

# Empleo de los ensayos de tracción y doblado alternativo para estimar el deterioro por corrosión bajo tensión en un acero de pretensado

## *Use of tensile and alternative bent testing to assess stress corrosion cracking on prestressed steel*

Laura Rodríguez Duro<sup>1\*</sup>

### Palabras clave

corrosión bajo tensión; tracción; doblado alternativo; acero de pretensado;

### Resumen

La corrosión bajo tensión es una de las causas más importantes de daño en las estructuras de hormigón pretensado. Se produce por la combinación de un material susceptible a la corrosión, la presencia de un medio corrosivo y la existencia de tensiones mecánicas. El ensayo de tracción y el ensayo de doblado alternativo proporcionan información sobre el comportamiento tensional y deformacional del material.

En este trabajo se trata de valorar el daño causado por la corrosión bajo tensión en un acero de pretensado, examinando la modificación de otras características con referencia al acero sin dañar. Las propiedades que se han analizado son la resistencia y la deformación. Para ello se han preparado las muestras de acero con diferentes niveles de corrosión para posteriormente, haciendo uso de los ensayos de tracción y de doblado alternativo, analizar el comportamiento del acero.

Se ha demostrado que en el caso del ensayo de tracción, la conclusión a la que se llega es que no permite apreciar la caída de parámetros de resistencia y deformación hasta que no se alcanzan patologías de corrosión avanzadas. Pero en el proceso del ensayo de doblado alternativo se puede decir que el efecto es patente desde los primeros indicios ya que el acero atacado puede llegar a romperse desde el primer doblado.

### Keywords

stress corrosion cracking; tensile; alternative bent; prestressing steel;

### Abstract

*The stress corrosion cracking is one of the most important causes of damage in the prestressed concrete structures. It's produced by the combination of a corrosion susceptible material, the presence of a corrosive medium and the existence of mechanical tensions. Tensile and alternative bent tests give information about the tensional and deformational behaviour of the material.*

*In this work, the damage caused by the stress corrosion cracking on prestressed steel has been assessed by examining the modification of other characteristics with reference to the undamaged steel. The properties that have been analysed are strength and deformation. In so doing, steel specimens have been corroded at different corrosion levels to subsequently analyse, by making use of tensile and alternative bent tests, the behaviour of the steel.*

*It has been demonstrated that in the case of the tensile test, the conclusion is that it is not possible to estimate the fall of parameters of resistance and deformation until pathologies of advanced corrosion are reached. But in the process of alternative bent testing the effect of the corrosion is evident from the first levels, for the steel attacked may break down from the first bent.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La **corrosión bajo tensión** es una de las causas más importantes de daño en las estructuras de hormigón pretensado. Las armaduras activas pueden sufrir corrosión bajo tensión debido a distintos procedimientos agresivos tanto químicos como abrasivos o a causa de revestimientos escasos u hormigones inapropiados para el ambiente en el que se sitúa la estructura.

La corrosión bajo tensión aparece como consecuencia de la **combinación de tres factores**: un material susceptible a la corrosión, presencia de un medio agresivo y existencia de tensiones mecánicas. No es un requisito suficiente para que la corrosión se produzca la existencia

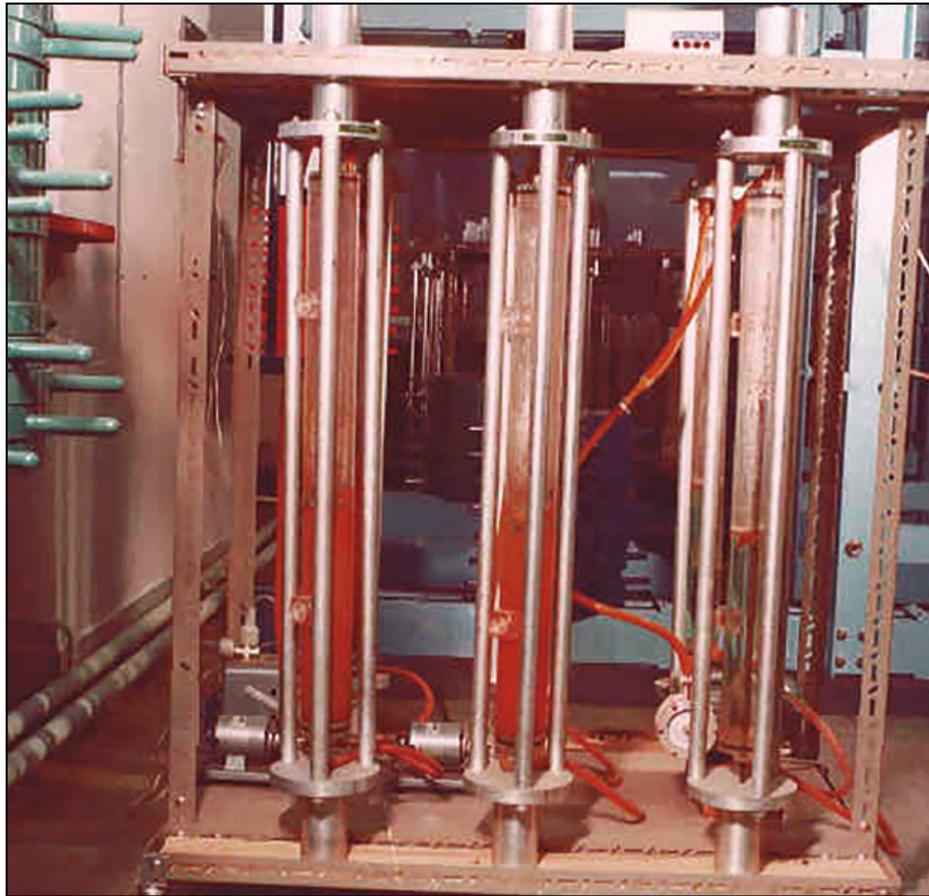
del medio agresivo y de las tensiones mecánicas (Galvele 2005). Para que la **susceptibilidad** a la corrosión bajo tensión tenga lugar se deben tener en cuenta otras **características metalúrgicas** del material: composición química, tamaño de grano, microestructura, tratamiento térmico, etc. (Feliu y Andrade 1991).

