

Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón

Informado por el Comité ACI 224

Grant T. Halvorsen
Presidente

Randall W. Poston
Secretario

Peter Barlow†‡
Florian Barth†
Alfred G. Bishara*
Howard L. Boggs
Merle E. Brander†
Darvid Darwin‡
Fouad H. Fouad

David W. Fowler§
Peter Gergely
Will Hansen
M. Nadim Hassoun
Tony C. Liu‡
Edward G. Nawy
Harry M. Palmbaum

Keith A. Pashina
Andrew Scanlon‡
Ernest K. Schrader
Wimal Suaris
Lewis H. Tuthill
Zenon A. Zielinski

*Autor contribuyente

† Miembro del Grupo de Trabajo que preparó estas revisiones

‡ Autor principal

§ Presidente del Grupo de Trabajo que preparó estas revisiones

Nota: Los Miembros Asociados Masayatsu Ohtsu y Robert L. Yuan, y el Miembro Consultor LeRoy Lutz contribuyeron a las revisiones de este documento.

*Se resumen las causas de fisuración de las estructuras de hormigón. Se presentan los procedimientos usados para evaluar la fisuración del hormigón y las principales técnicas para reparar fisuras. Se discuten los principales métodos de reparación de fisuras y se brinda una guía para su correcta aplicación.**

Palabras clave: Autocurado; vigas (apoyos); reacciones cemento-agregados; construcciones de hormigón; losas de hormigón; hormigones; consolidación; corrosión; fisuración (fractura); perforación; retracción por secado; resinas epoxi; evaluación; falla; llenado con mortero; calor de hidratación; hormigón masivo; metacrilatos; dosificación de mezclas; plásticos; polímeros y resinas; hormigón premoldeado; hormigón pretensado; hormigón armado; reparaciones; reafirmado; sellado; asentamiento (estructural); retracción; especificaciones; diseño estructural; tracción; expansión térmica; cambio de volumen.

TABLA DE CONTENIDOS

Prefacio, p. 2

Capítulo 1 – Causas y control de la fisuración, p. 2

1.1 – Introducción

1.2 – Fisuración del hormigón en estado plástico

1.3 – Fisuración del hormigón endurecido

Capítulo 2 – Evaluación de la fisuración, p. 9

2.1 – Introducción

2.2 – Determinación de la ubicación y magnitud de la fisuración del hormigón

2.3 – Selección de los procesos de reparación

Capítulo 3 – Métodos de reparación de fisuras, p. 14

3.1 – Introducción

3.2 – Inyección de resinas epoxi

3.3 – Perfilado y sellado

3.4 – Costura de fisuras

3.5 – Armadura adicional

3.6 – Perforación y obturación

3.7 – Llenado por gravedad

3.8 – Llenado con mortero

3.9 – Colocación de mortero como mezcla seca (Drypacking)

3.10 – Detención de fisuras

3.11 – Impregnación con polímero

3.12 – Sobrecapas y tratamientos superficiales

3.13 – Autocurado

Capítulo 4 – Resumen, p. 21

Agradecimiento, p. 21

Capítulo 5 – Referencias, p. 21

5.1 – Referencias recomendadas

5.2 – Referencias citadas

* La intención de los Informes, Guías, Prácticas Normalizadas y Comentarios de los Comités ACI es proveer lineamientos para la planificación, diseño, ejecución e inspección de las construcciones. Este documento fue preparado para ser utilizado por personas capacitadas para evaluar la relevancia y limitaciones de su contenido y recomendaciones, personas que se harán responsables por la aplicación del material que contienen las publicaciones. El American Concrete Institute deslinda cualquier responsabilidad por los principios expuestos. El Instituto no será responsable por cualquier pérdida o daño que surgiera de los mismos.

No se hará referencia a este documento en ningún documento contractual. Si el Arquitecto / Ingeniero desea que los elementos de este documento formen parte de los documentos contractuales, dichos elementos deberán ser reescritos en términos obligatorios para poder ser incorporados por el Arquitecto / Ingeniero.

ACI 224.1R-93 reemplaza a ACI 224.1R-90, y entró en vigencia el 1° de Setiembre de 1993.

PREFACIO

La fisuración del hormigón es atribuible a numerosas causas. Las fisuras pueden sólo afectar la apariencia de una estructura, pero también pueden indicar fallas estructurales significativas o falta de durabilidad. Las fisuras pueden representar la totalidad del daño, pero también pueden señalar problemas de mayor magnitud. Su importancia depende del tipo de estructura, como así también de la naturaleza de la fisuración. Por ejemplo, fisuras que pueden ser aceptables para un edificio residencial pueden no serlo para una estructura para almacenamiento de líquidos.

Las fisuras sólo se podrán reparar correctamente si se conocen sus causas y si los procedimientos de reparación seleccionados son adecuados para dichas causas; caso contrario, las reparaciones pueden durar poco. **Los procedimientos de reparación exitosos a largo plazo son aquellos que atacan no sólo las propias fisuras sino también las causas de la fisuración.**

A fin de ayudarle al profesional a determinar cuál es la mejor solución para un determinado problema de fisuración, este informe discute las causas, métodos de evaluación y métodos de reparación de las fisuras del hormigón. El Capítulo 1 presenta un resumen de las causas de la fisuración, y está diseñado para brindar información útil para la evaluación de las fisuras. El Capítulo 2 describe técnicas y criterios de evaluación. El Capítulo 3 describe métodos para reparar fisuras e incluye una discusión de varias técnicas disponibles. Muchas situaciones sólo se podrán corregir completamente aplicando una combinación de métodos.

Prefacio a la Revisión de 1991

Luego de la publicación inicial de ACI 224.1R en 1985, el Comité procesó dos revisiones menores. Una de las revisiones, publicada como ACI 224.1R-89 simplemente actualizó el formato de las referencias recomendadas. La segunda revisión contenía revisiones técnicas menores y correcciones editoriales, y agregó una nueva sección en el Capítulo 3 sobre el uso de metacrilatos de alto peso molecular como selladores/compuestos de curado.

Durante 1990 un Grupo de Trabajo del Comité 224 revisó el documento y recomendó las revisiones contenidas en la presente edición. En el Capítulo 1 sólo se modificaron detalles menores. La introducción del Capítulo 2 fue revisada exhaustivamente, y también se introdujeron algunas otras revisiones menores en el resto del capítulo. En el Capítulo 3, la sección sobre perfilado y sellado fue reescrita de manera de incluir el sellado flexible y la colocación de sobrecargas en las fisuras, y se lo actualizó para reflejar los materiales y prácticas constructivas actuales. Se revisó el artículo 3.2 sobre inyección de resinas epoxi para que resulte más general y refleje las prácticas actuales. La anterior sección sobre metacrilatos de alto peso molecular se trasladó al artículo 3.7 con el nuevo título de "Llenado por gravedad." Se reconoce así que el "metacrilato de alto peso molecular" es un material y no un

método. En el Capítulo 5 se presentan referencias; todas las citas del texto fueron revisadas de manera de utilizar el formato autor/fecha. Se agregaron varias referencias nuevas.

La revisión de este documento es un proceso continuo. El Comité 224 invita a los lectores y usuarios de este informe a enviar comentarios sobre nuevos desarrollos o puntos de vista alternativos sobre las *Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón*.

CAPÍTULO 1 – CAUSAS Y CONTROL DE LA FISURACIÓN

1.1 – Introducción

Este capítulo presenta un breve resumen de las causas de la fisuración y los medios para el control de la misma. Las fisuras se caracterizan como fisuras en hormigón en estado plástico o fisuras en hormigón endurecido (Kelly, 1981; Price, 1982). Además de la información proporcionada en este documento, otros textos como ACI 224R y los artículos de Carlson et al. (1979), Kelly (1981), Price (1982) y Abdun-Nur (1983) presentan detalles adicionales. En todo el capítulo se citan referencias adicionales.

1.2 – Fisuración del hormigón en estado plástico

1.2.1 Fisuración por retracción plástica

"La fisuración por retracción plástica (Figura 1.1) ocurre cuando está sujeto a una pérdida de humedad muy rápida provocada por una combinación de factores que incluyen las temperaturas del aire y el hormigón, la humedad relativa y la velocidad del viento en la superficie del hormigón. Estos factores pueden combinarse de manera de provocar niveles altos de evaporación superficial tanto en clima caluroso como en clima frío."

Si la humedad se evapora de la superficie del hormigón recién colocado más rápido de lo que puede ser reemplazada por el agua de exudación, el hormigón superficial se contrae. Debido a la restricción proporcionada por el hormigón debajo de la capa superficial que se seca, en el hormigón débil, plástico y en proceso de rigidización se desarrollan tensiones de tracción que provocan fisuras poco profundas pero de profundidad variable, que pueden formar un patrón poligonal aleatorio, o bien pueden aparecer básicamente paralelas unas a otras. Estas fisuras a menudo son bastante anchas en la superficie. Su longitud varía entre pocos milímetros y más de un metro, y su separación puede ser de pocos milímetros o de hasta 3 m. Las fisuras por retracción plástica comienzan como fisuras de poca profundidad, pero pueden convertirse en fisuras cuya profundidad abarque la totalidad de la altura del elemento.

Como la fisuración por retracción plástica se debe a un cambio diferencial de volumen del hormigón, las medidas de control para ser exitosas, requieren reducir el cambio diferencial de volumen entre la superficie y otras partes del hormigón.

Para impedir la rápida pérdida de humedad provocada por el tiempo caluroso y los vientos secos se pueden adoptar varias

medidas, descritas en los documentos ACI 224R, ACI 302.1R, ACI 305R. Estas medidas incluyen el uso de boquillas de niebla para saturar el aire en contacto con las superficies, y el uso de láminas plásticas para cubrir las superficies entre operaciones de acabado. También resultan útiles los rompevientos que reducen la velocidad del viento y los parasoles que reducen la temperatura superficial. Otra práctica recomendable es programar la construcción de losas y pavimentos para después que estén construidos los rompevientos.

1.2.2 Fisuración por precipitación de los agregados – Luego de su colocación inicial, vibrado y el acabado, el hormigón tiende a continuar consolidándose. Durante este período el hormigón plástico puede estar restringido por las armaduras, por una colada previa de hormigón o por los encofrados. Estas restricciones localizadas pueden provocar vacíos y/o fisuras adyacentes al elemento que impone la restricción (Figura 1.2). Si está relacionado con las armaduras, la fisuración por asentamiento de los agregados aumenta a medida que aumenta el tamaño de las barras, que aumenta el asentamiento del hormigón y disminuye el recubrimiento (Dakhil et al., 1975). Esto se ilustra en la Figura 1.3 para un rango limitado de las variables. El grado de fisuración por asentamiento se puede intensificar si el vibrado es insuficiente o si se emplean encofrados muy flexibles o con pérdidas.

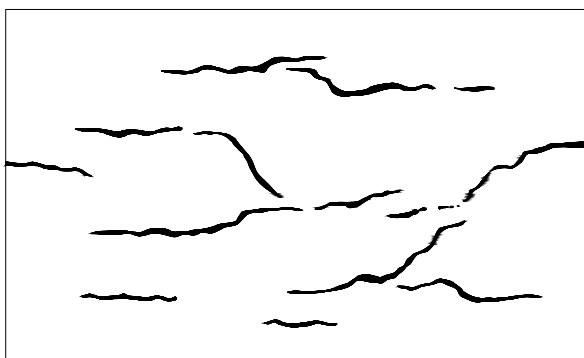


Fig. 1.1 – Típica fisuración por retracción plástica (Price, 1982)

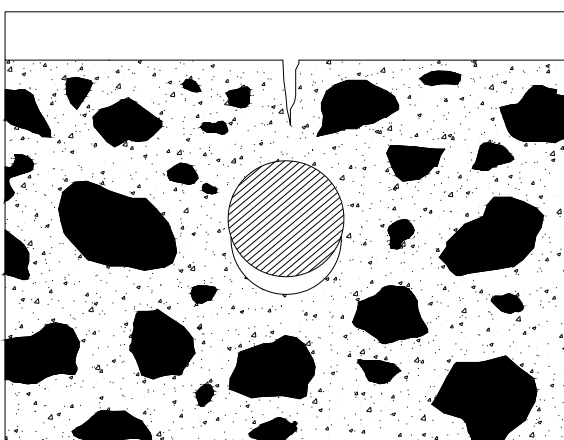


Fig. 1.2 – Fisura formada debido a una precipitación obstruida (Price, 1982)

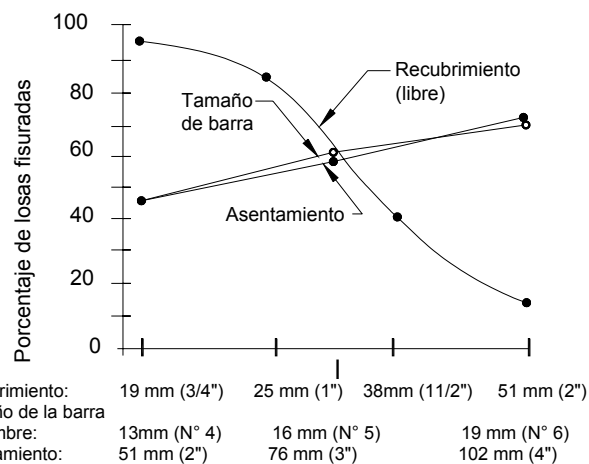


Fig. 1.3 – Fisuración por asentamiento de los agregados en función del tamaño de la barra o alambre, del asentamiento del hormigón y del recubrimiento (Dakhil et al., 1975)

El diseño de los encofrados (ACI 347R) y su vibrado (y revibrado), prever un intervalo de tiempo entre la colocación de hormigón en columnas o vigas de gran altura y la colocación de hormigón en losas y vigas (ACI 309.2R), la utilización de un hormigón con el menor asentamiento posible y el aumento del recubrimiento de hormigón son medidas que reducen la fisuración por asentamiento de los agregados.

1.3 – Fisuración del hormigón endurecido

1.3.1 Retracción por secado –

Una causa habitual de la fisuración del hormigón es la restricción de la retracción por secado. La retracción por secado es provocada por la pérdida de humedad de la pasta cementicia, la cual se puede contraer hasta un 1%. Por fortuna, los agregados proveen una restricción interna que reduce la magnitud de este cambio de volumen a aproximadamente 0,06%. Cuando se humedece el hormigón tiende a expandirse.

Estos cambios de volumen inducidos por los cambios de humedad son una característica propia del hormigón. Si la retracción del hormigón se produjera de manera no restringida el hormigón no se fisuraría. Es la combinación de la retracción y la restricción (generalmente proporcionada por otra parte de la estructura o por la subrasante) lo que provoca el desarrollo de tensiones de tracción. Cuando se supera la resistencia a la tracción del hormigón éste se fisura. Las fisuras se pueden propagar a tensiones mucho menores que las requeridas para provocar el inicio de la fisuración.

En los elementos de hormigón masivo hay tensiones de tracción provocadas por la retracción diferencial entre el hormigón de la superficie y el hormigón del interior de la masa. La mayor retracción de la superficie provoca el desarrollo de fisuras, que con el tiempo pueden penetrar más profundamente hacia el interior del hormigón.

La magnitud de las tensiones de tracción inducidas por los cambios de volumen está influenciada por una combinación de diferentes factores, incluyendo la magnitud de la retracción, el grado de restricción, el módulo de elasticidad y la magnitud de la fluencia lenta. La magnitud de la retracción por secado depende principalmente de la cantidad y tipo de agregados y del contenido de agua de la mezcla. Cuanto mayor sea la cantidad de agregados, menor será la retracción (Pickett, 1956). Cuanto más rígido sea el agregado, más efectivo será para reducir la retracción del hormigón (por ejemplo, la retracción de un hormigón que contiene arenisca puede ser más del doble que la de un hormigón que contiene granito, basalto o caliza (Carlson, 1938)). Cuanto mayor sea el contenido de agua, mayor será la retracción por secado (U.S. Bureau of Reclamation, 1975).

