

Corrosión y reparación de cables monocordón no adherentes

Informado por el Comité ACI/ASCE 423

	Charles W. Dolan Presidente	Henry Cronin Jr. Secretario	
Kenneth B. Bondy [†]	Catherine W. French	Gerard J. McGuire [†]	David H. Sanders
Robert N. Bruce Jr.	Clifford Freyermuth	Mark Moore [†]	Thomas C. Schaeffer
Dale C. Buckner	William L. Gamble	Antoine E. Naaman	Morris Schupack [†]
Ned H. Burns [†]	Hans R. Ganz	Kenneth Napio	Kenneth Shushkewich
Gregory P. Chacos*	Mohammad Iqbal	Thomas E. Henil*	Khaled S. Soubra
Jack Christiansen	Francis J. Jaques	Mrutyunjaya Pani	Patrick J. Sullivan
Todd Christopherson	Daniel P. Jenny	Kent H. Preston	Luc R. Taerwe
Steven R. Close	L.S. Paul Johal	Denis C. Pu	Carl H. Walter
Thomas E. Cousins	Susan N. Lane	Julio A. Ramirez	Jim J. Zhao
Apostolos Fafitis	Ward N. Marianos Jr.	Ken B. Rear	Paul Zia
Mark W. Fantozzi	Leslie D. Martin	David M. Rogowsky	
Martin J. Fradua [†]	Alan H. Mattock	Bruce W. Russel	

*Copresidentes del subcomité responsable por la preparación del presente informe.

[†] Miembro del subcomité responsable por la preparación del presente informe.

Este informe contiene información general sobre la evaluación de los daños provocados por la corrosión en las estructuras que contienen cables de postesado monocordón no adherentes. Explica el desarrollo histórico de las secciones del código de construcción que se ocupan de la durabilidad y la protección contra la corrosión. Describe la evolución de diferentes tipos y componentes de cables no adherentes. También describe aspectos específicos de la corrosión de los cables monocordón no adherentes y los problemas habituales que se presentan en las estructuras que los contienen. Se presentan métodos para la reparación, colocación y agregado de cables.

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 y para la redacción de especificaciones. Este documento debe ser utilizado por personas competentes para evaluar el alcance y limitaciones de su contenido y recomendaciones y que acepten responsabilidad por la aplicación del material que contiene. ACI deslinda cualquier responsabilidad por los principios expuestos. El Instituto no será responsable por ningún daño o pérdida que surja como consecuencia de los mismos.

La Documentación Técnica no deberá hacer referencia a este documento. Si el Arquitecto/Ingeniero desea incorporar algún elemento de este documento como parte de la Documentación Técnica, estos elementos se deberán redactar en lenguaje preceptivo e incorporar a la Documentación Técnica.

Palabras Clave: anclaje; cables; cables monocordón; carbonatación; construcciones de hormigón; durabilidad; ensayos; fragilización; grasa; hormigón postesado; hormigón pretensado; inspección; postesado externo; postesado no adherente; protección contra la corrosión; recubrimiento de hormigón; relevamientos; reparación; tensiones admisibles; vaina.

TABLA DE CONTENIDOS*

Capítulo 1 – Introducción, p. 423.4R-2

- 1.1 – Generalidades
- 1.2 – Antecedentes
- 1.3 – Alcance
- 1.4 – Limitaciones

Capítulo 2 – Revisión de los requisitos incluidos en los códigos y sus modificaciones, p. 423-4R-4

- 2.1 – Generalidades
- 2.2 – Recubrimiento de hormigón requerido para los cables no adherentes

* ACI 423.4R-98 entró en vigencia el 23 de Febrero de 1998.

Copyright © 1998, American Concrete Institute. Todos los derechos reservados.

- 2.3 – Tensiones de tracción admisibles en el hormigón
- 2.4 – Protección de los cables no adherentes

Capítulo 3 – Cables no adherentes, p. 423-4R-7

- 3.1 – Evolución de los cables no adherentes
- 3.2 – Problemas relacionados con las vainas
- 3.3 – Prácticas de detallado
- 3.4 – Problemas relacionados con el almacenamiento, el manipuleo y la construcción
- 3.5 – Mecanismos de deterioro
- 3.6 – Registros de comportamiento

Capítulo 4 – Evaluación de los daños provocados por la corrosión, p. 423-4R-13

- 4.1 – Generalidades
- 4.2 – Relevamiento de la condición del hormigón
- 4.3 – Relevamiento de la condición de los cables
- 4.4 – Ensayos no destructivos
- 4.5 – Retirar hormigón con fines exploratorios
- 4.6 – Exponer los cables
- 4.7 – Retirar cordones
- 4.8 – Otros procedimientos de ensayo e investigación

Capítulo 5 – Programas y métodos de reparación, p. 423-4R-19

- 5.1 – Generalidades
- 5.2 – Reparación de cables existentes
- 5.3 – Reemplazo de cordones
- 5.4 – Reemplazo de cables
- 5.5 – Postesado externo
- 5.6 – Monitoreo acústico continuo
- 5.7 – Apoyo o refuerzo externo mediante armadura no tesa
- 5.8 – Demolición y reemplazo total

Capítulo 6 – Resumen, p. 423-4R-24

Capítulo 7 – Referencias, p. 423-4R-25

- 7.1 – Referencias recomendadas
- 7.2 – Referencias citadas

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

1.1 – Generalidades

La intención de este informe es proporcionar información histórica y general relacionada con la evaluación de problemas de corrosión conocidos o

sospechados en cables monocordón no adherentes, y describir los métodos de reparación que típicamente se utilizan en la actualidad. Este documento describe el estado del conocimiento tal como lo percibe el comité. No constituye una práctica normalizada o recomendada. Se recomienda muy especialmente que los equipos que emprenderán la evaluación y reparación de problemas relacionados con la corrosión tengan experiencia en el diseño, construcción, evaluación y reparación de estructuras con cables monocordón no adherentes.

Otros sistemas de postesado y postesado también han evidenciado problemas de corrosión.¹ Sin embargo, ciertos aspectos de la corrosión de los cables monocordón no adherentes son únicos.

Las causas y efectos de la corrosión de los cables monocordón no adherentes difieren en muchos aspectos de aquellos de las armaduras adherentes convencionales u otros sistemas de postesado. Por lo tanto, los métodos para evaluar y reparar la corrosión de los cables monocordón también difieren en algunos aspectos. Por ejemplo, debido a que los cables están en gran medida aislados del hormigón que los rodea, es posible que no sean afectados por materiales nocivos tales como los cloruros y la humedad del hormigón. No obstante, estos cables tampoco se vuelven pasivos gracias al hormigón que los rodea y, si ingresa agua al interior de los revestimientos protectores o anclajes o si la grasa protectora no es adecuada, pueden sufrir corrosión. Una vez que la corrosión se ha iniciado, es posible que las medidas que se implementen para reparar y proteger el hormigón que rodea los cables no repare ni reduzca el deterioro del acero de postesado. Generalmente es necesario evaluar y reparar los cables en forma separada.

1.2 – Antecedentes

Los primeros sistemas de postesado no adherentes viables desde el punto de vista comercial fueron introducidos en Estados Unidos en la década del 50. En aquel momento no existían normas aceptadas para su diseño ni tampoco especificaciones sobre los materiales utilizados como acero de postesado; los únicos lineamientos disponibles eran las recomendaciones tentativas preparadas por un comité conjunto formado por ACI (American Concrete Institute) y ASCE (American Society of Civil Engineers), por el PCI (Prestressed Concrete Institute) o por la Oficina de Vialidad del Departamento de Comercio de Estados Unidos. Los primeros sistemas utilizaban paquetes de alambres o cordones de diferentes diámetros protegidos

mediante grasa y enfundados en papel que algunas veces se colocaba en forma manual.^{1,2}

El uso de cables no adherentes se popularizó más a fines de la década del 50 y principios de la década del 60, a medida que se progresaba en el establecimiento de normas de diseño y especificaciones para los materiales. En un comienzo la aceptación del concepto se daba a nivel regional y estaba fuertemente influenciada por los esfuerzos de venta y la capacitación ofrecida por los proveedores de cables. A medida que se demostraban las ventajas del sistema, el uso del postesado aumentó rápidamente a fines de la década del 60 y la década del 70. Para muchos tipos de estructuras estas ventajas incluían menores tiempos constructivos, elementos estructurales de menor altura, mayor rigidez y ahorros en los costos globales. Además de su aplicación en construcciones cerradas, los sistemas de postesado no adherente también se utilizaban en estructuras para estacionamiento de vehículos y losas construidas sobre el terreno, mientras que los sistemas de postesado adherente se utilizaban en tanques de agua, puentes, presas y sistemas de retenida y anclaje de suelo. Muchas veces en las estructuras de plantas nucleares se han utilizado cables multicordón y multicordón no adherentes.

Los primeros incidentes de corrosión en cables monocordón no adherentes comenzaron a aparecer durante los 70. Algunos creían que la grasa protegería los cables contra la corrosión durante su transporte, manipuleo e instalación, y que una vez instalados el hormigón los protegería adecuadamente. Sin embargo, la grasa que se aplicaba inicialmente muchas veces no aportaba las características inhibitorias de la corrosión requeridas en la actualidad por las "Especificaciones para cables monocordón no adherentes" del PTI (Post-Tensioning Institute). A principios de los 80 el PTI reconoció las implicancias estructurales de la corrosión y comenzó a implementar medidas para aumentar la durabilidad de los sistemas de postesado no adherentes. En 1985 el PTI publicó la primera norma que se ocupaba del comportamiento de los cables monocordón.³ Confiando en la experiencia y práctica obtenida en la industria nuclear con el uso de grasa hidrófoba inhibitoria de la corrosión, ACI decidió incorporar normas similares. En la edición de ACI 318 de 1989 se incorporaron medidas relacionadas con la protección requerida para los cables y la calidad del hormigón en función de las condiciones ambientales que potencialmente podrían promover la corrosión de los sistemas de postesado. Es más probable que sufran corrosión los sistemas de postesado de las estructuras

construidas con anterioridad a la adopción de estas nuevas normas, especialmente aquellas ubicadas en ambientes agresivos, que las estructuras diseñadas y construidas de conformidad con las mismas.

Los cables rotos, o aquellos que se sabe han sido dañados por la corrosión, pueden ser reparados o suplementados utilizando una variedad de métodos. La tarea más difícil consiste en determinar la magnitud de los daños ocasionados por la corrosión y el grado de reparación necesario. La intención del presente informe es proveer lineamientos para la evaluación de problemas de corrosión conocidos o sospechados y describir los métodos de reparación que se utilizan en la actualidad.

1.3 – Alcance

Este informe incluye una revisión de los siguientes puntos:

- Los códigos y las modificaciones a los códigos que afectan a los cables de postesado no adherentes;
- Los sistemas de protección contra la corrosión utilizados en el pasado y en la actualidad, y cómo estos sistemas han mejorado la protección contra la corrosión;
- Los tipos de daños que la corrosión provoca en el acero de pretensado;
- Los métodos para evaluar estructuras en las cuales se sospecha o se sabe que la corrosión ha provocado daños en el sistema de postesado; y
- Las opciones básicas de reparación actualmente en uso.

1.4 – Limitaciones

Este informe resume los problemas típicos que experimentan los sistemas de postesado no adherentes e incluye lineamientos generales para la evaluación y reparación de los cables monocordón. Aunque los métodos aquí presentados son de naturaleza general, estos métodos no son universalmente aplicables. No se incluyen especificaciones y detalles normalizados, ya que cada estructura es única y debe ser analizada como tal.

No es la intención del presente informe ser incluido como parte de las especificaciones para investigación y reparaciones. En la actualidad no existe un método práctico para determinar con certeza la extensión total de los daños sufridos por un sistema de postesado. La naturaleza impredecible de las fallas que sufren los cables inadecuadamente protegidos cuando se corroen implica que estimar la vida útil de los cables es una tarea incierta.

Existe una gran variabilidad en la duración y tasas de deterioro de los sistemas de postesado más antiguos. Esto se debe en parte a la composición de los elementos que constituyen los cables (cordón, anclajes, grasa y vaina), y en parte a la calidad del hormigón que los rodea, las condiciones ambientales y el tipo de mantenimiento realizado a la estructura. El investigador debe confiar en el conocimiento del comportamiento histórico de estructuras similares, y debe tener la experiencia necesaria para interpretar evidencias externas que pueden indicar problemas internos latentes.

CAPÍTULO 2 – REVISIÓN DE LOS REQUISITOS INCLUIDOS EN LOS CÓDIGOS Y SUS MODIFICACIONES

2.1 – Generalidades

Al evaluar los daños por corrosión en estructuras postesadas con cables no adherentes el investigador debe considerar la edad de la estructura y las normas y prácticas con las cuales contaban el diseñador y el contratista en el momento de la construcción. Aunque ACI publicó reglamentaciones para las construcciones de hormigón armado a partir de 1920, ACI 318-47 fue la primera en reconocer la importancia de las condiciones de exposición ambientales. No obstante, los primeros Códigos (ACI 318-47, ACI 318-51 y ACI 318-56) ya reconocían la importancia del recubrimiento de hormigón sobre el acero y la calidad del hormigón para lograr una adecuada protección contra la corrosión de las armaduras adherentes no tesas.

En 1958 el Comité Conjunto ACI-ASCE 323 publicó el documento "Recomendaciones tentativas para el hormigón pretensado" y se ocupó de la protección del acero de pretensado recomendando prácticas relacionadas con tres aspectos diferentes: recubrimiento de hormigón sobre el acero, tensiones de tracción admisibles y, para los sistemas no adherentes, protección de los cordones o alambres mediante grasa y una vaina protectora. Desde 1958 los requisitos para el hormigón pretensado incluyen requisitos relacionados con la protección contra la corrosión. La mayoría consideraba que la grasa y las vainas funcionaban en primer lugar como un lubricante e interruptor de la adherencia, y en segundo lugar como un inhibidor de la corrosión durante el transporte, manipuleo y colocación de los cables. Algunos consideraban que el recubrimiento de hormigón no fisurado aportaba protección a largo plazo.

En 1963 el hormigón pretensado fue incluido por primera vez en el Código ACI 318, con requisitos

referentes al recubrimiento de hormigón, las tensiones de tracción admisibles y la protección de los cordones. Con el tiempo estos requisitos fueron modificados, pero el cambio más sustancial se introdujo en 1989 cuando ACI 318 comenzó a enfatizar la durabilidad.

2.2 – Recubrimiento de hormigón requerido para los cables no adherentes

ACI 318-63 establecía los siguientes requisitos referentes al recubrimiento de hormigón sobre el acero:

a) Sobre el acero de pretensado, ductos y acero no pretensado se debían proveer los siguientes espesores mínimos de recubrimiento de hormigón:

	Recubrim. in. (mm)
Superficies de hormigón en contacto con el terreno:	2 (50)
Vigas:	
Acero de pretensado y barras de la armadura principal	1-1/2 in. (40)
Estribos y alambres de atar	1 (25)
Losas y vigas expuestas a la intemperie	1 (25)
Losas y vigas no expuestas a la intemperie	3/4 (20)

b) En atmósferas extremadamente corrosivas u otros tipos de exposiciones severas se debía aumentar adecuadamente la cantidad de protección.

