PATOLOGIA Y TERAPEUTICA DE LAS ARMADURAS ACTIVAS EN EL HORMIGON PRETENSADO

(STEELS FOR PRESTRESSING CONCRETE: THEIR PATHOLOGY AND THERAPEUTICS)

Manuel Elices Calafat, Catedrático de Ciencia de Materiales.
Departamento de Ciencias de Materiales.
Escuela de Ingenieros de Caminos. Universidad Politécnica.
28040-Madrid.

628-7

RESUMEN

En este artículo se comentan algunas enfermedades que pueden sufrir las armaduras activas a lo largo de su vida, su diagnóstico y la forma de curarlas. Para ello se contemplan tres etapas: la Prenatal, o etapa de fabricación del alambre trefilado a partir del alambrón. La etapa de Adolescencia, que es el período que va desde la fabricación hasta que el alambre empieza a trabajar, integrándose en el hormigón para comprimirlo. Y la tercera etapa, la de Madurez, que coincide con la etapa de servicio de la obra pretensada.

SUMMARY

Steels for prestressing concrete may have diseases along their life; its diagnosis and therapeutics are the subject of this paper. Three stages may be considered: Prenatal, where the steel wire is born from cold-drawing a suitable steel bar. Adolescence, the period from manufacturing to final stressing the concrete, and Maturity, the whole period of serviceability of the prestressed concrete structure.

INTRODUCCION

El acero que se utiliza para pretensar estructuras de hormigón es un material muy evolucionado, fruto de muchos años de experimentación de los artesanos metalúrgicos, y sólo ahora —a la luz de la Ciencia de los Materiales— empezamos a comprender y, a duras penas, mejorar las relaciones entre su fina microestructura y excelentes propiedades mecánicas.

La filosofía que se utiliza en el diseño de los modernos materiales compuestos —combinando la *resistencia* de un material frágil con la *plasticidad* de otro material dúctil para obtener un material, a la vez, resistente y dúctil— está presente en los aceros eutectoides formados por una delicada mezcla de cementita, dura y frágil, y ferrita, blanda y tenaz. Este acero, producto de una intuición cuyos orígenes deberíamos buscar en los aceros que se forjaron en Damasco o en Toledo, tam-

bién contiene a nivel microestructural la esencia del material con el que va a convivir; el hormigón armado. La cementita le da *fibra* y la ferrita *masa*, como diría Eduardo Torroja. Es como si nuestro acero, consciente del destino que iba a tener, quisiera identificarse microestructuralmente con el material que va a postensar.

En este artículo se pretenden comentar algunas experiencias del autor en relación con enfermedades que puedan sufrir las armaduras activas a lo largo de su vida y la forma de curarlas. Para ello se contemplan tres etapas; la *prenatal*, o etapa de fabricación del alambre trefilado a partir del alambrón. La etapa de *adolescencia*, que es el período que va desde la fabricación hasta que el alambre empieza a trabajar, integrándose en el hormigón para comprimirlo. Y la tercera etapa, la de la *madurez*, que coincide con la etapa de servicio de la obra pretensada.

El texto de este artículo corresponde al de una conferencia invitada con ocasión de COLLOQUIA 88.

1. ETAPA DE FABRICACION

Las características mecánicas de los tendones que van a pretensar el hormigón se consiguen seleccionando una familia especial de aceros (los aceros eutectoides y dentro de ellos los de perlita fina) y sometiendo a una deformación brutal. Durante esta etapa de *gestación* el acero sufre las mayores agresiones que experimentará a lo largo de su vida y sólo un accidente o una enfermedad contraída por la falta de protección del hormigón pueden ocasionar su rotura, si se exceptúan condiciones de trabajo anormales (como fatiga de gran amplitud o ambientes especialmente agresivos).

Las patologías que aparecen en esta etapa se diagnostican al examinar las roturas que pueden producirse durante el trefilado y a partir de los ensayos de control del producto terminado. La terapéutica a aplicar es distinta en cada caso, como se comenta a continuación.

1.1. Fabricación del alambre y patología asociada

El proceso central en la fabricación del alambre es el trefilado, que va acompañado de una etapa previa de preparación y de una etapa posterior de acabado y es posible asociar a cada etapa las patologías específicas que se comentan a continuación.

Antes de trefilar el acero es preciso dotarlo de una es-

tructura capaz de soportar las grandes deformaciones plásticas que sufrirá al pasar por la hilera. Para ello, conviene que la cementita —el componente frágil— sea lo más fina posible o, con más precisión, que la separación entre las láminas de cementita sea la menor posible (en la práctica se consigue que sea del orden de la décima de micra). Esta perlita fina tiene dos ventajas; por una parte, favorece la operación de trefilado y por otra, dota al alambroón de un mayor límite elástico, lo que permite obtener mayores resistencias a igualdad de trefilado.

Se ha comprobado que la resistencia de la perlita es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del espaciado entre las láminas de cementita y que el espaciado depende de la temperatura a que tiene lugar la formación de la perlita, cuanto menor es la temperatura más fina es la perlita. Esta transformación se consigue enfriando el alambroón en un baño de plomo fundido —proceso denominado *patentado*—. Los fabricantes de alambre, después de patentar durante un siglo y medio, pueden conseguir estructuras muy finas controlando la temperatura del baño de plomo y la velocidad del alambre que pasa a través de él. Cuando la temperatura, o la velocidad, no son las adecuadas puede producirse cementita gruesa que puede ocasionar roturas durante el trefilado.

El interés por aumentar el diámetro de los alambres trefilados y por abaratar el producto ha impulsado el de-

Figura 1. Artesano trefilando (s. XV) y moderna trefilería (2 km/minuto).

Figura 2. Patología del trefilado en función del ángulo de la hilera.

sarrollo de nuevos procedimientos para eliminar el proceso de patentado. En la actualidad ya se está trefilando sin patentar, cuando el alambón se obtiene por enfriamiento controlado en aire —conocido comercialmente por Stelmor—. Las temperaturas de transformación son algo superiores a las de patentado, pero la estructura todavía es lo suficientemente fina para permitir un buen trefilado.

La fase más crítica, en la etapa de gestación, es la de *trefilado*. En ella, el alambre —al pasar a través de una hilera— sufre una deformación brutal con objeto de aumentar, todavía más, su límite elástico y carga de rotura (Figura 1). Este fenómeno, conocido por endurecimiento por deformación, proporciona un incremento de la resistencia que crece exponencialmente con la deformación.

La deformación conseguida en el proceso de trefilado depende de la reducción de sección en la hilera y del ángulo del cono de la hilera. En la práctica se obtienen reducciones de entre el 60 y el 70 por ciento (se suele partir de alambón de 12 mm o de 9 mm de diámetro para acabar en alambres de 7 mm o 5 mm de diámetro respectivamente). Esta reducción no se hace de una sola vez, sino mediante varias hileras sucesivas. En este proceso influye en gran manera la fricción entre el alambre y la hilera y por este motivo se cuida muchísimo la preparación de la superficie del alambre y

su lubricación. La fuerza necesaria para trefilar el alambre depende de todos los parámetros que se han mencionado y el objetivo del fabricante es la optimización de todo el proceso. Las patologías surgen cuando alguno de estos parámetros se sale de los márgenes previstos y suelen manifestarse con roturas durante el trefilado (Figura 2).