La fisuración superficial irregular en muros y losas (piel de cocodrilo) constituye un ejemplo de retracción por secado a pequeña escala. Generalmente hay fisuración irregular cuando la capa superficial tiene mayor contenido de humedad que el interior del hormigón. El resultado es una serie de fisuras finas y poco profundas, con poca separación.

La retracción por secado se puede reducir aumentando la cantidad de agregado y reduciendo el contenido de agua. Un procedimiento que ayudará a reducir la fisuración por asentamiento de los agregados, como así también la retracción por secado de muros, consiste en reducir el contenido de agua del hormigón a medida que se cuele el muro, desde la parte inferior a la parte superior. Usando este procedimiento, el agua de exudación de las partes inferiores del muro tenderá a igualar el contenido de agua dentro del muro. Para que este procedimiento sea exitoso es fundamental controlar el hormigón cuidadosamente y compactarlo de manera adecuada.

La fisuración por retracción se puede controlar utilizando juntas de contracción y un adecuado detallado de las armaduras. La fisuración por retracción también se puede reducir utilizando cemento compensador de la retracción. Reducir o eliminar la restricción bajo una losa también puede ser una medida efectiva para reducir la fisuración por retracción de losas de cimentación (Wimsatt et al., 1987). Los requisitos mínimos de ACI 318 no siempre resultan adecuados para casos donde el control de la fisuración es particularmente importante. Estos temas se evalúan con mayor detalle en ACI 224R, publicación que describe prácticas constructivas adicionales, diseñadas para ayudar a controlar la fisuración por retracción por secado que efectivamente ocurre, y en ACI 224.3R, documento que describe el uso y la función de las juntas en las construcciones de hormigón.

1.3.2 Tensiones de origen térmico –

Las diferencias de temperatura dentro de una estructura de hormigón pueden ser provocadas por partes de la estructura que pierden calor de hidratación a diferentes velocidades, o por condiciones climáticas que enfrían o calientan una parte de la estructura hasta una mayor temperatura o con una mayor velocidad que otra. Estas diferencias de temperatura ocasionan cambios diferenciales de volumen. Si las tensiones de tracción provocadas por los cambios diferenciales de volumen superan

la capacidad de deformación por tracción del hormigón, éste se fisurará. Los diferenciales de temperatura provocados por diferentes tasas de disipación del calor de hidratación del cemento normalmente sólo afectan al hormigón masivo (que puede incluir columnas, estribos, vigas y zapatas, además de presas), mientras que los diferenciales de temperatura provocados por cambios de la temperatura ambiente pueden afectar a cualquier estructura.

La fisuración del hormigón masivo se puede deber a una temperatura en la superficie de la masa mayor que la temperatura en el interior de la misma. El gradiente de temperatura puede ocurrir ya sea porque la parte central del hormigón se calienta más que la parte exterior por el calor liberado durante el proceso de hidratación del cemento, o bien por un enfriamiento más rápido del exterior respecto del interior del hormigón. En ambos casos se originan tensiones de tracción en el exterior y, si estas tensiones superan la resistencia a la tracción, habrá fisuración. Las tensiones de tracción son proporcionales al diferencial de temperatura, el coeficiente de expansión térmica, el módulo de elasticidad efectivo (reducido por la fluencia lenta) y el grado de restricción (Dusinberre, 1945; Houghton, 1972, 1976). Cuanto más masiva sea la estructura, mayor será su potencial de generar gradientes térmicos y fisurarse.

Los procedimientos para reducir la fisuración de origen térmico incluyen reducir la máxima temperatura interna, demorar el inicio del enfriamiento, controlar la velocidad a la cual se enfría el hormigón y aumentar la resistencia a la tracción del hormigón. En los documentos ACI 207.1R, ACI 207.2R, ACI 207.4R y ACI 224R se presentan estos y otros métodos utilizados para reducir la fisuración del hormigón masivo.

El hormigón endurecido tiene un coeficiente de expansión térmica que puede variar entre 7 a $11 \times 10^{-6} \text{ C}$, con un valor típico de $10 \times 10^{-6} \text{ C}$. Si una parte de la estructura es sometida a un cambio de volumen de origen térmico, es probable que haya fisuración de origen térmico. Los diseñadores deberían prestar particular atención a las estructuras en las cuales algunas partes están expuestas a cambios de temperatura mientras otras están parcial o totalmente protegidas. Una caída de temperatura podría provocar la fisuración de los elementos expuestos, mientras que un aumento de temperatura podría provocar fisuración en los elementos protegidos. Los gradientes de temperatura provocan deflexiones y rotaciones en los elementos estructurales; si éstos están restringidos se pueden generar tensiones elevadas (Priestley, 1978; Hoffman et al., 1983; ACI 343R). Este problema se puede aliviar permitiendo el movimiento por medio de juntas de contracción correctamente diseñadas y detallando las armaduras adecuadamente.

1.3.3 Reacciones químicas –

Algunas reacciones químicas pueden provocar la fisuración del hormigón. Estas reacciones pueden ser producto de los materiales utilizadas para preparar el hormigón, o de los materiales que están en contacto con el hormigón una vez endurecido.

A continuación presentamos algunos conceptos útiles para reducir las reacciones químicas adversas, pero sólo el ensayo previo de las mezclas a utilizar o una gran experiencia en obra pueden determinar la eficacia de una medida en particular.

Con el tiempo el hormigón se puede fisurar como resultado de reacciones expansivas de desarrollo lento producidas entre los agregados que contienen sílice activa y los álcalis derivados de la hidratación del cemento, aditivos o fuentes externas (por ejemplo, el agua usada para el curado, el agua freática, las soluciones alcalinas almacenadas o empleadas en la estructura terminada).

La reacción álcali-sílice provoca la formación de un gel expansivo que tiende a extraer agua de otras partes del hormigón. Esto provoca expansiones locales junto con las correspondientes tensiones de tracción, y eventualmente puede provocar el deterioro total de la estructura. Las medidas de control incluyen la correcta elección de los agregados, el uso de cementos con bajo contenido de álcalis y el uso de puzolanas, las cuales a su vez contienen sílices muy finas y altamente activas. La primera medida puede impedir que ocurra el problema, mientras que las dos últimas tienden a reducir la relación entre álcalis y sílice reactiva, provocando la formación de un silicato de calcio alcalino no expansivo.

Ciertas rocas carbonatadas participan en reacciones con los álcalis; en algunos casos estas reacciones producen expansión y fisuración. Estas reacciones álcali-carbonato perjudiciales generalmente están asociadas con calizas dolomíticas y arcillosas que tienen una estructura granular muy fina (criptocristalina) (ACI 201.2R). El hormigón afectado se caracteriza por un patrón de fisuración en red. Esta reacción se distingue de la reacción álcali-sílice por la ausencia de depósitos superficiales de gel de sílice en las fisuras. El problema se puede minimizar evitando los agregados reactivos, diluyendo con agregados no reactivos, utilizando un menor tamaño máximo de agregado y utilizando cemento de bajo contenido de álcalis (ACI 201.2R).

Las aguas sulfatadas representan un problema para el hormigón desde el punto de vista de su durabilidad. Los sulfatos que penetran en la pasta cementicia hidratada entran en contacto con el aluminato de calcio hidratado. Se forma un sulfoaluminato de calcio, con el consiguiente aumento de volumen, que provoca elevadas tensiones de tracción localizadas, que a su vez provocan el desarrollo de fisuras poco separadas y un deterioro generalizado del hormigón. Los cementos pórtland de bajo contenido de aluminato tricálcico (ver las normas IRAM 50000 e IRAM 5001), pueden reducir la gravedad del problema. (Atención: en el documento original se hace referencia a "cementos pórtland ASTM C 150 Tipos II y V, de bajo contenido de aluminato tricálcico").

Los cementos compuestos (ver las normas IRAM 50000 e IRAM 50001) también son útiles para este problema. (Atención: en el documento original se hace referencia a "los cementos mezclados especificados en ASTM C 595").

En algunos casos extremos y luego de realizar los ensayos correspondientes, se podrían usar puzolanas que son conocidas por impartir una resistencia adicional contra el ataque de los

sulfatos, obviamente luego de realizar los ensayos correspondientes.

También pueden surgir condiciones perjudiciales como resultado de la aplicación de sales descongelantes sobre una superficie de hormigón endurecido. El hormigón expuesto a sales solubles en agua debería tener un elevado contenido de aire incorporado, tener un adecuado recubrimiento de las armaduras y ser hormigón de alta calidad y baja permeabilidad.

En ACI 201.2R se discuten en mayor profundidad los efectos de estos y otros problemas relacionados con la durabilidad del hormigón.

El hidróxido de calcio de la pasta cementicia hidratada se combinará con el dióxido de carbono del aire para formar carbonato de calcio. Debido a que el carbonato de calcio tiene menor volumen que el hidróxido de calcio, habrá retracción (habitualmente conocida como retracción por carbonatación). Esta situación puede provocar un importante grado de fisuración irregular en las superficies de hormigón, y puede ser particularmente grave en el caso de superficies frescas recién colocadas durante las primeras 24 horas si se usan calentadores sin ventilación adecuada para mantener el hormigón tibio durante los meses invernales.

A excepción de la carbonatación superficial, es poco lo que se puede hacer para proteger o reparar el hormigón que ha estado expuesto a los ataques químicos descritos en los párrafos precedentes (ACI 201.2R).

1.3.4 Meteorización – Los procesos de meteorización que pueden provocar fisuración, incluyen el congelamiento, deshielo, humedecimiento, secado, calentamiento y enfriamiento. En general la fisuración provocada por los procesos naturales de meteorización es conspicua, y puede dar la impresión de que el hormigón está a punto de desintegrarse, aún cuando el deterioro no haya progresado mucho debajo de la superficie.

Los daños provocados por los ciclos de congelamiento y deshielo representan el deterioro físico más habitual relacionado con las condiciones meteorológicas. Tanto el congelamiento del agua de la pasta como el congelamiento del agua en los agregados, o ambos fenómenos, pueden dañar el hormigón (Powers, 1975).

Los daños en el hormigón endurecido provocados por el congelamiento se deben al movimiento del agua hacia los sitios de congelamiento y a la presión hidráulica generada por el crecimiento de cristales de hielo (Powers, 1975).

Las partículas de agregado están rodeadas por pasta cementicia que impide que el agua escape rápidamente. Cuando las partículas de agregado están por encima de un grado crítico de saturación, la expansión del agua absorbida durante el congelamiento puede fisurar la pasta cementicia circundante o dañar el propio agregado (Callan, 1952; Snowdon y Edwards, 1962).

La mejor manera de proteger al hormigón contra el congelamiento y deshielo consiste en utilizar la menor relación agua-cemento y cantidad total de agua posibles, utilizar agregados durables e incorporar aire adecuadamente. También es importante el curado previo a la exposición a condiciones de

congelamiento. Permitir que la estructura se seque luego del curado mejorará su durabilidad con respecto al congelamiento y deshielo.

Otros procesos de meteorización que pueden provocar la fisuración del hormigón son los ciclos de humedecimiento y secado y calentamiento y enfriamiento. Ambos procesos generan cambios de volumen que pueden provocar fisuración. Si los cambios de volumen son excesivos habrá fisuración como se comentó en los artículos 1.3.1 y 1.3.2.

1.3.5 Corrosión de las armaduras – La corrosión de un metal es un proceso electroquímico que requiere un agente oxidante, humedad y flujo de electrones dentro del metal; se producen una serie de reacciones químicas en la superficie del metal y cerca de la misma (ACI 201.2R).

La clave para proteger un metal contra la corrosión es detener o invertir las reacciones químicas. Esto se puede lograr cortando los suministros de oxígeno o humedad, o proveyendo un exceso de electrones en los ánodos para impedir la formación de los iones metálicos (protección catódica).

El acero de las armaduras del hormigón generalmente no se corroe ya que en el ambiente altamente alcalino se forma un recubrimiento de óxido protector, fuertemente adherido al acero. Esto se conoce como protección pasiva.

Sin embargo, el acero de las armaduras se puede corroer si la alcalinidad del hormigón se reduce por carbonatación o si la pasividad de este acero es destruida por iones agresivos (generalmente cloruros). La corrosión del acero produce óxidos e hidróxidos de hierro, cuyo volumen es mucho mayor que el del hierro metálico original (Verbeck, 1975). Este aumento de volumen provoca tensiones radiales de estallido alrededor de las barras de armadura, y la consiguiente aparición de fisuras radiales localizadas. Estas fisuras radiales se pueden propagar a lo largo de la barra, provocando la formación de fisuras longitudinales (es decir, paralelas a la barra) o provocando el descascamiento del hormigón. También se puede formar una fisura ancha en un plano de barras paralelas a una superficie de hormigón y esto puede llevar a la fisuración laminar (en láminas), próxima a la superficie problema bien conocido en el caso de tableros de puentes.

Las fisuras permiten que el oxígeno, la humedad y los cloruros ingresen fácilmente; por lo tanto, las pequeñas fisuras radiales pueden crear una condición que acelerará la corrosión y la fisuración.

Las fisuras transversales a las armaduras generalmente no causan un proceso continuo de corrosión de las armaduras, siempre que el hormigón tenga baja permeabilidad. Esto se debe a que la porción expuesta de una barra en una fisura actúa como un ánodo. A edades tempranas, cuanto más ancha sea la fisura mayor será la corrosión, simplemente porque una parte más extensa de la barra ha perdido su protección pasiva. Sin embargo, para que haya un proceso continuo de corrosión, debe haber oxígeno y humedad disponible en otras partes de la misma barra o en barras eléctricamente conectadas por contacto directo o por medio de herrajes tales como los soportes de las armaduras. Si la combinación de densidad y espesor de recubrimiento de hormigón restringe adecuadamente el flujo de

oxígeno y humedad, se dice que el proceso de corrosión es autocurante (Verbeck, 1975).

Si se forma una fisura longitudinal paralela a la armadura, la corrosión puede continuar, ya que se pierde la pasividad en muchos puntos y hay oxígeno y humedad fácilmente disponibles a lo largo de toda la longitud de la fisura.

Otras causas de fisuración longitudinal, como por ejemplo la presencia de elevadas tensiones de adherencia, tracción transversal (por ejemplo a lo largo de estribos o a lo largo de losas traccionadas en dos direcciones), retracción y asentamiento, pueden iniciar la corrosión.

En general, para las construcciones de hormigón la mejor protección contra los daños inducidos por la corrosión es usar hormigón de baja permeabilidad y un recubrimiento de hormigón adecuado. Aumentar el espesor del recubrimiento de hormigón sobre las armaduras resulta efectivo para demorar el proceso de corrosión y también para resistir las hendiduras y descascamientos provocados por la corrosión o las tracciones transversales (Gergely, 1981; Beeby, 1983). En el caso de barras de gran diámetro y recubrimientos de gran espesor, puede ser necesario agregar pequeñas armaduras transversales (manteniendo los requisitos sobre recubrimiento mínimo) para limitar las hendiduras y para reducir el ancho de las fisuras superficiales (ACI 345R).

Si las condiciones de exposición son extremadamente severas es posible que sea necesario adoptar medidas de protección adicionales. Hay varias opciones disponibles, tales como el uso de armaduras recubiertas, selladores o sobrecapas encima del hormigón, aditivos inhibidores de la corrosión y protección catódica (NCHRP Synthesis 57). Cualquier procedimiento que impida de manera efectiva que el oxígeno y la humedad accedan a la superficie de acero, o invierta el flujo de electrones en el ánodo, protegerá el acero. En la mayoría de los casos se debe permitir que el hormigón respire, es decir que cualquier tratamiento superficial del hormigón debe permitir que el agua del hormigón se evapore.