En el **proceso de fisuración** por corrosión bajo tensión se pueden distinguir tres etapas: **nucleación** que puede iniciarse en los defectos microestructurales del acero ya que son sitios propicios para el comienzo de la fisuración, **propagación** que tiene lugar en forma de grietas y rotura final (Feliu y Andrade 1991 y Otero 1997).

En el **Laboratorio Central de Estructuras y Materiales** del CEDEX se ha estudiado este fenómeno desde la aparición de las primeras roturas por corrosión bajo tensión en España en los años 60. Uno de sus trabajos más relevantes fue la elaboración de la Tesis Doctoral del Dr. José

\* Autor de contacto: [laura.rodriguez@cedex.es](mailto:laura.rodriguez@cedex.es)

<sup>1</sup> Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, Madrid, España.



**Figura 1.** Detalle del bastidor y la célula de corrosión utilizados en la Tesis Doctoral del Dr. D. José Climent Beltrán (Climent 1979).

Climent Beltrán. En la figura 1 se muestran los bastidores y las células de corrosión que se utilizaron en la citada Tesis (Climent 1979).

El **ensayo a tracción** es la prueba que aporta mayor información. Simultáneamente permite conocer la respuesta en deformación, ante una carga unitaria o tensión, tanto en el periodo elástico como en el plástico, y la capacidad última o resistencia que puede esperarse (Sainz de Cueto 2007).

Por otro lado, el ensayo de doblado alternativo consiste en realizar **doblados y enderezados**, alternativamente en sentidos opuestos, contabilizando el número de ciclos necesarios para la rotura. Representa la capacidad del material para soportar ciclos de plastificación alternante (AENOR 2011).

Este trabajo de investigación trata de valorar el daño causado por la corrosión bajo tensión en un acero de pretensado, analizando la modificación de sus propiedades con referencia al acero sin dañar. Las herramientas de análisis que se han usado fueron el ensayo de tracción y de doblado alternativo (Rodríguez 2015).

La parte experimental consistió en la realización de **ensayos de corrosión bajo tensión** para caracterizar el material, conocer su tiempo de rotura y utilizando esta información, establecer los niveles de corrosión; y la ejecución de **ensayos de tracción y de doblado alternativo** con el objetivo de comparar los resultados obtenidos de las muestras sin corroer y de aquellas con un cierto grado de corrosión y así valorar el daño causado por la corrosión bajo tensión a través de su comportamiento en ambos ensayos.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El **acero de pretensado** es un material muy importante en diferentes campos de la ingeniería civil por lo que es el objetivo de incontables investigaciones científicas. Entre sus aplicaciones es usado como armadura activa en las estructuras de hormigón pretensado.

Se obtiene por **trefilado a partir de un alambón de 10 a 15 mm de diámetro**, seguido posteriormente de un tratamiento termomecánico de envejecimiento (estabilización).

Su **microestructura** es la típica de un **acero eutectoide** formada por colonias perlíticas en las que se alternan las bandas de ferrita y cementita.

El material utilizado en este estudio es un acero para pretensar liso en forma de alambre de **5 mm de diámetro nominal**, con una **resistencia mínima garantizada de 1.860 MPa**.

El ensayo de corrosión bajo tensión se realizó siguiendo el procedimiento de la norma UNE-EN ISO 15.630-3:2011 apartado 10 (AENOR 2011). El ensayo determina el **tiempo** hasta alcanzar la **rotura** de una probeta sometida a una carga de tracción constante y sumergida en una solución a una temperatura constante dada.

Como medio agresivo se usó una disolución de 200 gr de tiocianato amónico en 800 ml de agua destilada. Según norma, se considera que se ha completado el ensayo bien por rotura de la probeta, bien por haber alcanzado el tiempo establecido.



**Figura 2.** Marco rígido de ensayo.

Este ensayo está basado en el ensayo FIP (de la Federación Internacional del Pretensado) y es aceptado universalmente desde hace más de 40 años como un medio para reproducir de forma acelerada cómo afecta la corrosión en las propiedades del acero.

El **Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX** cuenta con tres máquinas para realizar ensayos de corrosión bajo tensión cada una de ellas compuestas por un marco rígido o bastidor y una célula o recipiente de disolución. Los **bastidores horizontales** son de carga permanente de 2 m de longitud. La capacidad de carga máxima es de 300 kN. Cada una de ellas está conectada a un **ordenador** con un software que se usa como medidor de tiempo (figura 2).