La fase final de este proceso de gestación consiste en darle al alambre un acabado final y, en algunos casos, un envejecimiento prematuro. Raramente se utiliza en construcción un alambre simplemente trefilado porque suele enderezarse mal, la relajación es grande y presenta más dispersión en las propiedades mecánicas. Esta falta de madurez, debida en gran parte a las tensiones residuales ocasionadas durante el trefilado, se corrige con un tratamiento de *envejecimiento* artificial.

En primer lugar, el alambre sufre unos doblados alternativos que reducen y uniformizan las tensiones residuales (proceso que algunos fabricantes llaman pasar por el *purgatorio*). Después se le envejece, calentándolo durante un cierto tiempo a una temperatura suave. Como el alambre es un producto vivo (una estructura que no está en equilibrio), el aumento de la temperatura acelera los procesos térmicamente activables y se producen en menos tiempo reacciones que a temperatura ambiente tardarían más, de ahí el concepto de enveje-

cimiento artificial. En esta etapa se consigue eliminar, en parte, las tensiones residuales introducidas durante el trefilado y mejorar las propiedades mecánicas. En algunos casos este tratamiento térmico va acompañado de un tratamiento termomecánico —calentamiento y tracción— que tiene por objeto mejorar todavía más las propiedades mecánicas, en particular la relajación de tensiones y el autoenderezado. Este tratamiento final, llamado de baja relajación o de estabilizado, permite conseguir valores de la relajación por debajo del 2 % en los ensayos normalizados a 1000 horas (UNE 7.288). Las patologías asociadas a esta última fase no suelen manifestarse con roturas durante el proceso termomecánico final, pero aparecen en los ensayos de control de calidad.

1.2. Diagnóstico y terapéutica

El diagnóstico de las enfermedades del alambre suele hacerse durante el trefilado —si se producen roturas— o al final del proceso —en los ensayos de control de calidad—.

Durante el proceso de fabricación pueden producirse roturas cuando el alambre pasa por la hilera; si el análisis metalográfico posterior muestra una perlita gruesa, habrá que sospechar del patentado y ajustar la temperatura y la velocidad de enfriamiento del alambre. A veces, se producen roturas típicas en forma de punta de lápiz que pueden atribuirse a un defecto de la hilera o a segregaciones en el alambón. En la figura 2 se indica, de forma esquemática, cómo influye el ángulo del cono de la hilera en el trefilado del alambón y se muestra que, para una determinada reducción del diámetro, hay un intervalo de valores del ángulo para los cuales es de esperar que se produzcan defectos internos que causen roturas en forma de punta de lápiz. Cuando el ángulo es correcto, los defectos internos —generalmente carburos precipitados— tienen su origen en un enfriamiento defectuoso en la fase previa al trefilado y se ponen de manifiesto en un examen metalográfico. No se trata, aquí, de recopilar todas las causas de las roturas durante el trefilado. Los casos comentados sirven de muestra y basta destacar que las roturas pueden tener su origen en defectos congénitos del alambón (en la monografía Walzdrahtfehler, citada en la bibliografía, hay una buena muestra de ellos) o en defectos de trefilado (excesiva reducción, ángulo del cono incorrecto, mala lubricación y otras causas que se analizan, por ejemplo, en el manual editado por Dove).

Los ensayos para el control de calidad proporcionan nuevos datos para diagnosticar el estado de salud del recién nacido. Aunque cada fabricante tiene sus procedimientos para el control de calidad, hay ensayos normalizados que se utilizan para la homologación de los

alambres; el ensayo de tracción (UNE 7.194), el de doblados alternativos (UNE 7.401) y el de relajación (UNE 7.288). En determinadas circunstancias conviene realizar ensayos adicionales de torsiones alternadas, de fatiga axil o de corrosión bajo tensión, cuyo alcance comentaremos más adelante. (Un breve análisis de las roturas producidas mediante estos ensayos se ha descrito en un trabajo anterior, M. Elices, 1985.)

El ensayo de tracción, aparentemente simple, aporta bastante información sobre el comportamiento mecánico del alambre; proporciona el módulo de elasticidad, el límite elástico convencional (los alambres trefilados no tienen un escalón de cedencia), y la carga de rotura.

Todos estos valores son muy repetitivos. La ductilidad, medida como alargamiento bajo carga máxima (sobre una base convencional) o mediante la estricción después de la rotura, es un parámetro que presenta más dispersión porque es más sensible a los defectos que los parámetros anteriores. Durante el ensayo de tracción tanto los defectos superficiales como los interiores (inherentes al alambón o producidos durante el trefilado) favorecen la iniciación de inestabilidades (deformaciones plásticas localizadas) que ocasionan roturas prematuras y, por consiguiente, menos dúctiles. En estos casos, un análisis metalográfico puede indicar el origen de estos defectos. El registro de la curva carga-desplazamiento es otro indicador del estado de salud; un tramo inicial recto, una relación límite elástico/carga de rotura entre 0,85 y 0,90 y un alargamiento superior al 6 % (sobre una base de 10 diámetros) son buenos datos para un chequeo inicial. También puede detectarse en la curva carga-desplazamiento, concretamente en la zona preplástica, si el tratamiento final de eliminación de tensiones no es correcto.

El ensayo de doblado alternativo es una medida, tecnológica, de la ductilidad y es bastante sensible a los defectos superficiales. Mientras en un ensayo a tracción la piel del alambre no llega a extenderse más del 10 %, en un ensayo de doblado puede llegar al 50 %.

El ensayo de torsión alternativa también refleja los defectos superficiales y la bondad del tratamiento de eliminación de tensiones residuales. La forma de rotura (fisura longitudinal, transversal o helicoidal) es importante, en particular cuando el alambre se va a utilizar en un cable. Los alambres que se abren longitudinalmente en un ensayo de torsión son más propensos a fisurarse si en el cable tienen que soportar esfuerzos laterales.

El ensayo de relajación es un índice de la capacidad del alambre para movilizar mecanismos de deformación plástica (V. Sánchez Gálvez y M. Elices, 1976 y 1986). Durante el tratamiento termomecánico final, destina-

do a disminuir la relajación, se pretende agotar la mayor parte de estas reservas deformando plásticamente el alambre a una temperatura adecuada. El resultado de este ensayo muestra la bondad de este tratamiento y permite estimar la tensión de la armadura activa a largo plazo.

Cuando un alambre supera los valores mínimos exigidos en estos ensayos se le considera apto para pretensar hormigón en condiciones normales. Dicho en los términos de este artículo; si el alambre supera el chequeo, se puede asegurar que no padece ninguna enfermedad que le impida llevar una vida normal. Sólo si pretende trabajar en condiciones muy duras —fatiga o en ambientes agresivos— conviene realizar una exploración complementaria para saber si durante el trefilado se han producido lesiones de menor importancia que puedan afectar este tipo de vida (pequeños defectos superficiales o han quedado tensiones residuales importantes). Los ensayos de fatiga y de corrosión bajo tensión no suelen realizarse de forma rutinaria en el control de calidad.

