por una progresiva disminución del revenimiento (asentamiento).

Transporte y Manejo

Generalmente, parte del aire, aproximadamente de 1 a 2%, se pierde durante el transporte del concreto de la planta mezcladora a la obra. La estabilidad del contenido de aire durante el transporte depende de diversas variables, incluyendo los ingredientes del concreto, tiempo de transporte, cantidad de agitación o vibración durante el transporte, temperatura, revenimiento (asentamiento) y cantidad de retemplado.

Una vez en la obra, el contenido de aire del concreto se mantiene esencialmente constante durante el manejo, si éste se ejecuta a través de descarga por canaletas, carretilla, carro motorizado y pala. Sin embargo, bombas de concreto, grúa y balde (cubo, cubeta) y esteras transportadoras pueden causar alguna pérdida de aire, especialmente en mezclas con alto contenido de aire. El bombeo de concreto puede causar una pérdida de contenido de aire de hasta 3 puntos porcentuales (Whiting y Nagi 1998).

Acabado (Terminación Superficial)

Las prácticas correctas de enrasado, aplanado y acabado no deben afectar el contenido de aire. McNeal y Gay (1996) y Falconi (1996) demostraron que la secuencia y el momento en que se hacen el acabado (terminación) y el curado son extremadamente importantes para la durabilidad de la superficie. El acabado excesivo puede reducir la cantidad de aire incluido en la superficie de las losas, dejando la superficie vulnerable al descascamiento. Sin embargo, como se enseña en la Figura 8-22, el acabado temprano no afecta necesariamente la resistencia al descascamiento, a menos que haya agua de sangrado (exudación) presente (Pinto y Hover 2001). El concreto que va a ser expuesto a sales de deshielo no debe ser acabado con llanas metálicas.

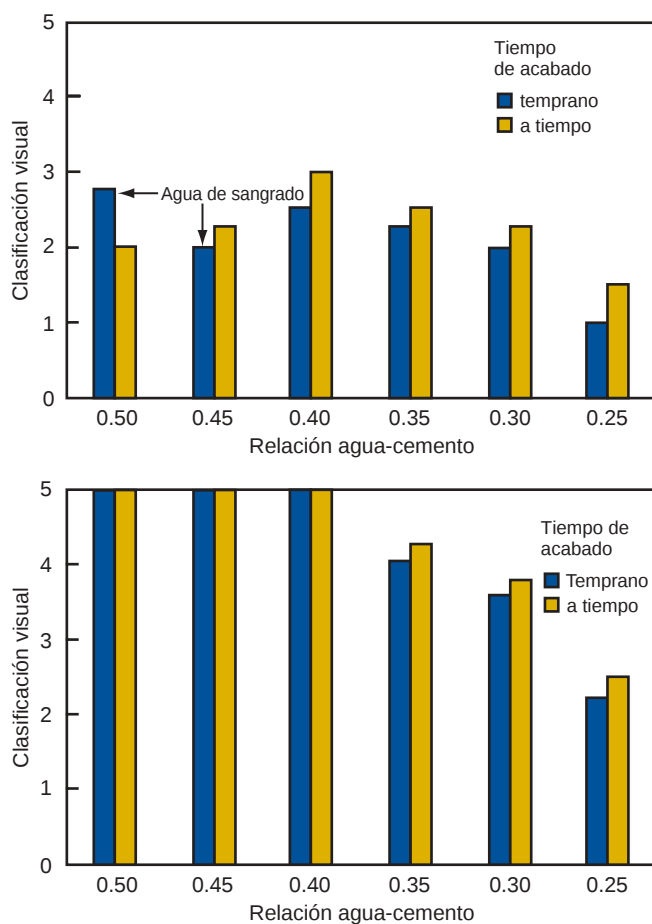


Fig. 8-22. Efecto del acabado temprano – aplanamiento de 20 minutos después de la colocación – sobre la resistencia al descascamiento para (superior) concreto con 6% de aire incluido; (inferior) concreto sin incorporación de aire.