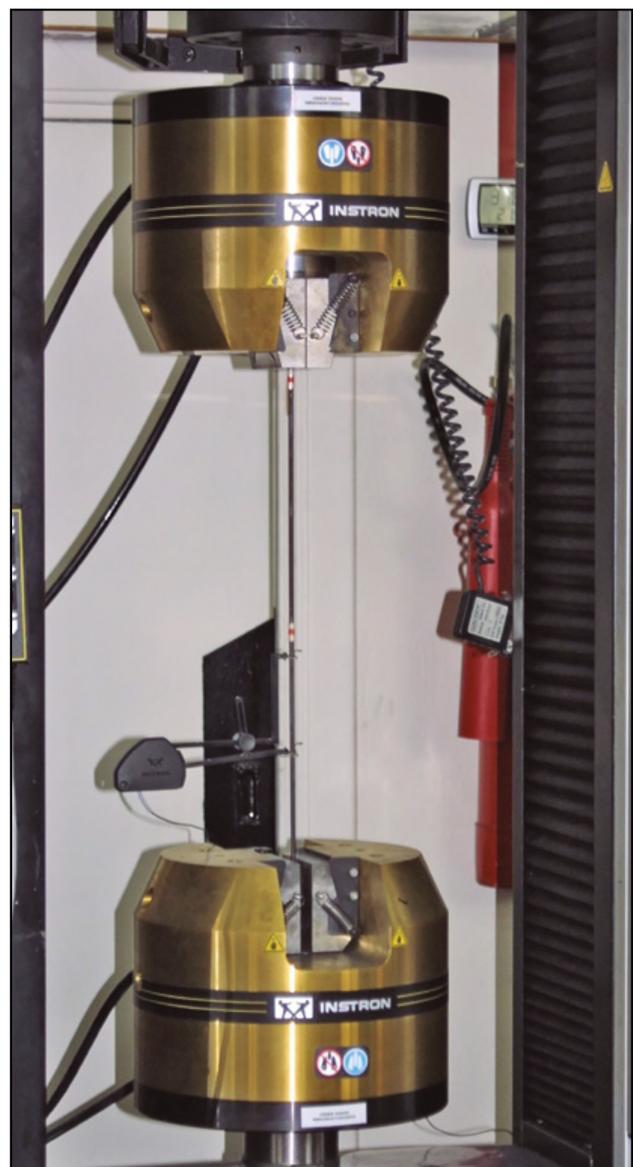
Con el objetivo de estudiar más en profundidad cómo afecta la corrosión bajo tensión en las características del material y a fin de cuantificar el deterioro de las propiedades del acero al aumentar el grado de corrosión con relación al acero sin daño se realizaron ensayos de tracción y doblado alternativo después de diferentes niveles de corrosión.

En base al estudio anteriormente hecho del material y su **comportamiento en corrosión bajo tensión**, se establecieron unos grados de corrosión en los cuales la probeta no se rompía pero se corroía de forma tal que esto influía en sus propiedades.

El procedimiento de preparación fue exactamente el mismo siguiendo la norma UNE-EN ISO 15.630-3:2011 (AENOR 2011) pero ahora el ensayo no se realiza hasta la rotura de la probeta sino que se detiene una vez alcanzado el tiempo de corrosión establecido.

Una vez que se paraba el ataque, se procedía al desmontaje del ensayo. Cuando las **probetas corroídas** pero no fracturadas se sacaban de la célula correspondiente, se limpiaban con etanol para que la disolución corrosiva en contacto con el aire no continuara actuando y las probetas pudieran ser usadas en un **ensayo posterior**.

Como herramientas de análisis se utilizan los ensayos de tracción y de doblado alternativo.



**Figura 3.** Máquina para ensayos de tracción.

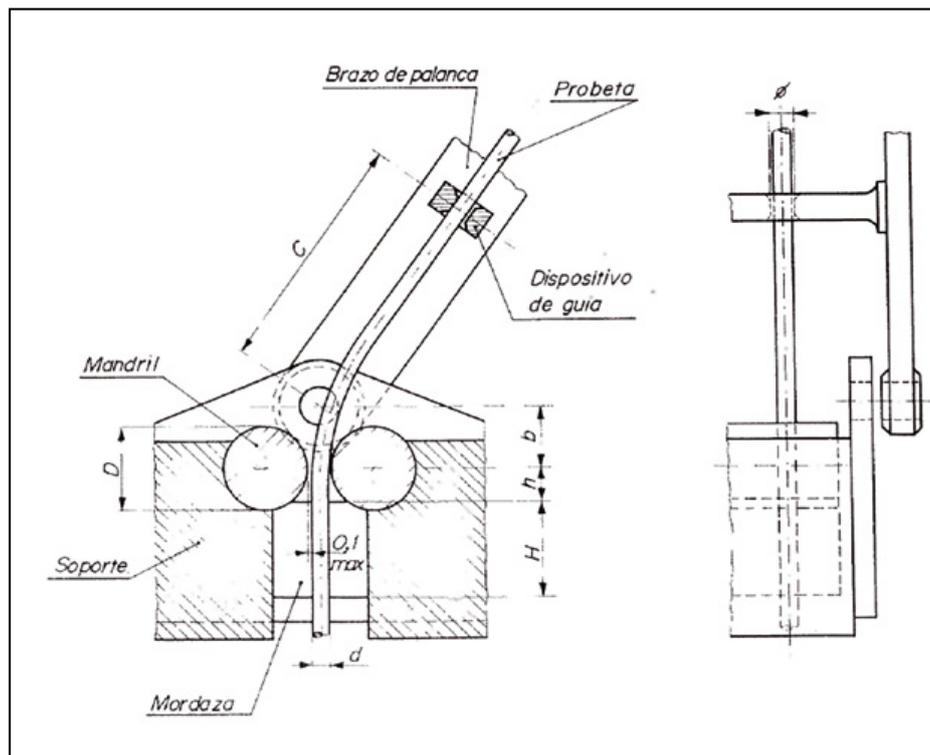


Figura 4. Esquema con los elementos esenciales de una máquina de doblado de alambre (AENOR 1980).

El **ensayo de tracción** se realizó siguiendo el procedimiento marcado por la norma UNE-EN ISO 15.630-3:2011 (AENOR 2011) apartado 5 y la norma UNE-EN ISO 6.892-1:2010 (AENOR 2010).

Consiste en someter a la probeta a un esfuerzo de estiramiento axial, generalmente hasta la rotura, en condiciones controladas y a una temperatura ambiente de  $23 \pm 5$  °C.

Las probetas utilizadas fueron cortadas de los alambres suministrados por el fabricante, con una longitud aproximada de 60 cm y fueron protegidas en los extremos para evitar el daño de las mordazas.

Para la determinación del módulo de elasticidad y del límite elástico convencional (0,1 % y 0,2 %), se ha utilizado un **extensómetro** que tiene una base de medida de 50 mm ( $L_0$ ).