2. ETAPA DE CONSTRUCCION

El tendón recién nacido —alambre o cable— se almacena, se transporta a la obra, se almacena de nuevo y, finalmente, se incorpora al hormigón —pretensándolo o postensándolo—. A toda esta etapa le podemos llamar de *adolescencia* o, de una forma general, etapa de la construcción de la obra, para distinguirla de las etapas de fabricación del alambre y de la etapa de mantenimiento de la obra. Como en todo organismo, la respuesta a la agresión externa será distinta según que el alambre esté sano o tenga una salud delicada. Mediante ensayos específicos es posible diagnosticar la predisposición de un tendón a ciertas agresiones externas y, en consecuencia, establecer una terapéutica adecuada, como se comenta a continuación.

2.1. Patología de la adolescencia

Las patologías propias de este período de juventud son las que pretendemos reflejar en este apartado. Para facilitar su descripción las agruparemos en patologías de *origen ambiental* y patologías por *daño mecánico*.

Las variaciones de *temperatura* no parecen afectar al comportamiento de los tendones, excepto en el caso extraordinario de un incendio (véase, por ejemplo, CEB, 1982). Si la temperatura supera los 200° C pueden empezar a producirse daños irreversibles en la microestructura del acero trefilado que afectarán al límite elástico, a la carga de rotura y a la relajación. Las bajas temperaturas no merman las propiedades del acero (M. Elices y otros, 1982; M. Elices, 1985), solamente

Figura 3. Una protección insuficiente durante la etapa de la adolescencia puede ocasionar problemas en la etapa de la madurez.

en aquellos casos en que los tendones estén coaccionados y sean distintos los coeficientes de dilatación de la coacción y del tendón pueden generarse esfuerzos importantes, pero esta situación es muy poco probable.

La agresión más temida del medio ambiente es la corrosión (Figura 3). La corrosión puede actuar de varias formas; corrosión generalizada, corrosión en forma de picaduras y corrosión fisurante bajo tensión. Las dos últimas son particularmente peligrosas porque pueden pasar inadvertidas y provocar roturas frágiles.

El ataque en forma de *picaduras* puede ser debido a una aireación diferencial localizada (en un defecto o en una fisura de la capa protectora), también a la presencia de corrientes eléctricas (producidas, por ejemplo, en las operaciones de soldadura), e incluso por acción bacteriana (ciertas bacterias anaeróbicas pueden estimular la reacción catódica utilizando el hidrógeno liberado en estas áreas durante su metabolismo). Los dos últimos tipos de corrosión por picadura pueden producirse debajo de la capa protectora. Corrosión de los dos primeros tipos se ha producido en tendones de reactores nucleares y hay referencias que lo documentan (Blackie, A.D., 1971; Handcock, M.G., 1971; Hildebrand, J.F., 1975; Fountain, M.J. et al., 1975; Kajfasz, S. y Zielinski, J.L., 1976). Durante la construcción de las vasijas de la estación Dungeness B se detectó, por primera vez en reactores nucleares, una importante corrosión por picaduras en los tendones antes del teso. Una minuciosa investigación sobre la fabricación de los tendones, protección y operaciones durante la instalación indicaron que la causa principal fue la presencia de corriente continua (producida durante las operaciones de soldadura) en un ambiente húmedo. La presencia de sales (cloruros, principalmente) procedentes de la atmósfera y de sulfonatos procedentes de la grasa, aceleraron el proceso (Blackie, A. D., 1971; Handcock, M.G., 1971). En la estación de Wylfa también se detectó corrosión en forma de picaduras similar a la descrita durante la inspección de los tendones en 1971

(Fountain, M.F. et al., 1975). Algunas picaduras alcanzaron varias décimas de milímetro de profundidad y se encontraron cloruros en su interior. Parece ser que el proceso fue debido a la acción combinada de sales (cloruros, principalmente) procedentes de la atmósfera marina y de un alto grado de humedad relativa. En estas condiciones (humedad mayor del 70 por 100) las sales pueden atravesar la grasa protectora y alcanzar una concentración para la que el inhibidor deja de ser eficaz y por lo tanto iniciar la corrosión por picaduras. Estas experiencias inglesas han servido para redactar unas recomendaciones recogidas en la BS 4975.

El otro tipo de corrosión mencionado, la *fisuración por corrosión bajo tensión*, es una forma de corrosión muy localizada debida al efecto sinérgico de un medio agresivo y un adecuado nivel tensional. Se trata de un problema complejo del que sólo se conocen algunos aspectos. Un resumen de la situación puede verse en M. Elices (1983), donde, además, se analizan algunas roturas atribuidas a la corrosión bajo tensión en un intento de revelar aspectos comunes a todas ellas y relacionarlos con los trabajos realizados en los laboratorios. Las roturas atribuidas a la corrosión bajo tensión en la etapa de construcción son escasas; U. Nurnberger (1980) cita algunas roturas «espontáneas» en rollos de alambre producidas durante el almacenamiento. En estos casos el ambiente agresivo fue, probablemente, la humedad y la presencia de cloruros y el estado tensional excesivo se originó por la actuación conjunta de las tensiones de incurvación y tensiones residuales producidas durante la fabricación. Estas roturas son difíciles de explicar si no se atribuyen a la corrosión bajo tensión, porque estos aceros son muy tenaces y fisuras importantes (alrededor de 1 mm de profundidad en un alambre de 7 mm de diámetro) pueden pasar inadvertidas después de un tesado inicial al 75 por ciento de la carga de rotura. Conviene destacar que esta patología corresponde a aceros que no se han fabricado por trefilado y que ya no se utilizan comercialmente (se trata de antiguos aceros producidos por laminación en caliente, templados y revenidos).

La patología de las armaduras activas, en la etapa de construcción, debida a *daño mecánico* es bien conocida. Durante el transporte y la colocación de las armaduras se puede dañar su piel y la valoración del daño depende de las acciones que va a soportar el tendón en el futuro. En situaciones normales, la gravedad de los defectos superficiales se comprueba en el momento del tesado —que es cuando el tendón soporta la mayor tensión previsible—. Es más, el tesado inicial puede producir un efecto beneficioso, similar al de la prueba de presión que se hace en tuberías metálicas, y que consiste en plastificar el fondo de las pequeñas fisuras haciéndolas menos peligrosas frente a una sobrecarga. Esta ventaja se ha comprobado en alambres que posteriormente han de trabajar a muy bajas tem-

peraturas (M. Elices, 1985, p. 253). Cuando el tendón va a estar sometido a fatiga, o el ambiente que le rodea es agresivo, o ambas cosas a la vez, los pequeños defectos superficiales —que pasan inadvertidos en el momento del tesado— pueden ocasionar problemas a largo plazo.