Ocho años después, en ACI 318-71, el recubrimiento requerido aumentó de 2 in. (50 mm) a 3 in. (75 mm) para los elementos pretensados hormigonados contra el terreno y permanentemente en contacto con el suelo. Además, se introdujo un nuevo requisito relacionado con la protección de las armaduras que exigía incrementar el recubrimiento requerido en un 50 por ciento en los elementos en los cuales las tensiones de tracción admisibles del hormigón eran mayores que $6\sqrt{f'_c}$ psi ($0,5\sqrt{f'_c}$ MPa). También se revisó el requisito sobre recubrimiento de hormigón del Código de 1963 para exigir que al incrementar la protección con hormigón también se considerara la densidad y porosidad del hormigón (además del espesor del recubrimiento). Las revisiones del Código realizadas en 1977, 1963 y 1989 no modificaron los requisitos referentes al recubrimiento de hormigón. En el Comentario de 1983 se agregó la siguiente discusión:

R7.7.5 – Ambientes corrosivos

Cuando bajo condiciones de servicio el hormigón ha de estar expuesto a fuentes externas de cloruros, tales como sales descongelantes, aguas salobres, agua de mar o las salpicaduras de alguna de ellas, el

hormigón se deberá dosificar de manera de satisfacer los requisitos para exposiciones especiales incluidos en la Sección 4.5 del Código, incluyendo el contenido mínimo de aire incorporado, la máxima relación agua-cemento (o la mínima resistencia en el caso del hormigón liviano), el contenido máximo de iones cloruro en el hormigón y el tipo de cemento. Además, como protección contra la corrosión, se recomienda utilizar como mínimo un recubrimiento de hormigón de 2 in. (50 mm) en losas y muros y de 2-1/2 in. (60 mm) en los demás elementos. Si los elementos son de hormigón prefabricado construidos en planta bajo condiciones controladas se recomienda utilizar como mínimo un recubrimiento de 1-1/2 in. y 2 in. (40 y 50 mm) respectivamente.

Esta discusión es importante, ya que hace notar al diseñador la importancia del contenido de aire, la máxima relación agua cemento, el máximo contenido de iones cloruro y el tipo de cemento al momento de diseñar considerando la protección contra la corrosión.

Finalmente, al incorporar requisitos diferentes para el recubrimiento de hormigón sobre el acero de los elementos fabricados en planta, el Código de 1971 introdujo una diferenciación entre los elementos fabricados en planta y los demás elementos de hormigón pretensado.

2.3 – Tensiones de tracción admisibles en el hormigón

En los ambientes agresivos se diseñaba para minimizar la fisuración y así mejorar la durabilidad reduciendo el ingreso de elementos corrosivos. Aunque al principio un cable correctamente engrasado dentro de una vaina intacta puede no ser afectado por una fisura en el hormigón que lo rodea, la corrosión de las armaduras convencionales próximas puede provocar descantillado, el cual a su vez puede resultar en la corrosión del cordón.

Para considerar la durabilidad a largo plazo y la protección contra la corrosión, el elemento de mayor interés son las máximas tensiones de tracción admisibles en el hormigón bajo cargas de servicio, luego de todas las pérdidas de pretensado. Las recomendaciones iniciales presentadas en 1958 por el Comité ACI-ASCE 323 limitaban las tensiones de tracción admisibles en los elementos pretensados a $6\sqrt{f'_c}$ psi ($0,5\sqrt{f'_c}$ MPa) si los elementos no estaban expuestos a la intemperie u otros ambientes corrosivos. Para los elementos postesados no expuestos a la intemperie u otros ambientes corrosivos, las tensiones

de tracción admisibles estaban limitadas a $3\sqrt{f'_c}$ psi ($0,25\sqrt{f'_c}$ MPa). No se hacía ninguna referencia a las tensiones admisibles en los sistemas no adherentes.

En ACI 318-63 las tensiones de tracción admisibles en el hormigón estaban limitadas a $6\sqrt{f'_c}$ psi ($0,5\sqrt{f'_c}$ MPa) para los elementos no expuestos a temperaturas de congelación ni a ambientes corrosivos, siempre que los elementos contuvieran armadura adherente (tesa o no tesa) para controlar la fisuración. Para los demás elementos no se permitían tensiones de tracción bajo niveles de carga de servicio.

El Código de 1971, "Hormigón Pretensado – Tensiones Admisibles," requería que en la mayoría de los elementos las tensiones de tracción en el hormigón se limitaran a $6\sqrt{f'_c}$ psi ($0,5\sqrt{f'_c}$ MPa), pero permitían tracciones de hasta $12\sqrt{f'_c}$ psi ($1,0\sqrt{f'_c}$ MPa) en el hormigón si se realizaban cálculos utilizando secciones transformadas fisuradas y una relación momento-flecha bilineal para confirmar que la flecha a largo plazo del elemento satisficiera los "Requisitos de Resistencia y Comportamiento en Servicio – Control de Flechas." Además, los límites establecidos para las tensiones admisibles podían ser superados siempre que se realizaran trabajos experimentales y analíticos para demostrar que el comportamiento no se vería afectado.

En el Código de 1977, para una tensión de tracción admisible de hasta $12\sqrt{f'_c}$ psi ($1,0\sqrt{f'_c}$ MPa), se agregó un requisito que exigía aumentar el recubrimiento de hormigón sobre el acero pretensado y no pretensado en el caso de los elementos pretensados en contacto con el suelo, a la intemperie o expuestos a ambientes corrosivos. La sección "Protección de las armaduras mediante hormigón" requería aumentar el recubrimiento de hormigón en un 50 por ciento en el caso de los elementos expuestos al suelo, la intemperie o ambientes agresivos y con una tensión de tracción mayor que $6\sqrt{f'_c}$ psi ($0,5\sqrt{f'_c}$ MPa). El Código de 1995 conserva las tensiones de tracción admisibles definidas en el Código de 1977.

2.4 – Protección de los cables no adherentes

La protección de los cables no adherentes fue inicialmente descrita por el Comité ACI-ASCE 323 como consistente en una grasa o material impregnado en asfalto enfundado en una vaina protectora. La especificación y aprobación del método de protección se

dejaba a criterio del ingeniero. En ACI 318-63, la Sección 2602 indicaba que "el acero no adherente deberá estar permanentemente protegido contra la corrosión." Sin embargo, no proporcionaba ninguna información específica respecto del material de la vaina y la protección requerida. Como ya se observó anteriormente, algunas veces se interpretaba que la protección permanente contra la corrosión era proporcionada por el recubrimiento de hormigón.

El Código de 1971 incluía una sección titulada "Protección contra la corrosión para los cables no adherentes." Esta sección estipulaba que "los cables no adherentes deberán estar completamente recubiertos con un material adecuado para asegurar su protección contra la corrosión." Para evitar la adherencia con el hormigón que los rodeaba y evitar la pérdida del recubrimiento durante la colocación del hormigón, esta sección también exigía que el recubrimiento fuera continuo en la totalidad de la zona no adherente de los cables.

En 1972 el PTI publicó su primera edición del "Manual de Postesado," el cual incluía una especificación para los materiales utilizados para postesado. Posteriormente esta especificación fue revisada y publicada en forma de una especificación guía en la segunda y tercera edición del Manual (1976 y 1981, respectivamente). En 1985 el PTI publicó la "Especificación para cables monocordón no adherentes," la primera especificación detallada basada en la experiencia. En 1989 ACI 318 hizo referencia a este documento en su sección "Protección contra la corrosión para cables de pretensado no adherentes."

A continuación se discuten los requisitos nuevos más significativos de la especificación del PTI de 1985.

- **Definición de las condiciones de exposición:** Las nuevas especificaciones de 1985 diferenciaban entre cables en "ambientes normales (no corrosivos)" y cables "en ambientes agresivos (corrosivos)." Los ambientes normales se definían como aquellos presentes en la mayor parte de las estructuras cerradas con interiores secos y estructuras expuestas en áreas con nevadas escasas o nulas. Los ambientes agresivos se definían como aquellos que expondrían la estructura a aplicaciones directas o indirectas de productos químicos descongelantes, agua de mar, aguas salobres o salpicaduras de alguna de estas fuentes.
- **Anclajes y acoples:** Se requería que las conexiones entre los anclajes y las vainas fueran estancas y que se implementara un cierre estanco en las cavidades donde se alojaban las cuñas. Se requería que los acoples tuvieran vainas protectoras iguales a las de

los cordones, ya que los acoples se vuelven parte del cordón.

- **Vainas:** Se especificaban diferentes espesores de vaina en función de la exposición. Estos espesores eran de 0,025 in. (0,6 mm) para ambientes normales y 0,030 in. (0,8 mm) para ambientes agresivos. Se requería que el diámetro interno de la vaina terminada fuera como mínimo 0,010 in. (0,3 mm) mayor que el diámetro del cordón.
- **Recubrimiento protector contra la corrosión:** (En adelante se utilizará el término "grasa" para referirse al recubrimiento protector contra la corrosión, definido en la especificación del PTI como "... un recubrimiento orgánico con aditivos polarizantes, desplazadores de la humedad e inhibidores de la protección adecuados.") Se indicaba el peso mínimo de grasa sobre el cordón, al igual que una lista de requisitos acerca de los ensayos a realizar sobre la propia grasa. La calidad de la protección contra la corrosión se basaba en la norma ASTM B-117 considerando el tiempo hasta el desarrollo de Herrumbre Grado 7 y establecía como mínimo 720 horas en ambientes normales y 1000 horas en ambientes agresivos.

El PTI publicó nuevamente esta especificación en 1993, introduciendo importantes revisiones en todos los capítulos. A continuación se resumen los cambios más significativos:

- **Definición de las condiciones de exposición:** Los términos "normal (no corrosivo)" y "agresivo (corrosivo)" utilizados en las especificaciones anteriores fueron reemplazados por "normal" y "agresivo." Las definiciones de normal y agresivo permanecieron similares a la de la especificación de 1985, salvo que las estructuras expuestas en áreas con nevadas escasas o nulas ya no se mencionaban como ambientes normales. Se advertía al diseñador que debía "evaluar cuidadosamente las condiciones para determinar si el ambiente en el cual está ubicada la estructura se considera de algún modo agresivo."
- **Definición de las condiciones de exposición:** Se agregó una aclaración para indicar que las cavidades que se dejan para aplicar el tesado y que no se han de mantener secas luego de la etapa constructiva se deben considerar expuestas a un ambiente agresivo.
- **Acero de pretensado:** Se agregaron requisitos de protección referentes al embalaje y la identificación. Se agregó un criterio para limitar la corrosión superficial a picaduras de no más de 0,002 in. (0,05 mm) de diámetro o longitud. (Este tipo de corrosión

se puede retirar utilizando lana de acero fina y puede no ser detectable al tacto.)

- Anclajes y acoples: Se aclararon los criterios referentes a los ensayos estáticos y se relacionaron con ACI 318; también se agregaron requisitos para la realización de ensayos dinámicos. Se agregaron criterios referentes a las tensiones de aplastamiento del hormigón. Se agregó una aclaración que requería que los anclajes que se utilizarían en ambientes agresivos debían estar completamente protegidos contra la corrosión. Se introdujo un requisito exigiendo que el encapsulado del anclaje, la conexión entre la vaina protectora y el encapsulado, y el sello de la cavidad para tesado soportaran una presión hidrostática de 1,25 psi (0,0086 MPa) durante 24 horas.
- Vainas: Se eliminaron las vainas de menor espesor anteriormente permitidas para cables expuestos a ambientes normales; se especificó un espesor mínimo para las vainas de 0,040 in. (1,0 mm) en ambos tipos de ambientes. El tamaño del espacio anular entre el exterior del cordón y el interior de la vaina se aumentó de 0,010 in. (0,3 mm) a 0,030 in. (0,8 mm). Se especificó el encapsulado total de los cables a ser utilizados en ambientes agresivos, con los mismos requisitos de estanqueidad establecidos para los anclajes. Se agregó un requisito que requiere que el diseñador especifique la cantidad de cordón sin vaina permitido en los anclajes en el caso de los cables expuestos a ambientes normales.
- Recubrimiento inhibidor de la corrosión (antes llamado "Recubrimiento protector contra la corrosión") (habitualmente denominado grasa): Para todos los cables se debe utilizar grasa que satisfaga el criterio de la norma ASTM B117 – aparición de Herrumbre Grado 7 luego de 1000 horas. (Se eliminó el tiempo de ensayo menos prolongado anteriormente permitido para los cables a utilizar en ambientes no agresivos.)
- Requisitos para la instalación: Se agregó un requisito estableciendo un mínimo recubrimiento de hormigón para los anclajes, y se especificó que para ambientes normales éste debía ser de 1,50 in. (40 mm) y para ambientes agresivos de 2 in. (50 mm).
- Acabado de los cables: Se redujo la longitud admisible para la proyección de los cordones más allá de la cara de las cuñas. La proyección mínima anteriormente permitida era de 0,75 in. (20 mm) y la máxima de 1,25 in. (30 mm). Los límites revisados

aplicables a la proyección son un mínimo de 0,50 in. (12 mm) y un máximo de 0,75 in. (20 mm).

CAPÍTULO 3 – CABLES NO ADHERENTES

3.1 – Evolución de los cables no adherentes

Las primeras estructuras construidas en Estados Unidos con cables no adherentes fueron las losas izadas construidas a mediados de los 50.⁴ Esto se logró engrasando y envolviendo con papel los primeros cables, que eran no adherentes. Se utilizaban alambres de alta resistencia, generalmente de 0,25 in. (6 mm) de diámetro, con una resistencia última de 240 ksi (1650 MPa), y los anclajes eran del tipo ilustrado en la Figura 3.1. Este sistema utilizaba anclajes grandes y complejos, grandes trompetas de transición y una distancia fija entre los botones en cada extremo del cable. Durante este período también se desarrollaron sistemas que utilizaban uno o múltiples cordones.

A principios de la década del 60 se tomó conciencia de las ventajas de los cables monocordón no adherentes, y consecuentemente el número de proveedores de este tipo de cables aumentó. El mercado halló que este sistema era muy competitivo, y el uso de cables monocordón no adherentes aumentó de forma significativa. Los componentes de los anclajes eran altamente variables, e incluían espirales, barriles o piezas forjadas de alta resistencia y accesorios que se unían mecánicamente al acero de pretensado. El anclaje más popular consistía en una pieza fundida que tenía una cavidad para albergar la cuña de dos piezas que se utilizaba con los cables monocordón. Actualmente este es el sistema más difundido y representa alrededor del 60 por ciento en tonelaje de todo el postesado existente.⁵

A fines de los 60 las vainas de papel comenzaron a ser reemplazadas por plástico. Se han utilizado tres procedimientos diferentes (Figuras 3.2 y 3.3): 1. El cordón se cubre con tubos de plástico preformados colocados a presión; 2. El cordón se envuelve longitudinalmente con una cinta que se sella con calor; y 3. El cable engrasado se cubre con plástico fundido continuamente extruido sobre el mismo.⁶ El espesor y la composición del material utilizado para las vainas quedaba a criterio del proveedor y no eran uniformes. El primer esfuerzo por regular estos aspectos fue realizado por el PTI en su especificación de 1985.