PRUEBAS PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE AIRE

Cuatro métodos están disponibles para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco. A pesar de haberse medido sólo el contenido de aire total, y no las características del sistema de vacíos de aire, ensayos en laboratorio muestran que estas pruebas son una buena indicación de la aceptabilidad del sistema de aire.

Pruebas de aceptación para el concreto fresco se deben realizar regularmente como control de rutina. La obtención de las muestras y los ensayos deben cumplir con las normas ASTM C 172 (AASHTO T 141).

A continuación se presentan los métodos para la determinación del contenido de aire en concretos frescos:

1. Método por presión (ASTM C 231, AASHTO T 152, COVENIN 348, IRAM 1602, Nch 2184, NMX-C-157, NTC 1032, NTE 195, NTP 339.080, NTP 339.083, UNIT-NM 47), práctico para pruebas en la obra, en todos los tipos de concreto, a excepción de los concretos muy porosos y con agregados ligeros.

2. Método volumétrico (ASTM C 173, AASHTO T 196, COVENIN 347, IRAM 1511, NMX C 158, NTC 1028, NTP 339.081), práctico para ensayos en obra de todos los tipos de concreto, pero especialmente indicado para concretos con agregados ligeros (livianos) y porosos. Cuando se usan agregados mayores que 50 mm (2 pulg.), se los debe remover manualmente y el efecto de esta remoción se debe calcular para llegar al contenido de aire total.
3. Método gravimétrico (ASTM C 138, AASHTO T 121, COVENIN 349, NTP 339.046), requiere un conocimiento preciso de la masa específica relativa y del volumen absoluto de los componentes del concreto.
4. Indicador de aire Chace (AASHTO T 199), una manera sencilla y barata de aproximación del contenido de aire del concreto fresco. Este aparato de bolsillo ensaya una muestra del mortero del concreto. *Este ensayo no es un sustituto de los métodos más precisos tales como los métodos por presión, volumétrico y gravimétrico.*

La prueba del índice de espuma se puede usar para medir el contenido necesario relativo del aditivo inclusor (incorporador) de aire en concretos conteniendo combinaciones de cemento y ceniza volante (Gebler y Klieger 1983).

Las características de los vacíos de aire del concreto endurecido se pueden determinar por la ASTM C 457 y la NTC 3791. Estos ensayos se usan para la determinación del factor de espaciamiento de los vacíos de aire, el área superficial de los vacíos y el número de vacíos por longitud de la sección transversal.



Fig. 8-23. Equipo para el análisis del sistema de vacíos. (IMG12402)

Análisis del Sistema de Vacíos de Aire del Concreto Fresco

Los métodos convencionales para el análisis del aire en el concreto fresco, tales como el método por presión presentado anteriormente, miden sólo el volumen total de aire. Consecuentemente, no proveen ninguna información sobre los parámetros para la determinación de la calidad del sistema de aire. Estos parámetros – el tamaño y el número de vacíos y el espaciamiento entre ellos – se pueden medir en muestras pulidas de concreto endurecido (ASTM C 457 y NTC 3791), pero el resultado de estos análisis están disponibles sólo muchos días después que el concreto se haya endurecido. Por lo tanto, un aparato llamado analizador de vacíos de aire (AVA) fue desarrollado para determinar los parámetros de la ASTM C 457 en muestras frescas de concreto con aire incluido. Así, se puede estimar el factor de espaciamiento, la superficie específica y la cantidad total de aire incluido.

En este método, las burbujas de aire de la muestra fresca suben a través de un líquido viscoso, entran en una columna de agua y entonces suben por el agua, y un registrador colecta la fuerza ascendiente (Fig. 8-24). El líquido viscoso retiene los tamaños originales de las burbujas. Las burbujas grandes suben más rápidamente por el líquido que las pequeñas. Se registra la variación de la fuerza de ascensión en función del tiempo y se la puede relacionar con el número de burbujas de tamaños diferentes.