De entre las diversas formas de daño mecánico que se pueden originar durante la construcción, las roturas en los anclajes (producidas por un sistema de sujeción defectuoso) son las más frecuentes. En general, no se trata de una enfermedad del tendón sino de una agresión brutal de la que no se salva un tendón, por muy sano que esté. Otra forma de agresión es la producida por el trefilado *in situ* que sufre el alambre en el sistema de pretensado circunferencial utilizado en estructuras cilíndricas —depósitos y tuberías—. Como es bien sabido, la tensión en el alambre se consigue arrollándolo sobre la estructura mientras pasa a través de una hilera. En obra es muy difícil controlar el trefilado con la precisión que se hace en fábrica (lubricación y estado de la hilera, velocidad y tracción del carro, etc.). En estas circunstancias no es de extrañar que se produzcan roturas durante el tesado, o al poco tiempo, debido a daños localizados provocados por el sistema constructivo. De nuevo, no se trata de una enfermedad del alambre, sino de heridas producidas por una agresión, aunque para este tipo de pretensado se utilice un alambre sin tratamiento térmico (o con un tratamiento de inferior calidad) porque el trefilado en obra elimina las mejoras finales introducidas en fábrica.

DIAGNOSTICO Y TERAPEUTICA

El diagnóstico y la posible terapéutica en la etapa *adolescente* de las armaduras activas queda reducido a la detección de la susceptibilidad a la corrosión y a la fatiga. Tanto la resistencia, como la ductilidad y la relajación, deben estar garantizadas por el fabricante y comprobadas en obra en los ensayos de control de calidad y, en este sentido, el alambre debe gozar de buena salud. A las heridas que pueda sufrir durante el almacenamiento, transporte y puesta en obra, ya se ha hecho referencia anteriormente.

Cuando se sospecha que el acero trabajará en un ambiente agresivo es conveniente diagnosticar la susceptibilidad del acero en este ambiente. El detalle de este estudio depende de la importancia de la obra, en casos extremos conviene realizar ensayos dinámicos, a distintas frecuencias, en el medio agresivo porque se ha comprobado que esta situación es más desfavorable que los ensayos estáticos de corrosión bajo tensión (véase, por ejemplo, M. Elices y V. Sánchez-Gálvez, 1988). Cuando esto no es posible, por falta de medios o porque el medio ambiente no se conoce bien, se pue-

de recurrir a ensayos inespecíficos que ponen de manifiesto algunas debilidades del acero —concretamente, la presencia de pequeños defectos o de tensiones residuales superficiales de tracción— que podrían mermar su capacidad resistente.

La FIP ha propuesto un ensayo (FIP-78) basado en el convencimiento de que las roturas en los aceros de pretensado son debidas a la fragilización por hidrógeno. Un análisis del alcance de este ensayo puede verse en otro artículo (M. Elices, 1983) donde se concluye que debe considerarse como un ensayo de control, relativamente simple y reproducible. El ensayo FIP-78 permite detectar la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno de un acero en el estado de utilización y, por tanto, controlar la calidad superficial de unas partidas o la regularidad de un suministro. Otro aspecto es la fijación de unos límites admisibles para el valor medio del tiempo de rotura. Un acero con un tiempo de rotura grande no garantiza una inmunidad a la corrosión bajo tensión cuando esté desprotegido. Por otra parte, es sabido que aceros extraídos de obras que han presentado problemas de corrosión han proporcionado tiempos de rotura (alrededor de veinte horas) similares a los que se obtienen con aceros generalmente aceptables para la construcción pretensada. En este sentido, el rechazo de una partida de aceros, en base únicamente al ensayo FIP-78, carece de fundamento excepto cuando se obtengan tiempos de rotura muy cortos (por ejemplo, menos de cinco horas, por fijar una cifra orientativa). En estas circunstancias es aconsejable realizar un estudio de las tensiones residuales o de posibles defectos superficiales.

La terapéutica recomendada en la etapa de construcción frente a la corrosión, y en particular frente a la corrosión bajo tensión de las armaduras activas es *preventiva*:

- Extremar las precauciones durante el transporte (con una protección adecuada), almacenamiento (además de protección, procurar que la humedad relativa sea lo menor posible) e instalación (que las vainas estén limpias, sin agua y protegerlas hasta el tesado e inyección).
- Evitar las corrientes eléctricas. Si es posible, planificar las operaciones de soldadura antes de introducir los tendones en las vainas. Cuando no sea posible, canalizar la corriente a través de zonas más conductoras y utilizar corriente alterna, si se puede. El efecto de las corrientes eléctricas se ha tratado en una monografía de la FIP (J. T. Harvey y J. W. Boom, 1980).

Antes de aplicar los recubrimientos protectores, limpiar cuidadosamente la superficie de los tendones. Las grasas deberán cumplir una serie de especificaciones, como las indicadas en las normas ASME/ACI o BS 4975.

En particular, cuanto menos higroscópicas mejor, no deben emulsionarse, deben evitarse los sulfonatos como inhibidores, las cantidades de cloruros, sulfuros y nitratos solubles en agua no excederán de 10 ppm y deben permanecer estables durante la vida estimada de la obra.

La eficacia de los medios de protección temporal es difícil de evaluar porque, en general, son productos mal definidos, conocidos mediante nombres comerciales, y resulta difícil controlar la influencia de los distintos componentes. Puede conseguirse información sobre este tema a partir de los trabajos publicados en los distintos simposios de la FIP y en las referencias que figuran en ellos; de todos modos, el mejor procedimiento consiste en realizar ensayos comparativos con los productos disponibles. Los resultados de una campaña de ensayos con este propósito —con productos disponibles en España—, se han publicado en una serie de artículos (V. Sánchez-Gálvez y otros, 1981, 1982, 1983). Un ejemplo que sirve de contrapunto a los accidentes mencionados en el primer capítulo y que muestra que con una protección eficaz los riesgos de corrosión bajo tensión son mínimos es el de una estructura pretensada cuya construcción se suspendió durante dos años (V. Sánchez-Gálvez y M. Elices, 1981). Algunos tendones se tesaron, pero no llegaron a inyectarse durante este período. La adecuada protección de los anclajes y de las vainas evitó la aparición de la fisuración por corrosión bajo tensión, aún cuando la estructura estaba situada en un ambiente ligeramente marino. En estos momentos, casi diez años después, la obra está terminada y funciona satisfactoriamente.

Cuando el tendón va a estar sometido a *cargas oscilantes*, debe diagnosticarse su resistencia a la fatiga. Hay propiedades —como el módulo de elasticidad, el límite elástico o la carga de rotura— que son poco sensibles a pequeñas variaciones en la estructura del acero, mientras que otras —resistencia a la fatiga o a la corrosión bajo tensión— sí lo son. Por este motivo, los fabricantes tienen menos dificultades en garantizar un valor del límite elástico o de la carga de rotura que en conseguir el suministro de varias partidas con la misma resistencia a la fatiga. La dispersión de los ensayos tradicionales de fatiga, o de corrosión bajo tensión, refleja este hecho (M. Elices, 1987).

El diagnóstico de la resistencia a la fatiga debe hacerse mediante ensayos de fatiga axil normalizados. Estos ensayos presentan dos tipos de dificultades: las propias del ensayo y las que se generan al fijar los requisitos. Las principales dificultades del ensayo suelen estar en conseguir un sistema de sujeción que no dañe la probeta, porque de lo contrario lo que se mide es la resistencia a la fatiga del conjunto probeta-anclaje (véanse, por ejemplo, los resultados del artículo de M.