El ensayo se realizó hasta la rotura de la probeta para poder determinar la **carga máxima** que soporta cada una de las probetas.

Para la acotación del alargamiento bajo carga máxima se consideró una base de medida de 500 mm, siguiendo lo indicado en la norma UNE 36.094:1997 (AENOR 1997).

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX en una máquina de 200 kN de capacidad con dos extensómetros dobles de 50 mm y 100 mm de base respectivamente (figura 3).

El ensayo de doblado alternativo se realizó sobre probetas de 18 cm de longitud aproximadamente.

Se ha efectuado hasta rotura de la probeta, siguiendo el procedimiento operatorio de la norma UNE-EN ISO 15.630-3:2011 apartado 7 (AENOR 2011).

A continuación se muestra un esquema con los elementos esenciales de una máquina de doblado de alambre (figura 4) y una fotografía de la máquina del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (figura 5).

### 3. RESULTADOS

Los **ensayos de corrosión bajo tensión** para la **caracterización del material** dieron como resultado un valor medio del tiempo de rotura de 4,52 horas.

En base a estos valores se establecieron unos niveles de corrosión en los que las probetas no se rompían pero se corroían. Se fijaron 3 niveles alrededor de la media del tiempo de rotura: 4° nivel 4 horas de corrosión, 5° nivel 5 horas de corrosión y 6° nivel 6 horas de corrosión (figura 6).

En la figura 7 se puede observar la fractura típica de corrosión bajo tensión hallada en este trabajo y obtenida por **microscopía óptica**. La fractura no presentaba el aspecto de una rotura de carácter dúctil, sino más bien una apariencia de carácter frágil con ausencia total de estricción de la zona, aspecto típico de la rotura inducida por fragilización por hidrógeno.

Se puede ver que la primera etapa se inicia debido a una imperfección y evoluciona uniformemente en un plano con una pendiente muy pronunciada respecto al plano transversal hasta un tercio del diámetro y en la segunda etapa la fisura se extiende violentamente de forma arborescente a partir del punto medio de la primera. Esta segunda etapa es la consecuencia de la dispersión variable de la primera, fruto de la fuerza aplicada, mientras que la primera es el resultado del desarrollo creciente como consecuencia de la actuación conjunta de la carga y el medio corrosivo (Rodríguez, Saínez de Cueto, Morales y Pérez. En imprenta).

Se realizaron casi unos **30 ensayos de corrosión bajo tensión** con diferentes niveles de ataque, y posteriormente se llevaron a cabo 4 ensayos de tracción en cada uno de los niveles fijados y otros 4 ensayos de doblado alternativo también en los diferentes grados de corrosión. Los resultados obtenidos se van a usar para compararlos con los hallados para las muestras sin corroer.



Figura 5. Máquina para el ensayo de doblado alternativo.

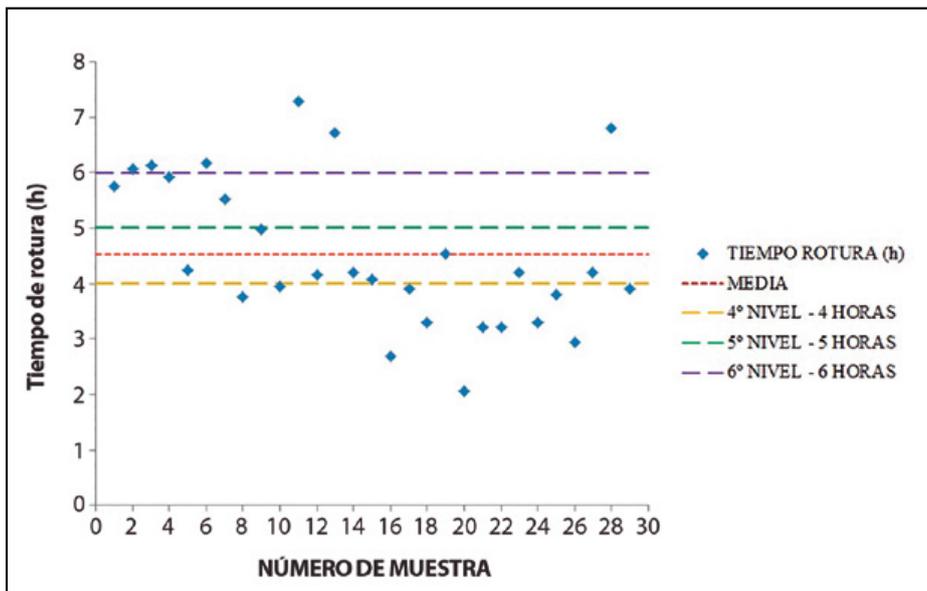


Figura 6. Valores del ensayo de corrosión bajo tensión y niveles de corrosión.



Figura 7. Imagen de rotura de desarrollo típico de corrosión bajo tensión vista transversalmente.