1.3.6 Prácticas constructivas inadecuadas –

Existe una gran variedad de prácticas constructivas inadecuadas cuyo resultado puede ser la fisuración del hormigón. Entre ellas la más habitual es la costumbre de agregarle agua al hormigón para mejorar su trabajabilidad. El agua agregada reduce la resistencia, aumenta el asentamiento y aumenta la retracción por secado. Si esta práctica se combina con el uso de un mayor contenido de cemento para contrarrestar la reducción de la resistencia, el aumento del contenido de agua significará un aumento del diferencial de temperatura entre el interior y el exterior de la estructura, cuyo resultado será un aumento de las tensiones térmicas y posiblemente, fisuración. Si se agrega cemento, aún manteniendo constante la relación agua-cemento, habrá más retracción porque aumentará el volumen relativo de pasta.

La falta de curado aumentará el grado de fisuración de una estructura de hormigón. Terminar el curado antes de tiempo permitirá mayor retracción en un momento en el cual el hormigón aún tiene baja resistencia. La falta de hidratación del cemento, debida al secado, resultará no sólo en una

disminución de la resistencia a largo plazo sino también en una reducción de la durabilidad de la estructura.

Otros problemas constructivos que pueden provocar fisuración son el uso de apoyos inadecuados para los encofrados, una compactación inadecuada y la colocación de juntas de contracción en puntos de tensión elevada. La falta de apoyo para los encofrados o la compactación inadecuada pueden provocar el asentamiento y la fisuración del hormigón antes que éste haya desarrollado resistencia suficiente para soportar su propio peso, mientras que la incorrecta ubicación de las juntas de construcción puede provocar la abertura de las juntas en los puntos de tensión elevada.

Los métodos para impedir la fisuración provocada por estas y otras prácticas constructivas inadecuadas son bien conocidos (ver ACI 224R, ACI 302.1R, ACI 304R, ACI 305R, ACI 308, ACI 309R, ACI 345R y ACI 347R), pero requieren especial atención para asegurar su correcta implementación.

1.3.7 Sobrecargas durante la construcción –

A menudo las cargas inducidas durante la construcción pueden ser mucho más severas que las que soportará la estructura en servicio. Desafortunadamente, estas condiciones se pueden dar a edades tempranas cuando el hormigón es más susceptible de ser dañado y con frecuencia originan fisuras permanentes.

Los elementos premoldeados, tales como vigas y paneles, son los más expuestos a este tipo de abuso, pero el hormigón colado in situ no está exento de ser afectado. Un error común es no apoyar correctamente los elementos premoldeados durante su transporte y montaje. El uso de puntos de elevación arbitrarios o simplemente convenientes puede provocar daños severos. Los ganchos y pasadores usados para levantar estos elementos deben ser detallados o aprobados por el diseñador. Si no es posible utilizar ganchos o pasadores, se debe proveer acceso al fondo del elemento de manera de poder usar correas. El Comité PCI sobre Criterios de Control de la Calidad (1985, 1987) proporciona información adicional sobre las causas, prevención y reparación de las fisuras relacionadas con la fabricación y transporte de vigas, columnas, losas de núcleo hueco y vigas doble T de hormigón premoldeado o pretensado.

Los operarios de los equipos elevadores deben ser cuidadosos y saber que es posible provocar daños aún cuando se utilicen los accesorios adecuados. Si una viga o panel de grandes dimensiones se baja demasiado rápido y el descenso se detiene demasiado bruscamente, habrá una carga de impacto cuya magnitud puede ser varias veces mayor que el peso propio del elemento. Otro error habitual que se debe evitar es hacer palanca sobre una esquina de un panel para levantarlo o "aflojarlo".

Al considerar cómo se apoyará un elemento para su transporte, el diseñador debe ser consciente de las cargas que se pueden inducir durante el traslado. Algunos ejemplos de situaciones que ocurren durante el transporte de elementos premoldeados de grandes dimensiones por medio de camiones con acoplado son el pasar sobre cordones pronunciados o pisar el cordón de las aceras en curvas cerradas, la torsión debida al

peralte de los caminos que es diferente para el camión y para el acoplado, y la aceleración diferencial del acoplado respecto del camión.

Las vigas pretensadas pueden presentar problemas de fisuración particulares en el momento de relajar la tensión – generalmente cuando las vigas tienen menos de un día de edad. Si hay múltiples cables, éstos se deben relajar siguiendo una secuencia determinada, de manera de no someter el elemento a cargas excéntricas inaceptables. Si se relajan todos los cables de un lado de la viga mientras los cables del otro lado permanecen tensionados, puede haber fisuración del lado de los cables no relajados. Estas fisuras son indeseables, pero es probable que se cierren cuando se relajen los cables restantes.

En las vigas T que tienen una de sus alas altamente reforzada y la otra delgada y altamente pretensada, se pueden desarrollar fisuras en las uniones entre el alma y las alas.

Otra práctica que puede provocar fisuración cerca de los extremos de las vigas es soldar por puntos las placas de apoyo al banco de colado para mantenerlas en su lugar durante la colocación del hormigón. Con frecuencia los puntos de soldadura no se rompen hasta que durante la aplicación de la fuerza de pretensado se induce una tensión suficiente para romperlos. Hasta ese momento el fondo de la viga está restringido, mientras que el resto de la viga está en compresión. Si las soldaduras son demasiado fuertes se formarán fisuras cerca de las placas de apoyo.

Los choques térmicos pueden provocar la fisuración del hormigón curado al vapor si no se lo trata correctamente. El máximo valor de enfriamiento utilizado habitualmente es de 40 °C) por hora (ACI 517.2R; Verbeck, 1958; Shideler y Toennies, 1963; Kirkbride, 1971b). Si se usan agregados frágiles y la capacidad de deformación es baja, el valor del enfriamiento debería ser menor. Se deberían aplicar restricciones de temperatura a toda la viga, no sólo a ubicaciones en las cuales se monitorea la temperatura. Si se retiran las cubiertas protectoras que retienen el calor para acceder a los extremos de las vigas y cortar los cables, y si la temperatura ambiente es baja, se pueden producir choques térmicos. Raramente hay registradores de temperatura en estas zonas críticas.

También existen condiciones similares y potencial de fisuración en el caso de bloques, cordones y paneles premoldeados sujetos a una brusca disminución de la temperatura superficial.

Muchos creen que los enfriamientos bruscos pueden provocar fisuración sólo en las capas superficiales de unidades de gran espesor, y que los enfriamientos rápidos no perjudican la resistencia ni la durabilidad de los productos premoldeados (ACI 517.2R; Mansfield, 1948; Nurse, 1949; Higginson, 1961; Jastrzebski, 1961; Butt et al., 1969; Kirkbride, 1971a; Concrete Institute of Australia, 1972; PCI Energy Committee, 1981). Una excepción es la fisuración transversal observada en vigas pretensadas sujetas a enfriamiento antes de relajar la tensión de pretensado. Por este motivo, los elementos pretensados se deberían relajar inmediatamente después de discontinuar el curado al vapor (PCI Energy Committee, 1981).

ACI 224.1R-93 – CAUSAS, EVALUACIÓN Y REPARACIÓN DE FISURAS

En climas fríos el hormigón colado in situ puede ser sometido involuntariamente a cargas constructivas, si se emplean calentadores para lograr una temperatura de trabajo elevada dentro de una estructura. Típicamente se utilizan cubiertas de lona para cubrir las aberturas para puertas y ventanas, y dentro del área cerrada se disponen potentes calentadores. Si los calentadores están próximos a los elementos de hormigón exteriores, puede producirse un gradiente térmico inaceptable dentro de dichos elementos. El interior del muro se expandirá en relación con el exterior. Para minimizar este efecto, los calentadores se deberían mantener alejados de los muros exteriores. Esto constituye una buena práctica, ya que también evitará retracción por secado y fisuración por carbonatación localizadas.

Durante la etapa constructiva el almacenamiento de los materiales y la operación de los equipos pueden provocar condiciones de carga mucho más severas que aquellas para las cuales se diseñó la estructura. Los daños originados por sobrecargas constructivas no previstas sólo se pueden impedir si los diseñadores proporcionan información sobre limitaciones de carga para la estructura y si el personal cumple con estas limitaciones.

1.3.8 Errores de diseño y detallado – Las consecuencias de un diseño y/o detallado incorrecto van desde estructuras no satisfactorias desde el punto de vista estético hasta la falta de serviciabilidad o fallas catastróficas. Estos problemas sólo se pueden minimizar por medio de una profunda comprensión del comportamiento estructural (en su sentido más amplio).

Los errores de diseño y detallado que pueden provocar fisuración inaceptable incluyen el uso de ángulos reentrantes mal detallados en las esquinas de muros, elementos y losas premoldeados, la incorrecta selección y/o detallado de las armaduras, la restricción de elementos sujetos a cambios de volumen provocados por variaciones de temperatura y humedad, la falta de juntas de contracción adecuadas y el incorrecto diseño de las fundaciones, que provoca movimientos diferenciales dentro de la estructura. Kaminetzky (1981) y Price (1982) presentan ejemplos de estos problemas.

Los ángulos reentrantes permiten la concentración de tensiones y, por lo tanto, son ubicaciones preferenciales para el inicio de fisuras. Ya sea que las elevadas tensiones sean el resultado de cambios de volumen, cargas en el plano o flexión, el diseñador debe reconocer que las tensiones siempre son elevadas cerca de esquinas o ángulos reentrantes. Algunos ejemplos bien conocidos son las aberturas para puertas y ventanas en los muros de hormigón y los extremos de las vigas entalladas, ilustrados en las Figuras 1.4 y 1.5. Para mantener las inevitables fisuras poco abiertas e impedir su propagación, se requiere armadura diagonal correctamente anclada.

El uso de una cantidad inadecuada de armadura puede provocar fisuración excesiva. Un error típico consiste en armar un elemento ligeramente porque se trata de un "elemento no estructural". Sin embargo, el elemento (por ejemplo un muro) puede estar unido al resto de la estructura de una manera tal que se requiera que soporte gran parte de la carga una vez que la estructura se comienza a deformar. Entonces el "elemento no

estructural" comienza a soportar carga de manera proporcional a su rigidez. Debido a que este elemento no ha sido detallado para actuar estructuralmente, se pueden producir fisuras antiestéticas aún cuando la seguridad de la estructura no esté en riesgo.

La restricción de elementos sujetos a cambios de volumen frecuentemente provoca fisuración. Las tensiones que se pueden generar en el hormigón debido a la restricción de la fluencia lenta, los diferenciales de temperatura y la retracción por secado pueden ser mucho mayores que las tensiones provocadas por las cargas. No es difícil que una losa o una viga restringida e impedida de acortarse, aún si está pretensada, desarrolle tensiones de tracción suficientes para provocar fisuración. Los muros bien diseñados deberían tener juntas de contracción separadas entre una y tres veces la altura del muro. Se debería permitir el movimiento de las vigas. Las construcciones postesadas coladas in situ que no permiten que un elemento pretensado se acorte pueden provocar la fisuración tanto del elemento como de la estructura de apoyo (Libby, 1977). El problema de la restricción de los elementos estructurales es particularmente serio en los elementos pretensados y premoldeados que se sueldan a los apoyos en ambos extremos. En combinación con otros detalles problemáticos (ángulos reentrantes, etc.) puede resultar catastrófico (Kaminetzki, 1981; Mast, 1981).

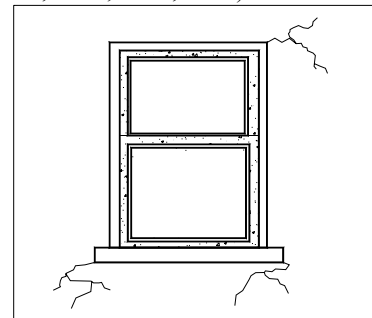


Fig. 1.4 – Patrones de fisuración típicos en ángulos o esquinas reentrantes (Price, 1982)

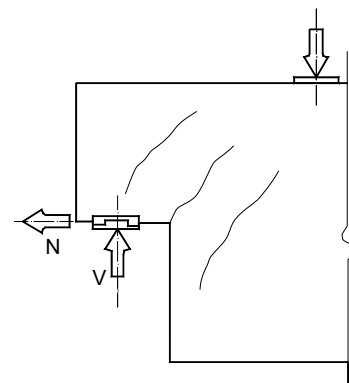


Fig. 1.5 – Patrón de fisuración típico en el extremo entallado de una viga bajo cargas de servicio*

* De Alan H. Mattock y Timothy C. Chan (1979), "Design and Behavior of Dapped-end Beams," *Journal*, Prestressed Concrete Institute, V. 24, No. 6, Noviembre-Diciembre, pp. 28-45

ACI 224.1R-93 – CAUSAS, EVALUACIÓN Y REPARACIÓN DE FISURAS

Las fundaciones mal diseñadas pueden provocar movimientos diferenciales excesivos dentro de una estructura. Si el movimiento diferencial es relativamente pequeño, el problema de la fisuración será puramente estético. Sin embargo, si se produce un importante asentamiento diferencial, es posible que la estructura no sea capaz de redistribuir las cargas con la velocidad suficiente para impedir la falla. Una de las ventajas del hormigón armado es que, si el movimiento se produce durante un período de tiempo suficientemente largo, la fluencia lenta permitirá que haya al menos alguna redistribución de la carga.

La importancia del correcto diseño y detallado dependerá de la estructura y las cargas particulares involucradas. Se debe tener especial cuidado en el diseño y detallado de aquellas estructuras en las cuales la fisuración podría provocar problemas de serviciabilidad importantes. Estas estructuras también requieren inspecciones continuas durante todas las fases de la construcción para suplementar el diseño y detallado.

1.3.9 Cargas aplicadas externamente – Se sabe que las tensiones de tracción inducidas por las cargas provocan la fisuración de los elementos de hormigón. Este hecho es reconocido y aceptado por todos los involucrados en el diseño del hormigón. Los procedimientos de diseño actuales (ACI 318 y las Especificaciones Normalizadas para Puentes Carreteros de AASHTO) utilizan armaduras no sólo para tomar las fuerzas de tracción sino también para lograr una adecuada distribución de las fisuras e imponer un límite razonable al ancho de las mismas.

El estado actual del conocimiento sobre elementos flexionados constituye la base de las siguientes conclusiones generales sobre las variables que controlan la fisuración: El ancho de fisura aumenta con el aumento de la tensión de las armaduras, el espesor del recubrimiento y la sección de hormigón que rodea cada una de las barras. De todas estas variables la más importante es la tensión del acero de las armaduras. El diámetro de las barras no es una consideración importante. El ancho de una fisura en la parte inferior de una viga aumenta a medida que aumenta el gradiente de deformación entre el acero y la cara traccionada de la viga.

La ecuación que se considera que permite pronosticar mejor el máximo ancho de fisura superficial probable, en flexión, fue desarrollada por Gergely y Lutz (1968). Una versión simplificada de esta ecuación es:

$$w = 0,076 \beta f_s (d_c A)^{0,33} \times 10^{-3} \quad (1.1)$$

siendo w el máximo ancho de fisura probable, en mm; β la relación entre la distancia entre el eje neutro y la cara traccionada y la distancia entre el eje neutro y el baricentro de las armaduras (se adopta aproximadamente igual a 1,20 para vigas típicas en edificios); f_s la tensión en el acero de las armaduras, en ksi; d_c el espesor de recubrimiento entre la fibra traccionada y el centro de la barra más próxima a la misma, en mm; y A la sección de hormigón simétrica con el acero de las armaduras dividida por el número de barras, mm^2 .

ACI 318 usa una modificación de esta ecuación que efectivamente limita los anchos de fisura a **0,40 mm** para exposición exterior y **0,33 mm** para exposición interior. Sin embargo, considerando la información presentada en el artículo 1.3.5 que indica que existe poca correlación entre el ancho superficial de las fisuras transversales a las barras y la corrosión de las armaduras, estos límites no parecen justificables desde el punto de vista del control de la corrosión.