Se pueden retirar las muestras de concretos fresco en la planta de concreto premezclado o en la obra. Ensayar el concreto antes y después de su colocación en la cimbra (encofrado) puede ayudar en la verificación de los efectos, sobre el sistema de aire, de los métodos de transporte, colocación y consolidación. Como las muestras se retiran

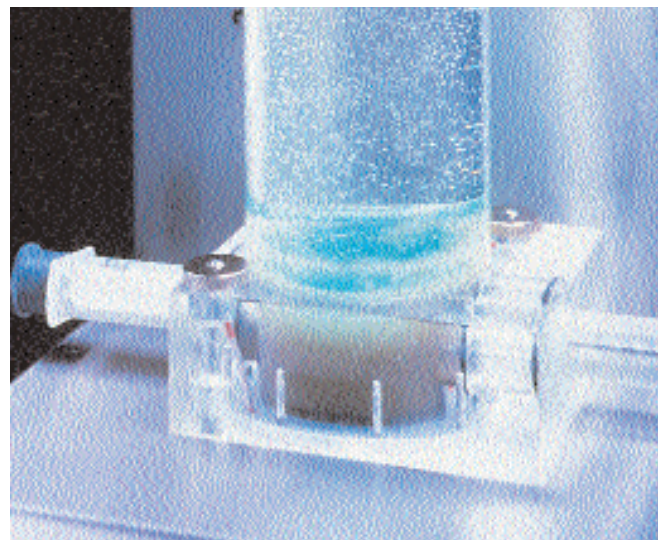


Fig. 8-24. Burbujas de aire que suben a través del líquido en la columna. (IMG12401)

del concreto fresco, el contenido de aire y el sistema de aire se pueden ajustar durante la producción.

Actualmente no hay normas para este método. El AVA no fue desarrollado para medir el contenido total de aire en el concreto y, debido al pequeño tamaño de la muestra, puede suministrar datos imprecisos de este contenido. Sin embargo, esto no significa que el AVA no sea útil como un método de evaluación de la calidad del sistema de vacíos de aire, pues ofrece buenos resultados si utilizado en conjunto con los métodos tradicionales de medida de contenido de aire (Aarre 1998).

CONTENIDOS RECOMENDADOS DE AIRE

La cantidad de aire a ser empleada en el concreto con aire incluido depende de: (1) tipo de la estructura, (2) condiciones del clima, (3) número de ciclos de congelación-deshielo, (4) cuando de la exposición a los descongelantes y (5) la vida útil de la estructura.

El ACI código de la construcción recomienda que el concreto que se va a exponer a la congelación y al deshielo en ambiente con humedad o a descongelantes debe tener el contenido de aire para exposición severa presentado en la Tabla 8-6. Además, la relación agua-materiales cementantes no debe exceder 0.45. El ACI 318 permite la reducción de un punto porcentual en la meta del contenido en concretos con resistencia mayor que 350 kg/cm² o 34 MPa

Tabla 8-6. Contenido Total de Aire Recomendado para el Concreto

Tamaño máximo nominal de agregado mm (pulg.)	Contenido de aire, porcentaje*		
	Exposición severa**	Exposición moderada†	Exposición suave††
<9.5 (¾)	9	7	5
9.5 (¾)	7½	6	4½
12.5 (½)	7	5½	4
19.0 (¾)	6	5	3½
25.0 (1)	6	4½	3
37.5 (1½)	5½	4½	2½
50 (2)‡	5	4	2
75 (3)‡	4½	3½	1½

* Las especificaciones de proyecto normalmente permiten que el contenido de aire sea entre -1% a +2% del contenido de aire de la tabla.

** Concreto expuesto a congelación-deshielo en presencia de humedad, descongelantes u otros agentes agresivos.

† Concreto expuesto a congelación pero no con presencia constante de humedad y no en contacto con descongelantes o productos químicos agresivos.

†† Concreto no expuesto a condiciones de congelación, descongelantes o agentes agresivos.

‡ Estos contenidos de aire se aplican a la mezcla total, así como a los tamaños de agregado de la mezcla. Sin embargo, al ensayarse estos concretos, los agregados mayores que 37.5 mm (1½ pulg.) se deben retirar manualmente o por cribado y el contenido de aire se determinará en la fracción de concreto menor que 37.5 mm (1½ pulg.) (Las tolerancias en el contenido de aire al entregarse el concreto se refieren a este valor).