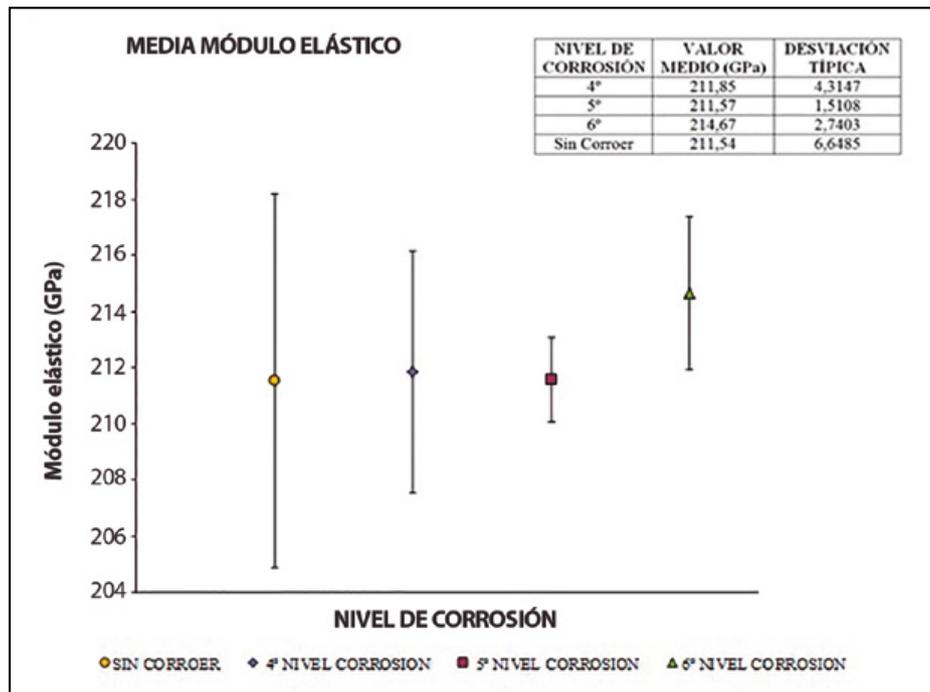


Figura 8. Valores medios para el módulo elástico según nivel de corrosión.

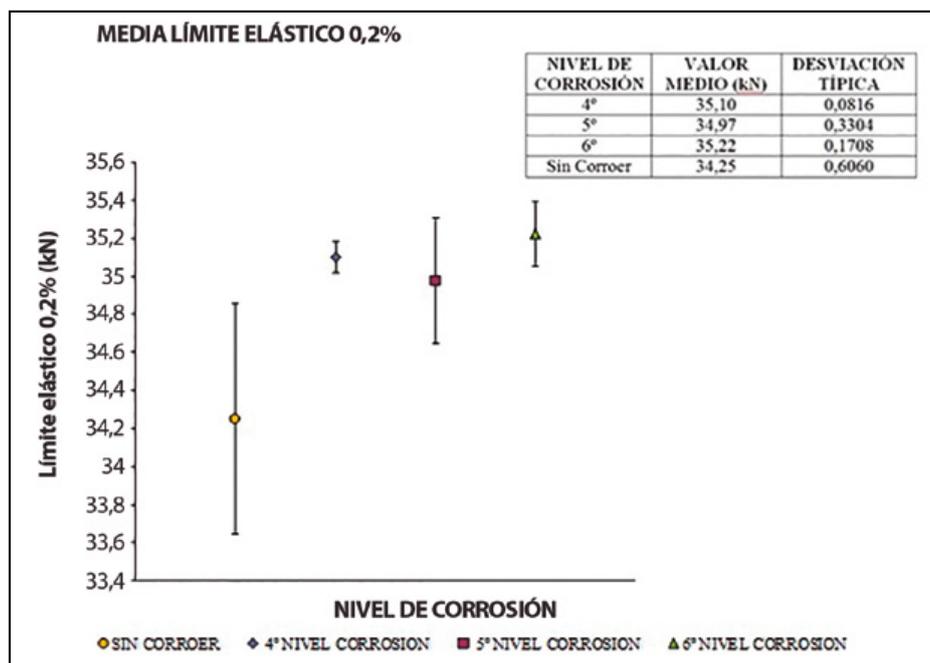


Figura 9. Valores medios para el límite elástico al 0,2 % según nivel de corrosión.

En el ensayo de tracción después de diferentes ataques de corrosión no se apreciaron diferencias significativas entre las muestras sin corroer y las muestras con un determinado grado de corrosión en los resultados de módulo elástico y límite elástico (figuras 8 y 9).

Como primer indicio, en el nivel de corrosión más alto se observó un cierto descenso del alargamiento bajo carga máxima desde 6,60 % para las muestras sin corroer, y 6,03 y 6,43 % en el cuarto y en el quinto nivel y hasta 5,41 % en este último, el sexto, porque existe en él una muestra con un valor de 2,93 % (figura 10).

En este mismo nivel de corrosión, el sexto, se advirtió una bajada, significativa pero muy escasa, de la carga máxima unitaria desde 1.903 MPa para las muestras sin corroer, y 1.954 y 1.952 MPa en el cuarto y en el quinto nivel hasta

1.941 MPa en este último porque existe en él una muestra con un valor 1.879 MPa (figura 11).

Esto parecía indicar que la corrosión bajo tensión afecta más a la capacidad de deformación del acero de pretensado que al comportamiento resistente.

Las barras que se incluyen en estas gráficas se refieren al error del resultado calculado con su desviación típica y no a la incertidumbre de la medida.

A continuación se incluye la curva tensión-deformación (figura 12) donde se puede ver en rojo un alambre corroído en el último nivel conseguido y en línea discontinua un alambre sin corroer.

Se observa el mismo comportamiento que se ha explicado anteriormente, es decir, ese nivel de corrosión afectaba a la deformación en rotura más que a la capacidad

