

## EVALUACIÓN DEL DAÑO Y LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE CABLES DE UN PUENTE POSTENSADO TRAS 25 AÑOS EN SERVICIO

José Alberto Álvarez<sup>1\*</sup>, Borja Arroyo<sup>1</sup>, Roberto Lacalle<sup>1</sup>, Federico Gutiérrez-Solana<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LADICIM – Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, Avda. Los Castros 44, 39005 Santander, Spain

\* Persona de contacto: [alvareja@unican.es](mailto:alvareja@unican.es)

### RESUMEN

Este trabajo analiza el estado de degradación de los cables/tirantes de un puente, que fue desmontado para su reparación, tras aproximadamente 25 años en servicio. La estructura analizada consiste en un puente de secciones cajón postensadas exteriormente. Los cables se encontraban protegidos mediante lechada de mortero tipo “grout” y alojados en un ducto en el interior de la sección. Los efectos adversos sobre los cordones de acero de alta resistencia empleados en la construcción del puente se localizaban fundamentalmente en dos zonas: a) zona de anclaje en la que el efecto de las cuñas produce una desprotección local del acero; b) zona interior del ducto en la que se generan áreas locales en las que el “grout” no había penetrado convenientemente. Fundamentalmente se aprecian dos posibles mecánicas de deterioro; la corrosión de acero en las zonas no protegidas por mortero en el interior de los ductos, y la fragilización por hidrógeno en zonas locales. Se ha cuantificado el efecto de la corrosión en el acero y su influencia en las propiedades mecánicas. Asimismo, se han llevado a cabo ensayos de corrosión acelerada sobre los cordones de pretensar con distinto nivel de degradación para evaluar la influencia del estado inicial sobre la vida remanente.

**PALABRAS CLAVE:** Cordón de pretensar, Corrosión, Puente postensado.

### ABSTRACT

This work analyzes the state of degradation of the cables/tendons of a bridge, which was dismantled for repair, after approximately 25 years in service. The analyzed structure consists of a bridge of externally post-tensioned box sections. The cables were protected by “grout” type mortar and housed in a duct inside the section. The adverse effects on the high-strength steel strands used in the construction of the bridge were mainly located in two areas: a) anchoring area in which the effect of the wedges produces a local lack of protection of the steel; b) interior zone of the duct in which local areas are generated in which the “grout” had not penetrated adequately. Fundamentally, two possible deterioration mechanics were observed; corrosion of steel in areas not protected by mortar inside the pipelines, and hydrogen embrittlement in local areas. The effect of corrosion on steel and its influence on the mechanical properties has been quantified. Likewise, accelerated corrosion tests have been carried out on prestressing strands with different levels of degradation to evaluate the influence of the initial state on the remaining life.

**KEYWORDS:** Pres, Structural Integrity, Fatigue.

### 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha tenido lugar una construcción masiva de todo tipo de infraestructuras para transporte, tanto por carretera como ferroviarias. Entre ellas destacan los viaductos por la complejidad técnica y el impacto económico que acompaña su construcción. Entre los diferentes tipos de puentes existentes, este trabajo se centra en los basados en postensados, aunque presentan problemas comunes con los atirantados. En efecto, si bien las solicitaciones son diferentes en ambas tipologías, en el primero las cargas dominantes son las de tipo estático aplicadas en el tensado mientras que en los atirantados cobra especial importancia las cargas de fatiga [1].

Tanto los puentes postensados como los atirantados tienen una larga trayectoria de funcionamiento (entre 30 y 50 años). Durante los periodos de servicio se han detectado deficiencias, procedentes del diseño, y el efecto de los procesos de corrosión sobre ambas tipologías. En algunos casos se han llegado a producir colapsos y, en cualquier caso, existe una amplia experiencia en cuanto a diagnóstico y reparación a lo largo del periodo de vida.