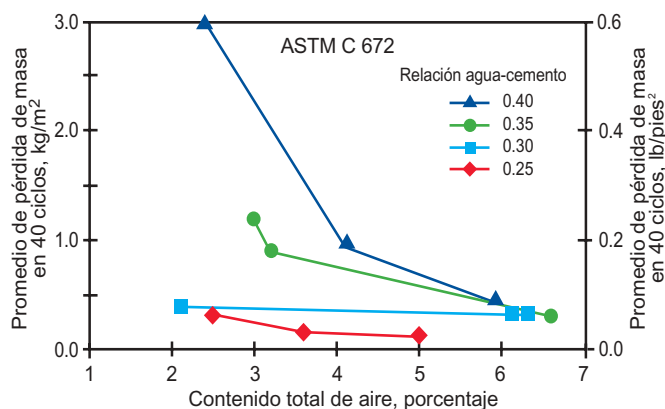


Fig. 8-25. Pérdida de masa medida después de 40 ciclos de exposición a congelación-deshielo en concretos con varios contenidos de cemento (Pinto y Hover 2001).

(5,000 lb/pulg²) y presumidamente con relación agua-cemento bien baja.

La Figura 8-25 muestra como el contenido de aire y la relación agua-cemento (resistencias entre 410 kg/cm² y 600 kg/cm² o 40 y 59 MPa [5,800 a 8,600 lb/pulg²]) afectan la resistencia a los descongelantes. Esto ilustra que concretos con relación agua-cemento muy baja son más resistentes a la congelación y a los descongelantes, por lo tanto, se puede permitir el uso de contenidos de aire menores. Esta relación (Fig. 8-25) no fue establecida para concretos con materiales cementantes suplementarios, por falta de estudios (Pinto y Hover 2001).

El ACI 318 limita la cantidad de puzolana y escoria – 10% para el humo de sílice, 25% para la ceniza volante, 50% para la escoria – como parte del material cementante en concretos expuestos a descongelantes. Sin embargo, diseñadores de mezclas deben consultar las prácticas locales sobre las dosis permitidas visando prevenir daños por la congelación y los descongelantes. Se pueden analizar las combinaciones de materiales sin registro histórico, utilizándose la ASTM C 666 (AASHTO T 161) y ASTM C 672. Pinto y Hover (2001) evaluaron la aplicabilidad de los requisitos del ACI 318 sobre a la resistencia a la congelación de mezclas de concreto de cemento Portland con relación agua-cemento de 0.25 a 0.50. La Figura 8-26 ilustra el efecto del aumento del contenido de aire sobre la reducción de la expansión debida a la congelación-deshielo en concretos con diferentes tamaños de agregados, expuestos a ambiente saturado. Esto muestra la necesidad de cumplir con los requisitos de la Tabla 8-6, en condiciones severas.

Cuando el aire incluido no se hace necesario para la protección contra los ciclos de congelación-deshielo y los descongelantes, se puede emplear el requisito de aire para exposición suave, presentado en la Tabla 8-6. Se pueden usar contenidos de aire mayores, cuando se logre la resistencia de diseño. Como se enfatizó anteriormente, el aire incluido disminuye el sangrado (exudación) y la segregación y puede mejorar la trabajabilidad del concreto.

Más información sobre el concreto con aire incluido se puede encontrar en Whiting y Nagi (1998).