Figura 4. Influencia del daño producido por los anclajes en la vida de un tendón sometido a fatiga (M. Elices y V. Sánchez-Gálvez, 1977).

Elices y V. Sánchez-Gálvez, 1977b) (Figura 4). Otra dificultad adicional, cuando se ensayan cables, es el giro del anclaje en cada ciclo; en algunos ensayos se prescribe que el cabezal no gire, mientras que en otros se especifica que debe girar libremente. Los requerimientos —número de ciclos, amplitud y valor medio— plantean dificultades de otra índole, porque no suele conocerse con precisión qué historia de cargas deberá soportar el tendón en cada caso.

La terapéutica en estas circunstancias es delicada porque si los ensayos de fatiga dan valores por debajo de los especificados el alambre debe rechazarse aunque se dude, por los motivos antes comentados, de la representatividad de las especificaciones. Por otra parte no es posible poner en práctica una terapéutica preventiva —como en la corrosión— por razones obvias. En caso de duda puede procederse a un refuerzo estructural que alivie las tensiones del tendón para que pueda soportar las cargas de fatiga prudentemente minoradas.

En todas estas situaciones —fatiga, corrosión bajo tensión y corrosión fatiga— la forma de estimar la vida del tendón es utilizando las técnicas de la Mecánica de la Fractura (véase M. Elices, 1988, por ejemplo).

3. ETAPA DE SERVICIO

En esta etapa el tendón ha alcanzado su madurez. Después del último tesado el acero se aísla del exterior —protegido dentro de las vainas en las estructuras postensadas y arropado por el hormigón en las pretensadas—. A partir de este momento, el tendón y el hormigón dependerán el uno del otro. Si el tendón deja de comprimir al hormigón, éste se fisurará dejando al acero en contacto con el ambiente exterior. El hormigón es un material hecho para trabajar a la intemperie pero el acero no. En determinadas condiciones el acero se recubre de una delgada capa de óxido protector y hasta es capaz de cicatrizar algunos rasguños, pero basta la presencia, en pequeñas cantidades, de iones agresivos (el del cloro, por ejemplo), una variación en

la acidez del medio o en su potencial eléctrico, para que pierda esta propiedad y se corroa. El deterioro de los tendones conduce a una pérdida del pretensado que ocasiona una mayor fisuración del hormigón y el ciclo se reanuda.

En las estructuras pretensadas, la corrosión de las armaduras no es la única patología de la *etapa adulta* pero sí la más importante. A lo largo de la vida de la estructura pueden sobrevenir accidentes —sobrecargas o incendios— que le producirán heridas pero, de la misma forma que los accidentes no se consideran una enfermedad, no trataremos aquí de este tipo de daños. No obstante, igual que después de recuperarse de un accidente pueden quedar secuelas que le hagan más vulnerable a ciertas enfermedades, consideraremos aquellas patologías que se puedan derivar de un accidente y que acaben mermando la capacidad protectora del hormigón.

3.1. Patología de la madurez

Uno de los ejemplos más claros de la patología en esta etapa es el de las roturas de forjados pretensados en aparcamientos (M. Schupack y M. Suárez, 1981) y los problemas detectados en los tableros y vigas de algunos puentes pretensados (U. Nurnberger, 1980; J. M. Morera, 1987). Estas roturas se han atribuido a la presencia de cloruros provenientes de distintos productos utilizados para impedir la formación de hielo en los pavimentos. En el caso de los aparcamientos, los cloruros habían sido arrastrados por los neumáticos de los vehículos. El efecto de los cloruros en los aceros es bien conocido porque provocan la rotura de la capa pasiva e inician una forma de corrosión localizada, llamada corrosión por picaduras. Cuando el acero está sometido a tensión las picaduras actúan como pequeñas entallas, concentrando las tensiones a su alrededor y favoreciendo la iniciación de los procesos de corrosión bajo tensión.

Las secuelas de accidentes pueden disminuir las defensas —la protección— de los tendones; un incendio, por ejemplo, puede producir un calentamiento del alambre que reduzca la eficacia del tratamiento termomecánico del trefilado, disminuir el límite elástico, la carga de rotura y aumentar las pérdidas por relajación. Al disminuir la fuerza del pretensado aumenta el riesgo de fisuración del hormigón y, en consecuencia, su capacidad protectora. Estas situaciones, por buscarles una semblanza médica, equivaldrían a las patologías que aparecen en la edad adulta como consecuencia de accidentes —açaecidos en la juventud—, pero que no se les suele dar la importancia que merecen a su debido tiempo.

Otras veces, la capacidad protectora no se pierde como consecuencia de un accidente sino lentamente con

el tiempo, como si se tratara de una enfermedad; un detalle mal concebido en el proyecto, o ejecutado defectuosamente, puede ir deteriorando el recubrimiento protector del hormigón. Un desagüe mal concebido puede ser la causa de la contaminación por cloruros de las armaduras activas en los aparcamientos o en los tableros de los puentes. También se encuentran patologías que provienen de incompatibilidades entre los materiales, lo que los médicos conocen por rechazo.

Por ejemplo, un cajetín de un anclaje sellado con materiales con un coeficiente de dilatación distinto al del hormigón, puede fisurarse y convertirse a la larga en un depósito de humedad y crear problemas de corrosión en los anclajes. Un último ejemplo —quizás, el más apropiado para este artículo por tratarse de una verdadera infección— es el posible ataque al hormigón, y también al acero, por bacterias; bacterias que transforman el ácido sulfhídrico en sulfatos, bacterias reductoras de los sulfatos y la denominada bacteria del hierro (véase el libro Biczok, o la monografía de la Metals Society sobre corrosión microbiana).

Aunque la patología más importante de esta etapa derive de la falta de protección de los tendones, para terminar este apartado conviene resaltar que las roturas por corrosión bajo tensión son escasas. Durante el tercer simposio de la FIP se presentó un resumen de 242 roturas ocurridas en los últimos treinta años (U. Nurnberger, 1981). Los accidentes se refirieron a todo tipo de estructuras pretensadas y con cualquier tipo de aceros: aceros trefilados, templados y revenidos, barras y cables. En todas ellas concurren múltiples causas, siendo la más frecuente la falta de protección de los tendones (alrededor del 90 % en las estructuras pos-

tesadas y del 60 % en depósitos y tuberías). Estos resultados coinciden con los del informe CUR, realizado diez años antes, donde tampoco se puede deducir que todas las roturas sean debidas a la corrosión bajo tensión. Aunque ésta haya desempeñado un papel importante en algunos casos, con frecuencia las roturas aparecen asociadas con otras formas de corrosión. La principal conclusión del referido simposio fue que «el análisis de los accidentes presentados demostraron que si una estructura está bien proyectada y bien construida no se pueden dar las condiciones necesarias para que se produzcan roturas por corrosión bajo tensión» (M. Elices y V. Sánchez-Gálvez, 1982).