Para elementos de hormigón pretensado se han desarrollado varias ecuaciones (ACI 224R), pero ninguno de los métodos ha logrado una aceptación generalizada.

En elementos traccionados el máximo ancho de fisura es mayor que el pronosticado por la expresión desarrollada para miembros flexionados (Broms, 1965; Broms y Lutz, 1965). La ausencia de un gradiente de deformación y una zona de compresión en los elementos traccionados son probablemente las causas de los mayores anchos de fisura.

En base a los limitados datos disponibles, se ha sugerido la siguiente expresión para estimar el máximo ancho de fisura en tracción directa (ACI 224R):

$$w = 0,10 f_s (d_c A)^{0,33} \times 10^{-3} \quad (1.2)$$

El documento ACI 224.2R contiene información adicional sobre la fisuración del hormigón en tracción directa.

Es dable esperar que los anchos de fisura en flexión y tracción aumenten con el tiempo en el caso de elementos sometidos a cargas de larga duración o a cargas repetitivas. Aunque los datos disponibles evidencian una dispersión considerable, se puede anticipar que los anchos de fisura se duplicarán con el tiempo (Abeles et al., 1968; Bennett y Dave, 1969; Illston y Stevens, 1972; Holmberg, 1973; Rehm y Eligehausen, 1977).

A pesar de que aún queda mucho camino por recorrer, los principios básicos del control de la fisuración ya han sido comprendidos. **Las armaduras bien distribuidas ofrecen la mejor protección contra la fisuración no deseada al igual que reducir la tensión en el acero, utilizando mayor cantidad de armaduras, también reducirá la cantidad de fisuración.** Aunque una reducción del recubrimiento también reducirá el ancho de fisura superficial, los diseñadores deben recordar, como se mencionó en el artículo 1.3.5, que las fisuras (y por lo tanto los anchos de fisura) perpendiculares a las armaduras no afectarán la corrosión del acero de manera significativa, a la vez que una reducción del recubrimiento de hormigón perjudicará la protección contra la corrosión de las armaduras.

CAPÍTULO 2 – EVALUACIÓN DE LA FISURACIÓN

2.1 – Introducción

Antes de reparar las fisuras del hormigón, es importante identificar primero su ubicación y extensión. Se debería determinar si las fisuras observadas indican problemas

ACI 224.1R-93 – CAUSAS, EVALUACIÓN Y REPARACIÓN DE FISURAS

estructurales actuales o futuros, considerando las condiciones actuales y las condiciones de carga anticipadas para el futuro. Antes de especificar las reparaciones es necesario establecer las causas de la fisuración. Se deberían revisar los planos, especificaciones y registros de construcción y mantenimiento. Si estos documentos, junto con las observaciones recogidas in situ, no proporcionan la información necesaria, antes de proceder con las reparaciones se debería efectuar una investigación in situ y un análisis estructural completo.

Las causas de la fisuración fueron descritas en el Capítulo 1. Una evaluación detallada de la fisuración observada permitirá detectar cuáles de estas causas se aplican a una situación determinada.

Las fisuras se deben reparar si éstas reducen la resistencia, rigidez o durabilidad de la estructura a niveles inaceptables, o si la función de la estructura resulta seriamente perjudicada. En algunos casos, como el de las fisuras en estructuras para contención de agua, la función de la estructura determinará la necesidad de realizar reparaciones, aún cuando la resistencia, rigidez o apariencia no estén significativamente afectadas. Las fisuras en pavimentos y losas de cimentación pueden requerir reparaciones para impedir descascamientos en los bordes, migración de agua hacia la subrasante o para transmitir cargas. Además, puede ser deseable efectuar reparaciones que mejoren el aspecto de la superficie de una estructura de hormigón.

2.2 – Determinación de la ubicación y magnitud de la fisuración del hormigón

La ubicación y magnitud de la fisuración, así como el estado general del hormigón de una estructura, se pueden determinar mediante observaciones directas e indirectas, ensayos no destructivos y destructivos, y ensayos de testigos extraídos de la estructura.

2.2.1 Observación directa e indirecta – Se deben registrar las ubicaciones y anchos de las fisuras utilizando un esquema de la estructura. Marcar una grilla sobre la superficie de la estructura puede ser útil para ubicar con precisión las fisuras en el esquema.

Los anchos de las fisuras se pueden medir con una precisión de alrededor de **0,025 mm** utilizando un comparador, que es un pequeño microscopio de mano con una escala en el lente más próximo a la superficie observada (Figura 2.1). Los anchos de las fisuras también se pueden estimar utilizando una tarjeta de comparación, que es una tarjeta con líneas claramente marcadas, cada una de ellas de un ancho especificado. El esquema debe incluir observaciones tales como descascamientos, armaduras expuestas, deterioros superficiales y manchas de óxido. Las condiciones internas en la ubicación de una fisura específica se pueden observar usando endoscopios flexibles o boroscopios rígidos.

El movimiento de las fisuras se puede monitorear mediante indicadores de movimiento mecánicos, del tipo ilustrado en la Figura 2.2. El indicador, o monitor de fisuras, ilustrado en la Figura 2.2(a) permite la lectura directa del desplazamiento y rotación de las fisuras. El indicador de la Figura 2.2(b) (Stratton

et al., 1978) amplifica el movimiento de las fisuras (en este caso 50 veces) e indica el máximo rango de movimiento durante el período de medición. Los indicadores mecánicos tienen la ventaja de no requerir protección contra la humedad. Si se desea obtener historiales más detallados, existe una gran variedad de transductores (principalmente los transformadores diferenciales de variación lineal) y sistemas de recolección de datos disponibles (desde registradores de cinta hasta sistemas digitales).

Los esquemas se pueden complementar con fotografías que documenten la condición de la estructura en el momento de la investigación. Los documentos ACI 201.1R, ACI 201.3R, ACI 207.3R, ACI 345.1R y ACI 546.1R presentan lineamientos para efectuar un relevamiento de la condición del hormigón en estructuras en servicio.

2.2.2 Ensayos no destructivos – Se pueden realizar ensayos no destructivos para determinar la presencia de fisuras y vacíos internos y la profundidad de penetración de las fisuras visibles en la superficie.

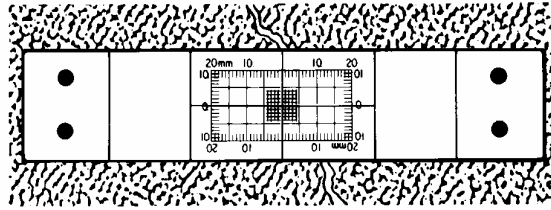
Golpear la superficie con un martillo o usar una cadena de arrastre son técnicas sencillas que permiten identificar la fisuración laminar próxima a la superficie. Un sonido hueco indica la presencia de una o más fisuras debajo de la superficie y paralelas a la misma.

La presencia de armaduras se puede determinar usando un pacómetro (Figura 2.3) (Malhotra, 1976). Se pueden conseguir diversos pacómetros, cuya capacidad va desde la mera indicación de la presencia de acero hasta aquellos que se pueden calibrar y le permiten al usuario experimentado una mejor determinación de la profundidad y el tamaño de las barras de armadura. Sin embargo, en algunos casos puede ser necesario retirar el recubrimiento de hormigón (a menudo usando taladros o cinceles) para identificar los tamaños de las barras o para calibrar las mediciones del recubrimiento, especialmente en zonas con congestión de armaduras.

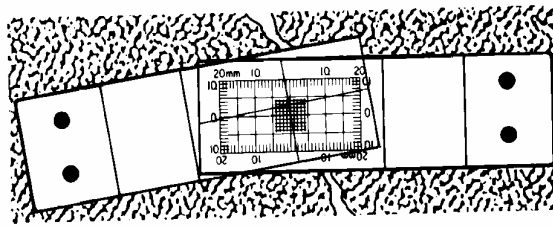
Si se sospecha que la corrosión es una causa de fisuración, la manera más sencilla de investigar la corrosión es retirar parte del hormigón para poder observar el acero directamente. El potencial de corrosión se puede detectar midiendo potenciales eléctricos usando una media celda de referencia adecuada. La más usada es una media celda de sulfato de cobre-cobre (ASTM C 876; Clear y Hay, 1973); su uso también requiere acceso al acero de las armaduras.



Fig. 2.1 – Comparador para medir anchos de fisura (cortesía de Edmund Scientific Co.)

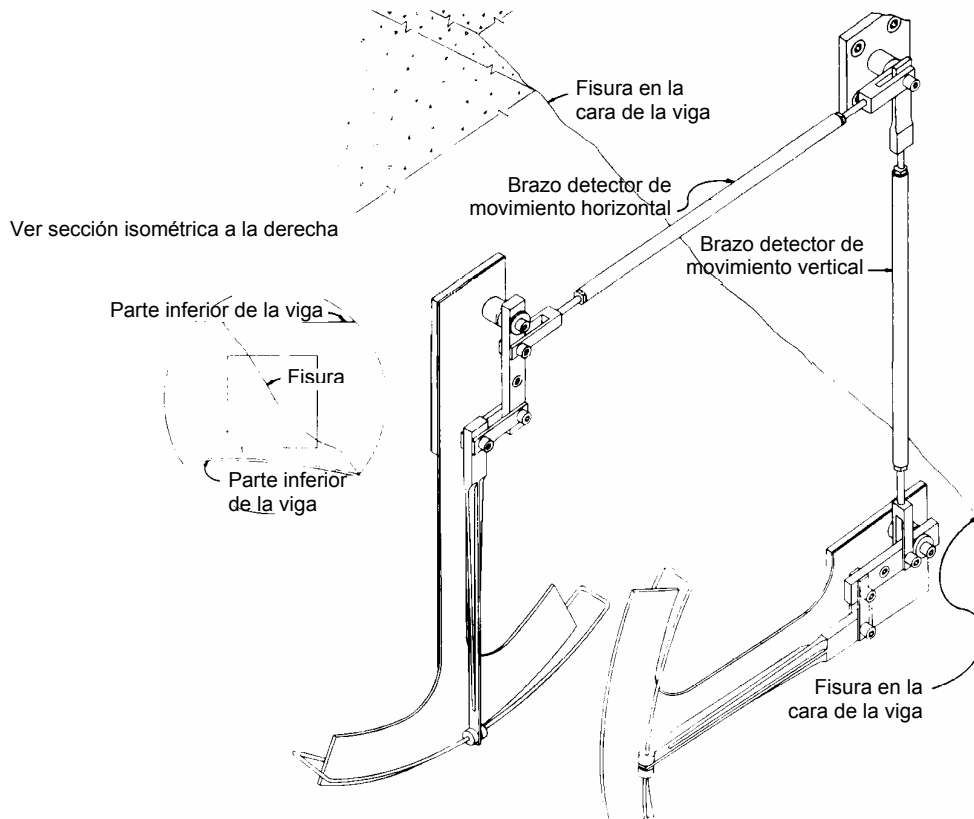


Monitor recién colocado



Monitor después del movimiento de la fisura

(a) Monitor de fisuras (cortesía de Avongard)



(b) – Indicador del movimiento de la fisura (Stratton et al., 1978)

Fig. 2.2



Fig. 2-3 – Pacómetro (localizador de armaduras) (cortesía de James Instruments)

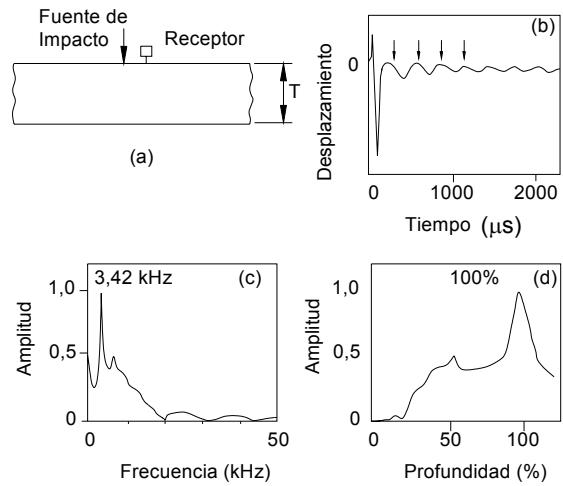


Fig. 2.5 – Respuesta pulso-eco de una placa sólida: a) esquema de configuración del ensayo; b) forma de onda de desplazamiento; c) espectro de amplitud; y d) espectro de amplitud normalizado

Con personal adecuadamente capacitado y una correcta evaluación es posible detectar fisuras usando equipos de ensayo ultrasónicos no destructivos (ASTM C 597). La técnica más común son los ensayos de transmisión pasante utilizando equipos disponibles comercialmente (Malhotra y Carino, 1991; Knab et al., 1983). Un pulso mecánico es transmitido a una cara del elemento de hormigón y es recibido en la otra, como se ilustra en la Figura 2-4. El tiempo que tarda el pulso en atravesar el elemento se mide electrónicamente. Si se conoce la distancia entre los transductores de transmisión y recepción se puede calcular la velocidad del pulso.

Si no es posible acceder a caras opuestas de un elemento, los transductores se pueden ubicar sobre la misma cara [Figura 2.4(a)]. Aunque esta técnica es posible, los resultados no se pueden interpretar de manera sencilla y directa dado que puede haber un cambio significativo en la velocidad de pulso medida, si una discontinuidad interna aumenta el recorrido de la señal. Generalmente, cuanto mayor sea la velocidad del pulso mayor será la calidad del hormigón. La interpretación de los resultados de los ensayos de velocidad de pulso mejora considerablemente con el uso de un osciloscopio que permita una representación visual de la señal medida [Figura 2.4(b)].

Algunos equipos proveen sólo una lectura digital del tiempo de recorrido del pulso, sin display osciloscópico. Si no llega ninguna señal al transductor, esto significa que hay una discontinuidad interna importante, como una fisura o vacío. Se puede obtener una indicación de la magnitud de la discontinuidad realizando lecturas en una serie de posiciones sobre el elemento.

Los equipos de ultrasonido deben ser operados por personas capacitadas, y los resultados deben ser evaluados por una persona con amplia experiencia en el tema, ya que la humedad, las armaduras y los elementos empotrados podrían afectar los resultados. Por ejemplo, si hay fisuras completamente

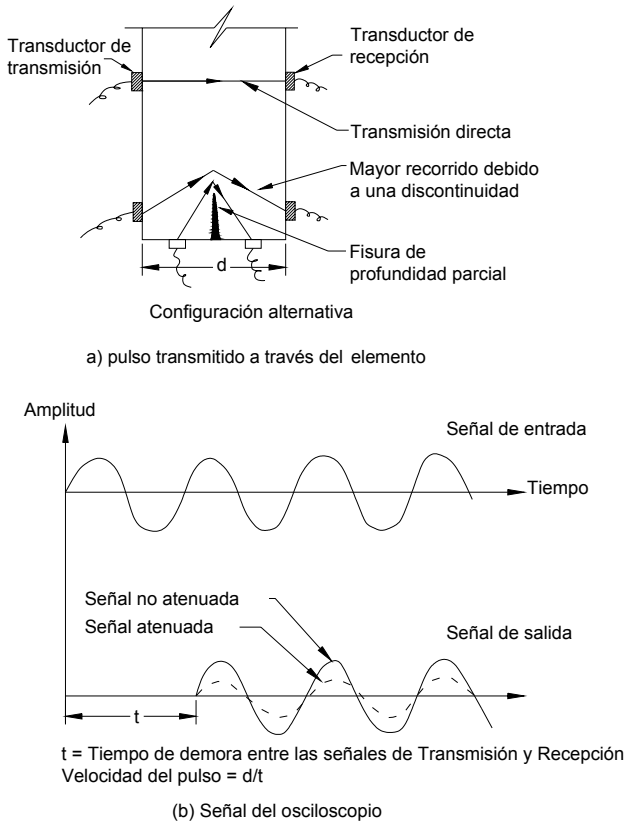


Fig. 2.4 – Ensayo ultrasónico, técnica de transmisión pasante

saturadas, en general los ensayos ultrasónicos no serán efectivos. En algunos casos es difícil discernir entre un grupo de fisuras muy próximas entre sí y una única fisura de gran tamaño.