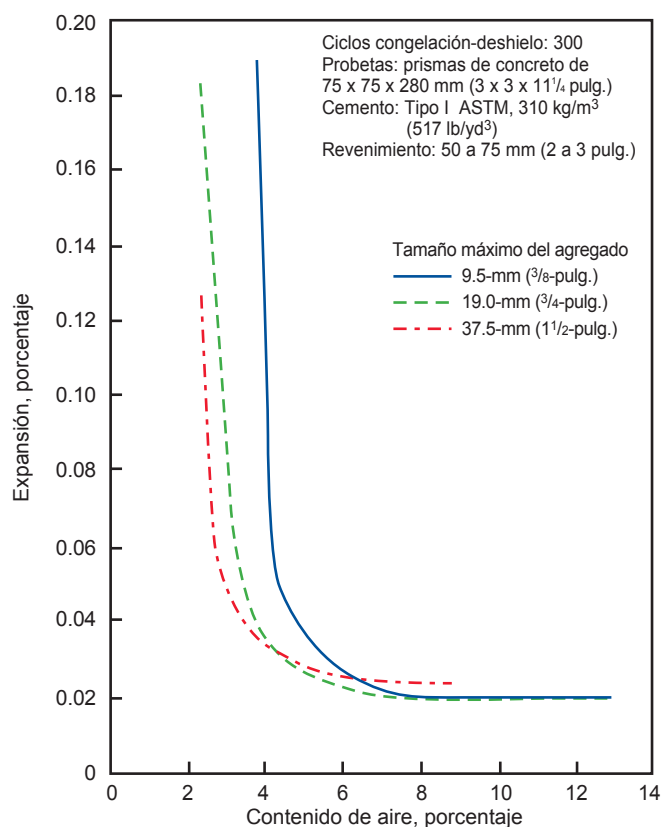


Fig. 8-26. Relación entre contenido de aire y la expansión de concretos con agregados de varios tamaños máximos ensayados durante 300 ciclos de congelación-deshielo. Cuanto menor es el tamaño del agregado, más aire se requiere (Klieger 1952).

REFERENCIAS

Aarre, Tine, "Air-Void Analyzer (Analizador de Vacíos de Aire)," *Concrete Technology Today*, PL981, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL981.pdf, Abril 1998, página 4.

ACI Committee 201, *Guide to Durable Concrete (Guía del Concreto Durable)*, ACI 201.2R-92, reprobada 1997, ACI Committee 201 Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1992.

ACI Committee 308, *Standard Practice for Curing Concrete (Práctica Estándar para el Curado del Concreto)*, ACI 308-92, reprobada en 1997, ACI Committee 308 Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1992.

ACI Committee 309, *Guide for Consolidation of Concrete (Guía para la Consolidación del Concreto)*, ACI 309R-96, ACI Committee 309 Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1996.

ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Requisitos del Código de Construcción de Concreto Estructural y Comentarios)*, ACI 318-02, ACI Committee 318 Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2002.

ACPA, *Scale-Resistant Concrete Pavements (Pavimentos de Concreto Resistentes al Descascaramiento)*, IS117, American Concrete Pavement Association, Skokie, Illinois, 1996.

Bates, A. A.; Woods, H.; Tyler, I. L.; Verbeck, G. y Powers, T. C., "Rigid-Type Pavement (Pavimentos Rígidos)," *Association of Highway Officials of the North Atlantic States, 28th Annual Convention Proceedings*, páginas 164 a 200, Marzo 1952.

Bloem, D. L., *Air-Entrainment in Concrete (Aire Incluido en el Concreto)*, National Sand and Gravel Association and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 1950.

Brewster, R. S., *Effect of Vibration Time upon Loss of Entrained Air from Concrete Mixes (Efecto del Tiempo de Vibración sobre la Pérdida de Aire Incluido en Mezclas de Concreto)*, Materials Laboratories Report No. C-461, Research and Geology Division, Bureau of Reclamation, Denver, Noviembre 25, 1949.

Brown, F. P., y Cady, P. D., "Deicer Scaling Mechanisms in Concrete (Mecanismos de Descascaramiento del Concreto debido a los Descongelantes)," *Durability of Concrete*, ACI SP-47, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1975, páginas 101 a 119.

Cable, J. K.; McDaniel, L.; Schlorholtz, S.; Redmond, D. y Rabe, K., *Evaluation of Vibrator Performance vs. Concrete Consolidation and Air Void System (Evaluación del Desempeño de los Vibradores con relación a la Consolidación y el Sistema de Vacíos de Aire)*, Serial No. 2398, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/SN2398.pdf, 2000, 60 páginas.