3.2. Diagnóstico y terapéutica

En esta etapa resulta conveniente distinguir entre diagnóstico preventivo (chequeo rutinario, podríamos llamarlo) y diagnóstico después de un accidente (chequeo después de una enfermedad). Además, dentro del diagnóstico preventivo se tratarán por separado las estructuras postensadas con tendones no adherentes de las tensadas con armaduras adherentes.

Los *tendones no adherentes* suelen utilizarse para facilitar la inspección y, en estos casos, siempre hay tendones redundantes. El ejemplo más característico es el edificio de contención de un reactor nuclear (M. Elices y V. Sánchez-Gálvez, 1977). Durante las inspecciones rutinarias se buscan síntomas de corrosión en las armaduras ya que ésta es la posible enfermedad en este tipo de tendones, si se exceptúan los fallos en los anclajes, los defectos de proyecto o una ejecución de-

Figura 5. Situaciones que pueden originar problemas de corrosión con armaduras no adherentes.

Figura 6. Situaciones que pueden originar problemas de corrosión con armaduras adherentes.

ficiente. En la monografía de C. Etienne y otros (1981) hay bastante información sobre la forma de establecer un diagnóstico del estado de los tendones, vainas, grasas protectoras y anclajes, y en la figura 5 se muestran varias situaciones que pueden originar problemas de corrosión con armaduras no adherentes.

Cuando se utilizan *tendones adherentes* la inspección se justifica si hay sospechas de corrosión en las armaduras. La falta de protección suele manifestarse por la aparición de fisuras, desconchados en el recubrimiento o por manchas de óxido que afloran a la superficie del hormigón. En estructuras de hormigón armado es posible cuantificar la importancia de la corrosión en ensayos no destructivos midiendo la resistividad de las armaduras (por ejemplo, utilizando las técnicas puestas a punto por M. Andrade y colaboradores). En estructuras pretensadas, donde los alambres de los tendones pueden haberse roto sin apenas signos visibles de corrosión, es preciso descarnar los tendones y evaluar el daño directamente. Si se detectan múltiples roturas y no es evidente que el tendón haya quedado desprotegido —situación muy poco frecuente— conviene extraer muestras del alambre y realizar ensayos de corrosión bajo tensión en un laboratorio especializado. En la monografía de la ATEP HP6.83 se da información detallada de cómo realizar la inspección y el diagnóstico en una obra pretensada y, en particular, de las armaduras activas. Conviene resaltar en es-

tos casos la importancia de la inspección visual y para ello —como resalta la citada monografía— hace falta: poder ver, saber ver y saber lo que se quiere ver. En la figura 6 se resumen varias situaciones que pueden originar problemas de corrosión con este tipo de armaduras.

Un caso extravagante de inspección y diagnóstico es la detección de fisuras en hormigones sumergidos en el mar, citado en CUR (1987), y mencionado aquí como ejemplo de la aplicación de técnicas sofisticadas de ensayos no destructivos. Como ya se ha indicado, la presencia de grietas en el hormigón hace sospechar que las armaduras puedan estar corroidas. La anchura y la profundidad de las grietas en el hormigón se determinan, respectivamente, mediante microscopía acústica y detectando la intensidad de las ondas superficiales (ondas de Rayleigh). Las medidas se realizan con un manipulador hidráulico que opera por control remoto.

Cuando se trata de diagnosticar el estado de un tendón después de una enfermedad, por ejemplo, un incendio, lo más directo es estudiar una muestra representativa del alambre siempre que ello sea posible. A partir de un ensayo de tracción se pueden conocer sus características mecánicas (límite elástico, carga de rotura y alargamiento) y, además, la capacidad para relajar tensiones en el futuro. Aunque es deseable, si se

dispone de suficientes muestras, hacer ensayos directos de relajación de tensiones, es posible estimar estos valores a partir del ensayo de tracción utilizando un modelo desarrollado por V. Sánchez-Gálvez y M. Elices (1976, 1984 y 1986). Este modelo también permite predecir la relajación cuando la temperatura del tendón varía con el tiempo (V. Sánchez-Gálvez, M. Elices, A. Erdelyi y M. Kosiorek, 1977) e incluso cuando la temperatura varía a lo largo del tendón, situación que se puede dar en un incendio o en puentes sometidos a fuertes variaciones de temperatura (Sánchez-Gálvez, V. Elices, M. y Llorca, J., 1988).

La terapéutica aconsejable en esta etapa de madurez también depende del tipo de tendón utilizado:

— Para *tendones no adherentes*, la citada monografía (C. Etienne y otros, 1981) señala, una vez más, que la terapéutica consiste en eliminar la humedad y da recomendaciones para conseguirlo mediante grasas de calidad, vainas impermeables y anclajes bien proyectados. Estas recomendaciones están basadas en cinco años de investigaciones. Otra serie de recomendaciones (similares a las mencionadas en la etapa de adolescencia) van dirigidas a las grasas para evitar que tengan componentes peligrosos para el acero.

— En *tendones adherentes* la terapéutica que debe aplicarse, cuando el diagnóstico es corrosión, es simple; limpieza de la zona afectada, refuerzo del tendón —si es necesario— y una protección más eficaz de la zona. Esta protección incluye, además del recubrimiento del tendón, las reformas necesarias para evitar que la agresión se repita en el futuro; si la causa ha sido la contaminación por cloruros en los tableros y vigas de puentes, por ejemplo, cambiando la situación de los desagües (J.M. Conde-Salazar, 1987), o rediseñando los anclajes, de acuerdo con las normas anteriormente mencionadas, si la humedad ha penetrado hasta ellos.

Otras indicaciones terapéuticas —reparaciones y refuerzos— se indican en la monografía de la ATEP HP6.83, especialmente en el capítulo 3.3.3.

La protección catódica, utilizada para impedir la corrosión, es una terapéutica polémica en las obras pretensadas. Por el contrario, en las estructuras de hormigón armado la protección catódica se ha mostrado muy eficaz, como reflejan muchas publicaciones (una buena fuente de referencias es la publicación de la AASHTO, 1985, citada al final). El temor que se tiene cuando se pretende aplicarla a las armaduras activas es el riesgo de que rompan por fragilización por hidrógeno. Este temor está basado en dos observaciones: la primera es que los aceros utilizados —aceros de alta resistencia— son susceptibles a la fragilización por hidrógeno (de ello hay numerosas pruebas, basta revisar los trabajos de los congresos sobre fragilización por hidrógeno, ver P. Azou 1982, por ejemplo), y la segunda observación