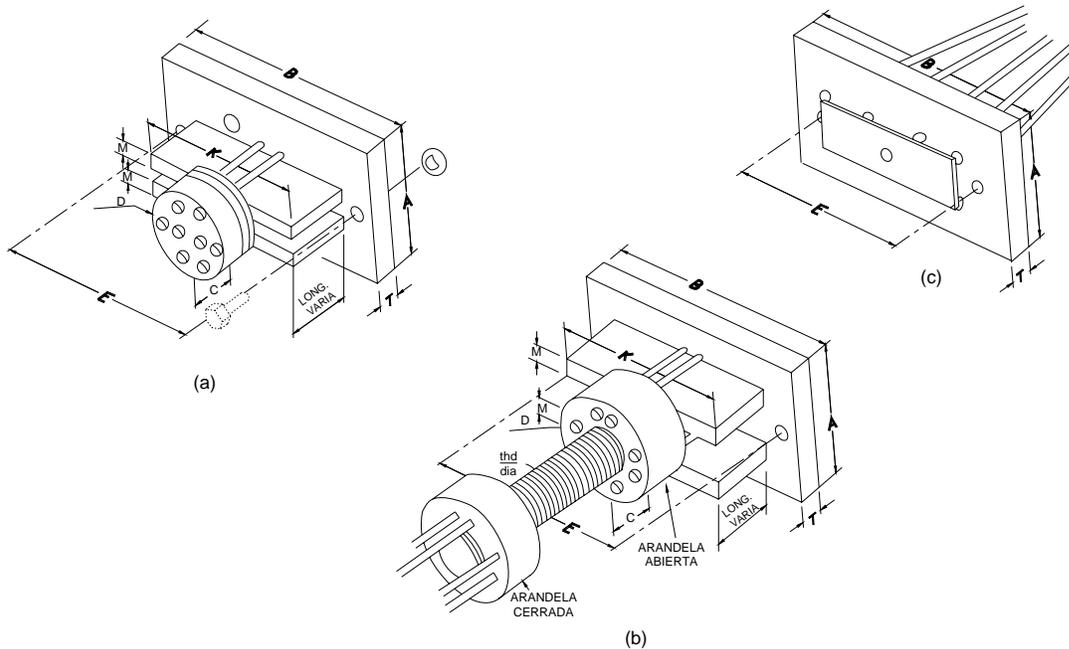


Figura 3.1 – (a) Anclaje en el extremo de tesado en un sistema de postesado con alambres; (b) Anclaje intermedio con varilla de acople roscada; y (c) Anclaje del extremo fijo. Generalmente las dimensiones "A" y "B" eran de 4 y 6 in. (100 y 150 mm), respectivamente, para un típico cable de 7 alambres utilizado en una losa (reproducido de la Referencia 1).

Inicialmente no existían normas para la grasa relacionadas con la protección contra la corrosión (excepto en la industria nuclear; ver la norma ACI 359-74, "Code for Concrete Reactor Vessels and Containments"), de modo que los fabricantes de cables utilizaban la grasa de su preferencia. No se especificaban las propiedades resistentes a la corrosión de la grasa, ni tampoco existían normas que establecieran la uniformidad y cantidad de grasa a aplicar al acero de pretensado. No se anticipaba que la grasa se deteriorara, pero a medida que se empezó a conocer el problema éste fue tratado por el PTI en sus especificaciones recomendadas.

3.2 – Problemas relacionados con las vainas

El sistema de vainas colocadas a presión requería que la vaina estuviera lo suficientemente sobredimensionada como para poder insertar el cordón engrasado sin demasiada dificultad. En consecuencia, dentro de las vainas quedaban demasiados vacíos de aire, lo que permitía la infiltración de agua durante el almacenamiento, transporte e instalación y también una vez en servicio.

Para el sistema sellado con calor las vainas se proveían en forma de rollos de cinta plástica generalmente de 20 a 40 mils (0,5 a 1,0 mm) de espesor.

Durante la fabricación de los cables se tomaba el cordón y se lo hacía pasar a través de una cabeza de extrusión engrasada, se solapaba la costura de la vaina y se soldaba con llama. Este método también daba por resultado vainas ligeramente sobredimensionadas que podían presentar vacíos de aire. La costura soldada se interrumpía cada vez que había una pausa en el proceso, y algunas veces esta costura se rompía durante el manipuleo o la instalación del cable. Por una u otro motivo este sistema muchas veces presenta interrupciones que dejan al cordón engrasado expuesto y potencialmente en contacto con el hormigón.

Las vainas extruídas sin costura aparecieron por primera vez a principios de la década del 70.⁷ Estas vainas minimizaron los problemas relacionados con los sistemas colocados a presión y sellados con calor, ya que hicieron posible que el cordón engrasado tuviera un revestimiento de buen calce y sin costura.

3.3 – Prácticas de detallado

Ciertos detalles inicialmente considerados aceptables son insuficientes para proveer el grado de durabilidad requerido por las versiones recientes de ACI 318. En la actualidad se reconoce que el hormigón no es capaz de proveer una protección confiable a los cordones, aún si éstos están engrasados.

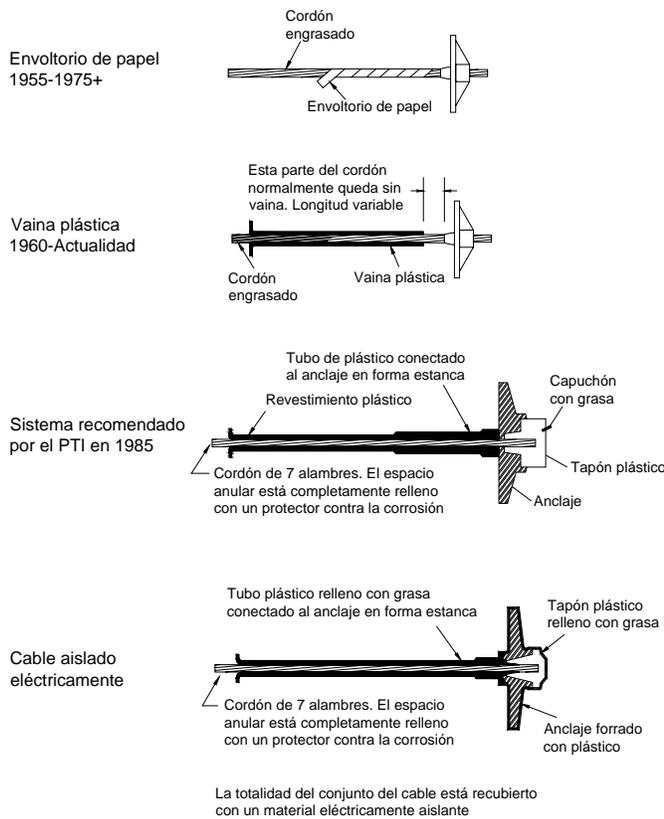
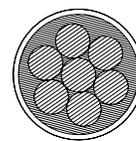


Figura 3.2 – Evolución de la protección contra la corrosión para los cables monocordón no adherentes utilizados en la construcción (reproducido de la Referencia 2)

Una práctica común tanto en el detallado como en la instalación consistía en permitir que la vaina se interrumpiera antes de los anclajes, tal como se ilustra en la Figura 3.4 (es posible que durante la instalación de los anclajes la grasa sea eliminada de estas secciones tanto en el extremo de tesado como en el extremo fijo). Durante las operaciones de tesado el cordón en el extremo de tesado se mueve aproximadamente 8 in. cada 100 ft (200 mm cada 30 m) de longitud. Durante este alargamiento en el extremo de tesado se interrumpe el contacto directo entre el cordón no revestido y el hormigón endurecido, lo cual permite la existencia de un recorrido para que el agua llegue al cordón y hacia el interior de la vaina.²

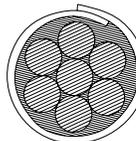
Como el anclaje del extremo fijo no se movía durante el tesado se consideraba aceptable que cerca del extremo fijo el cordón estuviera expuesto al hormigón. Sin embargo, esto también permitía que el extremo del cable quedara expuesto a la suciedad y el agua durante su almacenamiento, manipuleo y colocación, antes de

colocar el hormigón protector. Para todos los fines prácticos el extremo de la vaina quedaba abierto, y los vacíos dentro de la vaina permitían que cualquier agua disponible llegara al cable. Aún cuando el tiempo de almacenamiento en obra fuera relativamente breve (lo cual no siempre es el caso), había amplia oportunidad para que ingresara agua a los cables a causa de las nevadas o lluvias que pudieran ocurrir mientras los cables estaban almacenados sobre el terreno o los encofrados. En estas partes del cordón que no estaban adecuadamente protegidas con grasa, el agua y el oxígeno podrían provocar corrosión que luego sería exacerbada por la presencia de iones cloruro. La Figura 3.4 ilustra algunos defectos típicos que contribuyen a la corrosión en las regiones de los anclajes extremos.



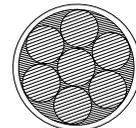
TUBO PREFORMADO INSERTADO A PRESIÓN

El cable se inserta a presión a medida que se aplica grasa



SELLADO CON CALOR

Formado a partir de una cinta plana a medida que se aplica grasa



EXTRUIDO

Formado por extrusión sobre el cordón a medida que se aplica grasa

Figura 3.3 – Tipos de vainas plásticas (reproducido de la Referencia 2)

El lado del anclaje desde el cual se realizaba el tesado se protegía llenando la cavidad o nicho en el cual se colocaba el anclaje con un mortero cementicio protector (Figura 3.4). La pieza fundida, las cuñas y el chicote del cordón no se recubrían. Muchas veces la contracción del tapón de mortero dentro de la cavidad de tesado generaba un espacio entre las paredes de la cavidad y el mortero que permitía que llegara agua al anclaje del cable. Frecuentemente se ha detectado corrosión en la placa de apoyo, pero no se conoce que esto haya provocado fallas. En el caso de los anclajes con sistema de fijación tipo barril y cuñas que apoyan sobre placas de apoyo se ha informado que los barriles tratados térmicamente sufren fallas frágiles. El principal

problema ha sido ya sea la corrosión de las cuñas o bien la migración de agua a lo largo del cable en el vacío entre los alambres o alrededor del borde exterior del cordón. Han ocurrido fallas por corrosión del cordón en

la longitud delante del anclaje que no tiene vaina, en puntos bajos del perfil donde hay acumulación de agua y en puntos en los cuales la vaina estaba dañada y permitía el acceso directo de materiales corrosivos.

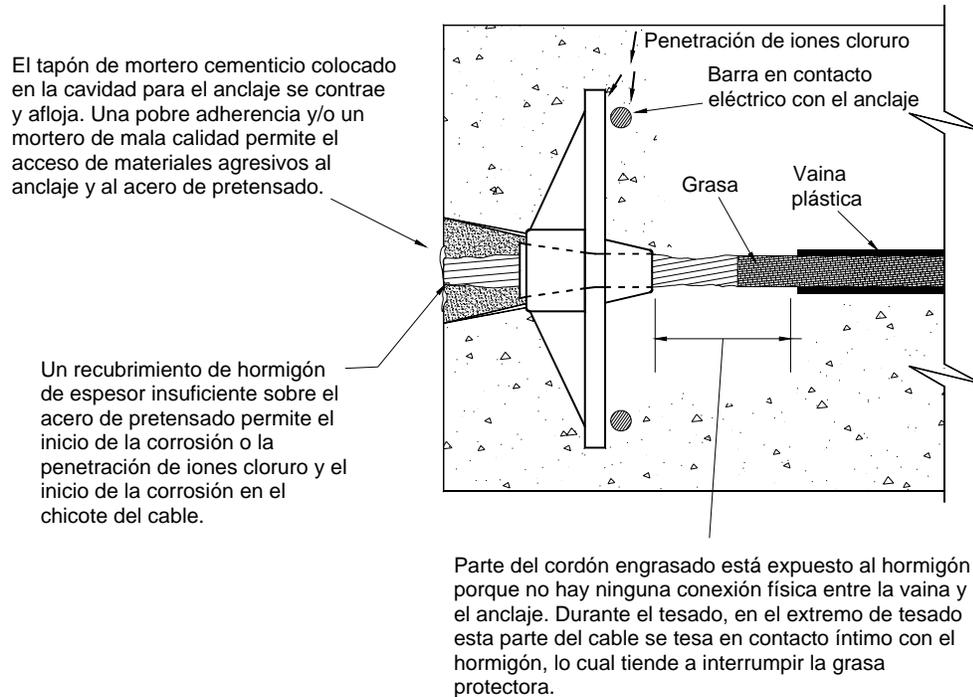


Figura 3.4 – Potenciales defectos de la protección contra la corrosión en el extremo de tesado de un cable monocordón no adherente.

Los anclajes intermedios presentan tanto características propias de los anclajes ubicados en el extremo de tesado como de los anclajes ubicados en el extremo fijo. Del lado donde se realiza la "primera colada" es posible que la vaina no esté adecuadamente sellada. Del lado del anclaje donde se realiza la "segunda colada" es posible que el cordón y los anclajes estén en contacto directo con el hormigón. Podría acceder agua al cable durante su transporte, almacenamiento e instalación, o incluso después que la estructura ha sido completada. En los anclajes intermedios se han desarrollado problemas en casos donde la junta constructiva sobre los anclajes no se selló para evitar la infiltración de agua (que algunas veces contenía cloruros) a través de la junta constructiva en elementos expuestos a la intemperie, como por ejemplo estructuras para estacionamiento de vehículos o balcones. Se han producido contaminaciones significativas del hormigón con cloruros como resultado de

infiltraciones a través de juntas constructivas no selladas. La corrosión de la superficie de los anclajes y barras de apoyo puede inducir descantilladuras a edad temprana. Estas descantilladuras luego actúan como pequeños reservorios donde se acumula agua, acelerando aún más el proceso de deterioro. Esta presencia de agua y oxígeno adyacente a la junta puede promover la corrosión de las barras, las placas de apoyo o los anclajes, y algunas veces incluso del propio cordón. Con las placas de apoyo y accesorios que se utilizaban anteriormente en los anclajes intermedios con sistema de fijación tipo barril, algunas veces la placa de apoyo se ubicaba de manera que la junta constructiva quedaba ubicada directamente por encima de la placa y permitía que el agua entrara en contacto con el anclaje en el extremo del cordón.