Una alternativa a los ensayos de transmisión pasante es la técnica pulso-eco, en la cual se usa un transductor simple para enviar y recibir ondas ultrasónicas. Ha resultado difícil desarrollar un ensayo pulso-eco que sea práctico para el hormigón. Se han desarrollado sistemas tipo transmisor-receptor que usan transductores independientes para transmitir y recibir (Alexander, 1980). Las investigaciones de Malhotra y Carino (1991) presentan más información sobre el método pulso-eco y otros métodos basados en la propagación de ondas.

Sansalone y Carino (1988, 1989) han avanzado significativamente en el uso de técnicas de propagación de ondas para detectar fallas en el hormigón mediante la técnica pulso-eco. Se genera un pulso mecánico impactando en una cara del elemento como se ilustra en la Figura 2.5. La onda se propaga a través del elemento, se refleja en un defecto u otra superficie del elemento y finalmente es recibida por un transductor de desplazamiento ubicado cerca del punto de impacto. La Figura 2.5(b) muestra una onda en el dominio del tiempo recibida por el transductor. Se intercala una condición de resonancia en el elemento, entre los bordes del mismo o entre un borde y el defecto. Analizando el contenido de frecuencia de la onda en el dominio del tiempo [Figura 2.5(c)], la frecuencia asociada con la resonancia aparece como una amplitud pico. En el caso de la Figura 2.5(a), el pico es el asociado con la frecuencia del espesor [ver Figura 2.5(d)]. Si existe alguna falla interna se observará un importante pico de amplitud en las reflexiones correspondientes a la profundidad de la falla en la frecuencia de la profundidad de la falla asociada.

También se pueden usar radiografías para detectar las discontinuidades internas. Existen equipos de rayos X y de rayos gama (Malhotra y Carino, 1991; Bungey, 1990). Los procedimientos son más adecuados para detectar planos de fisuración paralelos a la dirección de la radiación; resulta difícil discernir planos de fisuración perpendiculares a la radiación. Los equipos de rayos gama son menos costosos y relativamente más portátiles que los equipos de rayos X, y por lo tanto parecen adaptarse mejor a los ensayos in situ.

Un uso importante de los ensayos no destructivos es para detectar aquellas partes de la estructura que requerirán un estudio más detallado, que puede incluir la extracción de testigos para ensayo.

2.2.3 Ensayos en testigos de hormigón – Se puede obtener información importante extrayendo testigos de zonas seleccionadas de la estructura. Los testigos y sus perforaciones ofrecen la oportunidad de medir con precisión el ancho y la profundidad de las fisuras. Además, se puede obtener una indicación de la calidad del hormigón mediante ensayos de resistencia a la compresión, aunque para determinar la resistencia del hormigón no se deben utilizar testigos fisurados.

Un análisis petrográfico del hormigón fisurado permite identificar las causas materiales de la fisuración, tales como

reactividades alcalinas, daño por ciclos de congelamiento, fisuración de borde, presencia de partículas de agregado expansivas, daños relacionados con incendios, retracción y contracción. La petrografía también permite identificar otros factores que pueden estar relacionados con la fisuración, tales como la relación agua-cemento, el volumen relativo de pasta y la distribución de los componentes del hormigón. A menudo la petrografía sirve para determinar la edad relativa de las fisuras e identificar depósitos secundarios en superficies de fractura, los cuales afectan los programas de reparación.

Los ensayos químicos para detectar la presencia de cloruros excesivos indican el potencial de corrosión de las armaduras embebidas.

2.2.4 Revisión de planos y datos constructivos – Se debería revisar el diseño estructural y la disposición de las armaduras originales, u otros planos que permitan confirmar que el espesor y la calidad del hormigón, junto con las armaduras existentes, satisface o supera los requisitos de resistencia y serviciabilidad indicados en el, o los códigos de edificación aplicables. Se debería prestar particular atención a la revisión detallada de las cargas actuales y su comparación con las cargas de diseño. Para calcular las tensiones de tracción inducidas por las deformaciones del hormigón (fluencia lenta, retracción, temperatura, etc.) se deberían considerar las configuraciones del hormigón, condiciones de vínculo y presencia de juntas de construcción y de otros tipos. Se debería prestar particular atención a las fisuras que se desarrollan paralelas a las armaduras en una sola dirección, fundamentalmente apoyadas sobre vigas, pero que también cargan las vigas principales que soportan dichas vigas.

2.3 – Selección de los procedimientos de reparación

En base a una cuidadosa evaluación de la magnitud y las causas de la fisuración es posible seleccionar procedimientos para lograr uno o más de los siguientes objetivos:

1. Restablecer y aumentar la resistencia;
2. Restablecer y aumentar la rigidez;
3. Mejorar la funcionalidad;
4. Lograr impermeabilidad;
5. Mejorar la apariencia de la superficie de hormigón;
6. Mejorar la durabilidad; y/o
7. Impedir que se desarrolle un ambiente corrosivo en las armaduras.

Dependiendo de la naturaleza de los daños se puede seleccionar un solo método de reparación o varios. Por ejemplo, se puede restablecer la resistencia a la tracción a través de una fisura inyectando resina epoxi u otro agente adherente de alta resistencia. Sin embargo, puede ser necesario proveer resistencia adicional agregando armaduras o usando postesado. Si no se anticipa mayor fisuración, se puede usar solamente una inyección de resina epoxi para restablecer la rigidez flexional (ACI 503R).

Las fisuras que ocasionan fugas en estructuras para almacenamiento de agua u otros líquidos se deben reparar, a menos que la fuga se considere de poca importancia y exista

ACI 224.1R-93 – CAUSAS, EVALUACIÓN Y REPARACIÓN DE FISURAS

evidencia que indique que la fisura se está autocurando (Ver Sección 3.14). Las reparaciones para detener fugas pueden ser complicadas si es necesario efectuarlas mientras la estructura está en servicio.

Es posible que se desee reparar las fisuras del hormigón por motivos puramente estéticos. Sin embargo, las ubicaciones donde están las fisuras pueden ser visibles aún después de aplicar procedimientos cosméticos, y es probable que se requiera algún tipo de recubrimiento sobre la totalidad de la superficie.

Para minimizar futuros deterioros debidos a la corrosión de las armaduras, se deben sellar las fisuras expuestas a ambientes húmedos o corrosivos.

En el Capítulo 3 se describen los métodos más importantes de reparación de fisuras disponibles para lograr los objetivos antes enunciados.

CAPÍTULO 3 – MÉTODOS DE REPARACIÓN DE FISURAS

3.1 – Introducción

Luego de evaluar la estructura fisurada se puede seleccionar un procedimiento de reparación adecuado. Para que un procedimiento de reparación sea exitoso debe tener en cuenta la causa o las causas de la fisuración. Por ejemplo, si la fisuración se produjo principalmente por retracción por secado, es probable que luego de un tiempo la fisura se estabilice. Por el contrario, si las fisuras se deben a un proceso de asentamiento de las fundaciones que aún continúa, las reparaciones serán inútiles hasta que se corrija el problema del asentamiento.

Este capítulo contiene un relevamiento de los métodos de reparación de fisuras, incluyendo un resumen de las características de las fisuras que se pueden reparar con cada procedimiento, los tipos de estructuras que han sido reparadas, y un resumen de los procedimientos usados. El lector también puede consultar el documento ACI 546.1R y la Compilación ACI No. 5 (1980), documentos que tratan específicamente el tema de la reparación del hormigón.

3.2 – Inyección de resinas epoxi

Mediante la inyección de resinas epoxi se pueden adherir fisuras de muy poca abertura, hasta 0,05 mm. La técnica generalmente consiste en establecer bocas de entrada y venteo a intervalos poco espaciados a lo largo de las fisuras, sellar la fisura en las superficies expuestas e inyectar la resina epoxi a presión.

La inyección de resinas epoxi se ha usado exitosamente para reparar fisuras en edificios, puentes, presas y otros tipos de estructuras de hormigón (ACI 503R). Sin embargo, a menos que se haya corregido la causa que originó la fisuración, es probable que vuelva a aparecer una fisura cerca de la fisura original. Si no se puede eliminar la causa de la fisuración hay dos opciones disponibles. Una consiste en perfilar y sellar la fisura, tratándola como una junta, o establecer una junta que acomode el movimiento y luego inyectar la fisura con una resina epoxi u otro material adecuado. Los materiales

epoxídicos utilizados para efectuar reparaciones estructurales deberían satisfacer los requisitos de ASTM C 881 (Tipo IV). El documento ACI 504R describe prácticas para sellar juntas, incluyendo el diseño de las juntas, materiales disponibles y métodos de aplicación.

A excepción de ciertos materiales epoxídicos que toleran el agua, esta técnica no es aplicable si las fisuras tienen fugas activas y no se pueden secar. Las fisuras húmedas se pueden inyectar usando materiales que toleren la humedad, pero los contaminantes presentes en las fisuras (incluyendo material fino y agua) pueden reducir la efectividad del material epoxídico para reparar las fisuras estructuralmente.

La aplicación de un adhesivo flexible, de bajo módulo de elasticidad, en una fisura, no permitirá un movimiento significativo de la estructura de hormigón. El módulo de elasticidad efectivo de un adhesivo flexible en una fisura es básicamente el mismo que el de un adhesivo rígido (Adams et al., 1984); esto se debe a que la capa de material es delgada y hay restricción lateral impuesta por el hormigón que lo rodea.

La inyección de resinas epoxi requiere un alto grado de capacitación, y la aplicación de la técnica puede estar limitada por la temperatura ambiente. Los siguientes son los procedimientos generales involucrados en la inyección de resinas epoxi (ACI 503R):

- **Limpiar las fisuras.**

El primer paso consiste en limpiar las fisuras que se hayan contaminado, tanto como sea posible. Los contaminantes tales como el aceite, la grasa, el polvo o las partículas finas del hormigón impiden la penetración y adherencia de la resina epoxi, y reducen la efectividad de las reparaciones. Preferentemente la contaminación se debería eliminar por aspiración o lavado con agua u otras soluciones de limpieza. Luego la solución se elimina utilizando aire comprimido y un agente neutralizante, o bien se deja transcurrir tiempo suficiente para que se seque al aire. Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones prácticas que impiden limpiar completamente las fisuras. Se debería realizar una evaluación razonable de la magnitud y grado de limpieza necesaria. Es posible que haya que realizar una limpieza de prueba.

- **Sellar las superficies.**

Las fisuras superficiales se deben sellar para evitar que el material epoxídico salga antes de gelificarse. Si no se puede acceder a la cara donde está la fisura pero hay material detrás de la misma, o si se trata de reparar una losa de cimentación, algunas veces el material posterior o la sub-base constituyen un sello adecuado; sin embargo, es difícil determinar esta condición de manera anticipada, y una inyección no controlada puede provocar daños tales como la obturación del sistema de drenaje. Por lo tanto, es necesario actuar con extremo cuidado al inyectar fisuras que no son visibles en todas las superficies. Una superficie se puede sellar aplicando un material epoxídico, poliéster u otro material sellador adecuado sobre la superficie de las fisuras y permitiendo que endurezca. Si no se desea que la superficie a lo largo de la fisura tenga aspecto brillante y si no se requiere inyección a

alta presión, se puede aplicar un sellador superficial plástico removible sobre la cara de la fisura. Una vez completado el trabajo el sellador superficial se puede retirar y la superficie no quedará brillante. Si la apariencia de la superficie acabada es importante también se pueden emplear selladores cementicios. Si se requieren presiones de inyección extremadamente elevadas, se puede cortar en forma de V alrededor de la fisura hasta una profundidad de 13 mm y un ancho de alrededor de 20 mm, llenar con material epoxídico y enrasar con la superficie.

- **Instalar las bocas de entrada y venteo.**

Hay tres métodos de uso generalizado:

- a. **Accesorios insertados en orificios perforados.** Este método fue el primero en utilizarse, y con frecuencia se usa previo perfilado de las fisuras en forma de V. El método consiste en perforar un orificio en la fisura, de aproximadamente 20 mm de diámetro y entre 13 a 25 mm debajo del vértice de la acanaladura en V. Dentro de este orificio se coloca un accesorio, por ejemplo una boquilla para tubería o vástago de válvula, generalmente adherido con un adhesivo epoxi. Los equipos de mandril y broca al vacío o las barrenas tubulares enfriadas por agua son útiles para impedir que las fisuras se obturen con el polvo generado por la perforación.

- b. **Accesorios adheridos a ras.**

Un método generalmente utilizado cuando las fisuras no se perfilan en forma de V, para obtener una boca de entrada, consiste en adherir un accesorio a ras con la cara de hormigón sobre la fisura. El accesorio a ras tiene una abertura en su parte superior para permitir el ingreso del adhesivo y un ala en la parte inferior adherida al hormigón.

- c. **Interrupción del sellado.**

Otro método de entrada consiste en interrumpir el sellado sobre una parte de la fisura. Este método se puede utilizar cuando se pueden conseguir dispositivos especiales tipo arandela que cubren la parte no sellada de la fisura y permiten inyectar el adhesivo directamente en la fisura, sin fugas.

- **Mezclar la resina epoxi.**

Esto se hace por pastones o por métodos continuos. En el mezclado por pastones, los componentes adhesivos se mezclan previamente de acuerdo con las instrucciones del fabricante, generalmente usando un agitador mecánico tal como una paleta mezcladora. Se debe cuidar de mezclar sólo la cantidad de adhesivo que se pueda usar antes que el material comience a gelificarse. Cuando el material adhesivo comienza a gelificarse, comienzan a cambiar sus características de flujo, lo que dificulta cada vez más la inyección a presión. En el sistema de mezclado continuo, dos componentes adhesivos líquidos pasan a través de las bombas de dosificación antes de pasar a través de un cabezal mezclador automático. El sistema de mezclado continuo permite usar adhesivos de fraguado rápido que poseen una vida útil corta.

- **Inyectar la resina epoxi.**

Se pueden utilizar bombas hidráulicas, tanques de presión o pistolas neumáticas. La presión de inyección a utilizar se debe seleccionar cuidadosamente. Con frecuencia una mayor presión no mejora mucho la velocidad de inyección. De hecho, el uso de una presión demasiado elevada puede propagar las fisuras existentes, provocando daños adicionales.

Si la fisura es **vertical** o **inclinada**, el proceso de inyección debería comenzar bombeando resina epoxi en la boca de entrada ubicada a menor altura hasta que el nivel de resina llegue a la boca de entrada inmediatamente superior. Luego la boca de entrada inferior se obtura y el proceso se repite hasta llenar completamente la fisura y obturar todas las bocas.

Si la fisura es **horizontal**, la inyección debería proceder de la misma manera desde un extremo de la fisura hasta el otro. La fisura está llena cuando la presión se puede mantener. Si la presión no se puede mantener, esto significa que la resina epoxi aún está fluyendo hacia partes de la fisura que aún están vacías o que hay fugas.

- **Retirar el sellado superficial.**

Una vez que se ha curado la resina epoxi inyectada, el sellado superficial se debería retirar por trituración u otros medios, según resulte adecuado.

- **Procedimiento alternativo.**

Un procedimiento alternativo para las estructuras masivas consiste en practicar una serie de perforaciones [generalmente entre 20 a 100 mm de diámetro] que intersequen la fisura en varias ubicaciones. Típicamente las perforaciones se practican a intervalos de 1,5 m.

Otro método que se está utilizando recientemente es un método al vacío o por asistencia de succión. Existen dos técnicas: una consiste en encerrar totalmente el elemento fisurado en una bolsa e introducir el adhesivo líquido en el fondo y luego aplicar vacío en la parte superior. La otra técnica consiste en inyectar las fisuras desde un lado y aplicar vacío desde el otro. En general se usan resinas epoxi; sin embargo, también se han usado acrílicos y poliésteres de manera exitosa.