El elemento clave para la conservación de los puentes de acero pretensado es la protección de los cables de acero frente a la corrosión y la fragilización. Una de las mayores dificultades a las que se enfrentan los responsables de infraestructuras consiste en detectar la acción de la corrosión y evaluar su posible efecto sobre las características mecánicas de los aceros, sin desmontar

la infraestructura. Por ello, el disponer de material extraído de puentes durante las labores de reparación, es una oportunidad de conocer el estado real de este material tras el daño mecánico y ambiental al que ha estado expuesto.

Los aceros trefilados de alta resistencia juegan un papel clave en la construcción de los puentes modernos. Sin embargo, por efecto del tiempo, estos sufren degradación por corrosión causando pérdidas de seguridad y accidentes. Conocer los efectos de la corrosión el comportamiento de los cables de este tipo de infraestructura en un reto para ingenieros y científicos en los últimos años. En esta línea se han realizado numerosas publicaciones que abordan tanto el comportamiento estructural, Integridad estructural, del componente como los aspectos metalúrgicos. Un ejemplo se muestra en [1] donde se analiza también el efecto de la pérdida de sección por corrosión y su efecto sobre la fatiga de cables de 7 alambres galvanizados.

Una reciente publicación [2] se analiza el efecto de la acción de las mordazas y de la pérdida de la capa de galvanizado en el comportamiento frente a fatiga; en ese mismo trabajo se recoge un buen resumen de daños relatados en puentes atirantados, entre ellos se menciona las causas de colapso del puente de Polcevera en 2018 [3] debido a la combinación de efectos de corrosión y fatiga. El trabajo presentado en [4] también aborda el caso de un puente atirantado reparado tras 30 años de servicio; en el mismo se compara el riesgo de SCC en puentes atirantados frente a postensados. También se analiza el daño producido en cables por efecto de la corrosión.

En [5] se analiza la acción de la corrosión sobre alambres simultáneamente a la acción de carga de tracción, se aprecia una intensificación de la corrosión al aumentar la tensión. También se muestra la relación entre pérdida química y propiedades mecánicas. En esta línea se propone el empleo de la norma ASTM G49-94 [6]. La referencia [7] propone este tipo de correlación, ofreciendo buenos resultados en cuanto a la variación de ductilidad, no tanto en relación a tensiones.

Las referencias [8,9] se ocupan del efecto del mal llenado de los conductos de protección de los torones de estructuras postensadas sobre la corrosión.

El presente trabajo analiza el estado de degradación de los cables internos de un puente postensado de sección cajón, que fueron desmontados para su sustitución como consecuencia del deficiente estado de conservación que presentaban, tras aproximadamente 25 años en servicio. Se trata de viaductos constituidos por vanos de 45 m de longitud e isostáticos. El tablero se materializa mediante cajón de hormigón. El viaducto se estructura mediante dovelas prefabricadas sin armaduras pasivas y con postesado exterior que sustenta las dovelas. El sistema de postesado consta de seis tendones de 31 cordones de 0.6" de diámetro y dos tendones de 24 cordones de 0.6" desnudos instalados en el interior de vainas de PEAD inyectadas con lechada de cemento.

Los cordones que se emplean en las estructuras postensadas se componen de alambres de alta resistencia. Cada cordón está compuesto por siete alambres, seis de ellos enrollados en forma de hélice alrededor del alambre

central. El cable se clasifica dentro del tipo Grado 1860 MPa de baja relajación [11]. Las dimensiones más comunes presentan un tamaño nominal de 12,7 mm y 15,2 mm de diámetro, (sus áreas respectivas son 99 y 140 mm<sup>2</sup> respectivamente).

El tipo de acero empleado en la fabricación de los alambres presenta una composición cercana a la eutectoide con un proceso de trefilado y estabilización posterior. Estas características metalúrgicas proporcionan al material una adecuada resistencia frente a procesos de CBT y fragilización por hidrógeno [10] Sin embargo, debido a que la susceptibilidad a dichos procesos de deterioro aumenta con la resistencia a tracción, si los cables pueden encontrarse expuestos a condiciones ambientales adversas deben tomarse precauciones para aumentar su protección.

Los tendones empleados en elementos postensados y pretensados no soportan cargas cíclicas de suficiente entidad para provocar problemas de fatiga. Este proceso es más significativo en puentes de tipo atirantado.