En ocasiones las ubicaciones elegidas por el diseñador para colocar los anclajes han resultado en problemas de corrosión. Ubicar los anclajes en las líneas

de desagüe o juntas de expansión de las estructuras para estacionamiento de vehículos, o en bordes expuestos de losas de construcciones comerciales y residenciales (por ejemplo balcones), ha permitido que el agua se infiltre hacia las zonas de anclaje y provoque que el cordón falle por corrosión. En casos en los cuales no se aplicó una impermeabilización especial, algunas veces las juntas constructivas ubicadas en las uniones viga-columna han permitido que ingrese agua a las vainas de los cables a través de sus anclajes en juntas y columnas. Estas juntas rara vez se sellan, a pesar de que con frecuencia están ubicadas en el recorrido del flujo de drenaje y pueden estar expuestas al agua de lluvia o nieve derretida. Si en la junta constructiva el hormigón no está bien compactado el agua que escurre por la cara de una columna puede ingresar al anclaje del cable. La presencia de nidos de abeja en el hormigón, los hormigones permeables, la existencia de zonas de acumulación de agua, las juntas constructivas mal selladas, los conductos mal colocados y otros defectos constructivos son todos factores que pueden contribuir para que el agua acceda a los cables.

3.4 – Problemas relacionados con el almacenamiento, el manipuleo y la construcción

Aunque las vainas de los cables son bastante resistentes, el desgaste al cual están sujetas durante las operaciones de transporte, manipuleo y colocación del hormigón puede ser importante. Esto puede afectar la protección contra la corrosión aportada por la grasa y las vainas protectoras de los cables.

Las prácticas típicamente problemáticas incluyen las siguientes:

- Las bandas metálicas utilizadas para mantener los cables arrollados durante su transporte pueden dañar o cortar sus vainas;
- Los elementos no acolchados que se utilizan para izar los cables y llevarlos del camión al área de almacenamiento o del área de almacenamiento a los encofrados donde serán instalados pueden dañar o cortar sus vainas;
- Almacenar los cables sin protegerlos adecuadamente, como por ejemplo dejar los cables en contacto directo con el suelo, dejarlos expuestos a la lluvia o a la nieve o colocarlos donde puedan ser dañados por el tráfico que se produce durante la construcción;
- Manejar los cables sin el debido cuidado al colocarlos en los encofrados puede dañar o cortar sus vainas;
- Reparar en forma incompleta los daños sufridos por las vainas de los cables;
- Dejar los extremos no sellados de los cables expuestos a la intemperie, ya sea antes de colocar el hormigón o después del tesado;
- Usar un recubrimiento de hormigón inadecuado sobre los chicotes de los cordones en las cavidades para tesado;
- Usar un recubrimiento de hormigón inadecuado para proteger los cables en los puntos más altos y más bajos de su perfil, y también en los anclajes;
- La presencia de vacíos dentro de camisas o trompetas, los cuales permiten la acumulación de agua;
- No llenar adecuadamente con mortero las cavidades para tesado; y
- Utilizar morteros que contienen cloruros u otros agentes químicos que aceleran la corrosión de los cordones.

Actualmente algunos de los sistemas de encapsulado que se utilizan en ambientes agresivos incorporan camisas o trompetas sobredimensionadas para ayudar a sellar los cables en la transición entre la vaina y el anclaje. Debido a que estos sistemas se basan en la fricción antes que en una unión mecánica entre el anclaje y la camisa, se ha informado que estas camisas se pueden aflojar y salir del anclaje antes o durante la colocación del hormigón. Para satisfacer la intención de las ediciones de 1985 y 1993 de la "Especificación para cables monocordón no adherentes" del PTI referentes a la protección de los cables no adherentes es necesario realizar inspecciones y las reparaciones que correspondan.

Los daños que pueden sufrir la grasa y las vainas o la exposición a la humedad durante estas etapas de la construcción podrían afectar el comportamiento futuro del sistema postesado; sin embargo, en la industria no hay ninguna especificación o procedimiento generalizado que defina la responsabilidad por la protección o que establezca medidas específicas para lograr una protección adecuada. Hoy en día estos temas son tratados en forma parcial por la segunda edición del "Field Procedures Manual." Desde 1997 el Comité ACI/ASCE 423, "Hormigón Pretensado," está revisando, rescribiendo e incorporando la "Especificación para cables monocordón no adherentes" a través de un procedimiento de normalización. Este Comité está considerando aspectos relacionados con las operaciones de transporte y manipuleo.

3.5 – Mecanismos de deterioro

En la mayoría de los casos el mecanismo de corrosión requiere la presencia de agua y oxígeno. Si la grasa inhibidora de la corrosión cubre el cordón completamente en general no habrá corrosión. Siempre existe la posibilidad de que la grasa presente discontinuidades, de modo que si hay agua y oxígeno disponibles puede haber corrosión. A medida que el cordón o los cordones se corroen y disminuye su sección transversal, la tensión en la sección restante aumenta más allá de su resistencia última a la tracción y el alambre o los alambres fallan. También pueden ocurrir fallas por fragilización de los alambres de los cordones si hay otros materiales agresivos presentes, tales como nitratos y sulfatos.^{2,8,9} Las fallas por fragilización pueden ocurrir sin que haya una pérdida significativa de sección transversal en el cordón. No es raro que en el punto de rotura de un cordón las superficies de falla de uno o dos alambres sean irregulares, una característica de las fallas por fragilización, y que los alambres restantes presenten configuraciones en forma de copa-cono típicas de las fallas dúctiles. No necesariamente ni probablemente todos los alambres de una sección transversal determinada serán afectados de manera similar en forma simultánea (Figuras 3.5, 3.6 y 3.7).

Si tiene poco recubrimiento de hormigón, generalmente menos que aproximadamente 3/4 in. (20 mm), al fallar un cordón éste puede estallar y salirse del hormigón (Figuras 4.1 y 4.2). Si esto ocurre o no depende del perfil del cable, del tipo de vaina utilizada y de la presencia de armadura perpendicular entre el cable roto y la superficie del hormigón. Ocasionalmente el cordón se puede soltar del anclaje y proyectarse más allá del borde de la estructura.^{2,10}

Si el recubrimiento de hormigón se descantilla o es eliminado, los cables pueden quedar sujetos a daños provocados por los vehículos que circulan. Esto ocurre con mayor frecuencia cuando el recubrimiento de hormigón tiene un espesor menor que 3/4 in. (20 mm) y puede ser el resultado de una mala colocación del cable o un pobre enrasado y acabado del hormigón. No es la intención de las vainas resistir el contacto directo con el tráfico de la estructura en servicio, y bajo estas circunstancias se pueden romper con gran facilidad. Una vez rota la vaina la grasa desaparece rápidamente y el agua contaminada puede ingresar libremente a la vaina y provocar corrosión.



Figura 3.5 – Micrografía de barrido electrónico que muestra la superficie de fractura de uno de los alambres de un cordón que falló. La superficie de fractura es frágil e irregular, característica de la fisuración provocada por las tensiones que genera la corrosión.

3.6 – Registros de comportamiento

En general los cables con vainas de plástico extruído logran una mejor protección contra la corrosión que los cables de otros sistemas no adherentes y que otros tipos de vainas. Sin embargo, este mejor comportamiento también puede estar relacionado con mejoras en la calidad y métodos de aplicación de la grasa que se introdujeron aproximadamente en el mismo momento en que los fabricantes comenzaron a utilizar el sistema de vainas de plástico extruído. Las vainas extruídas hoy en día predominan en la industria, probablemente como resultado de la edición 1985 de la "Especificación para cables monocordón no adherentes" del PTI. Analizando incidentes de corrosión aleatorios, resulta claro que es importante tener cuidado para evitar que a las vainas o anclajes ingresen materiales agresivos, incluyendo agua.



Figura 3.6 – Microfotografía que muestra recorridos de fisuras transgranulares irregulares, característica de la fisuración provocada por las tensiones que genera la corrosión, en alambre estirado en frío de alta resistencia.

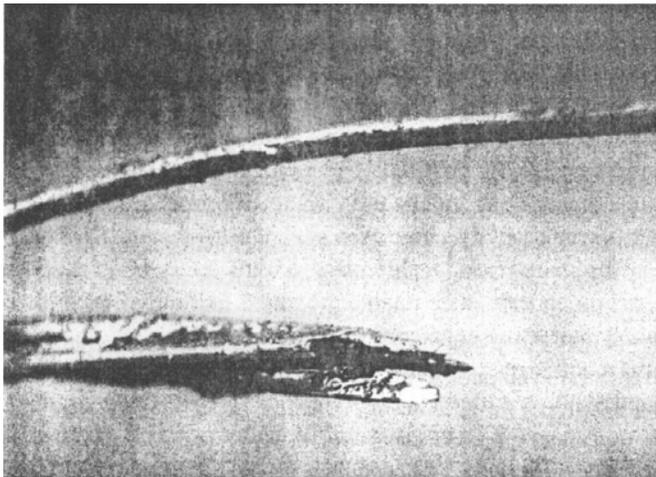


Figura 3.7 – Fracturas frágiles en un cordón que falló. Observar la mezcla de agua, grasa y subproductos de la corrosión que se ve en estos alambres de cordones recién extraídos de una estructura.

No se ha registrado ningún colapso súbito en estructuras con cables no adherentes estando la estructura en servicio. La demolición de estas estructuras demuestra que poseen mayor reserva de resistencia que la que exhiben las estructuras no postesadas. Una característica de las estructuras que utilizan cables no adherentes es su propensión a desarrollar una acción de catenaria significativa aún cuando las partes principales de las losas y vigas estén siendo pulverizadas o eliminadas.^{11,12} Aunque no existen garantías contra un colapso súbito parcial, es probable que una estructura postesada continuará comportándose de manera dúctil aunque un número significativo de cables haya fallado.

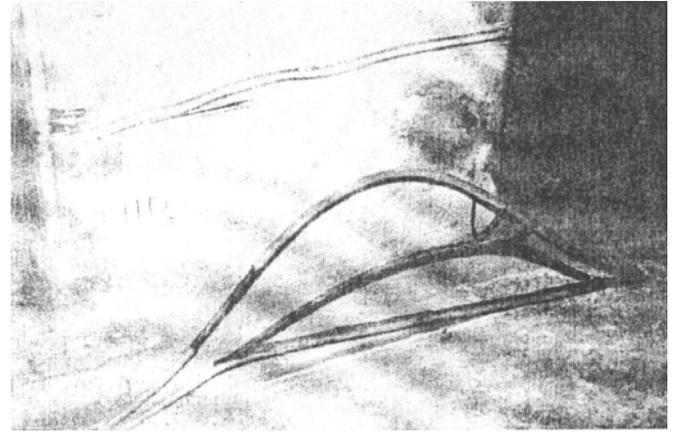


Figura 4.1 – Lazos formados en cables que fallaron y atravesaron la parte superior de una losa. Observar la presencia de ensortijamientos en algunos alambres del cable superior; algunas veces éstos son la única parte que atraviesa el recubrimiento de hormigón.

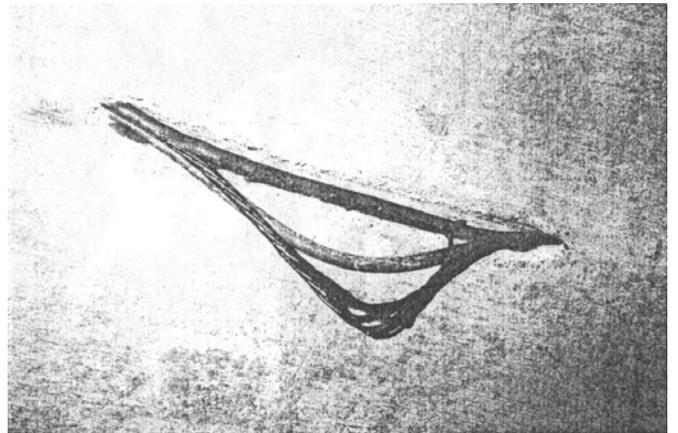


Figura 4.2 – Cables que fallaron y sobresalen del techo. El punto de rotura del cable está alejado de la ubicación donde sobresalen los lazos.

CAPÍTULO 4 – EVALUACIÓN DE LOS DAÑOS PROVOCADOS POR LA CORROSIÓN

4.1 – Generalidades

Utilizando procedimientos de mantenimiento y reparación adecuados se puede prolongar la vida útil prácticamente de cualquier estructura, ya sea que la estructura sea de hormigón pretensado o de cualquier otro material. En general el costo de las reparaciones se puede estimar con un grado de precisión razonable que permite determinar la factibilidad de la inversión. En las estructuras que no utilizan cables no adherentes, los

daños provocados por la corrosión se estiman examinando las áreas descantilladas o manchadas de herrumbre. En base a inspecciones puntuales y registros de comportamiento bajo condiciones similares, en las áreas que el hormigón no está manchado, descantillado o deslaminado se asume que la armadura está en condiciones de servicio. El mismo razonamiento se aplica a la evaluación del deterioro de las barras de armadura adherente en las estructuras que utilizan cables no adherentes, pero su utilidad es menor a la hora de evaluar los propios cables.

Para minimizar el riesgo de pasar por alto algún aspecto significativo se deberían evaluar adecuadamente las condiciones de la estructura. En última instancia será necesario adoptar decisiones acerca del tipo de reparaciones a realizar y la necesidad de reforzar el sistema de acero. Estas decisiones generalmente se basan en la evaluación de los datos recogidos, y deben ser tomadas por un investigador experimentado que comprenda que es probable que no todas las deficiencias latentes hayan sido identificadas. Al igual que para cualquier reparación, el objetivo consiste en reparar los defectos obvios, eliminar las causas que provocaron el deterioro cuando sea posible, detener el avance del deterioro y determinar los requisitos de monitoreo y mantenimiento a futuro.

4.2 – Relevamiento de la condición del hormigón

Muchas referencias incluidas en el Capítulo 7 contienen información específica sobre los métodos de aceptación generalizada para evaluar las estructuras de hormigón. A continuación repasamos los procedimientos habituales.

La evaluación debería incluir una inspección cuidadosa y bien documentada para identificar posibles deterioros y deficiencias, y para identificar también sus causas. Si estuvieran disponibles, se debería revisar los planos de diseño y de taller originales para identificar problemas posiblemente atribuibles al diseño, detallado o selección de los materiales. Se deberían comparar los planos con los hallazgos del relevamiento para evaluar el comportamiento en servicio y determinar si los problemas que se sospechan son localizados o podrían llegar a ser generalizados. Es habitual que las condiciones de una estructura ya construida difieran en cierta medida de los planos. Las publicaciones ACI 364.1R, "Guía para la evaluación de estructuras de hormigón antes de su rehabilitación," y ACI 437, "Evaluación de la resistencia de estructuras de hormigón existentes" contienen lineamientos adicionales sobre este tema.

