

*Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

EVALUACIÓN DEL DAÑO DE CORDONES Y ALAMBRES POSTENSADOS DE UN PUENTE TRAS 55 AÑOS EN SERVICIO

Trabajo realizado por:

Ulises Luis Fernández Cáceres

Dirigido:

José Alberto Álvarez Laso

Federico Gutiérrez-Solana Salcedo

Borja Arroyo Martínez

Titulación:

**Máster Universitario en Integridad y
Durabilidad de Materiales,
Componentes y Estructuras**

Santander, Julio de 2025

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	4
1.1 Introducción	4
1.2 Objetivos	5
2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Cordones postensados y sus aplicaciones	6
2.1.1 Diferencias principales con los cables de acero utilizados en puentes atirantados	10
2.1.2 Tipologías de cordones de acero postensado: internos y externos	11
2.2 Deterioro de cordones postensados por exposición a ambientes agresivos	12
2.2.1 Efectos de la corrosión	14
2.2.2 Efectos de la fragilización por hidrógeno	16
3. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	20
3.1 Descripción del puente	20
3.1.1 Características de la estructura del puente	20
3.1.2 Daños detectados	22
3.2 Muestras recibidas	24
3.3 Ensayo de tracción simple	27
3.4 Ensayo de contenido de hidrógeno	28
3.5 Tomografía axial computarizada (TAC)	29
3.6 Análisis fractográfico	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1 Ensayo de tracción simple	31
4.1.1 Ensayo de cordones del Grupo 1	31
4.1.2 Ensayo de cordones del Grupo 2	33
4.1.3 Ensayo de cordones del Grupo 3	36
4.1.4 Ensayo de alambres del Grupo 4	40
4.1.5 Estimación de la sección útil remanente por tensión de rotura	43
4.1.6 Ensayos adicionales – Alambres centrales de los cordones ensayados	44
4.2 Ensayo de contenido de hidrógeno	51
4.3 Tomografía axial computarizada (TAC)	55
4.3.1 Comparación de la sección remanente con la sección útil estimada por tensión de rotura	59
4.4 Análisis fractográfico	60
4.4.1. Grupo 1	60
4.4.2. Grupo 2	61
4.4.3. Grupo 3	63
4.4.4. Grupo 4	64

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	65
5.1 Conclusiones	65
5.2 Trabajo futuro	72
6. BIBLIOGRAFÍA	73

1. Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Si bien los primeros inventos de elementos pretensados en el hormigón tuvieron su origen a finales del siglo XIX, a partir de mediados del siglo XX se produjo la adopción de forma masiva de esta metodología constructiva como una forma de impulsar la reconstrucción de infraestructuras después de la Segunda Guerra Mundial en países como Francia, Alemania y Estados Unidos [1]. Actualmente, el uso de acero pretensado en el hormigón es una práctica ampliamente difundida en la industria de la construcción, mediante la cual es posible el diseño de elementos estructurales más esbeltos y eficientes.

Uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la industria es al diseño e implementación de métodos de protección química de estos elementos metálicos, los cuales podrían quedar sometidos a la acción nociva de la corrosión y de la fragilización por hidrógeno inducidas por la exposición a ambientes de menor o mayor agresividad. La pérdida de capacidad portante que sufran dichos elementos puede llegar a comprometer la integridad y seguridad de la estructura de la cual forman parte.

En dicho contexto, el presente Trabajo de Fin de Máster se centra en el estudio del caso de las vigas de hormigón pretensado situadas en el vano más extremo del lado oeste de un puente contiguo al estribo de tierra firme el cual recibe la denominación de Vano Nro. 30. En las mencionadas vigas se habría detectado el desprendimiento del recubrimiento inferior de hormigón y la rotura de cordones de armadura activa, cuyas extremidades rotas habrían quedado colgando debajo del puente (Figura 1.1).



Figura 1.1 Cordones rotos con recubrimiento de hormigón desprendido [2]

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

En el año 2024, se procedió a la demolición completa de las vigas del Vano Nro. 30, siendo estas sustituidas y el puente devuelto a su situación de servicio normal. Cabe notar que, como el vano se corresponde al último tramo del puente antes del estribo que lo conecta a tierra firme, este se encuentra a menor altura sobre el nivel del agua que los demás vanos; este hecho tiene consecuencias en lo que se refiere a los efectos ambientales.

El puente en cuestión se encuentra en servicio desde el año 1969, por lo que, tras más de 55 años desde su puesta en marcha, existe la preocupación de que los demás vanos se encuentren expuestos a sufrir daños similares a los del vano Nro. 30.

Por lo tanto, se ha solicitado la evaluación de la integridad de los cordones de muestra extraídos durante el proceso de demolición, de manera a caracterizar el deterioro sufrido.