es que los potenciales utilizados para la protección catódica permiten la descarga de hidrógeno sobre la superficie del acero. Por otra parte, los defensores de la protección catódica argumentan que hay obras pretensadas protegidas de esta manera y no se han roto (D. Spector, 1964; B. Henze, 1965; W. Scannell y W. Hartt, 1987, por citar algunas). Esta postura se puede contrarrestar presentando numerosos ensayos, realizados en laboratorio en condiciones realistas, con aceros de pretensado en una gran variedad de medios (que van desde medios ácidos hasta agua destilada, pasando por agua de mar) en los que se producen roturas bruscas por fragilización por hidrógeno [véanse, por ejemplo, algunos trabajos realizados en el Departamento de Ciencia de Materiales; K. McGuinn y M. Elices (1981), R.N. Parkins y otros (1982), M. Elices (1983), V. Sánchez-Gálvez y M. Elices (1984), A. Martín y V. Sánchez-Gálvez (1988), en todos ellos se producen roturas debidas a polarización catódica en *condiciones que se pueden dar en la práctica*]. Ambos resultados no son contradictorios. En el laboratorio se fuerza la entrada del hidrógeno amplificando el estado tensional (con probetas fisuradas) y favoreciendo la absorción del hidrógeno adsorbido. En las obras las armaduras que están protegidas catódicamente y no han roto es porque el hidrógeno no ha penetrado (o la cantidad que ha penetrado es pequeña) y no se ha producido fragilización. El argumento, que a veces se da, de que las probetas sometidas a protección catódica y posteriormente ensayadas hasta rotura tienen la misma ductilidad que las probetas sin proteger no es válido porque, en muchos casos, la penetración del hidrógeno es reversible y en el momento del ensayo la concentración de hidrógeno puede ser muy pequeña. De todos modos, el hecho de que en el laboratorio se hayan producido roturas, en circunstancias que pueden darse en la obra, debe invitar a la reflexión a los entusiastas de la protección catódica.

CONCLUSION

El acero de los tendones es un material «noble», como lo califican los que lo trefilan, y además hemos visto que es un material sano y fuerte. Las peores agresiones las sufre durante la gestación y, si llega a nacer, difícilmente caerá enfermo a lo largo de su vida si cuenta con la protección del hormigón. La mejor terapia que se puede recomendar en estos casos es la preventiva y así lo reconocen las normas y recomendaciones citadas.

Quedan problemas por resolver y la fragilización por hidrógeno, que amenaza a todos los aceros de alta resistencia, es uno de ellos. El proceso de fragilización —o los procesos— a nivel microestructural todavía no se ha aclarado (R. A. Oriani y otros, 1985). Cuando se conozcan con detalle, quizás sea posible anularlos mo-

dificando algunos aspectos de su microestructura mediante ingeniería genética, por seguir con la analogía. Merece señalarse que en este campo se haya producido recientemente un contacto real, y no una analogía, entre los alambres y la medicina. R.L. Tapping y B.D. Sawicka (1987) han utilizado las técnicas de tomografía computerizada (TAC) utilizada en los hospitales para evaluar la fragilización por hidrógeno en aceros y han podido obtener imágenes tridimensionales de microfisuras que se han desarrollado en el interior del material.

También es posible que estos problemas se resuelvan de una manera radicalmente distinta: sustituyendo el acero, en vez de modificarlo, por un nuevo material que sea inmune. En este caso se trataría de una nueva raza y no de una mutación dentro de la familia de los ace-

ros. Desde hace años se está experimentando con tendones fabricados con materiales compuestos —fibra de vidrio o fibras orgánicas en una matriz orgánica—. Los resultados son alentadores porque son más resistentes a la corrosión, no conducen la electricidad y no crean perturbaciones electromagnéticas, aunque tienen otros inconvenientes, pero este tema se tratará en otro artículo. Los alambres trefilados son un producto muy evolucionado, como se ha indicado al comienzo, y sobrevivirán a la competencia de otras especies. En la actualidad se están abriendo camino en frentes muy distintos del hormigón pretensado, basta citar, para terminar, un ejemplo del campo de la medicina; la fabricación de nervios artificiales para la estimulación eléctrica de músculos a partir de «cables» de siete alambres de 0.03 mm de diámetro (G.D. Bibel y otros, 1987). Los resultados alcanzados son esperanzadores.

REFERENCIAS

- AASHTO (1985)
Cathodic protection of reinforced concrete bridge decks.
NACE, Houston.
- Andrade, C., Castelo, V., Alonso, C. y González, J.A. (1985)
The determination of the corrosion rate of steel embedded in concrete by the polarization resistance and AC impedance methods.
ASTM STP 906, pp. 43-46.
- ATEP (1983)
HP6-83 - Recomendaciones para la conservación de obras pretensadas.
Asociación Técnica Española del Pretensado, Madrid.
- Azou, P. (Ed.) (1982)
Hydrogen et matériaux (Tercer Congreso).
Ecole Centrale des Arts et Manufactures. Dos volúmenes.
- Bibel, G.D., Michael, M. y Utter, J. (1987)
Artificial nerves designed with ultrafine stranded wire.
Wire J. Int., Diciembre, pp. 32-39.
- Biczok, I. (1972)
Concrete corrosion, Concrete protection.
Akademiai Kiado, Budapest.
- Blackie, A.D. (1971)
Corrosion of prestressing tendons.
Civil Engineering and Public Works Review, pp. 53-55.
- CEB (1982)
Design of concrete structures for fire resistance.
Bulletin d'Information N 145.
- Conde-Salazar, J. (1987)
Reparación de estructuras de viaductos.
XII Asamblea de la A.T.E.P., Granada.
- CUR (1971)
Cases of damage due to corrosion of prestressing steel.
Report N 49.
- CUR (1987)
Activities in the Netherlands on research and codes in civil engineering.
Centre for Civil Engineering Research and Codes. Holanda.
- Dove, A.B. (1980)
Steel wire handbook.
The Wire Association International Inc., Connecticut.
- Elices, M. (1971)
Damage on prestressed concrete pipes.
1st. International Symposium on Stress Corrosion of Prestressing Steel, FIP 1, pp. 26-32.
- Elices, M. (1977)
El acero en la prefabricación pretensada.
Hormigón y Acero, N 124, pp. 105-112.
- Elices, M. (1983)
Problemas de corrosión bajo tensión en el hormigón pretensado.
Rev. Ib. Corrosión y Protección, pp. 21-23.
- Elices, M. (1985)
Fracture of steels for reinforcing and prestressing concrete.
Capítulo 5 de Fracture Mechanics of Concrete (G. C. Sih y A. DiTommaso, Eds.), M. Nijhoff.
- Elices, M. (1988)
Mecánica de la Fractura.
Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos (4 volúmenes).