Los relevamientos de la fisuración son de gran utilidad, ya que las fisuras pueden ser provocadas por deficiencias estructurales, recubrimiento insuficiente sobre las armaduras o cables, deslaminación incipiente debida a la corrosión de las armaduras o conductos embebidos en el hormigón, o contracción restringida. Se deberían tomar notas para documentar el ancho y la longitud de las fisuras, como así también la presencia de pérdidas, eflorescencias y manchas de herrumbre.

Se debería realizar un relevamiento para localizar posibles deslaminaciones en losas y otros elementos estructurales, utilizando métodos apropiados para las condiciones existentes. El relevamiento de las deslaminaciones se puede utilizar para estimar la extensión y distribución de los daños provocados por la corrosión en el acero.

Los ensayos de materiales que típicamente se realizan pueden incluir:

- Ensayo para determinar el contenido de iones cloruro a fin de evaluar la profundidad e intensidad de la penetración de cloruros, y también para estimar el contenido de cloruros del hormigón original. La contaminación por cloruros puede promover la corrosión tanto de las partes del sistema de postesado que se encuentran en contacto con el hormigón como de las armaduras convencionales y accesorios cuya corrosión podría afectar el hormigón que protege al sistema de postesado.
- Evaluación de la profundidad de carbonatación en el hormigón. Esta reacción disminuye el pH del hormigón, haciendo que sea más probable que haya corrosión en presencia de humedad y oxígeno.
- Mediciones del recubrimiento de hormigón sobre cables y armaduras y, si corresponde, correlación de estas mediciones con los perfiles de contaminación por cloruros o profundidad de carbonatación.
- Determinación del potencial de corrosión mediante la media celda de cobre/sulfato de cobre, para determinar si hay actividad corrosiva en el sistema de acero. (Si no hay continuidad eléctrica es posible que estos ensayos no permitan obtener información significativa respecto de los cables; en cambio, si hay continuidad eléctrica en el acero y contacto con el hormigón, estos ensayos pueden indicar la probabilidad de que exista actividad corrosiva en los anclajes y las armaduras.)
- Extracción de testigos de hormigón para realizar ensayos de resistencia a la compresión y análisis petrográficos, incluyendo análisis del sistema de vacíos de aire. (Antes de comenzar la extracción de

testigos es necesario determinar la ubicación de los cables.)

4.3 – Relevamiento de la condición de los cables

Es posible obtener información sobre la probable condición del sistema de postesado realizando una inspección visual. La inspección visual puede ayudar a identificar evidencias externas específicas que indiquen posibles problemas internos. La inspección visual puede ayudar a identificar si el problema presenta algún patrón y puede indicar también su posible extensión.

En las estructuras postesadas la fisuración del hormigón se puede deber a problemas relacionados con el sistema de postesado, pero se deberían evaluar todas las fisuras para determinar su impacto sobre la futura durabilidad de la construcción. A continuación presentamos algunos ejemplos de patrones de fisuración que pueden proporcionar información acerca del sistema de postesado:

- La presencia de fisuras verticales en las vigas y la presencia de fisuras perpendiculares a la dirección de pretensado en las losas puede indicar una pérdida de fuerza de postesado. Para determinar si ha ocurrido este tipo de fisuración se puede realizar un análisis estructural que tome en cuenta posibles pérdidas de la tensión de postesado debidas a la presencia de restricciones. Una discrepancia importante entre las tensiones bajo cargas de servicio calculadas y la magnitud real de la fisuración observada puede indicar una pérdida de postesado.
 - La presencia de fisuras longitudinales ya sea en los laterales o en el fondo de las vigas, alineadas con los cables, puede indicar que se ha infiltrado agua a los cables. A medida que las vainas de los cables se llenan con agua y se congelan durante los meses de invierno (en climas fríos), la expansión debida a la formación de hielo puede hacer que el recubrimiento de hormigón sobre los cables falle por hendimiento.
 - La aparición de humedad o evidencias de acción disolvente del agua a través de las fisuras indica la infiltración de agua. La fisuración provocada por la infiltración de agua puede seguir el recorrido de los cables en una distancia considerable desde su punto medio hacia los apoyos.
 - Una inversión no intencional de la curvatura de los cables en cualquier punto de una viga puede provocar el hendimiento de la viga como resultado de las tensiones internas locales que se generan en el hormigón que rodea la zona donde se ha invertido la curvatura cuando se tesan los cables.
- Las fisuras en la zona próxima a las uniones viga-columna pueden ser el resultado de las acciones estructurales, de una deficiencia de las armaduras utilizadas para controlar las tensiones de estallido en la zona de anclaje de los cables, de la restricción de la contracción, o de una combinación de estos efectos. El agua que ingresa a estas fisuras puede acceder fácilmente a los extremos de los cables y provocar aún más deterioro.¹³

La presencia de manchas en la superficie del hormigón también pueden ser evidencia de posibles deterioros internos debidos a la corrosión del sistema de postesado. Las manchas de grasa en los intradós de las losas, especialmente en los puntos bajos de los perfiles de los cables, pueden indicar daños en las vainas que no han sido reparados, además de un espesor insuficiente del recubrimiento de hormigón sobre los cables. Estas manchas de grasa pueden estar acompañadas por manchas de humedad o evidencia de acción disolvente del agua, lo cual indica que se ha infiltrado agua a los cables de la losa. Las manchas de herrumbre próximas pueden ser el resultado de la corrosión del acero de postesado o tal vez solamente de los elementos de apoyo. En todo caso, estas manchas indican que la protección contra la corrosión del sistema de postesado ha sido comprometida y que es necesario realizar ensayos adicionales y retirar hormigón para realizar una evaluación, tal como se discute en la Sección 4.5.

Se deberían inspeccionar visualmente las cavidades de los anclajes llenadas con mortero donde los extremos de los cables están expuestos, especialmente cuando hay una exposición a la humedad evidente, y lo observado se debería correlacionar con cualquier señal de problemas como las descritas en los párrafos precedentes. Cualquier evidencia de contracción, fisuración, desadherencia, daños por ciclos de congelamiento y deshielo, o manchas de herrumbre provenientes de una cavidad llena con mortero pueden indicar una potencial falla de la protección contra la corrosión del anclaje y el cable de postesado.

La más obvia de las evidencias externas de los daños por corrosión es la presencia de lazos de cordón que sobresalen de la estructura (Figuras 4.1 y 4.2). Estos lazos se producen cuando los cordones se rompen y hay una súbita liberación de energía elástica. Típicamente los cordones salen de la losa en los puntos altos o bajos del perfil de los cables donde el recubrimiento de hormigón puede tener menor espesor, pero ocasionalmente sólo un alambre atraviesa la superficie del hormigón. Los lazos que forma este fenómeno pueden tener alturas desde 1 in. (25 mm) hasta 2 ft (600

mm). En vez de salir de la estructura en forma de lazos, los cables también pueden sobresalir de la estructura en forma recta, proyectándose longitudes de varias pulgadas o incluso varios pies.

Es posible que un cordón se rompa sin perturbar visiblemente el hormigón, de modo que la ausencia de lazos o proyecciones no se debe considerar sinónimo de la ausencia de cables rotos. La mayoría de las estructuras postesadas utilizan hormigones de mayor resistencia (con mayor resistencia a la fisuración) y/o pueden incorporar (tal vez en forma no intencional) un grado significativo de restricción o redundancia (por ejemplo, construcciones construidas debajo del nivel del terreno o construcciones con losas en dos direcciones), de modo que es posible que en una viga o en una región de una losa hasta el 50 por ciento de los cables estén rotos sin que haya señales de deterioro evidentes.

La ubicación donde el cable o alambre sobresale de la estructura generalmente está a cierta distancia de la ubicación real de la falla. Para identificar la ubicación, naturaleza y posibles causas de la falla será necesario retirar hormigón para realizar una exploración y además retirar el cable roto.

Una inspección visual de la estructura puede servir para determinar la distribución de los puntos donde sobresalen o se proyectan los cordones, la cual luego se puede correlacionar con problemas en el detallado y protecciones contra la corrosión inadecuadas para ayudar a determinar posibles reparaciones y medidas de protección adecuadas. También puede ser útil intentar determinar la distribución temporal de estos lazos y proyecciones para observar si hay alguna tendencia aparente en la frecuencia de las fallas de los cables en función del paso del tiempo. Desafortunadamente, demorar las reparaciones con el objetivo de monitorear las fallas de los cables pueden permitir que se acelere el deterioro. En general es mejor iniciar las reparaciones tan pronto como se haya completado un estudio razonable de las condiciones y no esperar meses o incluso años para obtener mayor información. En algunos pocos casos se ha observado que la velocidad de la actividad corrosiva aumenta con el tiempo, lo cual indica que la velocidad de las fallas de los cables podría también aumentar con el tiempo.

4.4 – Ensayos no destructivos

Actualmente no existen métodos de ensayo no destructivos confiables para evaluar la condición de los cables existentes dentro de una estructura. Los principales inconvenientes que presentan los métodos de ensayo utilizados en la actualidad incluyen su

incapacidad para proveer información acerca de la gravedad o ubicación de las picaduras, pérdidas de sección bruta, ubicación de fisuras o roturas preexistentes, o roturas y pérdida de sección de los alambres individuales de un cordón. A continuación repasamos algunos de los procedimientos más habituales, e incluimos comentarios sobre las limitaciones para su aplicación a los cables no adherentes.

- Técnicas de rayos X: Frecuentemente estas técnicas se utilizan para localizar las armaduras dentro del hormigón, por lo general en áreas pequeñas ya que resulta una técnica muy costosa. No se pueden utilizar rayos X para obtener información acerca de picaduras, roturas ni pérdidas de sección transversal de alambres individuales. Las imágenes que se obtienen son borrosas y no se prestan a interpretaciones demasiado finas. Además, la presencia de otras armaduras podría impedir la visualización del cable que se desea estudiar. Generalmente no resulta práctico utilizar este método en toda la longitud de un cable para detectar roturas en el cordón.
- Uso de radar (ASTM D 4748): Esta técnica también se puede utilizar para ubicar las armaduras embebidas en el hormigón. El radar tiene las mismas limitaciones que los rayos X, pero se adapta mejor para localizar armaduras, incluyendo cables, en áreas de mayor tamaño.
- Emisión acústica (no confundir con el Monitoreo Acústico Continuo discutido en la Sección 5.6): Esta es una técnica para localizar corrosión que se basa en la detección de sonidos de alta frecuencia emitidos en los sitios donde hay corrosión activa, y se ha utilizado con éxito en estructuras de acero tales como tanques. En cuanto a detectar los daños por corrosión en el sistema de postesado, la emisión acústica es un procedimiento para el cual no existe ninguna correlación entre los resultados obtenidos y la condición de los cables. Con los ensayos de emisión acústica no es posible determinar la naturaleza de los daños provocados por la corrosión (ataque superficial o picaduras), la ubicación de los daños (en el cordón o en el anclaje, en qué lugar del cordón), ni tampoco si se han roto sólo algunos alambres o todo el cordón.
- Velocidad de pulsos ultrasónicos (ASTM C 597): Este método es útil para determinar ciertas propiedades del hormigón, pero no se ha demostrado que se pueda adaptar para determinar la integridad de los cables.

- Potencial de corrosión mediante media celda (ASTM C 876): Este ensayo se puede utilizar para determinar la presencia de actividad corrosiva en las barras de armadura adherente y en anclajes y cordones que están en contacto con el hormigón. Estos ensayos no permiten ubicar de manera confiable la corrosión en la longitud de un cable, ya que la grasa y la vaina aíslan eléctricamente el cordón. Este método es redundante si hay evidencias visibles de corrosión.
- Pacómetros: Además de la armadura adherente, estos dispositivos permiten ubicar cables engrasados y revestidos. Son útiles para estimar el espesor del recubrimiento de hormigón sobre los anclajes y cordones, y el espesor de mortero protector sobre los extremos de los cordones en las cavidades para tesado. Para realizar lecturas con pacómetro en los anclajes, los extremos de los cordones y toda la longitud de los mismos, puede ser necesario calibrar el dispositivo comparando contra mediciones físicas reales del espesor del recubrimiento de hormigón.
- Ensayos de vacío: Realizar ensayos de vacío en las cavidades de tesado llenadas con mortero permite evaluar la calidad del mortero y su adherencia a las paredes de la cavidad.² Estos ensayos pueden ser útiles para cuantificar la efectividad del tapón de mortero para evitar la infiltración de agua en los cables de postesado.
- Ensayos por impacto-eco: Estos ensayos se pueden utilizar como suplemento de un relevamiento de las deslaminaciones para determinar con mayor precisión las áreas deslaminadas. También se pueden utilizar para determinar las profundidades de las fisuras, vacíos y presencia de nidos de abeja. Los ensayos por impacto-eco no proporcionan ninguna información respecto de la condición de los cordones.

4.5 – Retirar hormigón con fines exploratorios

Generalmente es necesario retirar hormigón para inspeccionar los cordones, la grasa, las vainas y los anclajes, y para evaluar la extensión de la actividad corrosiva en la armadura adherente.

Este procedimiento es lento y se limita a las partes accesibles de la estructura. Por ejemplo, los anclajes de los cables de las vigas muchas veces se encuentran embebidos en las columnas y no se pueden exponer fácilmente. Las estructuras habitadas presentan problemas especiales, ya que retirar el hormigón genera ruidos molestos y suciedad. El número de oportunidades

para realizar este tipo de inspecciones puede ser pequeño respecto del número total y metraje de los cables presentes en una estructura, de modo que la información obtenida puede no ser estadísticamente significativa. Se puede retirar hormigón para calibrar o confirmar resultados obtenidos mediante ensayos no destructivos.

Al reparar el hormigón retirado se debería colocar nuevamente la grasa, restablecer la vaina y el recubrimiento de hormigón sobre el acero. Ver la norma ACI 546, "Guía para la reparación del hormigón."

4.6 – Exponer los cables

Es más conveniente exponer las partes de los cables que tienen menor recubrimiento de hormigón, como por ejemplo en los puntos más altos o bajos de sus perfiles. En la mayoría de las estructuras es preferible exponer el cordón en los puntos bajos del perfil por diferentes motivos: en primer lugar, retirar la superficie superior muchas veces afecta considerablemente la funcionalidad de la estructura; en segundo lugar, la superficie superior en general está más expuesta a fuentes de humedad u otros agentes agresivos, y puede ser difícil lograr reparaciones de buena calidad y restablecer la protección en un tiempo razonable, o incluso puede ser deseable dejar abierta el área estudiada abierta durante un período de tiempo que permita realizar varias observaciones; y en tercer lugar, si hay agua presente en los cables, ésta tiende a acumularse en los puntos bajos del perfil y es más probable su detección en dichos puntos, especialmente en el caso de los cordones con vainas no demasiado ajustadas. En todos los casos se debe tener cuidado de no dañar los cables ya que generalmente éstos están completamente tesados.