Stratton y McCollum (1974) describen el empleo de las inyecciones de resina epoxi como un procedimiento efectivo de reparación a mediano plazo para tableros de puentes con fisuras en láminas. Como informan Stratton y McCollum, se omiten el primer paso, el segundo y el sexto, y en una ubicación específica el proceso termina cuando sale resina epoxi de la fisura a una cierta distancia de las bocas de inyección. Este procedimiento no detiene el proceso de corrosión. Este procedimiento también se puede intentar para otras aplicaciones, y constituye una de las opciones disponibles aunque no haya sido universalmente aceptado. El éxito de la reparación depende de la ausencia de contaminantes inhibidores de la adherencia en el plano de fisuración. Si se desea inyectar elementos con fisuras en láminas, las resinas epoxi y los procedimientos de inyección se deben seleccionar cuidadosamente. Smith (1982) presenta información sobre tableros de puentes observados durante períodos posteriores a

la inyección de hasta siete años. Smithson y Whiting describen inyecciones de resina epoxi como método para adherir nuevamente una sobrecapa de un tablero de puente fisurado en láminas. El Comité 224 está desarrollando información adicional sobre esta aplicación para su posterior inclusión en futuras revisiones de este Informe.

3.3 – Perfilado y sellado

El perfilado y sellado de fisuras se puede aplicar en condiciones que requieren una reparación inmediata y cuando no es necesario efectuar una reparación estructural. Este método consiste en agrandar la fisura a lo largo de su cara expuesta y llenarla y sellarla con un sellador adecuado (Figura 3.1). Esta es una técnica habitual para el tratamiento de fisuras, y es relativamente sencilla en comparación con los procedimientos y capacitación requeridos para la inyección de resinas epoxi. El procedimiento se adapta mejor a superficies aproximadamente planas y horizontales tales como pisos o pavimentos. Sin embargo, también se pueden perfilar y sellar fisuras sobre superficies verticales (utilizando un sellador no fluido) y superficies curvas (tubos, pilas y postes).

El perfilado y sellado se usa para tratar tanto fisuras finas de patrón irregular como fisuras aisladas de mayor tamaño. Un uso habitual y efectivo es la impermeabilización mediante sellado de las fisuras en superficies de hormigón en contacto con el agua o expuestas a presión hidrostática. Este tratamiento reduce la posibilidad de que la humedad llegue a las armaduras o atraviese el hormigón, provocando manchas superficiales u otros problemas.

Los selladores pueden ser de diferentes materiales, incluyendo resinas epoxi, uretanos, siliconas, polisulfuros, materiales asfálticos o morteros de polímero. Se deberían evitar los morteros cementicios por su potencial de fisuración. Los selladores utilizados en pisos deberían ser lo suficientemente rígidos para soportar el tránsito anticipado. Un sellador satisfactorio debería ser capaz de soportar deformaciones cíclicas y no debería ser frágil.

El procedimiento consiste en preparar en la superficie una ranura de profundidad variable, generalmente entre 6 a 25 mm. Se puede usar una sierra para hormigón, herramientas manuales o herramientas neumáticas. Luego la ranura se limpia con chorro de aire, arena o agua a presión y se seca. Se coloca un sellador en la ranura y se permite su curado.

Se puede disponer un interruptor de la adherencia en el fondo de la ranura para permitir que el sellador cambie de forma, sin concentrar tensiones en el fondo (Figura 3.2). El interruptor de la adherencia puede ser una cinta o tira de polietileno que no se adhiera al sellador.

Hay que detallar la ranura cuidadosamente de manera que su relación de aspecto (ancho/profundidad) acomode el movimiento anticipado (ACI 504R).

En algunos casos se colocan sobrecapas (overbanding) de forma independiente o en combinación con perfilado y sellado. Este método se utiliza para mejorar la protección contra el descantillado de los bordes y por motivos estéticos para crear un tratamiento de apariencia más uniforme. Un procedimiento

típico de colocación de sobrecapas consiste en preparar un área de aproximadamente 25 a 75 mm a cada lado de la fisura mediante chorro de arena u otros medios de preparación superficial y aplicar un recubrimiento (por ejemplo uretano) de 1 a 2 mm de espesor en forma de banda sobre la fisura. Antes de colocar las sobrecapas en zonas no expuestas al tránsito, algunas veces se utiliza un interruptor de la adherencia sobre fisuras que no han sido perfiladas, o sobre fisuras previamente perfiladas y selladas. Si se anticipa que el movimiento será mínimo se pueden colocar sobrecapas sobre las fisuras, pero si se anticipa que puede haber un movimiento importante, las sobrecapas se deben utilizar en combinación con perfilado y sellado de las fisuras para asegurar una reparación impermeable.

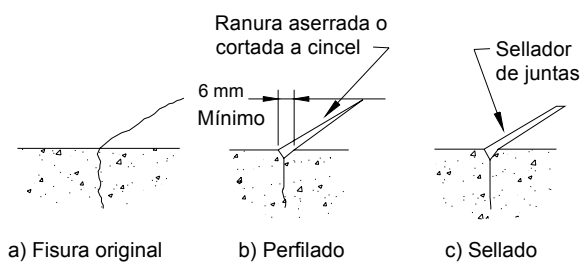


Fig. 3.1 – Reparación de una fisura mediante perfilado y sellado (Johnson, 1965)

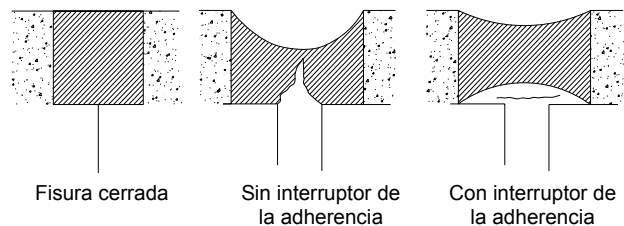


Fig. 3.2 – Efecto del interruptor de la adherencia

3.4 – Costura de fisuras

Coser una fisura consiste en perforar orificios a ambos lados de la fisura, insertar unidades metálicas en forma de U de patas cortas (grampas o bridas de costura) y asegurarlas con mortero como se ilustra en la Figura 3.3 (Johnson, 1965). Se pueden utilizar costuras cuando es necesario restablecer resistencia a la tracción en fisuras importantes (Hoskins, 1991). Al coser una fisura la estructura tiende a volverse más rígida, y esta rigidez puede aumentar la restricción global de la estructura provocando fisuración en otras partes del hormigón. Por lo tanto, puede ser necesario reforzar la sección o las secciones adyacentes. Debido a que la concentración de tensiones es frecuente, puede ser necesario emplear este método conjuntamente con otros.

Los pasos del procedimiento de costura son perforar orificios a ambos lados de la fisura, limpiar los orificios y anclar las patas de las grampas en los orificios, utilizando un mortero que no se contraiga, o bien un sistema adhesivo en base a resina epoxi. Las grampas deben ser variables en longitud, en orientación, o en ambos aspectos, y se las debe ubicar de manera que la tracción transmitida a través de la

fisura no se aplique sobre un único plano dentro de la sección sino que se distribuya sobre cierta superficie.

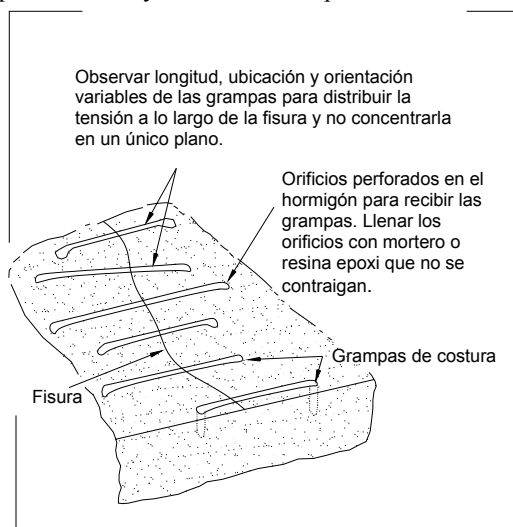


Fig. 3.3 – Costura de una fisura (Johnson, 1965)

3.5 – Armadura adicional

3.5.1 Armadura convencional – Algunas vigas de hormigón fisuradas de puentes se han reparado exitosamente insertando barras de armadura y asegurándolas con adhesivo epoxi (Stratton et al., 1978, 1982; Stratton, 1980). Esta técnica consiste en sellar la fisura, perforar orificios que intersequen el plano de fisuración aproximadamente a 90 grados (Figura 3.4), inyectar adhesivo epoxi en el orificio y la fisura hasta llenarlos y colocar una barra de armadura en el orificio perforado. Típicamente se usan barras No. 4 ó 5 (10 M ó 15 M), y se las extiende al menos 0,5 m a cada lado de la fisura. La separación de las barras de armadura se selecciona en función de los objetivos de la reparación. Se puede utilizar cualquier patrón de disposición deseado, dependiendo del criterio de diseño y de la ubicación de las armaduras existentes. El material epoxídico adhiere la barra a las paredes del orificio, llena el plano de fisuración, adhiere las superficies de hormigón separadas para formar nuevamente una unidad monolítica y, por lo tanto, refuerza la sección. El material epoxídico utilizado para adherir la fisura nuevamente debería tener muy baja viscosidad y satisfacer los requisitos de ASTM C 881 Tipo IV.

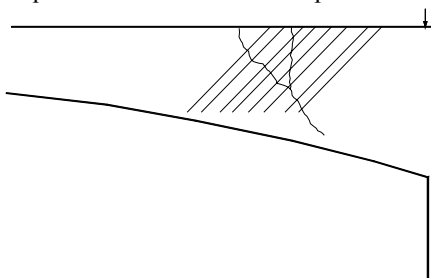
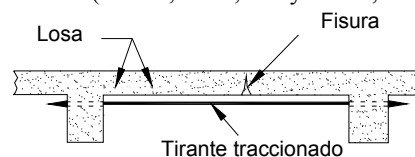
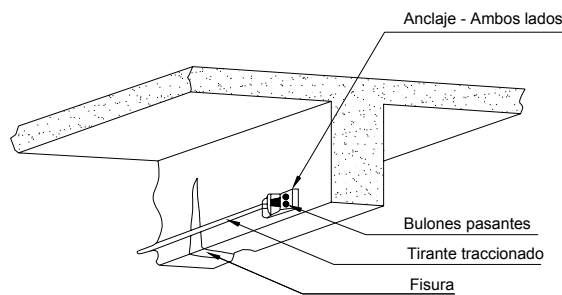


Fig. 3.4 – Orientación de las barras de armadura utilizadas para reparar fisuras (Stratton et al., 1978)

3.5.2 Acero de pretensado – A menudo el postesado es la mejor solución disponible cuando se debe reforzar una parte importante del elemento, o cuando se deben cerrar las fisuras que se han formado (Figura 3.5). Esta técnica emplea barras o cables de pretensado para aplicar una fuerza de compresión. El acero de pretensado se debe anclar adecuadamente, y es necesario realizar el procedimiento cuidadosamente para evitar que el problema simplemente se traslade a otras partes de la estructura. Se deben analizar cuidadosamente los efectos de la fuerza de tesado (incluyendo la excentricidad) sobre las tensiones dentro de la estructura. En el caso de estructuras indeterminadas postesadas mediante este procedimiento se deberían considerar los efectos de los momentos secundarios y reacciones inducidas (Nilson, 1987; Lin y Burns, 1981).



a) Para corregir fisuración en una losa



b) Para corregir fisuración en una viga

Fig. 3.5 – Ejemplos de pretensado externo (Johnson, 1965)

3.6 – Perforación y obturación

La perforación y obturación de una fisura consiste en perforar hacia abajo en toda la longitud de la fisura y llenarla con mortero de manera de formar una cuña o tapón (Figura 3.6).

Esta técnica sólo es aplicable cuando las fisuras son de forma razonablemente recta y uno de sus extremos es accesible. La utilización más frecuente de este método es en la reparación de fisuras verticales en muros de contención.

Se debe perforar un orificio (típicamente entre 50 a 75 mm de diámetro), centrado sobre la fisura y siguiendo la misma. El orificio debe ser suficientemente grande para intersecar la fisura en toda su longitud y proveer suficiente material de reparación para absorber estructuralmente las cargas ejercidas sobre el tapón. Luego el orificio se debe limpiar, impermeabilizar y llenar con mortero. El tapón de mortero impide el movimiento transversal de las secciones de hormigón adyacentes a la fisura. También reduce las fugas a través de la

misma y la pérdida de suelo de la parte trasera de un muro con fugas.

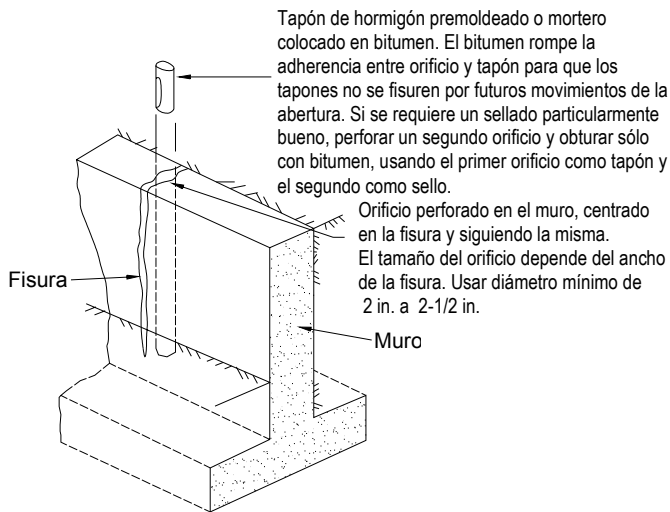


Fig. 3.6 – Reparación de una fisura mediante perforación y obturación

Si lo esencial es lograr impermeabilidad y no la transferencia de cargas estructurales, el orificio perforado se debería llenar con un material resiliente de bajo módulo de elasticidad en lugar de mortero. Si el efecto obturador es esencial, el material resiliente se puede colocar en un segundo orificio, llenando con mortero el primero.

3.7 – Llenado por gravedad

Se pueden usar monómeros y resinas de baja viscosidad para sellar fisuras con anchos superficiales de entre 0,03 a 2 mm, aplicándolos por el método del llenado por gravedad (Rodler et al., 1989). También se han utilizado exitosamente los metacrilatos de alto peso molecular, uretanos y algunas resinas epoxi de baja viscosidad. Cuanto menor sea la viscosidad, más finas serán las fisuras que se pueden llenar.

El procedimiento típico comienza por limpiar la superficie con chorro de aire y/o chorro de agua. Para lograr el mejor llenado posible se debería permitir que las superficies húmedas se sequen durante varios días. El monómero o resina se puede verter sobre la superficie y esparcir empleando cepillos, rodillos o escobas de goma. Debido a que el monómero o la resina penetra en las fisuras lentamente, se debe trabajar el material sobre las fisuras moviéndolo hacia adelante y hacia atrás para lograr el máximo llenado. El exceso de material se debe retirar de la superficie utilizando una escoba para impedir que queden zonas resbaladizas o brillantes luego del curado. Si la textura superficial (fricción) es importante, se debe esparcir arena sobre la superficie antes del curado del mortero o la resina.

Si las fisuras contienen gran cantidad de suciedad, humedad u otros contaminantes, el sellador no puede llenarlas. Una

solución puede ser limpiar y preparar estas fisuras empleando chorros de agua.

Se pueden utilizar testigos extraídos de las fisuras para evaluar la efectividad del llenado de las fisuras. Se puede medir la profundidad de penetración del sellador. Se pueden realizar ensayos de corte (o tracción) aplicando la carga en dirección paralela a las fisuras reparadas (siempre que no haya armaduras presentes en el testigo en el área de falla o cerca de la misma). Para algunos polímeros la fisura de falla ocurrirá fuera de la fisura reparada.