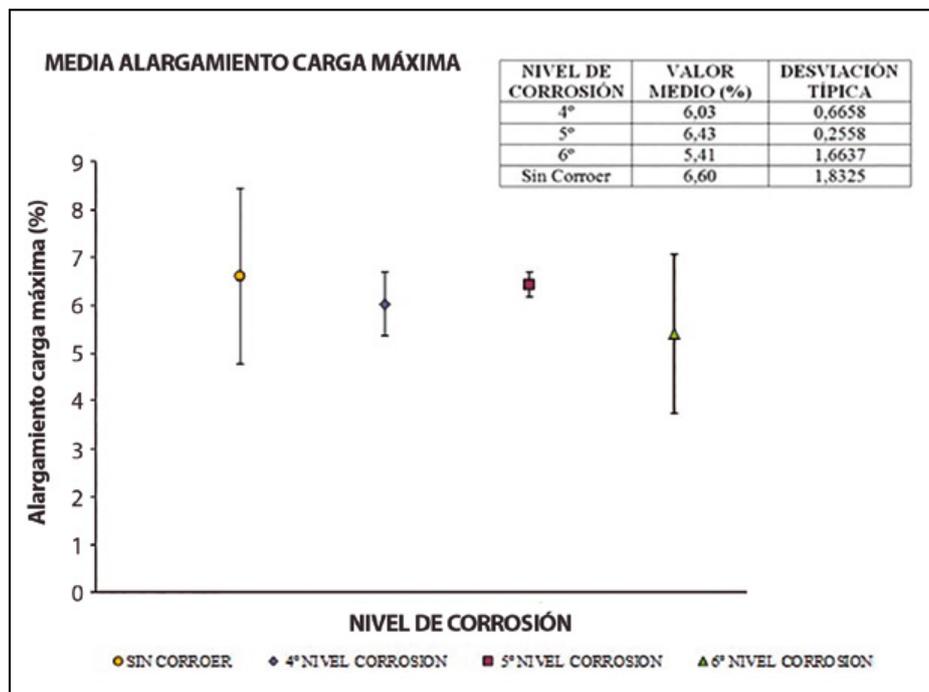


Figura 10. Valores medios para el alargamiento bajo carga máxima según nivel de corrosión.

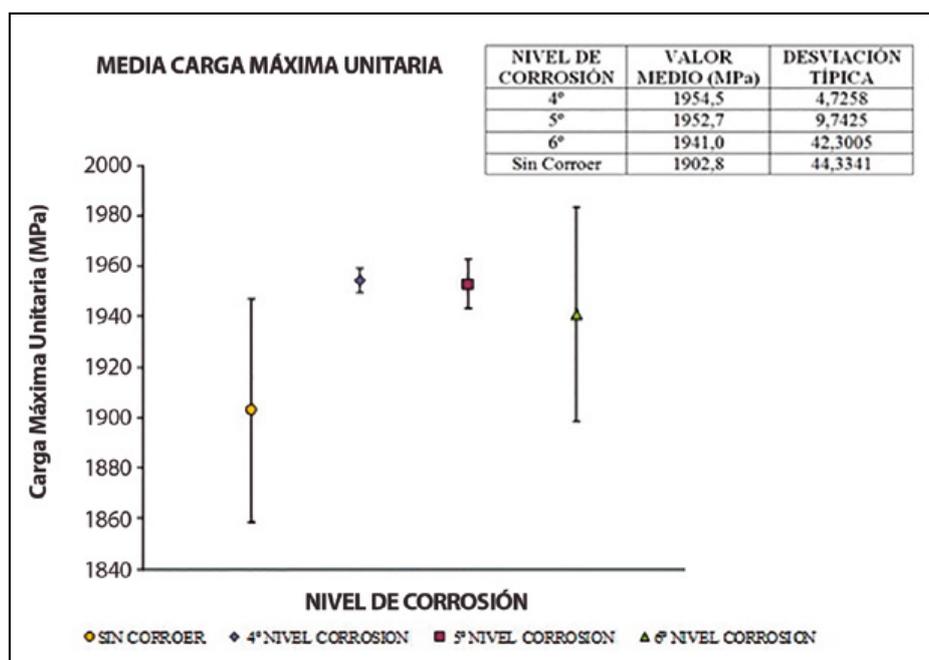


Figura 11. Valores medios para la carga máxima unitaria según nivel de corrosión.

resistente del material. Pero este caso representado aquí es un suceso extremo y por tanto el ensayo de tracción no era válido como herramienta de análisis.

Los resultados de **doblado alternativo** en cambio parecían indicar que se producen fenómenos de fragilización del material desde los niveles más bajos de corrosión (figura 13).

Es más, se puede decir que el efecto fue patente desde los primeros indicios ya que el acero atacado podía llegar a romperse desde el primer doblado, como es el caso del último nivel de corrosión conseguido con una media de 2 doblados.