Se debe recordar que un cordón que en un área accesible se encuentra en perfectas condiciones y correctamente engrasado puede estar seriamente dañado a unos pocos pies de distancia. Una vez roto, toda la longitud del cable pierde su valor estructural, de modo que es importante realizar tantas observaciones como sea posible y realizarlas en las áreas donde se sospecha la presencia de corrosión. Para estimar el estado actual y el comportamiento futuro de la estructura se deberá aplicar el criterio profesional.

Como se discutió anteriormente, la presencia de manchas de grasa o manchas de agua en el intradós de las losas y vigas puede ayudar a identificar los sitios donde sería deseable retirar el hormigón para una mejor inspección. También se deberían examinar ubicaciones aparentemente no problemáticas de manera de lograr

una evaluación más representativa del estado general de los cables.

Exponer los cables seleccionados en una longitud como mínimo igual a 12 in. (300 mm) y en la mayor parte de su circunferencia como sea posible podría permitir obtener la siguiente información:

- El tipo revestimiento protector (envoltorio de papel, vaina colocada a presión, vaina sellada con calor o vaina extruída), su ajuste sobre el cordón y su espesor;
- Daños no reparados en las vainas;
- Presencia de agua dentro de las vainas;
- Condición de la grasa;
- Corrosión del cordón;
- Verificación del tamaño del cordón; y
- Presencia de cordones o alambres sueltos que indiquen pérdidas de pretensado.

Para determinar si el cordón o los alambres se han aflojado generalmente se utilizan barras de palanca o destornilladores. Si aplicando una barra de palanca es posible desplazar significativamente el cordón, es probable que el cordón conserve muy poca tensión o que la haya perdido por completo. Este ensayo es subjetivo, ya que la longitud de cordón expuesta afecta la cantidad de desplazamiento obtenido. Para identificar alambres sueltos o rotos se puede utilizar la prueba de penetración con destornillador. La persona que realiza la inspección intenta insertar un destornillador de punta plana entre los alambres del cordón en una boca de inspección. Si el destornillador penetra en el cordón es señal que el alambre o los alambres conservan poca tensión o la han perdido por completo. Si se expone una longitud de cordón suficiente este ensayo se puede realizar entre cada uno de los seis alambres exteriores, identificando así la rotura de alambres individuales. Esta prueba también es subjetiva y no necesariamente detectará todas las roturas en los alambres, especialmente si se encuentran a cierta distancia del punto donde se realiza la inspección. Los anclajes intermedios y la adherencia de los cables provocada por la presencia de productos de la corrosión pueden mantener en los cables una fuerza suficiente para "enmascarar" las roturas en el cordón o los alambres.

Resulta útil retirar el hormigón en la región de los anclajes intermedios, particularmente en las ubicaciones donde han ocurrido pérdidas a través de las juntas constructivas. El lado de la junta desde donde se realiza el tesado es el que se puede exponer sin comprometer la integridad del cable; el hormigón que se encuentra del otro lado está comprimido y no debería ser perturbado.

No se deberían iniciar operaciones para retirar hormigón con fines exploratorios sin antes contar con un plan de acción detallado. Se debería preparar una especificación que defina las precauciones de seguridad y procedimientos aceptables para la demolición, reparaciones y colocación de parches de hormigón. Los trabajadores que realicen el cincelado del hormigón deben tener conocimientos acerca de los cables de manera que puedan comprender lo que buscan y las consecuencias que se producirían en caso de romper un cordón. Estas personas deberían retirar el hormigón aplicando procedimientos lentos y cuidadosos y utilizando las herramientas adecuadas. Ver ACI 546.1R, "Guía para la realización de reparaciones." Como se mencionó anteriormente, los cordones rotos pueden sobresalir verticalmente a través de las superficies superior o inferior del hormigón, u horizontalmente a través de los anclajes.

4.7 – Retirar cordones

Es posible retirar cordones para su inspección, pero rara vez se corta un cable activo para este propósito. Es mucho más habitual retirar parte de un cordón que ya se sabe está roto, generalmente de uno que ya se ha salido parcialmente del hormigón. Generalmente es posible retirar el cordón entre el punto donde salió del hormigón y la rotura, pero algunas veces esto requiere un esfuerzo considerable. Disponer el trozo de cordón retirado sobre el elemento estructural es una manera sencilla de determinar la ubicación de la rotura. Una vez retirado, el cordón se puede analizar para determinar el estado en que se encuentra la grasa, la frecuencia y severidad de la corrosión y el tipo de falla de los alambres.

Algunas veces las evidencias de corrosión son sutiles y se parecen más a manchas que a herrumbre; por este motivo es importante que el cordón sea examinado cuidadosamente por una persona experimentada en este tipo de evaluaciones. El extremo roto de un cordón se puede someter a ensayos metalúrgicos en laboratorio para obtener un análisis de los alambres rotos. Los alambres del cordón se pueden analizar microscópicamente para detectar fisuración, picaduras y corrosión.

Algunas veces es posible identificar los residuos químicos presentes en los alambres en la ubicación de la falla y relacionarlos con la falla. Se pueden ensayar las propiedades físicas y mecánicas del cordón utilizando una parte del cordón tomada a cierta distancia de la rotura para determinar su resistencia a la tracción y alargamiento y realizar ensayos de flexión.

4.8 – Otros procedimientos de ensayo e investigación

Se puede soltar un cordón de un anclaje para medir su fuerza efectiva y así verificar la tensión en el cordón (ensayo denominado "*lift-off*"), pero estos ensayos son difíciles de realizar en el caso de los cables monocordón de una estructura terminada. Debido a que el cordón se corta cerca de las cuñas, se necesitan herramientas especiales para agarrar el extremo del cordón para tirar del mismo y aflojar las cuñas. La corrosión aumenta la fuerza de trabazón de las cuñas y debilita el extremo del cordón, lo cual dificulta ejecutar este procedimiento. Debido a la probabilidad de dañar permanentemente el anclaje y el cordón, no es posible soldar una prolongación en el extremo del cordón. En el caso de los anclajes con sistema de fijación tipo barril, es posible agarrar el barril para de este modo tirar del cable. Sin embargo, se debe tener cuidado ya que los barriles generalmente han sido tratados térmicamente, lo cual los hace duros, difíciles de agarrar y no permite realizar soldaduras.

Los ensayos descritos en el párrafo anterior no proveen información en cuanto a la cantidad o la distribución de la corrosión sobre el cordón, ni tampoco son una indicación de la pérdida de resistencia última. Estos ensayos sólo permitirán saber si el cordón tiene la capacidad necesaria para soportar la fuerza ejercida por el gato una vez que se aflojan las cuñas. Típicamente, estos los ensayos no superan la tensión utilizada para calzar las cuñas. Algunas veces el cordón se rompe inmediatamente después que se aflojan las cuñas, lo cual indica que la pérdida de resistencia ocurrió antes del ensayo. Lógicamente el paso siguiente consiste en retirar la vaina del cable para realizar una inspección.

Una alternativa consiste en verificar la tensión en el cordón utilizando equipos que permiten analizar las características vibratorias del cordón tesado. Estos equipos se pueden adaptar a partir de los equipos utilizados para monitorear los cables de los puentes atirantados y otras aplicaciones similares.

Se expone una parte del cordón, típicamente alrededor de 2 ft (600 mm), y se revisan los extremos de la longitud expuesta para localizar puntos nodales. Se fija un acelerómetro al cordón expuesto y se golpea el cordón para excitarlo. La vibración se transmite del acelerómetro al equipo de medición para determinar la tensión en el cordón en función de la frecuencia vibratoria. Verificar la tensión mediante este procedimiento tampoco permite obtener información detallada respecto de la corrosión del cordón.

Realizar ensayos de carga en vigas y losas de acuerdo con ACI 318, "Evaluación de la resistencia de

estructuras existentes," no permite obtener información detallada respecto del estado de los cables individuales. Podría haber fallado un número significativo de cables sin que este hecho sea detectado por un ensayo de carga. El período de tiempo posterior a los ensayos durante el cual los resultados son válidos está sujeto a un importante grado de incertidumbre, y ACI 318 no contiene ninguna guía para estimar la vida de servicio remanente. Además, los ensayos de carga son costosos e invasivos. Por lo tanto, aunque un ensayo de carga puede confirmar que la parte de la estructura ensayada tiene una resistencia adecuada en el momento del ensayo, este método tiene limitaciones cuando se lo aplica a estructuras en las cuales se conoce o sospecha la presencia de daños por corrosión en cables no adherentes.

CAPÍTULO 5 – PROGRAMAS Y MÉTODOS DE REPARACIÓN

5.1 – Generalidades

Antes de emprender reparaciones de cualquier tipo resulta prudente determinar las causas que originaron los daños por corrosión y posibles medidas preventivas a implementar. Incorporar medidas que consideren las causas del deterioro pueden ayudar a que el programa de reparaciones sea más efectivo para prolongar la vida útil de la estructura. Si la necesidad de reparar los cables es crítica se debería evaluar analizando la estructura para determinar si existe suficiente capacidad de reserva para soportar adecuadamente las cargas de diseño después de perder algunos cables. En algunos casos podría no ser necesario reemplazar todos los cables rotos o dañados, o podría ser razonable utilizar cordones de menor diámetro para reemplazar los cordones que se retiran. Si es necesario mantener una tensión de precompresión adecuada o una determinada resistencia última, se podrían utilizar cables de menor diámetro pero de mayor resistencia. Si el tipo y el estado del cordón y su vaina lo permiten, es posible reemplazar el viejo cordón por uno del mismo diámetro. Si el análisis indica que la capacidad de carga ha caído por debajo de los límites establecidos en el código, y especialmente si ha caído por debajo de los niveles indicados para cargas de servicio, antes de realizar las reparaciones puede ser necesario evacuar o apuntalar las partes de la estructura afectadas.

Si la corrosión de los cables ha progresado hasta un punto tal que la resistencia de cualquier parte de la estructura se ha reducido a un nivel inaceptable será

necesario considerar la realización de reparaciones para corregir las deficiencias. El tipo de reparaciones dependerá de la extensión (o supuesta extensión) de los daños provocados por la corrosión y la consiguiente pérdida de resistencia. Si se sabe que los daños son menores, y si se puede identificar fácilmente la ubicación de dichos daños, la solución puede consistir simplemente en reparar y proteger los cables existentes. Más probablemente se encontrarán una variedad de condiciones, algunas de las cuales pueden exigir retirar y reemplazar los cables en su totalidad. Para determinar cómo el proceso de reparación podría afectar aún más la integridad de la estructura será necesario analizar los métodos y secuencias de reparación propuestos aplicando el criterio profesional.

Si la extensión real o supuesta de los daños hace que no sea posible localizar las ubicaciones donde se deberían realizar reparaciones, puede ser necesario reforzar la estructura aplicando externamente un sistema estructural compuesto por cables postesados, secciones de acero estructural o elementos de hormigón. Para algunas estructuras se han diseñado sistemas de postesado que reemplazan completamente los cables originales. En las secciones siguientes se discuten estos diferentes enfoques. Cuando no sea factible utilizar refuerzos externos puede ser necesario demoler y reemplazar completamente la estructura.

5.2 – Reparación de cables existentes

Si se detectan evidencias visibles que indican la presencia de corrosión en los cables, como por ejemplo las que se pueden ver en los anclajes expuestos que no han sido llenados con mortero, estos problemas se deberían reparar tan pronto como sea posible. La parte expuesta del anclaje se debería limpiar mediante chorro de arena o métodos equivalentes, recubrir con pintura antioxidante u otros materiales protectores contra la corrosión, y la cavidad de tesado se debería llenar correctamente de acuerdo con la "Especificación para cables monocordón no adherentes" del PTI.

En las estructuras en las cuales se ha diagnosticado corrosión de los cables se deberían aplicar medidas apropiadas para detener o disminuir la velocidad de avance de la corrosión en los cables existentes. Eliminar la infiltración de agua es fundamental, de modo que se debería reparar el hormigón y sellar las fisuras. Se pueden sellar fisuras en forma aleatoria pero, si hay una fisuración importante o si una gran parte del recubrimiento de hormigón en toda o parte de la estructura es deficiente, se debería considerar la aplicación de una membrana impermeable, posiblemente incorporando

una superficie de desgaste cuando corresponda. Ver ACI 224.1R, "Causas, evaluación y reparación de las fisuras en las estructuras de hormigón."

5.3 – Reemplazo de cordones

Cuando un cordón se ha cortado o dañado en forma no intencional, o cuando se sabe o sospecha que hay daños por corrosión localizados, muchas veces se realizan reparaciones consistentes en reemplazar la parte del cordón comprendida entre dos anclajes. Se reutilizan los viejos anclajes, y las viejas cuñas nunca se destraban. La sección dañada del cordón se corta y retira, y se utilizan acopladores para empalmar una longitud de cordón nuevo en los extremos del cordón original. Los acopladores más simples consisten en tubos cortos con dos conjuntos de cuñas, mientras que existen otros que permiten tesar el cordón en los puntos de empalme (Figuras 5.1, 5.2 y 5.3). Cuando se utilizan acopladores para tesado en línea no es necesario exponer los anclajes originales, y el proceso de tesado consiste en una forma limitada de un ensayo de verificación. Algunos diseñadores especifican que para este tipo de reparaciones el cordón se debe tesar de la manera habitual, hasta el 80 por ciento de la carga última. Otros consideran que las pérdidas a largo plazo ya han ocurrido y por lo tanto exigen la aplicación de una tensión inicial menor; según este razonamiento, los cables así tesados tendrán aproximadamente la misma tensión efectiva que los cables originales.

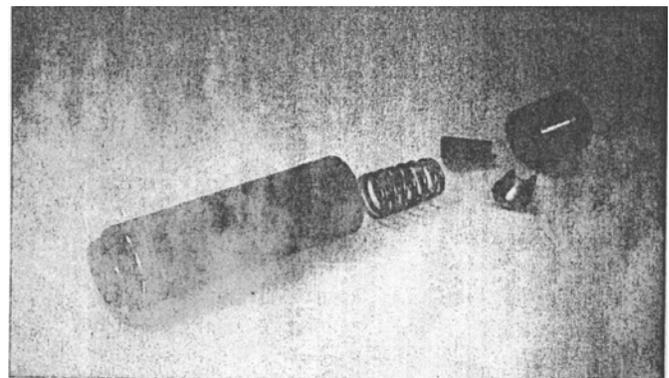


Figura 5.1(a) – Típico acoplador tipo barril; despiece parcial que permite ver las cuñas que se ajustan a medida que el cable se tesa nuevamente

También es posible reemplazar un cordón en toda su longitud y utilizar los anclajes originales, pero algunas veces es difícil retirar las viejas cuñas y los anclajes se podrían dañar durante el proceso. En general es recomendable reemplazar los anclajes por anclajes

nuevos, ya que esto representa la oportunidad de mejorar la durabilidad del sistema. Una vez liberados los anclajes, generalmente es fácil retirar los cordones. En algunos casos para retirar los cordones se puede utilizar un gato, pero aunque este método es confiable puede resultar excesivamente lento. Habitualmente los cordones sueltos se retiran a mano o con ayuda de una mordaza o vehículo. Si el cordón está excesivamente adherido y se requiere el uso de un gato, la tensión aplicada no debería ser mayor que $0,80 f_{pu}$. Si no es posible mover el cordón será necesario determinar la causa de la adherencia (generalmente utilizando el alargamiento logrado para calcular la distancia hasta la ubicación donde el cordón está adherido) y corregirla.