Cody, Rober D.; Cody, Anita M.; Spry, Paul G. y Gan, Guo-Liang, "Concrete Deterioration by Deicing Salts: An Experimental Study (Deterioración del Concreto por Sales Descongelantes: Un Estudio Experimental)," <http://www.ctre.iastate.edu/pubs/semisesq/index.htm>, *Semi-seiquicentennial Transportation Conference Proceedings*, Center for Transportation Research and Education, Ames, Iowa, 1996.

Cordon, W. A., *Entrained Air—A Factor in the Design of Concrete Mixes (Aire Incluido – Un factor en el Diseño de Mezclas de Concreto)*, Materials Laboratories Report No. C-310, Research and Geology Division, Bureau of Reclamation, Denver, Marzo 15, 1946.

Elfert, R. J., *Investigation of the Effect of Vibration Time on the Bleeding Property of Concrete With and Without Entrained Air (Efecto del Tiempo de Vibración sobre el Sangrado del Concreto con y sin Aire Incluido)*, Materials Laboratories Report No. C-375, Research and Geology Division, Bureau of Reclamation, Denver, Enero 26, 1948.

“Entrained Air Voids in Concrete Help Prevent Salt Damage (Los Vacíos de Aire Incluido en el Concreto Ayudan a Prevenir los Daños por Sales),” *Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, Mayo 1982.

Falconi, M. I., *Durability of Slag Cement Concretes Exposed to Freezing and Thawing in the Presence of Deicers (Durabilidad de los Concretos con Cemento de Escoria Expuestos a Hielo y Deshielo en Presencia de Sales)*, Masters of Science Thesis, Cornell University, Ithaca, New York, 306 páginas.

Gebler, S. H. y Klieger, P., *Effect of Fly Ash on the Air-Void Stability of Concrete (Efecto de la Ceniza Volante sobre la Estabilidad de los Vacíos de Aire en el Concreto)*, Research and Development Bulletin RD085, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD085.pdf, 1983.

Gebler, Steven H. y Klieger, Paul, *Effect of Fly Ash on Durability of Air-Entrained Concrete (Efecto de la Ceniza Volante sobre la Durabilidad del Concreto con Aire Incluido)*, Research and Development Bulletin RD090, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD090.pdf, 1986.

Gilkey, H. J., “Re-Proportioning of Concrete Mixtures for Air Entrainment (Re-Proporcionamiento de Mezclas de Concreto para la Inclusión de Aire),” *Journal of the American Concrete Institute, Proceedings*, vol. 29, no. 8, Farmington Hills, Michigan, Febrero 1958, páginas 633 a 645.

Gonnerman, H. F., “Durability of Concrete in Engineering Structures (Durabilidad del Concreto en Estructuras de Ingeniería),” *Building Research Congress 1951*, collected papers, Division No. 2, Section D, Building Research Congress, London, 1951, páginas 92 a 104.

Gonnerman, H. F., *Tests of Concretes Containing Air-Entraining Portland Cements or Air-Entraining Materials Added to Batch at Mixer (Ensayos de Concretos Conteniendo Cementos con Inclisor de Aire o Materiales Incluidores de Aire Adicionados a la Mezcladora)*, Research Department Bulletin RX013, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX013.pdf, 1944.

Greening, Nathan R., *Some Causes for Variation in Required Amount of Air-Entraining Agent in Portland Cement Mortars (Algunas Causas de la Variación de la Cantidad Necesaria de Agente Inclisor de Aire en Morteros de Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX213, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX213.pdf, 1967.

Klieger, Paul, *Air-Entraining Admixtures (Aditivos Incluidores de Aire)*, Research Department Bulletin RX199, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX199.pdf, 1966.

Klieger, Paul, *Extensions to the Long-Time Study of Cement Performance in Concrete (Extensión del Estudio a Largo Plazo del Comportamiento del Cemento en el Concreto)*, Research Department Bulletin RX157, Portland Cement Association, 1963.

Klieger, Paul, *Further Studies on the Effect of Entrained Air on Strength and Durability of Concrete with Various Sizes of Aggregate (Estudios Adicionales sobre el Efecto de la Inclusión de Aire sobre la Resistencia y la Durabilidad del Concreto con Agregados de Varios Tamaños)*, Research Department Bulletin RX077, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX077.pdf, 1956.