El grout de cemento proporciona un ambiente pasivo alrededor de los cables que protege los mismos frente a los efectos de la corrosión. La protección adecuada comienza con un adecuado llenado de los conductos en los que se alojan los tendones. El componente primario del grout es cemento Portland (Tipo I y II)(ASTM C150/150M), si bien pueden venir acompañado de otros productos para mejorar ciertas propiedades; el cemento de escorias puede mejorar la resistencia a ambientes agresivos. La adición de dry silica reduce la permeabilidad. La relación agua/cemento debe contenerse por debajo de 0,45 para evitar la formación de bleed.

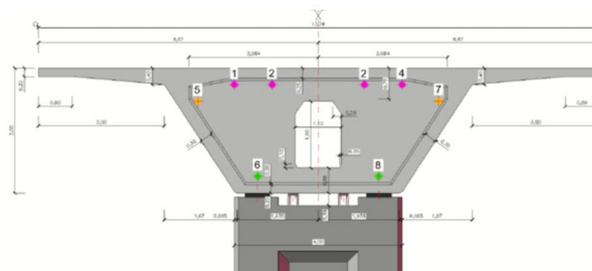


Figura 1. Sección de vigas cajón.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO

En este trabajo se aborda la integridad de cordones procedentes de muestras extraídas tras 25 años en servicio. Es una oportunidad envidiable de conocer el estado real de este material tras el daño mecánico y ambiental al que ha estado expuesto. Los primeros trabajos descritos tratan de evaluar el comportamiento mecánico en función de la apariencia (acabado superficial) de los cordones, tratando de evitar en lo posible las extracciones. Sin embargo, este análisis resulta de escaso rigor y ofrece grandes dudas debido al carácter interpretativo. Aunque se parte de este planteamiento, en este trabajo se centra en la viabilidad

en la continuidad de la estructura y no tanto en su condición actual. Para ello, se propone la realización de ensayos normalizados como son el de inmersión en CNS y los ensayos de CBT. Los ensayos de corrosión acelerada en cámara de niebla salina se realizan de acuerdo a la norma ASTM B-117-18, con una exposición al 100% de humedad con un ambiente al 5% de NaCl en peso y una duración de 30 días).

Los ensayos de CBT (FIP) se llevaron a término según la norma EN ISO 15630-3:2019, (disolución de tiocianato de amonio al 1N en agua destilada y 50°C de temperatura). Las muestras fueron solicitadas a una carga constante igual al 70% del límite elástico al 0,2% realizados sobre cables con diferente grado de deterioro procedentes de la obra reparada.

El estudio conjunto de las propiedades mecánicas en función de la apariencia y su variación tras la acción del ambiente aplicado durante el ensayo CNS, junto con los parámetros de durabilidad (obtenidos del ensayo FIP), y el análisis fractográfico permiten realizar una evaluación de integridad estructural para cada elemento en función del estado de degradación.

La fragilización por hidrógeno es un factor que puede estar presente siempre y coexisten un estado tensional y un ambiente electrolítico. Es el caso que nos ocupa se ha encontrado zonas con disolución acusa que ha dado lugar a disminución local de pH. Por tanto debe considerarse el posible efecto fragilizador del hidrógeno por lo que, aparte de la fractografías se ha incluido un evaluación del contenido en hidrógeno en cada etapa de la investigación. El objetivo general del trabajo es establecer una metodología de estudio del comportamiento mecánico y de la integridad estructural de los cordones.

### 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En primer lugar, se seleccionaron 24 muestras de cordones procedentes de emplazamientos elegidos por su representatividad. Las muestras presentaban distinto grado de deterioro superficial

En primer lugar, se procedió a una limpieza superficial en la mayor profundidad posible mediante hidrolavadora con agua a presión de 100 bar, de cara a la eliminación de la mayor cantidad de mortero adherido e impurezas posible, seguida de un secado exhaustivo con aire a presión e inmersión en acetona. A continuación, se procedió a clasificar el nivel de daño superficial de los cordones en tres estados (ver Figura 2),

- Bueno: No se aprecia daño superficial. Puede observarse visualmente alguna picadura que no marca por tacto superficial.
- Regular: Se aprecia aumento de rugosidad con pérdida de la textura original pero sin pérdida de masa apreciable
- Malo: En este caso existe pérdida de masa con cráteres locales y restos de óxidos en superficie.