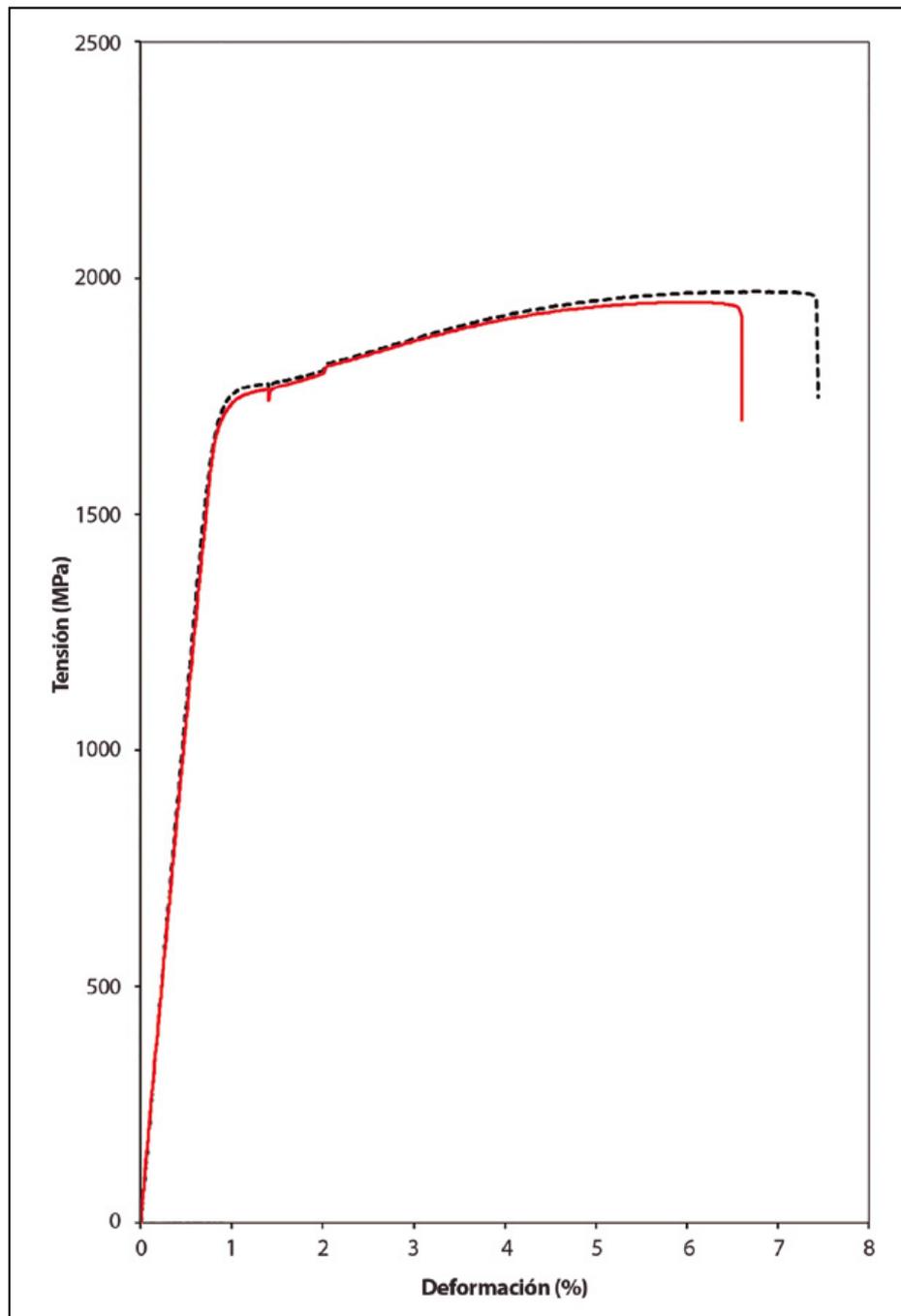
Esto confirma que también frente al fenómeno de doblado la muestra corroída sufría una disminución alta en su aptitud a la deformación.

Igual que en el caso de tracción, las barras corresponden al error y no a la incertidumbre.

#### 4. CONCLUSIONES

Por último, se expone el resumen de las conclusiones más relevantes de este estudio:

Como parte fundamental de esta investigación, para cuantificar el daño por corrosión en las propiedades de un acero de pretensado y poder evaluar su grado de ataque mediante ensayos mecánicos, se ha planteado como posibles herramientas de análisis los ensayos de tracción y doblado alternativo. Para ello se han realizado ataques previos de corrosión bajo tensión sobre unas 30 probetas para su posterior ensayo.



**Figura 12.** Curva tensión deformación para muestra corroída en el sexto nivel de corrosión y muestra sin corroer.

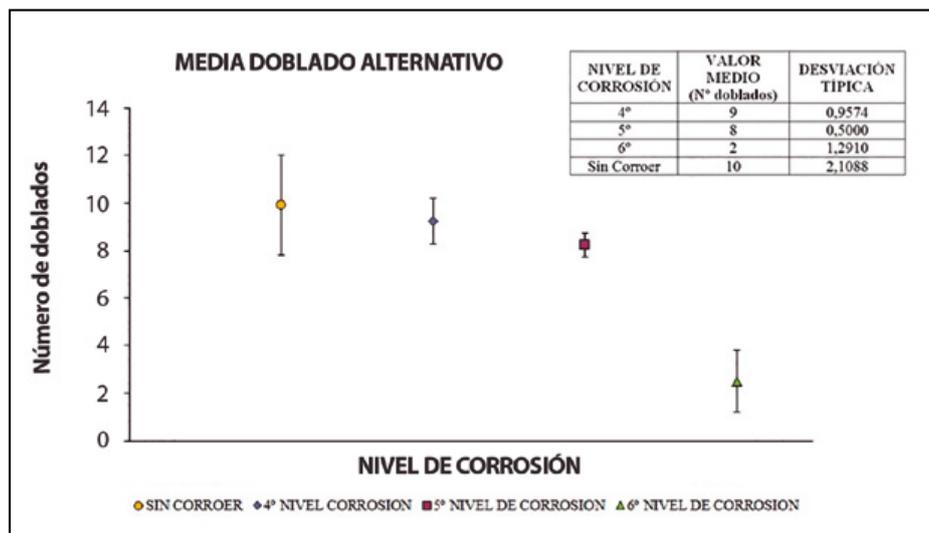
En el caso del **ensayo de tracción**, la conclusión a la que se llega es que no permite apreciar la caída de parámetros de resistencia y deformación hasta que se alcanzan patologías de corrosión avanzadas.

No se aprecian diferencias significativas entre las muestras sin corroer y las muestras con un determinado grado de corrosión en los resultados de módulo elástico y límite elástico. Como primer indicio, en el nivel de corrosión más alto se ha observado un cierto descenso del alargamiento bajo carga máxima y una bajada, significativa pero muy escasa, de la carga máxima unitaria. Esto hace señalar que la corrosión bajo tensión afecta más a la aptitud de deformación del acero de pretensado que a su resistencia.

Los resultados de **doblado alternativo** sugieren que se producen fenómenos de degradación del acero de

pretensado desde los primeros niveles de corrosión. Es más, se puede añadir que es evidente el daño causado ya que el material corroído es capaz de colapsarse desde el primer doblado lo que corrobora que frente al proceso de doblado el acero atacado sufre una gran reducción en su comportamiento deformacional.

Por lo tanto, para la valoración del deterioro por corrosión bajo tensión y/o fragilización del acero, se dispone de ensayos que no ofrecen capacidad de resolución. El ensayo de tracción ha demostrado que no es adecuado para evaluar el grado de corrosión del material estudiado pero existen otros ensayos que permiten apreciar los cambios experimentales desde progresiones más tempranas. Los ensayos de carácter alternante como es el caso del doblado alternativo proporcionan una herramienta para realizar un seguimiento del avance del daño.