- Elices, M. y Climent, J. (1974)
Stress corrosion failures of prestressed concrete pipes.
2nd. International Symposium on Stress Corrosion of Prestressing Steel, FIP 2, pp. 1-12.
- Elices, M. y Sánchez-Gálvez, V. (1977a)
Acero para centrales nucleares pretensadas.
Hormigón y Acero, N 123, pp. 155-180.
- Elices, M. y Sánchez-Gálvez, V. (1977b)
Fatiga de alambres de pretensado.
Hormigón y Acero, N 125, pp. 85-99.
- Elices, M. y Sánchez-Gálvez, V. (1982)
El Tercer Simposio de la FIP sobre corrosión bajo tensión en aceros para pretensado.
Hormigón y Acero N 144, pp. 129-138.
- Elices, M. y Sánchez-Gálvez, V. (1988)
Corrosión fatiga.
En Corrosión (serie Nuevas Tendencias, C.S.I.C.), en vías de publicación.
- Elices, M., Maeder, G. y Sánchez-Gálvez, V. (1983)
Effect of surface residual stress on hydrogen embrittlement of prestressing steels.
British Corrosion Journal, Vol. 18, núm. 2, pp. 80-81.
- Elices, M., Faas W., Rostasy, F. y Wiedemann, G. (1982)
Cryogenic behaviour of materials for prestressed concrete.
Monografía de la FIP 5.11.
- Estellés, P. (1985)
Alambrones de enfriamiento controlado y aceros de pretensado.
Hormigón y Acero, N. 156, pp. 215.
- Etienne, C.F., Binnekamp, D.C., Copier, W.J., Hendrickx, R. y Smith, C.L. (1981)
Corrosion protection of unbonded tendons.
Heron, Vol. 26, núm. 3.
- FIP (1971)
Stress corrosion of prestressing steel (Primer Simposio).
Proceedings [Bijl, C., Lamers, L. y Wind, G. (Eds.)], Koninklijke Nederlandsche. Hoogovens, Holanda.
- FIP (1973)
Stress corrosion of prestressing steel (Segundo Simposio).
Proceedings [Blekkenhorst, F., Lamers, L. y Wind, G. (Eds.)], Hoogovens, Ijmuiden, Holanda.
- FIP-78 (Stress Corrosion Test) (1978)
Stress corrosion cracking resistance test for prestressing tendons.
Technical Report N 5, FIP, Wexham Springs, Slough, U.K.
- FIP (1981)
Stress Corrosion of prestressing steel (Tercer Simposio).
Proceedings [Elices, M., Sánchez-Gálvez, V. (Eds.)], Wexham Springs, Slough, U.K.
- Fountain, M.J., Blackie, D. y Mortimer, D. (1975)
Corrosion protection of prestressing tendons.
International Conference, York, Paper C127/75.
- Handcock, M.G. (1971)
Electrolytic corrosion of pre-stressing steels under and impressed e.m.f.
FIP Symposium, Arhem.
- Harvey, J.T. y Boon, J.W. (1980)
The influence of stray electrical currents on the durability of prestressed concrete structures.
Technical Report N 6, FIP, Wexham Springs, Slough, U.K.
- Heuze, B. (1965)
Cathodic protection of steel in prestressed concrete.
Materials Protection, pp. 57-62.
- Hildebrand, J.F. (1975)
Evaluation of corrosion-inhibiting compounds for the protection of prestressing systems.
International Conference, York, Paper C150/75.
- Kajfasz, S., Zielinski, J.L. (1976)
Analysis of the results of the questionnaire on the corrosion protection of tendons in nuclear Power Plants.
Grupo de trabajo FIP para vasijas de reactores y depósitos, Madrid.
- Martín, A. y Sánchez-Gálvez, V. (1988)
Environmentally assisted fatigue crack growth in high strength eutectoid cold drawn steels.
Br. Corrosion J., Vol. 23, núm. 2, pp. 96-101.
- McGuinn, K.F. y Elices, M. (1981)
Stress corrosion resistance of transverse precracked prestressing tendon in tension.
British Corrosion Journal, Vol. 16, núm. 4, pp. 187-195.
- Metals Society (1983)
Microbial corrosion.
Proceedings de la Conferencia. National Physical Laboratory.
- Morera, J.M. (1987)
Deterioros aparecidos en las estructuras de la autopista Villalba-Adanero.
XII Asamblea de la A.T.E.P., Granada.
- Nurnberger, U.
Forschung. Strassenbau und strassenverkerstechnik.
Heron, 308, Abt. Strassenbau, Bonn, pp. 1-195.
- Nurnberger, U. (1981)
Analysis and evaluation of failures in prestressed steel.
Proceedings 3rd. FIP Symposium. FIP-Berkeley, Wexham Springs, Slough, U.K.
- Oriani, R.A., Hirth, J.P. y Smialowski, M. (1985)
Hydrogen degradation of ferrous alloys.
Noyes. Publications, N.J.

- Parkins, R.N., Elices, M., Sánchez-Gálvez, V. y Caballero, L. (1982)
Environment sensitive cracking of prestressing steels.
Corrosion Science, Vol. 22, núm. 5, pp. 379-405.
- Sánchez-Gálvez, V. y Elices, M. (1981)
An example of delayed grouting.
Proceedings 3rd. FIP Symposium, FIP-Berkeley, Wexham Springs, Slough, U.K.
- Sánchez-Gálvez, V. y Elices, M. (1984)
Pérdidas de pretensado por fluencia y relajación 1 y 2.
Hormigón y Acero, 153, pp. 95-121.
- Sánchez-Gálvez, V. y Elices, M. (1984)
On hydrogen induced cracking in prestressing steel wires.
Proceedings 5th. ECF. (L. Faria, Ed.), Lisboa.
- Sánchez-Gálvez, V. y Elices, M. (1986)
The relationship between tensile strain, creep and stress relaxation in cold-drawn steels at low temperatures.
Materials Science and Engineering, N 78, pp. 1-8.
- Sánchez-Gálvez, V., Elices, M. y Astiz, M.A. (1976)
A new formula for stress relaxation in steels.
Materials and Structures, Vol. 9, núm. 54, pp. 441-417
- Sánchez-Gálvez, V., Elices, M y Royuela, J. (1981)
Temporary protection of prestressing tendons.
Proceedings 3rd. FIP Symposium, FIP-Berkeley, Wexham Springs, Slough, U.K.
- Sánchez-Gálvez, V., Lancha, A.M. y Martín, A. (1983)
Estudio de la protección temporal en los aceros para hormigón pretensado y su influencia en la adherencia acero-hormigón.
III Congreso Nacional e Iberoamericano de Corrosión y Protección.
- Metals Society (1983)
- Sánchez-Gálvez, V., Elices, M. y Llorca, J. (1988)
Relajación de tensiones en tendones con temperatura variable.
Hormigón y Acero (en vías de publicación).
- Sánchez-Gálvez, V., Elices, M., Erdelyi, A. y Kosiorek, M. (1977)
Stress relaxation due to steam curing.
Materials and Structures, Vol. 10, núm. 60, pp. 351-356.
- Sánchez-Gálvez, V., Elices, M., Zarabozo, A. y Royuela, J.J. (1982)
Protección Temporal de Aceros de Pretensado.
Hormigón y Acero, 143, pp. 115-124.
- Scanell, W.T. y Hartt, W.H. (1987)
Cathodic polarization and fracture property evaluation of a pretensioned steel tendon in concrete.
Materials Performance, Dic., pp. 32-40.
- Schupack, M. y Suárez, M.G. (1981)
Corrosion embrittlement failures of prestressing systems in the United States.
Proceedings 3rd. FIP Symposium, FIP-Berkeley, Wexham Springs, Slough, U.K.
- Spector, D. (1964)
A study of failures and cathodic protection of reinforced concrete pipes.
Aqua, núm. 4, pp. 7-24.
- Tapping, R.L. y Sawicka, B.D. (1987)
Computer-asited tomography for the nondestructive evaluation of hydrogen-induced cracking in steel.
Materials Performance, Dic., pp. 46-50.
- Verein Deutscher Eisenhüttenleute (1973)
Walzdrahtfehler
Verlag Stahleisen M.B.H. Düsseldorf.

* * *