Figura 2. Clasificación según estado superficial: arriba Bueno, centro Regular, abajo Malo.

Las anteriormente citadas 24 muestras de cordón seleccionadas para los trabajos fueron distribuidas para los diferentes ensayos de caracterización. De las 24 muestras de cordón recibidas, 18 fueron seleccionadas para la caracterización de propiedades en tracción, comprobándose sus propiedades mecánicas en estado de recepción, así como la determinación de su contenido de hidrógeno.

Las 18 muestras de cordón seleccionadas para la caracterización en tracción, cuya longitud era de 1900 mm, se dividieron en dos tramos de 950 mm de longitud cada uno, utilizándose uno de ellos para los ensayos de tracción y contenido en hidrógeno. El segundo tramo se empleó para la caracterización del material tras inmersión en cámara de niebla salina (CNS) durante 30 días, siendo posteriormente ensayadas a tracción y determinación de contenido en hidrógeno.

Finalmente, 6 muestras distintas a las anteriores fueron empleadas para su caracterización en el ensayo de corrosión bajo tensión (CBT) acelerada y posterior análisis de contenido en hidrógeno (6 correspondían a muestras identificadas y 1 carecía de identificación). Las muestras se seccionaron a una longitud de 1600mm, guardando el sobrante en reserva.

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Comportamiento mecánico, análisis fractográfico y contenido en hidrógeno

Los ensayos de tracción fueron desarrollados según la normativa UNE-36094, determinándose las principales propiedades mecánicas: límite elástico, resistencia a tracción, módulo de elasticidad y deformación bajo carga máxima entre otras. La determinación del contenido en hidrógeno mediante el método de extracción en caliente tomando la media de 5 análisis como resultado.

El análisis fractográfico de cada uno de los cordones fue llevado a cabo mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). En el caso de rotura de un primer alambre y no del resto se analizó este (el más débil o contenedor de un mayor defecto), y en el caso de rotura de varios (o todos) los alambres del cordón se analizaron el alambre

central (si hubiera sufrido rotura) y uno o dos alambres exteriores donde se apreció el mayor daño.

En la Figura 3 Puede observarse como de las 18 muestras consideradas, 13 superaron los requerimientos de la norma UNE-36094, mientras que 5 no lo hicieron. En la mayoría de los casos, 4 de 5, las muestras que no superaron los requerimientos fueron aquellas que presentaban un aspecto superficial con zonas en las que se podían encontrar importantes defectos de corrosión en uno o varios alambres con importantes pérdidas de sección.

Como muestran las figuras siguientes (Figura 4), aunque las cargas de rotura se vieron reducidas en todos los casos donde no se cumplieron los requerimientos de la normativa, el parámetro más afectado en estos casos fue la deformación bajo carga máxima. Como muestran las gráficas de comportamiento fuerza-deformación y la macrografía, en la mayor parte de casos el material no llegó ni a entrar en régimen plástico antes de romper con unas deformaciones inferiores al 1%, mientras que en los cordones cuyos parámetros mecánicos se mostraron acordes a los requerimientos de la norma se alcanzaron deformaciones del orden de 5-6%.

Por su parte, aquellos cordones ensayados a tracción tras la exposición a CNS mostraron un comportamiento similar. 7 de las 8 muestras consideradas cumplieron los requerimientos a tracción, correspondientes con muestras que también lo hicieron antes de ser sometidas a CNS, mientras que la muestra que no cumplió se trataba de la mitad homóloga a la que tampoco lo hizo antes de ser sometida a CNS.