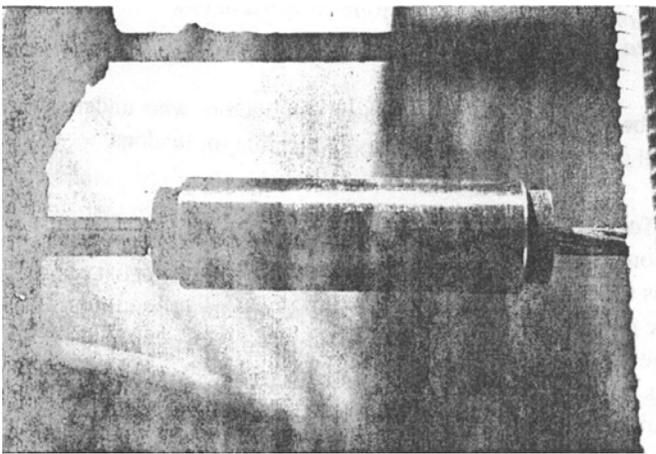


Figura 5.1(b) – Acoplador tipo barril instalado y tesado, pero antes de ser encapsulado

Antes de insertar el nuevo cordón dentro del viejo revestimiento protector que ha permanecido en la estructura se debería eliminar la humedad que se encuentra dentro de la vaina (por ejemplo, haciendo pasar trapos a través de la vaina hasta secarla completamente). Se debería bombear grasa dentro de la vaina a medida que se inserta el nuevo cordón. El objetivo de este procedimiento o de cualquier procedimiento alternativo debería ser llenar todos los vacíos dentro de la vaina de modo que no sea posible que ingrese agua nuevamente y así evitar el inicio de un nuevo ciclo de corrosión. El nuevo cordón puede venir ya sea desnudo o bien preengrasado y enfundado en un revestimiento plástico del cual se extrae para ser insertado. Para cualquier cable se debería utilizar un solo tipo de grasa. En general, es más recomendable utilizar como reemplazo cordones preengrasados, preferentemente cubiertos con una vaina protectora. En

los cordones que vienen engrasados de fábrica la grasa ha sido aplicada a presión durante el proceso de fabricación, de modo que la cobertura y penetración entre los alambres es mejor que la que se puede lograr aplicando la grasa en obra. La vaina se debería sellar en todos los puntos de inspección y reparación para así encapsular el cordón.



Figura 5.2 – Combinación de acopladores tipo barril y acopladores de tesado en línea utilizada para reparar y tesar nuevamente los cables que fallaron

Para reemplazar cordones se puede considerar el uso de cordones recubiertos con epoxi de acuerdo con la norma ASTM A 822/A. Para acomodar el espesor del recubrimiento (30 a 40 mils, o 0,7 a 1,0 mm) es necesario utilizar cordones de menor diámetro. Para los cordones recubiertos con epoxi se requieren anclajes y cuñas especiales, de modo que será necesario reemplazar los anclajes existentes. Se han informado casos en los cuales los cordones resbalaron a través de los anclajes debido a que el recubrimiento no permitió que los mandriles pudieran agarrar debidamente los cordones.

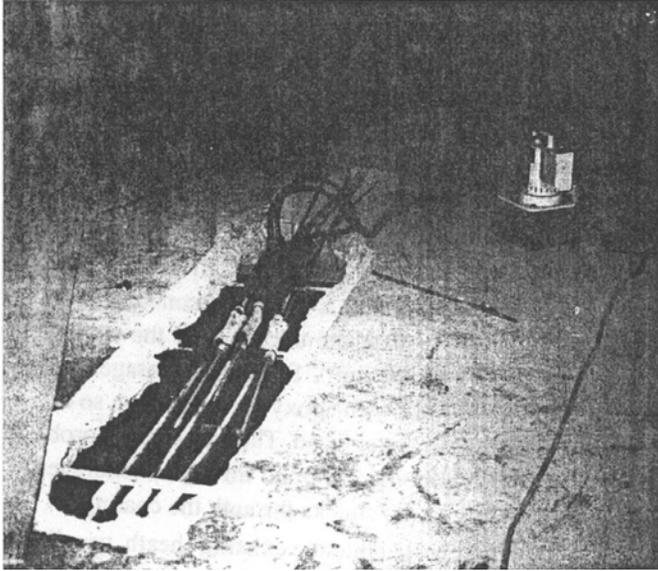


Figura 5.3 – Tesado de los cables utilizando acopladores en línea. El encapsulado se completará una vez concluido el tesado

Un cordón nuevo se coloca ya sea tirando para enhebrarlo en el revestimiento protector existente, generalmente primero haciendo pasar un cordón de menor diámetro soldado al extremo del nuevo cordón, o bien empujando con ayuda de un gato invertido y fijado de modo que proporcione la fuerza reactiva necesaria. El cordón pandea más fácilmente en el gato a medida que aumenta la fricción, de modo que las carreras deben ser cada vez más cortas; sin embargo, la mayor parte de los cordones se pueden reemplazar de este modo.

Reemplazar cordones es un procedimiento relativamente costoso, invasivo y lento. Sin embargo, puede representar una solución efectiva cuando por consideraciones arquitectónicas no se desea alterar la apariencia de la estructura. Estos trabajos deberían ser realizados por contratistas experimentados que comprendan todos los aspectos relacionados con la correcta protección contra la corrosión de los cables.

5.4 – Reemplazo de cables

En algunas estructuras o partes de estructuras donde hay numerosos cables dañados en muchas ubicaciones, en lugar de reemplazar cordones y anclajes, una solución más eficiente desde el punto de vista de los costos puede ser abandonar todos o algunos de los cables existentes e instalar cables nuevos. Generalmente esto sólo resulta factible en las losas o vigas anchas, ya que requiere cortar canaletas de longitud parcial o total en el hormigón. Este procedimiento está patentado y se

ilustra en las Figuras 5.4 y 5.5. El detallado de los nuevos anclajes y el nuevo cable debe asegurar que la compresión, el levantamiento y las fuerzas descendentes se transfieran desde el nuevo hormigón, donde están ubicados los nuevos cables, al hormigón existente.

5.5 – Postesado externo

Para reforzar grandes porciones de estructuras existentes se pueden utilizar sistemas de postesado aplicados externamente. Los sistemas de postesado externos se han utilizado con éxito en la recuperación de una gran variedad de sistemas estructurales, incluyendo placas planas en dos direcciones, losas planas, losas en una dirección y vigas.

Típicamente estos sistemas consisten en agregar cables rectos a lo largo de la zona traccionada de losas o vigas existentes, o en construir un reticulado de cables debajo o al lado de la losa o viga existente. El cordón inferior (traccionado) del reticulado es el cable o grupo de cables postesado. El elemento vertical del reticulado generalmente es un perfil de acero estructural (normalmente tubular) con una placa de apoyo que apoya en el intradós de la estructura existente y aplica la fuerza ascendente requerida. El cordón superior (comprimido) del reticulado es la propia estructura existente, a la cual se fijan los anclajes de postesado (Figuras 5.6 y 5.7).

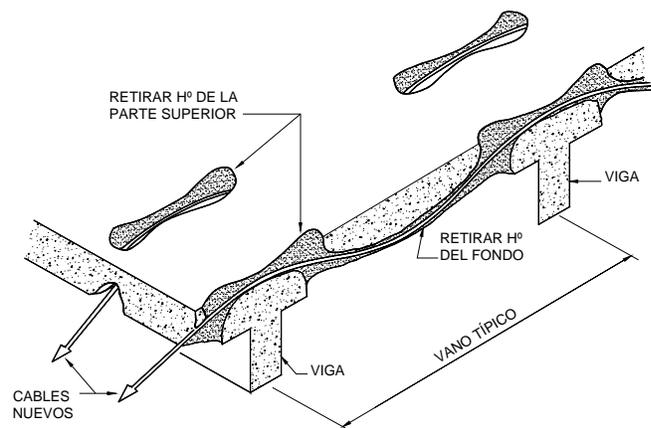


Figura 5.4 – Método patentado para reemplazar los cables internos (método de las canaletas o "trenching") (reproducido de la Referencia 1).

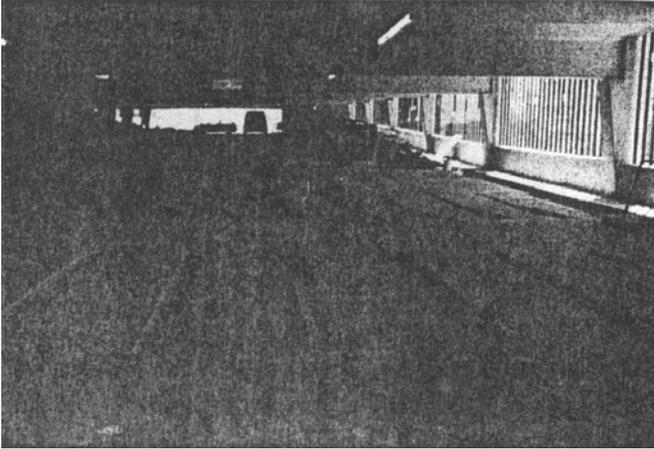


Figura 5.5 – Losa de una estructura para estacionamiento de vehículos en la cual se han abierto las canaletas pero aún no se han instalado los nuevos cables no adherentes (reproducido de la Referencia 1).

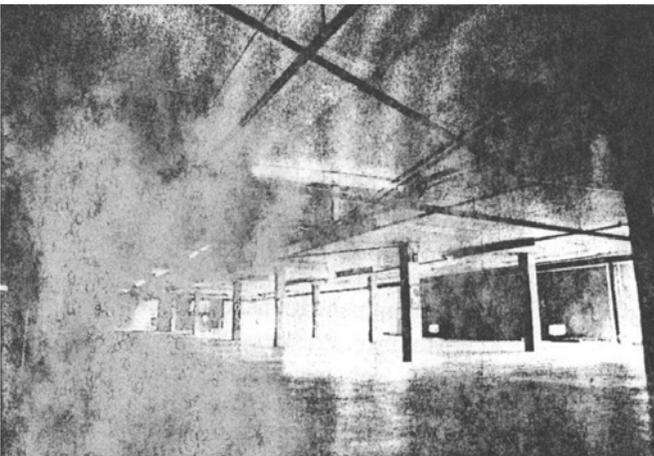


Figura 5.6 – Postesado externo utilizado para reforzar una losa

Las ventajas de utilizar sistemas de postesado externo para rehabilitar una estructura o parte de una estructura incluyen:

- La posibilidad de aplicar grandes fuerzas ascendentes a la estructura existente con mínimos requisitos de espacio libre;
- Interferencia escasa o nula con las tuberías, conductos y demás elementos utilizados por los servicios públicos existentes;
- Mínima perturbación de la funcionalidad de la estructura existente; y
- Costos posiblemente menores que otros métodos como por ejemplo el reemplazo de cables.

Una potencial desventaja de los sistemas de postesado externo es que son visibles y en algunos casos (cuando no quedan ocultos detrás de un cielorraso u otro elemento arquitectónico) pueden modificar la estética de la estructura. La protección contra incendio debe satisfacer los requisitos del código de edificación vigente. También es necesario utilizar protección contra la corrosión.

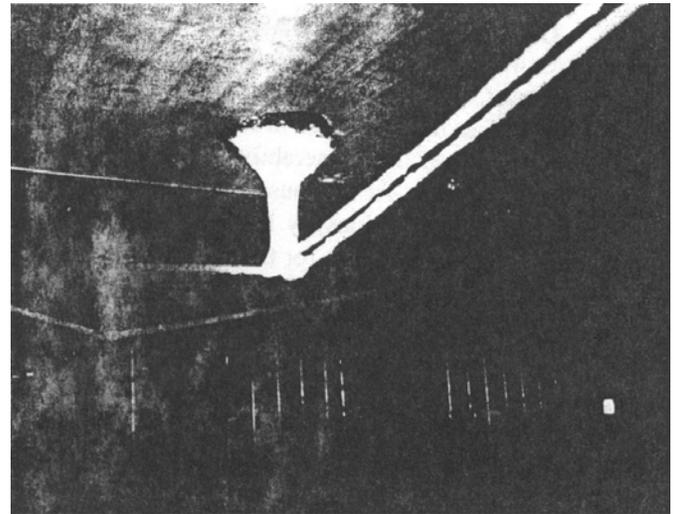


Figura 5.7 – Postesado externo luego de aplicar la protección contra el fuego

5.6 – Monitoreo acústico continuo

Recientemente se ha desarrollado un sistema de monitoreo acústico (propietario) que permite monitorear en forma continua las estructuras postesadas.¹⁴ Cuando ocurre una falla en un cordón o alambre se produce una liberación súbita de energía. Los sensores instalados en diferentes puntos de la estructura detectan la respuesta acústica transmitida desde el lugar donde se produjo la falla. La información recogida por los sensores es registrada por terminales que se encuentran en la obra y descargada a una computadora central donde se analiza la información para determinar la posible ubicación de la falla.

El sistema de monitoreo no determina la condición del sistema de postesado al inicio de la instalación, sino que permite obtener un registro del número y ubicación de los puntos de rotura de los cordones en la estructura luego de su instalación. Este sistema sirve de ayuda a la hora de evaluar y decidir las reparaciones a efectuar en estructuras donde se sabe o sospecha que hay problemas de corrosión en los cables. El objetivo es minimizar los gastos en reparaciones, a la vez asegurando la integridad estructural.

5.7 – Apoyo o refuerzo externo mediante armadura no tesa

Se pueden implementar refuerzos utilizando elementos no pretensados tales como acero estructural o vigas y columnas de hormigón armado. Si los requisitos arquitectónicos lo permiten, desde el punto de vista de los costos el método más efectivo para reforzar una estructura existente podría ser agregar un apoyo vertical permanente tal como una columna. Sin embargo, muchas estructuras no permiten la presencia de columnas adicionales y requieren alguna forma de refuerzo flexional (vigas principales y secundarias, o armadura externa adherente) que transfiera las cargas hasta las columnas existentes. Cuando se diseñan refuerzos no pretensados para que compartan las cargas con el sistema de piso existente (es decir, si los refuerzos se diseñan exclusivamente para la resistencia faltante y no para toda la resistencia flexional y al corte requerida del sistema de piso), el análisis y diseño se deberán realizar en base a la compatibilidad de las deformaciones para confirmar que las tensiones en el hormigón existente permanezcan dentro de los límites admisibles y/o que las flechas permanezcan dentro de los límites admisibles. Tesando previamente el sistema de refuerzo contra la estructura existente se puede hacer que contribuya a soportar las cargas permanentes existentes y las sobrecargas aplicadas, a la vez que se pueden reducir las flechas en el sistema. Para promover el compartir las cargas también se puede utilizar la acción compuesta entre los refuerzos y la estructura existente.