**Figura 13.** Valores medios para el número de doblados hasta rotura según nivel de corrosión.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación se ha llevado a cabo durante un contrato I+D otorgado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. La autora desea agradecer al Laboratorio Central de Estructuras y Materiales los medios puestos a disposición y el apoyo recibido para la realización de este estudio y a EMESA Trefilería (Arteixo, La Coruña) por el suministro del acero utilizado en él.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Galvele, J. R. (2001). Corrosión bajo tensión. Estado Actual del conocimiento. *Anales de mecánica de la fractura*, 18, 8-13
- [2] Feliu, S., y Andrade, M. C. (1991). *Corrosión y protección metálicas*. Madrid: CSIC.
- [3] Otero Huerta, E. (1997). *Corrosión y degradación de materiales*. Madrid: Editorial Síntesis.
- [4] Climent Beltrán, J. (1979). *Contribución al estudio de la corrosión fisurante bajo tensión de aceros al carbono de alta resistencia*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid (UCM).
- [5] Sainz de Cueto Torres, F. J. (2007). *Aceros estructurales y del hormigón para Técnicos de Laboratorio. Curso organi-*

*zado por el Instituto Técnico de la Viabilidad del Transporte y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Madrid.*

[6] AENOR (2011). UNE-EN ISO 15.630-3:2011. *Acero para el armado y el pretensado del hormigón. Métodos de ensayo. Parte 3: Acero para pretensar*. Madrid: Asociación Española de Normas.

[7] Rodríguez Duro, L. (2015). *Evaluación del daño por corrosión bajo tensión en un acero de pretensado mediante condiciones experimentales de fatiga*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid (UCM).

[8] AENOR (2010). UNE-EN ISO 6.892-1:2010. *Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente*. Madrid: Asociación Española de Normas.

[9] AENOR (1997). UNE 36.094:1997. *Alambres y cordones de acero para armaduras de hormigón pretensado*. Madrid: Asociación Española de Normas.

[10] AENOR (1980). UNE 36.461:1980. *Ensayo de doblado alternativo de alambres de acero para armaduras pretensadas*. Madrid: Asociación Española de Normas.

[11] Rodríguez Duro, L., Sainz de Cueto Torres, F. J., Morales Hortelano, M. A. y Pérez Trujillo, F. J. *Corrosión bajo tensión del acero de pretensado. Análisis mediante sollicitación de fatiga*. Monografías, Madrid: Servicio Editorial CEDEX (En imprenta).



## Más allá del arco. Puentes de la modernidad

Catálogo de la exposición

Autores: Dolores Romero Muñoz... [et al.]

ISBN: 978-84-7790-567-7

Año: 2015

P.V.P.: 25 €

El catálogo de esta exposición aborda y muestra la evolución en la ejecución de puentes en la España de los siglos XIX y XX, conforme a la introducción de nuevos materiales: hierro fundido, acero y hormigón armado. El catálogo está formado por dos partes: Ensayos y Catálogo. Los ensayos han sido elaborados por ingenieros relevantes relacionados con el diseño de proyectos, la historia y la estética de los puentes españoles. Tal es el caso de Miguel Aguiló, Miguel Ángel Astiz, Leonardo Fernández Troyano, José Manuel Gálligo y Javier Manterola. La parte del catálogo se divide en tres áreas: Puentes colgantes, Puentes de hierro y Puentes de hormigón, que muestran,

esencialmente, algunos de los más paradigmáticos puentes rectos realizados en los siglos XIX y XX (hasta 1950), así como su evolución histórica a través de la mejora del conocimiento estructural de los materiales con los que se construyeron.



## Obras Hidráulicas de la Ilustración

Catálogo de la exposición

Autores: Dolores Romero Muñoz, Miguel Aguiló Alonso, Daniel Crespo

Delgado, Cristóbal Mateos Iguacel, Carlos Nárdiz Ortiz,

José Polimón López y Fernando Sáenz

ISBN: 978-84-7790-547-9

Año: 2014

P.V.P.: 10 €

Este catálogo aborda los grandes proyectos de canales artificiales ideados por los hombres de la ilustración española en su empeño por promover la mejora de las comunicaciones fluviales y así romper el aislamiento de las zonas interiores desconectadas de la periferia por la lógica de la geografía peninsular. En ese periodo histórico intelectuales, mandatarios e ingenieros apostaron por la construcción de canales artificiales como elemento esencial del sistema de transportes español, concibiéndolos, más allá de la navegación fluvial, como modelo y punto de partida de una nueva política de desarrollo

económico integral de las regiones más retrasadas de la España interior. Los ilustrados españoles vieron en estas nuevas vías de comunicación un motor de la economía al fomentar la repoblación, el aprovechamiento industrial mediante el uso de su caudal como fuerza motriz al servicio de molinos, batanes, fábricas de harina, en impulsor del regadío y la ganadería, además del transporte de mercancías de gran volumen. Pero los proyectos más o menos utópicos de los ilustrados chocaron inevitablemente con la realidad. Casos representativos de este planteamiento son Pedro Rodríguez de Campomanes y Gaspar Melchor de Jovellanos que, con una visión rayana en la utopía coincidente con las de Carlos Lemaur, Ramón de Pignatelli, Francisco Gabarrús, Guillermo Bowles y Antonio Ponz, entre otros, se sentían fascinados por las enormes posibilidades de transformación del territorio que ofrecía la construcción de los canales de Castilla o de Aragón, por poner dos ejemplos significativos. Apuesta arriesgada que buscaba solucionar el problema secular de una red de comunicaciones cuya insuficiencia entorpecía permanentemente el progreso y el desarrollo económico de nuestro país.