Klieger, Paul, *Studies of the Effect of Entrained Air on the Strength and Durability of Concretes Made with Various Maximum Sizes of Aggregates (Estudios sobre el Efecto de la Inclusión de Aire sobre la Resistencia y la Durabilidad del Concreto con Agregados de Varios Tamaños Máximos)*, Research Department Bulletin RX040, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX040.pdf, 1952.

Kretsinger, D. G., *Effect of Entrained Air on Expansion of Mortar Due to Alkali-Aggregate Reaction (Efecto de la Inclusión de Aire sobre la Expansión del Mortero debida a la Reacción Alkali-Agregado)*, Materials Laboratories Report No. C-425, Research and Geology Division, U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Febrero 16, 1949.

Lerch, William, *Basic Principles of Air-Entrained Concrete (Principios Básicos del Concreto con Aire Incluido)*, T-101, Portland Cement Association, 1960.

McNeal, F. y Gay, F., “Solutions to Scaling Concrete (Soluciones para el Descascaramiento del Concreto),” *Concrete Construction*, Addison, Illinois, Marzo 1996, páginas 250 a 255.

Menzel, Carl A. y Woods, William M., *An Investigation of Bond, Anchorage and Related Factors in Reinforced Concrete Beams (Una Investigación de la Adherencia, del Anclaje y de los Factores relacionados con Vigas de Concreto Reforzado)*, Research Department Bulletin RX042, Portland Cement Association, 1952.

Mielenz, R. C.; Wokodoff, V. E.; Backstrom, J. E. y Flack, H. L., "Origin, Evolution, and Effects of the Air-Void System in Concrete. Part 1-Entrained Air in Unhardened Concrete (Origen, Evolución y Efectos del Sistema de Vacíos de Aire en el Concreto. Parte 1-Aire Incluido en el Concreto Fresco)," Julio 1958, "Part 2-Influence of Type and Amount of Air-Entraining Agent (Parte 2-Influencia del Tipo y de la Cantidad del Agente Incluidor de Aire)," Agosto 1958, "Part 3-Influence of Water-Cement Ratio and Compaction (Parte 3-Influencia de la Relación Agua-Cemento y de la Compactación)," Septiembre 1958, and "Part 4-The Air-Void System in Job Concrete (Parte 4-El Sistema de Vacíos de Aire en el Concreto de la Obra)," Octubre 1958, *Journal of the American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, 1958.

Pigeon, M. y Pleau, R., *Durability of Concrete in Cold Climates (Durabilidad del Concreto en Climas Fríos)*, E&FN Spon, New York, 1995, 244 páginas.

Pinto, Roberto C. A. y Hover, Kenneth C., *Frost and Scaling Resistance of High-Strength Concrete (Resistencia a Congelación y al Descascaramiento del Concreto de Alta Resistencia)*, Research and Development Bulletin RD122, Portland Cement Association, 2001, 70 páginas.

Powers, T. C., "The Mechanism of Frost Action in Concrete (El Mecanismo de la Acción de Congelación en el Concreto)," *Stanton Walker Lecture Series on the Materials Sciences*, Lecture No. 3, National Sand and Gravel Association and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 1965a.

Powers, T. C. y Helmuth, R. A., *Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing (Teoría de los Cambios de Volumen en la Pasta Endurecida de Cemento Portland durante la Congelación)*, Research Department Bulletin RX046, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX046.pdf, 1953.

Powers, T. C., *Basic Considerations Pertaining to Freezing and Thawing Tests (Consideraciones Básicas a respecto de los Ensayos de Hielo y Deshielo)*, Research Department Bulletin RX058, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX058.pdf, 1955.

Powers, T. C., *The Air Requirements of Frost-Resistant Concrete (Los Requisitos de Aire del Concreto Resistente a la Congelación)*, Research Department Bulletin RX033, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX033.pdf, 1949.