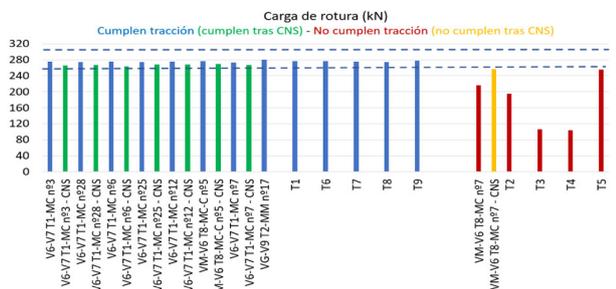


Figura 3 Resultados de carga de rotura de cordones ensayados a tracción (antes y después de CNS).



Figura 4. Resultados de deformación de cordones ensayados a tracción (antes y después de CNS).

Las figuras siguientes muestran la comparación de los principales parámetros mecánicos en ambos casos. Puede observarse como, a pesar de que las muestras con aspecto superficial “Bueno” han pasado a tenerlo “Regular” esto

no ha afectado a sus propiedades mecánicas, ya que no se han producido pérdidas de material apreciables. Igualmente, los contenidos en hidrógeno han sido más elevados en todos los casos: en algunos sensiblemente superiores y en otros una considerable cuantía superiores. Los cordones que cumplieron con los parámetros mecánicos requeridos tuvieron un contenido en hidrógeno (media de 5 medidas) por regla general menor que aquellos que no cumplieron (hay alguna excepción). Además, en las 5 muestras que no cumplieron, en una segunda instancia, se llevó a cabo la determinación del contenido de hidrógeno en la zona de la rotura, con el objeto de conocer el contenido local que pudo haberla provocado, obteniéndose en todos los casos valores muy superiores a los obtenidos de una zona cualquiera del cordón (que lo representa de forma general). De ello puede desprenderse que son estas zonas locales con defectos de mayor índole las que juegan el papel determinante en la rotura, más allá del estado general del cordón, pues será la presencia de “un eslabón más débil” el que cause el fallo del cordón.

Por su parte, las 8 muestras sometidas al ambiente de CNS presentaron unos contenidos en hidrógeno superiores a los de sus mitades análogas que no lo fueron (las ensayadas a tracción).

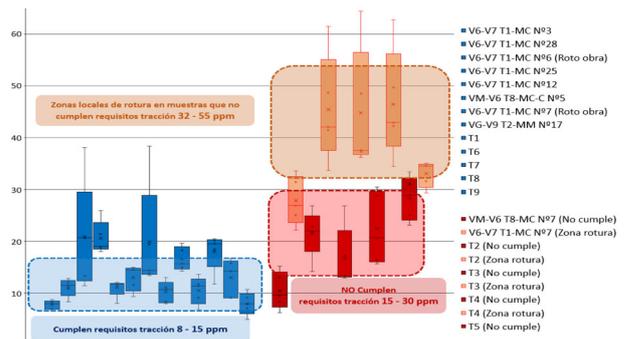


Figura 5. Resultados del contenido en hidrógeno de los cordones ensayados a tracción

#### 4.2. Ensayos de Corrosión Bajo Tensión

El requisito en este caso es que la media, o la mediana según se considere, del tiempo que los cordones resistan la exposición al citado ambiente sea superior a 5 horas, es decir 18000 segundos. Sólo una de las muestras superó el requisito de forma unitaria, y los valores medio y mediano obtenidos fueron de 10491 s y 7365, que distan bastante del citado requisito exigido.

Respecto a los contenidos en hidrógeno, los valores hallados en todos los casos se mantuvieron en un entrono constante de entre 10 y 12 ppm, no siendo especialmente más elevados que los que los de aquellos no expuestos a este ambiente, tal como se muestra en la Figura 6 siguiente.

Nuevamente es este caso, de cada uno de los cordones ensayados en CBT se llevó a cabo un análisis mediante técnicas SEM los alambres rotos con la carga correspondiente al 70% de límite elástico. En el caso de rotura de un sólo alambre y no del resto se analizó este (el más débil o contenedor de un mayor defecto), y en el

caso de rotura de varios (o todos) los alambres del cordón se analizaron el alambre central (si hubiera sufrido rotura) y uno o dos alambres exteriores donde se apreció el mayor daño. La Figura 7 muestra la fractografía de la superficie de rotura; el análisis consta de una macrografía general.