3.8 – Llenado con mortero

3.8.1 Llenado con mortero de cemento portland –

Las fisuras anchas, particularmente en presas de gravedad y muros de hormigón de gran espesor, se pueden reparar llenándolas con mortero de cemento portland. Este método es efectivo para detener las fugas de agua, pero no unirá estructuralmente las secciones fisuradas. El procedimiento consiste en limpiar el hormigón en las caras de la fisura; instalar asientos armados (boquillas de mortero) a intervalos sobre la fisura (para lograr una conexión con el aparato de inyección que soporte la presión); sellar la fisura entre los asientos utilizando pintura cementicia, sellador o mortero; lavar la fisura para limpiarla y probar el sellado; y luego llenar toda el área con mortero. Dependiendo del ancho de la fisura, los morteros pueden contener cemento y agua o cemento más arena y agua. Sin embargo, la relación agua-cemento se debe mantener tan baja como sea posible a fin de maximizar la resistencia y minimizar la retracción. Se pueden usar reductores del agua u otros aditivos para mejorar las propiedades del mortero. Para volúmenes pequeños se puede utilizar una pistola de inyección manual; para volúmenes más grandes se debería utilizar una bomba. Una vez llenada la fisura se debería mantener la presión durante varios minutos para asegurar una buena penetración.

3.8.2 Llenado con mortero químico –

Un mortero químico consiste en una solución de dos o más productos químicos (como por ejemplo uretanos, silicatos de sodio y acrilomidas) que se combinan para formar un gel, un precipitado sólido o una espuma, a diferencia de los morteros cementicios que consisten en suspensiones de partículas sólidas en un fluido. Con mortero químico se han llenado fisuras de muy poca abertura, hasta 0,05 mm.

Las ventajas de los morteros químicos incluyen su aplicabilidad en ambientes húmedos (humedad disponible en exceso), sus amplios límites de control del tiempo de gelificación y la posibilidad de aplicarlos en fisuras muy finas. Las desventajas son el elevado grado de capacitación necesaria para emplearlos satisfactoriamente y su falta de resistencia.

3.9 – Colocación de mortero como mezcla seca (Drypacking)

Colocación de mortero como mezcla seca es la colocación manual de mortero de bajo contenido de agua y su posterior apisonado. De este modo se produce un contacto íntimo entre el

mortero y el hormigón existente (U.S. Bureau of Reclamation, 1978). Debido a la baja relación agua-cemento del material, hay poca retracción y el parche permanece hermético y puede resultar de buena calidad desde el punto de vista de la durabilidad, resistencia e impermeabilidad.

La colocación de mortero como mezcla seca se puede emplear para llenar ranuras angostas practicadas con el fin de reparar fisuras inactivas. No es un método aconsejable para llenar o reparar fisuras activas.

Antes de colocar mortero como mezcla seca en una fisura se debería ensanchar la porción adyacente a la superficie hasta tener una ranura de alrededor de 25 mm de ancho y 25 mm de profundidad. La ranura debería ser ligeramente más ancha en la base que en la superficie.

Una vez que se ha limpiado y secado la ranura, se debería aplicar una capa de adherencia consistente en una lechada cementicia o cantidades iguales de cemento y arena fina mezcladas con agua hasta tener la consistencia de una pasta fluida, o bien un compuesto adherente adecuado a base de látex (ASTM C 1059). El mortero seco se debería comenzar a colocar de inmediato. El mortero consiste en una parte de cemento, una a tres partes de arena pasante tamiz (1,18 mm) y apenas agua suficiente para que el mortero se ligue al formar con él una bola en la mano.

Si el color del parche debe coincidir con el del hormigón que lo rodea se puede emplear una mezcla de cemento portland gris y cemento portland blanco. Normalmente, alrededor de un tercio de cemento es una proporción adecuada, pero las proporciones exactas sólo se pueden determinar realizando pruebas.

Para minimizar la retracción el mortero debe reposar durante 1/2 hora después del mezclado y se debe volver a mezclar antes de usar. El mortero se debería colocar en capas de alrededor de 10 mm de espesor. Se debería compactar cada capa utilizando una varilla y cada capa sobre la cual se colocará otra capa se debería rayar para facilitar su adherencia con la capa siguiente. No es necesario que haya tiempos de espera entre capas.

El acabado del mortero se puede realizar colocando un tablón de madera contra la superficie y golpeándolo varias veces con un martillo. La apariencia de la superficie se puede mejorar con algunas pasadas de llana o esponja. La reparación se debe curar ya sea con agua o con un compuesto de curado. El método de curado húmedo más sencillo consiste en colocar una tira de arpillera plegada húmeda sobre toda la longitud de la fisura.

3.10 – Detención de fisuras

Durante la construcción de las estructuras de hormigón masivo se desarrollan fisuras debido al enfriamiento de la superficie o por otras causas. A medida que la construcción avanza esas fisuras se propagan hacia el hormigón nuevo. Estas fisuras se pueden detener bloqueando la fisura y distribuyendo la tensión de tracción en una superficie mayor (U.S. Army Corps of Engineers, 1945).

A medida que continúa la colocación de hormigón se puede disponer un trozo de membrana interruptora de la adherencia o una malla de acero sobre la fisura. También se puede utilizar un tubo semicircular colocado sobre la fisura (Figura 3.7). A continuación se describen los procedimientos de instalación de los tubos semicirculares utilizados durante la construcción de una estructura de hormigón masivo: (1) El tubo semicircular se fabrica partiendo un tubo de 16 mm y plegándolo de manera de obtener una sección semicircular con un ala de aproximadamente 75 mm a cada lado; (2) se limpia el área en la proximidad de la fisura; (3) se coloca el tubo de manera que quede centrado sobre la fisura; (4) luego se sueldan las secciones; (5) se practican orificios en la parte superior del tubo para recibir las tuberías para mortero; y (6) luego de colocar las tuberías para mortero la instalación se cubre con hormigón colocado a mano concéntricamente sobre el tubo. Las tuberías instaladas para el mortero se usan para llenar la fisura en una fecha posterior, restaurando toda la continuidad estructural o parte de la misma.

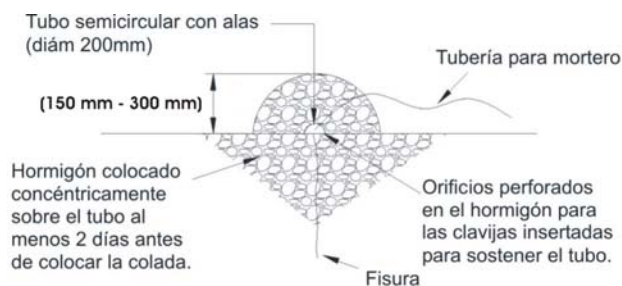


Fig. 3.7 – Método de detención de la fisura

3.11 – Impregnación con polímero

Para reparar algunas fisuras se pueden usar sistemas monoméricos. Un sistema monomérico es un líquido compuesto por monómeros que se polimerizarán formando un sólido. Los monómeros adecuados poseen diversos grados de volatilidad, toxicidad e inflamabilidad, y no son aptos para ser mezclados con agua. Tienen muy baja viscosidad y penetran el hormigón seco llenando las fisuras, tal como lo haría el agua. El monómero más frecuentemente utilizado para este propósito es el metacrilato de metilo.

Los sistemas monoméricos utilizados para impregnar contienen un catalizador o iniciador más el monómero básico (o una combinación de monómeros). También pueden contener un agente reticulante. Al calentarlos, los monómeros se unen entre sí, o polimerizan, creando un plástico tenaz, resistente y durable que mejora enormemente varias de las propiedades del hormigón.

Si una superficie de hormigón fisurado se seca, se inunda con el monómero y se polimeriza, algunas fisuras se llenarán y quedarán estructuralmente reparadas. Sin embargo, si las fisuras contienen humedad, el monómero no empapará el hormigón en cada una de las fisuras y, en consecuencia, la

reparación no será satisfactoria. Un monómero volátil que se evapora antes de su polimerización no es efectivo. Hasta el momento la impregnación con polímero no se ha utilizado exitosamente para reparar fisuras finas, sino que se ha utilizado fundamentalmente para lograr superficies impermeables más durables (Webster et al., 1978; Hallin, 1978).

Por otro lado, mediante impregnación con polímero se han reparado vigas gravemente fracturadas. El procedimiento consiste en secar la fractura, encamisarla temporalmente con una banda de chapa metálica impermeable al agua (a prueba del monómero), empapar las fracturas con el monómero y polimerizar el monómero. En regiones comprimidas los vacíos de gran tamaño o áreas rotas se pueden llenar con agregados fino y grueso antes de inundarlos con monómero, logrando así una reparación con hormigón polímero. El documento ACI 548R contiene una descripción más detallada de los polímeros

3.12 – Sobrecapas y tratamientos superficiales

Las fisuras superficiales finas en losas y pavimentos se pueden reparar empleando una sobrecapa adherida o un tratamiento superficial cuando se tenga la certeza de que ya no sufrirán movimientos significativos. Las sobrecapas adheridas se pueden utilizar para cubrir una losa, pero no necesariamente para repararla. Las sobrecapas y tratamientos superficiales pueden ser adecuados para las fisuras provocadas por hechos únicos y que no han penetrado totalmente la losa. Estas técnicas no son adecuadas para efectuar reparaciones en caso de fisuración progresiva, como la inducida por los agregados reactivos y la fisuración de borde.

En climas fríos las losas de cimentación no se deberían reparar utilizando sobrecapas ni tratamientos superficiales que constituyan una barrera de vapor. Una barrera de vapor provocará la condensación de la humedad que pasa de la subrasante, llevando a la saturación crítica del hormigón y a su rápida desintegración durante los ciclos de congelamiento y deshielo.

3.12.1 *Tratamientos superficiales* –

Para sellar las superficies de hormigón, incluyendo el tratamiento de fisuras muy finas, se han utilizado sistemas a base de resina bajos en contenido de sólidos y de baja viscosidad. Estos tratamientos se adaptan mejor para superficies que no están sujetas a un desgaste significativo.

Las losas de tableros de puente y estructuras para estacionamiento de vehículos, así como otras losas interiores, se pueden recubrir de manera efectiva una vez tratadas por inyección de resina epoxi o mediante perfilado y sellado. Se han aplicado materiales tales como uretanos, resinas epoxi, poliésteres y acrílicos en espesores de 1 a 50 mm, dependiendo del material y el objetivo del tratamiento. A menudo en el material se mezclan agregados antideslizantes, o bien se esparcen sobre la superficie para mejorar la tracción.

3.12.2 *Sobrecapas* – Las losas que contienen fisuras finas inactivas se pueden reparar aplicando una sobrecapa, por ejemplo una sobrecapa de mortero de cemento portland u hormigón modificado con polímero, o de hormigón con vapor

de sílice. Las losas que presentan fisuras activas se pueden sobrecapar siempre que en la sobrecapa se dispongan juntas directamente sobre las fisuras activas. En aplicaciones para carreteras y puentes se han utilizado con éxito sobrecapas de muy poco espesor, de hasta 30 mm (NCHRP Synthesis 57). Entre los polímeros adecuados se incluyen el estireno butadieno o los látex acrílicos. Los sólidos de la resina deben representar al menos 15 por ciento en peso del cemento portland, aunque el porcentaje óptimo generalmente es 20% (Clear y Chollar, 1978).

La superficie a sobrecapar se debe limpiar para retirar la capa superficial (la capa de material débil y no durable, que contiene cemento, material fino de los agregados, transportados a la superficie del hormigón demasiado húmedo por el agua de exudación), materiales carbonatados o debilitados de alguna otra manera, y otros contaminantes tales como grasas o aceites. Antes de colocar una sobrecapa se debería aplicar con escoba una capa adherente consistente en una fracción de mortero. Debido a que los hormigones modificados con polímero por lo general endurecen rápidamente, se deberían utilizar dosificadoras y mezcladoras continuas. Las sobrecapas modificadas con polímero se deberían mezclar, colocar y acabar rápidamente (en 15 minutos o menos en tiempo cálido). Para estas sobrecapas es habitual aplicar un curado húmedo durante 24 horas.

3.13 – Autocurado

El proceso natural de reparación de fisuras del hormigón conocido como "autocurado" puede ocurrir en presencia de humedad y en ausencia de tensión de tracción (Lauer y Slate, 1956). Tiene aplicación práctica para cerrar fisuras inactivas en ambientes húmedos, condición habitual en muchas estructuras de hormigón.

El autocurado se produce por la continua hidratación del cemento y carbonatación del hidróxido de calcio de la pasta cementicia por parte del dióxido de carbono presente en el aire y el agua que rodea al hormigón. Los cristales de hidróxido de calcio y carbonato de calcio precipitan, se acumulan y acrecen dentro de las fisuras. Los cristales se entrelazan y unen, produciendo un efecto de adherencia mecánica suplementado por la adherencia química entre cristales adyacentes y entre los cristales y las superficies de la pasta y los agregados. Como resultado de este proceso, se restablece parte de la resistencia a la tracción del hormigón a través de la sección fisurada, y es posible que la fisura se selle.

No habrá autocurado si la fisura está activa y sujeta a movimiento durante el período de curado. Tampoco habrá autocurado si hay un flujo de agua positivo a través de la fisura, ya que estos flujos disuelven y lavan los depósitos, a menos que el flujo de agua sea tan lento que se evapore completamente en la cara expuesta provocando que las sales disueltas se depositen nuevamente.

La saturación de la fisura y el hormigón adyacente con agua durante el proceso de curado es fundamental para lograr cualquier resistencia significativa. Sería deseable que la sección

ACI 224.1R-93 – CAUSAS, EVALUACIÓN Y REPARACIÓN DE FISURAS

fisurada estuviera sumergida. Alternativamente, se puede acumular agua sobre la superficie de hormigón de manera de saturar la fisura. La saturación debe ser continua durante la totalidad del proceso de curado. Un único ciclo de secado y reinmersión reducirá drásticamente el valor de la resistencia por curado. El curado debería comenzar tan pronto como sea posible luego de la aparición de la fisura. Demorando el curado se obtiene menos restauración de la resistencia que corrigiendo el problema de inmediato.

CAPÍTULO 4 – RESUMEN

La intención de este informe es que sirva como una herramienta en el proceso de evaluación y reparación de fisuras en las estructuras de hormigón.

Se resumen las causas de la fisuración del hormigón, junto con los principales procedimientos utilizados para controlar la fisuración. Se consideran tanto el hormigón en estado plástico como el hormigón endurecido. Se evalúan importancia del diseño, el detallado, los procedimientos constructivos, la dosificación del hormigón y las propiedades de los materiales.

Se describen las técnicas y metodologías usadas para evaluar fisuras. Se evalúan tanto requisitos analíticos como requisitos prácticos de aplicación en obra. Se enfatiza la necesidad de determinar las causas de la fisuración como prerrequisito para su reparación. Para seleccionar técnicas de reparación exitosas se deberían determinar las causas de la fisuración, si las fisuras son activas o inactivas. Los criterios para seleccionar los procedimientos de reparación de fisuras se basan en el resultado deseado para las reparaciones.

Se presentan doce métodos de reparación de fisuras, incluyendo las técnicas, ventajas y desventajas, y áreas de aplicación de cada uno de ellos.

AGRADECIMIENTO

El Comité ACI 224 – Fisuración, agradece la colaboración de Robert Gaul, Paul Krauss y James Warner, quienes no son miembros del Comité, por sus sugerencias y revisión de las revisiones presentadas en este documento. El Comité también agradece las contribuciones de Raymond J. Schutz; Paul H. Karr, anteriormente Miembro del Comité; y Donald L. Houghton y Robert E. Philleo, Miembros fallecidos, quienes fueron Autores Contribuyentes de la versión original de ACI 224.1R.

CAPÍTULO 5 – REFERENCIAS

5.1 Referencias recomendadas

A continuación listamos los Documentos de los diferentes organismos de normalización a los cuales se hace referencia en este documento, junto con los números o códigos que los identifican.