Powers, T. C., *Topics in Concrete Technology: ... (3) Mixtures Containing Intentionally Entrained Air; (4) Characteristics of Air-Void Systems (Temas en la tecnología del Concreto... (3) Mezclas Conteniendo Aire Incluido Intencionalmente, (4) Características del Sistema de Vacíos de Aire)*, Research Department Bulletin RX174, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX174.pdf, 1965.

Powers, T. C., *Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete (Espaciamiento de los Vacíos como una base para la Producción del Concreto con Aire Incluido)*, Research Department Bulletin RX049, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX049.pdf, 1954

Sayward, John M., *Salt Action on Concrete (Acción de las Sales sobre el Concreto)*, Special Report 84-25, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, Agosto 1984.

South Dakota Department of Transportation, *Investigation of Low Compressive Strength of Concrete in Paving (Investigación de la Baja Resistencia a Compresión del Concreto en Pavimentación)*, Precast and Structural Concrete, Study SD 1998-03, PCA Serial No. 52002-17, Pierre, South Dakota, 2000.

Stanton, Thomas E., "Durability of Concrete Exposed to Sea Water and Alkali Soils-California Experience (Durabilidad del Concreto Expuesto al Agua de la Mar y a Suelos con Alkalís - Experiencia en California)," *Journal of the American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, Mayo 1948.

Stark, David C., *Effect of Vibration on the Air-System and Freeze-Thaw Durability of Concrete (Efecto de la Vibración sobre el Sistema de Aire y sobre la Durabilidad a Hielo-Deshielo del Concreto)*, Research and Development Bulletin RD092, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD092.pdf, 1986.

Stark, David, *Longtime Study of Concrete Durability in Sulfate Soils (Estudio a Largo Plazo sobre la Durabilidad del Concreto en Suelos con Sulfatos)*, Research and Development Bulletin RD086, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD086.pdf, 1984.

Taylor, Thomas G., *Effect of Carbon Black and Black Iron Oxide on Air Content and Durability of Concrete (Efecto del Negro de Humo y del Óxido de Hierro Negro sobre el Contenido de Aire y la Durabilidad del Concreto)*, Research Department Bulletin RX023, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX023.pdf, 1948.

Verbeck, G. J., *Field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete (Estudios de Campo y de Laboratorio sobre la Resistencia del Concreto a Sulfatos)*, Research Department Bulletin RX227, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX227.pdf, 1967.

Verbeck, George y Klieger, Paul, *Studies of "Salt" Scaling of Concrete (Estudios sobre el Descascaramiento del Concreto Debido a las Sales)*, Research Department Bulletin RX083, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX083.pdf, 1956.

Walker, S. y Bloem, D. L., *Design and Control of Air-Entrained Concrete (Diseño y Control de Concretos con Aire Incluido)*, Publication No. 60, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 1955.

Wang, Kejin; Monteiro, Paulo J. M.; Rubinsky, Boris y Arav, Amir, "Microscopic Study of Ice Propagation in Concrete (Estudio Microscópico de la Propagación del Hielo en el Concreto)," *ACI Materials Journal*, Julio-Agosto 1996, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, páginas 370 a 376.

Whiting, D. y Stark, D., *Control of Air Content in Concrete (Control del Contenido de Aire en el Concreto)*, National Cooperative Highway Research Program Report No. 258 and Addendum, Transportation Research Board and National Research Council, Washington, D.C., Mayo 1983.

Whiting, David A. y Nagi, Mohamad A., *Manual on Control of Air Content in Concrete (Manual del Control del Contenido de Aire en el Concreto)*, EB116, National Ready Mixed Concrete Association and Portland Cement Association, 1998, 42 páginas.

Whiting, D. y Dziedzic, D., *Effects of Conventional and High-Range Water Reducers on Concrete Properties (Efectos de los Reductores de Agua Convencionales y de los de Alto Rango sobre las Propiedades del Concreto)*, Research and Development Bulletin RD107, Portland Cement Association, 1992, 25 páginas.

Woods, Hubert, *Observations on the Resistance of Concrete to Freezing and Thawing (Observaciones sobre la Resistencia a Hielo y Deshielo del Concreto)*, Research Department Bulletin RX067, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX067.pdf, 1954.