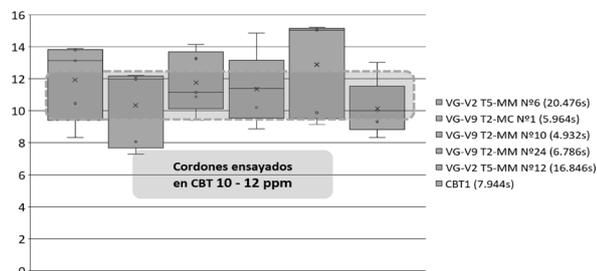


Figura 6. Resultados del contenido en hidrógeno de los cordones ensayados en CBT.

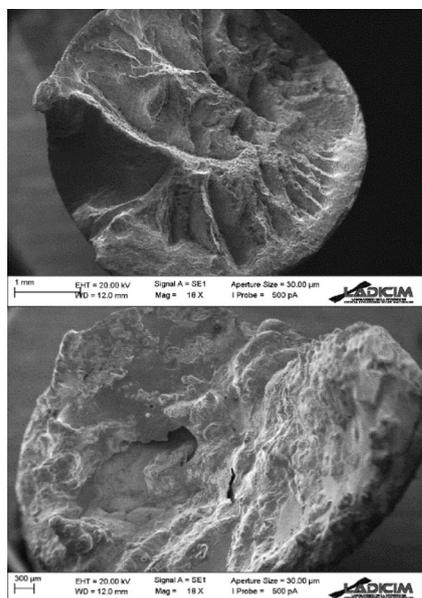


Figura 7. Imágenes tras ensayo de CBT cordón VG-V9 T2-MC n°1. Sup.: alambre lateral. Inf.: alambre lateral con mínima sección.

#### 4.3. Evaluación de la integridad estructural de cordones

La rotura prematura de cables que ha tenido lugar durante el ensayo de tracción se debe a la presencia de alambres con grandes pérdidas de sección por corrosión. Con el objetivo de establecer la causa final del fallo se ha analizado el segundo alambre roto del cordón T4, obteniendo los supuestos que se recogen en la Figura 8.

A partir de los análisis puede observarse que:

- Empleado un valor “realista” de tenacidad a fractura (50 MPa·m<sup>0.5</sup>), el FAD no reproduce adecuadamente las condiciones de rotura observadas.
- Hay que emplear valores de tenacidad en el entorno de 200 MPa·m<sup>0.5</sup> para que el punto de análisis se ubique en las proximidades de la línea de fallo. Estos valores no son realistas, más teniendo en cuenta la posible fragilización del material.
- El punto de análisis sí presenta valores razonables de Lr (aproximadamente iguales a Lr<sub>max</sub>).

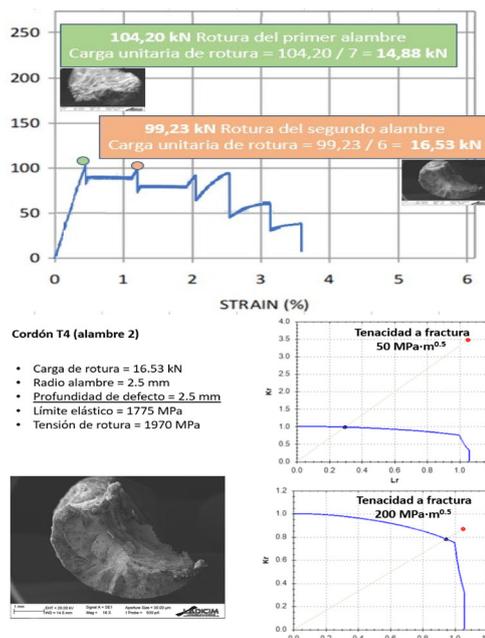


Figura 8. Análisis de fallo mediante FAD cordón T4.