1.2 Objetivos

Se ha propuesto como objetivo principal del presente trabajo de investigación, el determinar el grado de deterioro sufrido por los elementos pretensados en puntos específicos de la estructura, así como los mecanismos que han producido el mismo, y determinar si los mismos se encuentran en condiciones compatibles o incompatibles con la seguridad.

Para ello se han ejecutado una serie de ensayos de laboratorio que miden la capacidad portante remanente y ductilidad de las muestras, así como su contenido de hidrógeno, rugosidad aparente, sección remanente y caracterización de la rotura durante los ensayos de tracción. En base a los resultados obtenidos es posible determinar la naturaleza del ataque sufrido a causa del ambiente.

- La capacidad portante y la ductilidad se obtienen de las gráficas tensión-deformación de los ensayos de tracción simple.
- El efecto de la fragilización por hidrógeno se deduce de la correlación de los resultados en cuanto a ductilidad de los ensayos de tracción con la cantidad de hidrógeno medido en cada una de las muestras.
- La sección remanente y la rugosidad se obtiene de la realización de ensayos de tomografía axial computarizada de alambres individuales de cada muestra.
- Finalmente, la caracterización de la rotura del material se obtiene mediante observaciones a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM).

2. Estado del arte

2.1 Cordones postensados y sus aplicaciones

Desarrollado durante los últimos 80 años, el hormigón pretensado ha brindado a los ingenieros la capacidad de construir estructuras económicas, duraderas y eficientes, a menudo utilizando recursos y mano de obra locales, combinados con la tecnología más avanzada en diseño y construcción para mejorar el acceso y las conexiones de transporte de las comunidades locales.

Las estructuras de hormigón pretensado modernos son ampliamente utilizadas en el campo de la construcción de puentes gracias a sus buenas propiedades de comportamiento y a su capacidad de proveer extensos vanos. En los Estados Unidos, entre 1950 y 1990, en comparación con los puentes de estructura metálica y de hormigón armado, el uso de puentes de hormigón pretensado aumentó considerablemente, siendo los puentes metálicos de vanos medios y largos reemplazados de manera gradual por los más modernos puentes de hormigón pretensado.

El hormigón pretensado es ideal para la construcción de puentes de grandes vanos. Algunos de los ejemplos más representativos de esta característica son [3]:

- El puente Parrotts Ferry en California, Estados Unidos, con un solo vano de 195 metros.
- El vano central del puente atirantados Vasco de Gama en Lisboa, Portugal, es de 420 metros.
- El puente Lubha en Assam, India, con una estructura tipo cajón de un solo vano de 172 metros de largo.
- El puente Ganga en Patna, India, que en su tiempo fue el puente de hormigón pretensado más largo del mundo, con 5575 metros de largo en total, con vanos continuos de 121.65 metros cada uno.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

El pretensado del hormigón es ahora una técnica bien establecida en todos los países, con una amplia variedad de tipos de puentes y longitudes de vano construidos, que van desde cruces marítimos de gran escala hasta viaductos urbanos, autopistas, estructuras ferroviarias y pasarelas peatonales, así como también estructuras portuarias, deportivas y de grandes voladizos.

Para todas estas estructuras, los principios detrás del diseño y la construcción de puentes de hormigón pretensado siguen siendo los mismos: combinar la resistencia a la tracción del pretensado con la resistencia a la compresión del hormigón para crear una estructura equilibrada y mejorada.

El hormigón es resistente a la compresión, pero débil a la tracción; sin embargo, el pretensado puede utilizarse para asegurar que el hormigón permanezca dentro de sus límites de capacidad tanto a tracción como a compresión bajo el rango de cargas aplicadas.

El pretensado en obras de puentes se aplica normalmente como una fuerza externa al hormigón mediante el uso de alambres, cordones o barras, y puede aumentar significativamente la resistencia del hormigón por sí solo. Esto puede resultar en vanos más largos o esbeltos, lo cual mejora la estética al tiempo que proporciona una solución económica en la construcción [1].

Como se observa en la Figura 2.1, el principio fundamental del pretensado consiste en la introducción de una tensión interna de compresión en regiones de la estructura que normalmente trabajan a tracción.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