American Association of State Highway and Transportation Officials

Standard Specification for Highway Bridges

American Concrete Institute

201.1R Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service

201.2R Guide to Durable Concrete

207.1R Mass Concrete

207.2R Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete

207.4R Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete

224R Control of Cracking in Concrete Structures

224.2R Cracking of Concrete Members in Direct Tension

224.3R Joints in Concrete Construction

302.1R Guide to Concrete Floor and Slab Construction

304R Guide for Measuring, Mixing Transporting and Placing Concrete

305R Hot Weather Concreting

308 Standard Practice for Curing Concrete

309R Guide for Consolidation of Concrete

309.2R Identification and Control of Consolidation Related Surface Defects in Formed Concrete

318 Building Code Requirements for Reinforced Concrete

343R Analysis and Design of Reinforced Concrete Bridge Structures

345R Guide for Concrete Highway Bridge Deck Construction

347R Guide to Concrete Formwork

350R Environmental Engineering of Concrete Structures

503R Use of Epoxy Compounds with Concrete

504R Guide to Sealing Joints in Concrete Structures

517.2R Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure – State of the Art

546.1R Guide for Repair of Concrete Bridge Superstructures

548R Polymers in Concrete

American Society for Testing and Materials

C 150 Standard Specification for Portland Cement

C 595 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements

C 597 Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete

C 876 Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete

C 881 Standard Specification for Epoxy-Resin-Base Bonding Systems for Concrete

C 1059 Standard Specification for Latex Agents for Bonding Fresh to Hardened Concrete

Estas publicaciones se pueden obtener de las siguientes organizaciones:

American Association of State Highway and Transportation Officials

444 N Capitol Street NW Suite 224
Washington, D.C. 20001

American Concrete Institute
P.O. Box 9094
Farmington Hills, Mich. 48333-9094

ASTM
100 Barr Harbor Dr.
West Conshohocken, Pa. 19428-2959

5.2 – Referencias citadas

Abdun-Nur, Edward A. (1983), "Cracking of Concrete – Who Cares?," *Concrete International: Design and Construction*, V. 5, No. 7, Julio, pp. 27-30.

Abeles, Paul W.; Brown, Earl L., II, y Morrow, Joe W. (1968), "Development and Distribution of Cracks in Rectangular Prestressed Beams During Static and Fatigue Loading," *Journal, Prestressed Concrete Institute*, V. 13, No. 5, Octubre, pp. 36-51.

ACI Compilation No. 5 (1980), "Concrete Repair and Restoration," American Concrete Institute, Detroit 118 pp. (compilado de *Concrete International: Design and Construction*, V. 2, No. 9, Setiembre).

Adams, Robert D., y Wake, William C. (1984), *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Elsevier Applied Science Publishers, Ltd., Essex, Inglaterra, pp. 121-125.

Alberta Ministry of Highways (1990), "Alberta Test Procedures for Evaluation of Concrete Sealer," BT001, 5 pp.

Alexander, A. Michel (1980), "Development of Procedures for Nondestructive Testing of Concrete Structures: Report 2, Feasibility of Sonic Pulse-Echo Technique," *Miscellaneous Paper* No. C-77-11, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, 25 pp.

Beeby, A.W. (1983), "Cracking, Cover, and Corrosion of Reinforcement," *Concrete International: Design and Construction*, V. 5, No. 2, Febrero, pp. 35-40.

Bennett, E.W. y Dave, N.J. (1969), "Test Performances and Design of Beams with Limited Prestress," *The Structural Engineer* (Londres), V. 47, No. 12, Diciembre, pp. 487-496.

Broms, Bengt B. (1965), "Crack Width and Spacing in Reinforced Concrete Members," *ACI Journal, Proceedings*, V. 62, No. 10, Octubre, pp. 1237-1256.

Broms, Bengt B. y Lutz, LeRoy A. (1965), "Effects of Arrangement of Reinforcement on Crack Width and Spacing of Reinforced Concrete Members," *ACI Journal, Proceedings*, V. 62, No. 11, Noviembre, pp. 1395-1410.

Bungey, J.H. (1990), *Testing of Concrete in Structures*, 2da ed., Chapman and Hall, NY.

Butt, Yu M.; Kolbasov, V.M. y Timashev, V.V. (1969), "High Temperature Curing of Concrete Under Atmospheric

Pressure," *Proceedings*, 5th International Symposium on the Chemistry of Cement (Tokio, 1968), Cement Association of Japan, pp.437-476.

Callan, Edwin J. (1952), "Thermal Expansion of Aggregates and Concrete Durability," *ACI Journal, Proceedings*, V. 48, No. 6, Febrero, pp. 485-504.

Carlson, Roy W. (1938), "Drying Shrinkage of Concrete as Affected by Many Factors," *Proceedings ASTM*, V. 38, Parte 2, pp. 419-437.

Carlson, Roy W.; Houghton, Donald L.; y Polivka, Milos (1979), "Causes and Control of Cracking in Unreinforced Mass Concrete," *ACI Journal, Proceedings*, V. 76, No. 7, Julio, pp. 821-837.

Clear, Kenneth C. y Chollar, Brian H. (1978), "Styrene-Butadiene Latex Modifiers for Bridge Deck Overlay Concrete," *Report* No. FHWA-RD-78-35, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 124 pp.

Clear, K.C. y Hay, R.E. (1973), "Time-to-Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs. V. 1, Effects of Mix Design and Construction Parameters," *Report* No. FHWA-RD-73-32, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 103 pp.

Concrete Institute of Australia (1972), *Third Progress Report of the Low Pressure Steam-Curing of Concrete*, North Sydney, 26 pp.

Dakhil, Fadh H.; Cady, Philip D. y Carrier, Roger E. (1975), "Cracking of Fresh Concrete as Related to Reinforcement," *ACI Journal, Proceedings*, V. 72, No. 8, Agosto, pp. 421-428.

Dusinberre, D.M. (1945), "Numerical Methods for Transient Heat Flow," *Transactions*, American Society of Mechanical Engineers, V. 67, Noviembre, pp. 703-712.

Gergely, Peter (1981), "Role of Cover and Bar Spacing in Reinforced Concrete," *Significant Developments in Engineering Practice and Research*, SP-72, American Concrete Institute, Detroit, pp. 133-147.

Gergely, Peter, y Lutz, LeRoy A. (1968), "Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Members," *Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete*, SP-20, American Concrete Institute, pp. 87-117.

Higginson, Elm C. (1961), "Effect of Steam Curing on the Important Properties of Concrete," *ACI Journal, Proceedings*, V. 58, No. 3, Setiembre, pp. 281-298.

Hallin, J.P., "Field Evaluation of Polymer Impregnation of New Bridge Deck Surfaces," *Polymers in Concrete*, SP-58, American Concrete Institute, Detroit, 1978, pp. 267-280.

Hoffman, P.C.; McClure, R.M y West, H.H. (1983), "Temperature Study of an Experimental Segmental Concrete Bridge," *Journal, Prestressed Concrete Institute*, V. 28, No. 2, Marzo-Abril, pp. 78-97.

Holmberg, Ake (1973), "Crack Width Prediction and Minimum Reinforcement for Crack Control," *Dansk Slesab for Bygningsstatistik* (Copenage), V. 44, No. 2, Junio, pp. 41-50.

Hoskins, B.E.; Fowler, D.W. y McCullough, B.F. (1991), "An Evaluation of Repair Techniques Used for Uncontrolled

- Longitudinal Cracking and Failed Longitudinal Joints," *Research Report 920-4*, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin, 21 pp.
- Houghton, Donald L. (1972), "Concrete Strain Capacity Tests – Their Economic Implications," *Economical Construction of Concrete Dams*, American Society of Civil Engineers, Nueva York, pp. 75-99.
- Houghton, Donald L. (1976), "Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete," *ACI Journal, Proceedings*, V. 73, No. 12, Diciembre, pp. 691-700.
- Illston, J.M y Stevens, R.F. (1972), "Long-Term Cracking in Reinforced Concrete Beams," *Proceedings*, Institution of Civil Engineers (Londres), Parte 2, V. 53, pp. 445-459.
- Jastrzebski, Zbigniew D. (1961), *Nature and Properties of Engineering Materials*, John Wiley and Sons, Nueva York, 571 pp.
- Johnson, Sydney M. (1965), *Deterioration, Maintenance and Repair of Structures*, McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 373 pp.
- Kaminetzky, Dov (1981), "Failures During and After Construction," *Concrete Construction*, V. 26, No. 8, Agosto, pp. 641-649.
- Kelly, Joe W. (1981), "Cracks in Concrete: Part 1, Part 2," *Concrete Construction*, V. 26, No. 9, Setiembre, pp. 725-734.
- Kirkbride, T. (1971a), "Review of Accelerated Curing Procedures," *Precast Concrete* (Londres), V. 1, No. 2, Febrero, pp. 87-90.
- Kirkbride, T.W. (1971b), "Burner Curing," *Precast Concrete* (Londres), V. 1, No. 11, Noviembre, pp. 644-646.
- Knab, L.I.; Blessing, G.V. y Clifton, J.R. (1983), "Laboratory Evaluation of Ultrasonics for Crack Detection in Concrete," *ACI Journal, Proceedings*, V. 80, No. 1, Enero-Febrero, pp. 17-27.
- Lauer, Kenneth R. y Slate, Floyd O. (1956), "Autogenous Healing of Cement Paste," *ACI Journal, Proceedings*, V. 27, No. 10, Junio, pp. 1083-1098.
- Libby, James R. (1977), *Modern Prestressed Concrete*, 2da Edición, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, pp. 388-390.
- Lin, T.Y y Burns, Ned H. (1981), *Design of Prestressed Concrete Structures*, 3ra Edición, John Wiley & Sons, Nueva York, 646 pp.
- Malhotra, V.M. y Carino, N.J. (Editores) (1991), *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, CRC Press, Boca Raton, FL, 343 p.
- Mansfield, G.A. (1948), "Curing – A Problem in Thermodynamics," *Rock Products*, V. 51, No. 8, Agosto, p. 212.
- Mast, Robert F. (1981), "Roof Collapse at Antioch High School," *Journal*, Prestressed Concrete Institute, V. 26, No. 3, Mayo-Junio, pp. 29-53.
- NCHRP Synthesis of Highway Practice No. 57 (1979), "Durability of Concrete Bridge Decks," Transportation Research Board, Washington, D.C., Mayo, 61 pp.
- Nilson, Arthur H. (1987), *Design of Prestressed Concrete*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, Nueva York, 526 pp.
- Nurse, R.W. (1949), "Steam Curing of Concrete," *Magazine of Concrete Research* (Londres), V. 1, No. 2, Junio, pp. 79-88.
- PCI Committee on Quality Control Performance Criteria (1985), "Fabrication and Shipment Cracks in Precast or Prestressed Beams and Columns," *PCI Journal*, Mayo-Junio, pp. 24-49.
- PCI Committee on Quality Control Performance Criteria (1983), "Fabrication and Shipment Cracks in Prestressed Hollow-Core Slabs and Double Tees," *PCI Journal*, V. 28, No. 1, Enero-Febrero, pp. 18-39.
- PCI Energy Committee (1981), Discussion of "Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure – State of the Art," *ACI Journal, Proceedings*, Julio-Agosto, pp. 320-324.
- Pickett, Gerald (1956), "Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete," *ACI Journal, Proceedings*, V. 52, No. 5, Enero, pp. 581-590.
- Powers, T.C. (1975), "Freezing Effects in Concrete," *Durability of Concrete*, SP-47, American Concrete Institute, Detroit, pp. 1-11.
- Price, Walter H. (1982), "Control of Cracking During Construction," *Concrete International: Design and Construction*, V. 4, No. 1, Enero, pp. 40-43.
- Priestly, M.J. Nigel (1978), "Design of Concrete Bridges for Temperature Gradients," *ACI Journal, Proceedings*, V. 75, No. 5, Mayo, pp. 209-217.
- Rehm, Gallus y Eligehausen, Rolf (1977), "Lapped Splices of Deformed Bars Under Repeated Loadings (Übergreifungsstosse von Rippenstählen unter nicht ruhender Belastung)," *Beton und Stahlbeton* (Berlín), No. 7, pp. 170-174.
- Rodler, DJ.; D.P. Whitney; D.W. Fowler y D.L. Wheat, "Repair of Cracked Concrete with High Molecular Weight Methacrylates," *Polymers in Concrete: Advances and Applications*, SP-116, American Concrete Institute, Detroit, 1989, pp. 113-127.
- Sansalone, M. y Carino, N.J. (1988), "Laboratory and Field Studies of the Impact-Echo Method for Flaw Detection of Concrete," SP-112, American Concrete Institute, Detroit, pp. 1-20.
- Sansalone, M. y Carino, N.J. (1989), "Detecting Delaminations in Concrete Slabs with and without Overlays Using the Impact-Echo Method," *ACI Materials Journal*, V. 86, No. 2, Marzo-Abril, pp. 175-184.
- Shideler, Joseph J. y Toennies, Henry T. (1963), "Plant Drying and Carbonation of Concrete Block – NCMA-PCA Cooperative Program," *ACI Journal, Proceedings*, V. 60, No. 5, Mayo 1963, pp. 617-634. También, *Development Department Bulletin* No. D64, Portland Cement Association.
- Smith, Barbara J. (1992), "Epoxy Injection of Bridge Deck Delaminations," *Transportation Research Record* 1533, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 10-18.
- Smithson, Leland D. y Whiting, John E. (1992), "Rebonding Delaminated Bridge Deck Overlays," *Concrete Repair Digest*, V. 3, No. 3, Junio/Julio, pp. 100-101.
- Snowdon, L.C. y Edwards, A.G. (1962), "The Moisture Movement of Natural Aggregate and Its Effect on Concrete," *Magazine of Concrete Research* (Londres), V. 14, No. 41, Julio, pp. 109-116.

ACI 224.1R-93 – CAUSAS, EVALUACIÓN Y REPARACIÓN DE FISURAS

Stratton, F. Wayne (1980), "Custom Concrete Drill Helps Repair Shear Cracks in Bridge Girders," *Concrete International: Design and Construction*, V. 2, No. 9, Setiembre, pp. 118-119.

Stratton, F. Wayne y McCollom, Bruce F. (1974), "Repair of Hollow or Softened Areas in Bridge Decks by Rebonding with Injected Epoxy Resin or Other Polymers," *Report No. K-F-72-5*, State Highway Commission of Kansas, Julio, 104 pp.

Stratton, F. Wayne; Alexander, Roger y Nolting, William (1978), "Cracked Structural Concrete Repair through Epoxy Injection and Rebar Insertion," *Report No. FHWA-KS-RD.78-3*, Kansas Department of Transportation, Topeka, Noviembre, 56 pp.

U.S. Army Corps of Engineers (1945), "Concrete Operation with Relation to Cracking at Norfolk Dam," Little Rock District, Arkansas, Octubre.

U.S. Bureau of Reclamation (1975), *Concrete Manual*, 8va Edición, Denver, 627 pp.

Verbeck, George G. (1958), "Carbonation of Hydrated Portland Cement," *Cement and Concrete*, STP-205, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 17-36. También, *Research Department Bulletin* No. 87, Portland Cement Association.

Verbeck, George G. (1975), "Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete," *Corrosion of Metals in Concrete*, SP-49, American Concrete Institute, Detroit, pp. 21-38.

Webster, R.P.; Fowler, D.W. y Paul D.R. (1978), "Bridge Deck Impregnation in Texas," *Polymers in Concrete*, SP-58, American Concrete Institute, Detroit, pp. 249-265.

Wimsatt, A.W.; McCullough, B.F. y Bums, N.H (1987) "Methods of Analyzing and Factors Influencing Frictional Effects of Subbases," *Research Report 459-2F*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Noviembre, 77 pp.

· ACI 224.1R-93 fue sometida a votación del comité y procesada de acuerdo con los procedimientos de normalización de ACI.