De todo lo anterior se desprende que, para los casos analizados, la hipótesis de asimilar los defectos de gran pérdida de sección por corrosión a una fisura no parece acertada. Por el contrario, si se atiende al exclusivamente al criterio de colapso plástico de la sección (evaluado mediante comparación de Lr y Lr<sub>max</sub>), los resultados sí que parecen razonables. Es decir que, en estos casos, como se observó en los ensayos de tracción, el fallo se explica por plastificación de la sección remanente, mermada considerablemente por estos defectos de corrosión. Debe notarse que esta plastificación no tiene lugar en toda la extensión del cordón, sino localmente en la zona del alambre que contiene el defecto, por lo que a escala macroscópica (lo que puede verse en obra) la deformación total del cordón es despreciable. Sin embargo, esta plastificación local es suficiente para causar la rotura del alambre, e incluso del cordón si son coincidentes varios de ellos con pérdidas de material en la misma zona. Esto es de vital importancia ya que los cordones con esta defectología “rompen sin avisar”, es decir, sin que las medidas de deformación macroscópica del cordón puedan detectarla.

En el caso de aquellas roturas inducidas por un agrietamiento subcrítico sobrevenido por ambiente agresivo a partir de defectos de corrosión más superficiales se han considerado tres valores de fisura subcrítica de 0,25 mm, 0,5 mm y 1 mm posibles causantes del fallo, aplicando una carga del 70% de la resistencia a tracción de los cordones (como se hizo en los ensayos de CBT), tal como se recoge en la Figura 9. Es decir, en esta ocasión se han planteado tres hipótesis de tamaño de fisura y se ha calculado la tenacidad que tendría que tener el material para que se produzca el fallo con ellas aplicando la misma carga de rotura; ello con el objetivo de ver cual de los tamaños de grieta da como resultado una rotura para un valor de tenacidad típico de estos aceros de cordón de pretensar que están siendo considerados.

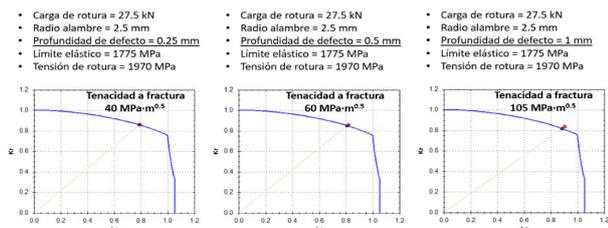


Figura 9. Análisis de fallo mediante FAD de cordón sometido a las condiciones del ensayo CBT.

En vista de ello, asumiendo como referencia valores de tenacidad en los entornos de  $80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$  para este tipo de materiales (trabajos J. Toribio), se confirma que las grietas subcríticas que excedan más allá de 0,5-0,7 mm, estarían en condiciones de ser causantes de procesos gobernados por la fractura frágil, tal como ocurre en los ensayos de CBT llevados a cabo.

Se han comparado las superficies de fractura de los alambres rotos en servicio con los que fallaron durante el ensayo de CBT. Las morfologías observadas en ambas muestran, a pesar de la oxidación y corrosión experimentada por el cordón roto en servicio, un aspecto muy similar consistente en fracturas cuasi-frágiles producidas antes de la plastificación general (Figura 10). Si se aplica el análisis anterior a los cordones sometidos a CBT, debe considerarse la coexistencia de dos efectos simultáneos:

- En los contextos donde existe un ambiente corrosivo llegan a producirse pérdidas de material suficientes para producir fallo en el dominio del colapso plástico. Entendiendo como tal el que sucede a escala local de la zona del defecto (no a escala macroscópica del cordón, como ya se ha comentado). Es decir, se amplifica el tamaño del defecto.
- Al mismo tiempo, el efecto del ambiente, que da lugar a la pérdida de sección, produce un cierto grado de fragilización que se manifiesta en forma de propagación subcrítica. Es decir, la fragilización implica una reducción en las propiedades en fractura.