La instalación de refuerzos o apoyos externos no pretensados puede implicar grandes inconvenientes desde el punto de vista del uso de la construcción y, dependiendo del tipo y los detalles del sistema de refuerzo externo, puede hacer que sea necesario reubicar las tuberías, conductos y demás elementos utilizados por los servicios públicos.

5.8 – Demolición y reemplazo total

Los procedimientos de demolición para las construcciones postesadas (en su totalidad) son similares a los utilizados para las construcciones de hormigón no pretensado, aunque los mecanismos de colapso son diferentes. Los cables hacen que se genere una acción de catenaria significativa; esto puede ser beneficioso o perjudicial, dependiendo de los procedimientos y equipos utilizados.¹⁵

En general no es necesario ni aconsejable cortar los cables antes de comenzar la demolición, ya que los cables se pueden utilizar para ayudar a controlar los

colapsos. Habitualmente es necesario realizar un retiro selectivo de hormigón de partes de losas y vigas, además de debilitar los muros, cajas de escaleras y columnas. Algunas veces es necesario tomar precauciones para evitar que los cables rotos estallen y se proyecten a partir de los bordes de la estructura y dañen las propiedades adyacentes, pero algunos estudios indican que es improbable que esto ocurra en los sistemas monocordón.¹⁰ La proyección dependerá de muchos factores, tales como el tipo de vaina protectora, la condición y la cantidad de grasa presente y el perfil de los cables, entre otros. El potencial de que los cables escapen de la estructura se debería evaluar proyecto por proyecto.

CAPÍTULO 6 – RESUMEN

Durante los últimos 40 años los cables no adherentes se han convertido en una forma de armadura importante para las estructuras de hormigón. Los tipos de cables utilizados han ido variando en respuesta al reconocimiento por parte de la industria de la vulnerabilidad de los primeros cables frente a los daños provocados por la corrosión. A medida que se fue avanzando en el conocimiento de las causas de la corrosión, las especificaciones del PTI y ACI fueron modificadas de manera de incluir requisitos sobre los materiales, fabricación, instalación y detalles de diseño que protegieran a los cables contra el deterioro. Sólo se comenzaron a adoptar requisitos para mejorar la durabilidad de los cables no adherentes apenas hace diez años, cuando el PTI publicó su primera especificación detallada, y pasaron varios años hasta que este documento fue reconocido por la comunidad del diseño y la construcción. Las estructuras que se construyen con cables monocordón no adherentes utilizando grasa de mala calidad, vainas inadecuadamente llenadas con grasa, agua dentro de las vainas y un mal detallado de la protección contra la corrosión tienen mayor probabilidad de sufrir fallas de los cordones. El principal objetivo que motivó la preparación del presente documento fue la evaluación y reparación de estas estructuras no protegidas y en proceso de deterioro.

El tipo más común de cable no adherente que se ha utilizado durante los últimos treinta años son los cordones de siete alambres con anclajes consistentes en piezas fundidas y cuñas de dos piezas. Las técnicas para reparar estos cables son conocidas por muchos contratistas e ingenieros, al igual que el costo de realizar

estos trabajos. Aunque existen muchos métodos disponibles para evaluar la condición del hormigón y la armadura adherente en las estructuras postesadas, no hay ningún método disponible para cuantificar la debilitación que ha sufrido un cable no adherente a causa de la corrosión.

No todas las estructuras se pueden reparar de manera económicamente viable reemplazando todos o parte de los cables. Algunas veces la mejor solución consiste en despreñar los cables existentes y reemplazarlos por un sistema aplicado externamente. Este método se adapta para muchas circunstancias y se puede utilizar tanto para vigas como para losas.

La demolición total de la estructura es el último recurso disponible, cualquiera sea la estructura deteriorada. La decisión de demoler una estructura postesada sólo se debería tomar después de realizar una evaluación realista del estado del hormigón y la armadura adherente, no simplemente en base a una estimación de la condición de los cables.

CAPÍTULO 7 – REFERENCIAS

7.1 – Referencias recomendadas

El siguiente es un listado de los documentos producidos por diferentes organismos de normalización a los cuales se hace referencia en el presente documento. Debido a que algunos de estos documentos son revisados frecuentemente, se recomienda que el lector que desee consultar las últimas revisiones se contacte directamente con el organismo que los publica.

American Concrete Institute

- 201.1R Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service
- 201.2R Guide to Durable Concrete
- 222R Corrosion of Metals in Concrete
- 224R Control of Cracking in Concrete Structures
- 224.1 R Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures
- 318 Building Code Requirements for Reinforced Concrete
- 362 State-of-the Art Report on Parking Structures
- 362.1R Guide for the Design of Durable Parking Structures
- 364.1R Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to

- 423.3 Recommendations for Concrete Members Prestressed with Unbonded Tendons
- 437 Strength Evaluation of Existing Concrete Structures
- 546.1R Guide for Repair of Concrete Bridge Superstructures

ASTM

- B 117 Standard Test Method of Salt Spray (Fog) Testing
- C 597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete
- C 876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- D 4748 Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short Pulse Radar

Post-Tensioning Institute

- Field Procedures Manual
- Manual for Certification of Plants Producing Unbonded Single Strand Tendons
- Post-Tensioning Manual
- PTI Committee for Development of the Field Procedures Manual for Unbonded Single Strand Tendons Specifications for Unbonded Single Strand Tendons

Prestressed Concrete Institute

- PCI Post-Tensioning Manual (1° ed.)

Transportation Research Board

- NCHRP Syntheses No.140 Durability of Prestressed Concrete Highway Structures
- NCHRB Report 313 Corrosion Protection of Prestressing Systems in Concrete Bridges

Otras publicaciones

- Aalami, B. O. y Barth, F. G. (1989). "Controlled Demolition of an Unbonded Post-Tensioned Concrete Slab." Post-Tensioning Institute, Phoenix, Ariz.
- Aalami, B. O. y Swanson, D. T. (Feb. 1988). "Innovative Rehabilitation of a Parking Structure," *Concrete International*, V. 10, No. 2, 6 pp. Andrew, A. E. (1982). *Durability of Unbonded Tendons*, Federation Internationale de la Precontrainte, England.
- Crane, A. P. (1983). *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, Ellis Horwood Limited, Chichester.

Elices, M. (1982). "Durability of Prestressing Steel," *A Report of the Third Symposium on Stress Corrosion Cracking*, Federation Internationale de la Precontrainte, England.

Etienne, C. F. et al. (1981). "Corrosion Protection of Unbonded Tendons." Heron, The Netherlands, CURVB.

Falconer, D. W. y Wilson, P. W. (Feb. 1988). "Inspection of Unbonded Tendons," *Concrete International*, V. 10, No. 2.

Gibala, R. y Heheman, R. F., ed. (1984). *Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking*, American Society for Metals, Metal Park, Ohio.

Greenhaus, S. (Nov. 1996). "Parking Lot Corrosion Cure," *Civil Engineering*.

Halvorsen, G. T. y Burns, N. H., eds. (1989). *Cracking in Prestressed Concrete Structures*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

Kreijger, P. C. et al. (1977). *Stress Corrosion in Prestressing Steel*, Heron, Holanda.

McGuire, G. J. (1989). *Unbonded Post-Tensioned Construction the Canadian Perspective*, Post-Tensioning Institute, Phoenix, Ariz.

Novokshchenov, V. (Sept. 1989). "Condition Survey of Prestressed Concrete Bridges," *Concrete International*, V. 11, No. 9, 9 pp.

O'Neil, E. F. (Feb. 1977). "Durability and Behavior of Prestressed Concrete Beams; Post-Tensioned Concrete Beam Investigation with Laboratory Tests from June 1961 to September 1974," *Technical Report No. 6-570, Report 4*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Miss. (NTIS AD A038 444).

Peterson, C. A. (Mar. 1980). "Survey of Parking Structure Deterioration and Distress," *Concrete International*, V. 2, No. 3, 9 pp.

Poston, R. W. y Dalrymple, G. A. (Abr.-Mayo 1993) "Repairing Unbonded Post-Tensioned Concrete," *Concrete Repair Digest*, V. 4, No. 2, 4 pp.

Precast/Prestressed Concrete Institute (Jul.-Ag. 1993), "Guideline for the Use of Epoxy Coated Strand," *Precast/Prestressed Concrete Institute Journal*, V. 38, No. 4.

Rehm, G. (1982). "Relationship between Results of Stress Corrosion Tests and Practical Circumstances with Regard to the Sensitivity of Prestressing Steels," Federation Internationale de la Precontrainte, England.

Schupack, M. (Oct. 1978). "A Survey of the Durability Performance of Post-Tensioning Tendons," *ACI JOURNAL, Proceedings* V. 75, No. 10, 12 pp.

Schupack, M. (Feb. 1991). "Corrosion Protection for Unbonded Tendons," *Concrete International*, V. 13, No. 2, 8 pp.

Schupack, M. (1983). "Prevention of Failures Related to Corrosion of Post-Tensioning Tendon Systems in Concrete," Federation Internationale de la Precontrainte, England.

Schupack, M. y Suarez, M. G. (Mar.-Abr. 1982). "Some Recent Corrosion Embrittlement Failures of Prestressing Systems in the United States," *PCI Journal*.

Schupack, M. (Ag. 1980). "Behavior of 20 Post-tensioning Test Beams Subject to up to 2200 Cycles of Freezing and Thawing in the Tidal Zone at Treat Island, Maine," SP-65, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

Schupack, M. (Dic. 1982). "Protecting Post-tensioning Tendons In Concrete Structures," *Civil Engineering-ASCE*.

Schupack, M. (Julio 1988). "Unbonded Single Strand Post-Tensioning Tendon Details: How to Avoid Performance Problems," *Concrete Construction*.

Schupack, M. (Oct. 1989). "Unbonded Performance," *Civil Engineering*.

Schupack, M. (Oct. 1991). "Evaluating Buildings with Unbonded Tendons," *Concrete International*.

Schupack, M. y Schupack D. (Mar. 1992). "Non-Destructive Field Test for Concrete Leak Tightness," *Concrete International*.

Schupack, M. (Dic. 1994). "Unbonded Tendons-Evolution and Performance," *Concrete International*.

Suarez, M. G. y Poston R. W. (1990). *Evaluation of the Condition of a Post-tensioned Concrete Parking Structure after 15 Years of Service*, Post-Tensioning Institute, Phoenix, Ariz.

Tanaksa, Y. et al. (1988). *Ten Year Marine Atmosphere Exposure Test of Unbonded Prestressed Concrete Prisms*, Post-Tensioning Institute, Phoenix, Ariz.

Tracy, R.; Crower, S. y Zeort, K. (Junio 1991). "Evaluation of a Deteriorated Post-Tensioned One-Way Slab," *Concrete International*, V. 13, No. 6, 6 pp.

United States Department of Commerce, Bureau of Public Roads (1955). "Criteria for Prestressed Concrete Bridges," United States Government Printing Office, Washington, D.C.

Vander Velde, H. (Junio 1994). "Corrosion Testing and Rehabilitation of Unbonded Post-Tension Cables in 'Push-Through' or 'Heat Sealed' Sheaths," Prepared for

Seminar on Parking Garages, Technical University of Nova Scotia, Toronto, Canadá.

Wagh, V. P. (Oct. 1986). "Bridge-Beam Repair," *Concrete International*, V. 8, No. 10, 8 pp.

Williams, M. S. y Waldron, P. (Nov.-Dic., 1989). "Dynamic Response of Unbonded Prestressing Tendons Cut during Demolition," *ACI Structural Journal*, 9 pp.

Estas publicaciones se pueden obtener de las siguientes organizaciones:

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

ASTM
100 Bar Harbor Drive
West Conshohocken, PA 19428

Post-Tensioning Institute 1717 West Northern Avenue
Suite No. 218
Phoenix, AZ 85021

Precast/Prestressed Concrete Institute 175 West Jackson
Boulevard
Chicago, IL 60604

Transportation Research Board National Research
Council 2010 Constitution Avenue, NW Washington
DC 20418

7.2 – Referencias citadas

1. Nehil, T. E., "Rehabilitating Parking Structures with Corrosion-Damaged Button-Headed Post-Tensioning Tendons," *Concrete International*, Oct. 1991.

2. Schupack, M., "Corrosion Protection for Unbonded Tendons," *Concrete International*, Feb. 1991.

3. "Specification for Unbonded Single Strand Tendons," *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Post-Tensioning Institute, Phoenix, Ariz., Mar.-Apr. 1985.

4. Peterson, C. y Braunfield, A. H., "Our Experience with Prestressed Lift Slabs," World Conference on Prestressed Concrete, San Francisco, Calif., Julio 29-Ag. 3, 1957.

5. "Summaries of Post-Tensioning Industry Tonnage Statistics from 1965 through 1992." Post-Tensioning Institute, Phoenix, Ariz., 1992

6. Schupack, M., "Evaluating Buildings with Unbonded Tendons," *Concrete International*, Oct., 1991.

7. Lang, F. A., "Tendons for Prestressed Concrete and Process for Making Such Tendons," U.S. Patent No. 3,646,748, Mar. 1972.

8. Schupack, M. y Suarez, M. G., "Some Recent Corrosion Embrittlement Failure of Prestressing Systems in the United States," *PCI Journal*, Mar.-Abr. 1982.

9. Schupack, M., "Evaluating Buildings with Unbonded Tendons," *Concrete International*, Oct. 1991.

10. Aalami, B. O. y Barth, F. G., "Controlled Demolition of an Unbonded Post-Tensioned Concrete Slab." Post-Tensioning Institute, Phoenix, Ariz., 1989.

11. Freyermuth, C. L., "Structural Integrity of Buildings Constructed with Unbonded Tendons," *Concrete International*, Mar. 1989.

12. Suarez, M. G. y Schupack, M., "Evaluation of the Performance of Single Strand Unbonded Tendons in the Collapse of the L'Ambiance Plaza Lift Slab Building," Post-Tensioning Institute Project Report, Phoenix, Ariz., Abril 1988.

13. Nawy, E. G., "Stresses, Strains, and Bursting Cracks in Anchorage Zones of Post-Tensioned Beams," *Cracking in Prestressed Concrete Structures*, SP-113, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1989.

14. Elliott, J. F., "Monitoring Prestressed Structures," *Civil Engineering*, Julio 1996.

15. Chacos, G., "Demolishing a Post-Tensioned Parking Garage," *Concrete International*, V. 13, No. 10, Oct. 1991, pp. 44-46.