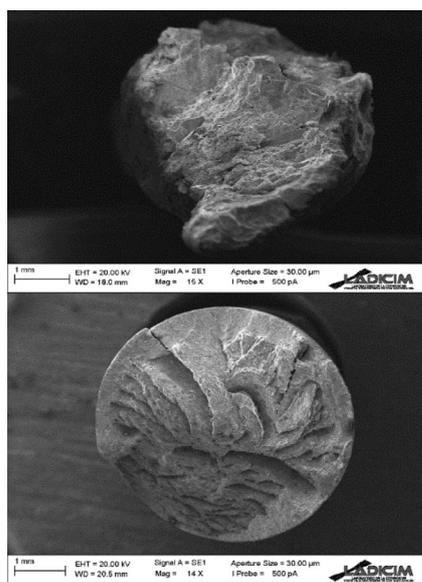


Figura 10. Macrografía de muestra. Sup.: rota en servicio; Inf.: rota en ensayo CBT.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha realizado una clasificación de los cordones en tres niveles de daño según su apariencia superficial: bueno, regular y malo. Los niveles bueno y regular no presentaron mermas de comportamiento en tracción, cumpliéndose los requerimientos mecánicos normativos; los clasificados como malo no los superan.

No se han apreciado fenómenos de fatiga en ningún caso. El modo de fallo en servicio fue debido a colapso plástico de la sección remanente debilitada de un material con cierto nivel de fragilización. La rotura última de los cordones se genera a partir de un defecto producido por corrosión y no por un crecimiento de fisura (fisuración por el ambiente).

En este modo de fallo no se producen deformaciones a escala macroscópica del cordón lo suficientemente grandes como para ser detectadas en obra: el cordón rompe “sin avisar” cuando se dan defectos en varios alambres en una misma zona, sin que la instrumentación detecte grandes variaciones de longitud del cordón completo. Por todo ello, el ensayo de tracción no puede representar de manera absoluta la condición real del cordón en obra, dado que las zonas más representativas de un cordón, las clasificadas como “malo”, no pueden ensayarse, usándose otras menos dañadas considerados “regular” o “bueno”.

Los ensayos de CBT se han mostrado como los más representativos al incorporar condiciones similares a las pésimas sufridas por los cordones durante su estado en servicio. Los ensayos CNS han mostrado capacidad para acelerar el deterioro superficial de los cordones, pero sin afectar al comportamiento mecánico.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a las empresas a cargo de los trabajos de reparación la confianza depositada en ellos para las labores de análisis llevadas a cabo.

## REFERENCIAS

- [1] J. A. Alvarez, R. Lacalle, B. Arroyo, J. Sainz-Aja, I. Sosa, A. Alonso, 2017. Procedia Structural Integrity 5, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.062>
- [2] Mihaela Iordachescu, Andres Valiente, Maricely De Abreu, Engineering Failure Analysis 125 (2021) 105437
- [3] M. Morgese, F. Ansari, M. Domaneschi, G.P. Cimellaro, Post-collapse analysis of Morandi’s Polcevera viaduct in Genoa Italy, Journal of Civil Structural Health Monitoring 10 (2020) 69–85, <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00370-7>.
- [4] Andrés Valiente, Mihaela Iordachescu, Antonio Aznar, Maricely de Abreu, Construction and Building Materials 285 (2021) 122945
- [5] Materials 2019, 12, 753; doi:10.3390/ma12050753
- [6] ASTM G49/94, standard guide for examination and evaluation pitting corrosion, ASTM Int. PA, USA, 2005
- [7] Chi-Ho Jeon, Duy Nguyen, Chang-Su Shimm, Assessment of mechanical properties of corroded prestressing strands; Applied Sciences, 2020
- [8] Xuhui Zhang, Lei Wang, Jianren Zhang, Yongming Liu Construction and Building Materials 134 (2017) 7–17
- [9] Lei Wang, Ju Yi, Jianren Zhang, Youbao Jiang, Xuhui Zhang Construction and Building Materials 153 (2017) 598–606
- [10] J. Toribio, D. Vergara y M.Lorenzo Theoretical and Applied fracture Mechanics 90 (2017) 276-286.
- [11] EN ISO 15630-3:2019