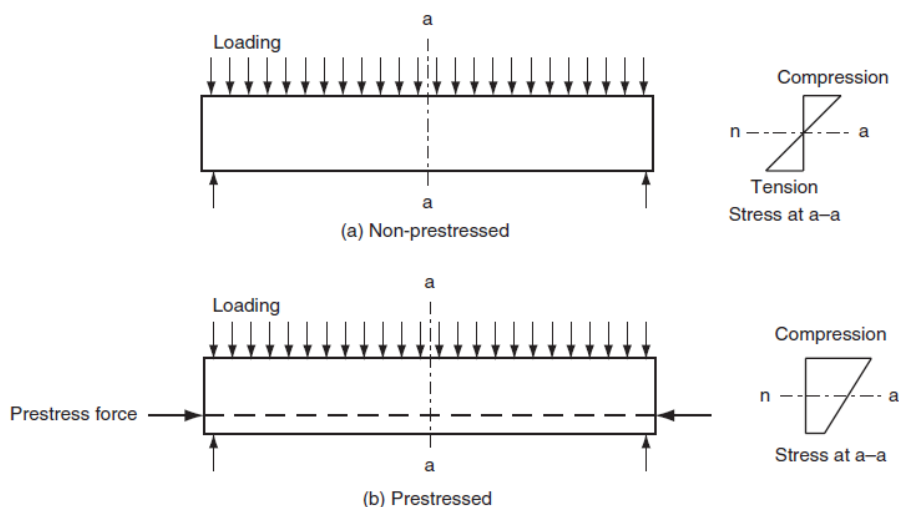


Figura 2.1 Esquema de viga pretensada con carga uniformemente distribuida [1]

Dicha tensión puede introducirse mediante el uso de elementos pretensados o postensados. La diferencia entre ambos, observable en la Figura 2.2, radica en que los primeros son sometidos a una tensión de tracción previa al hormigonado para luego transferir dicha tensión al hormigón una vez que este haya adquirido la resistencia mínima necesaria, mientras que los segundos son puestos en obra y tensionados dentro de vainas colocadas en el hormigón una vez que este haya adquirido cierta resistencia a compresión, y sujetadas en posición mediante el uso de cuñas para finalmente rellenar las vainas con una mezcla cementicia tipo grout que protege a los cordones del deterioro ambiental.

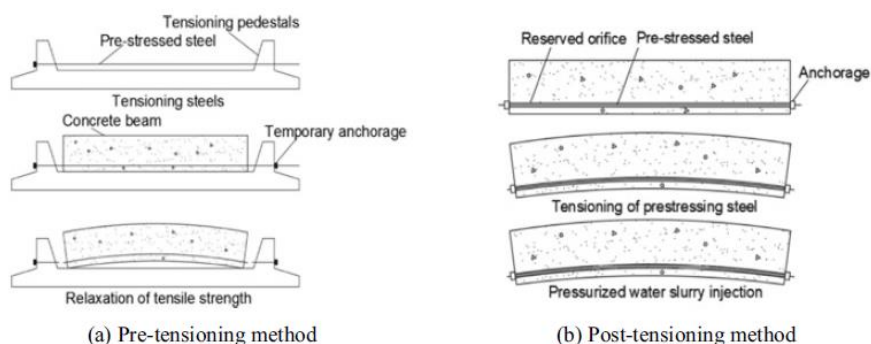


Figura 2.2 Diferencias fundamentales entre sistemas pretensados y postensados [3]

El uso de cordones postensados, que es el objeto de estudio del presente trabajo, permite aprovechar mejor la geometría de las estructuras que las barras pretensadas,

puesto que es posible diseñar el trazado teniendo en cuenta las regiones de mayores sollicitaciones a tracción.

Típicamente, los cordones y alambres postensados están elaborados con un acero trefilado de alta resistencia y baja relajación, con límites de roturas comprendidos entre 1570 MPa y 1870 MPa, y deformaciones mínimas hasta rotura de 3.5% [4]. En el caso de los cordones, estos normalmente están formados por dos, tres o siete alambres, quedando en el caso de los cordones de siete alambres, un alambre central alrededor del cual se disponen los seis restantes en forma helicoidal (Figura 2.3).

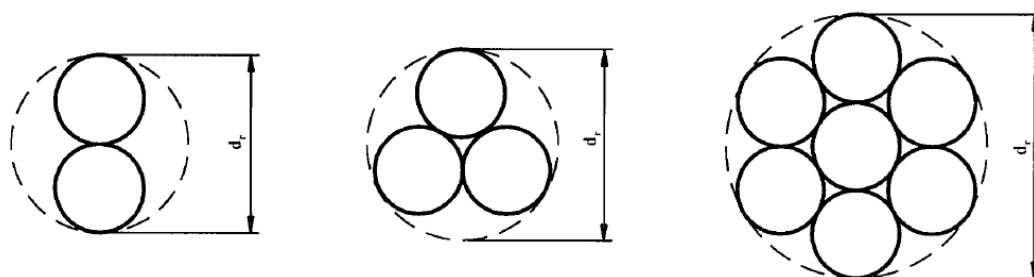


Figura 2.3 Sección típica de cordón de acero postensado, con el diámetro real de los mismos indicado [4]

El trefilado consiste en un proceso de conformado en frío que se utiliza para reducir el diámetro de un alambre de acero y mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente su resistencia a la tracción, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en hormigón pretensado. El proceso sigue los siguientes pasos: Se parte de un alambre de acero laminado en caliente con un diámetro mayor al deseado. El mismo se limpia para eliminar cascarilla de óxido y otros contaminantes superficiales, lo cual puede hacerse químicamente o mecánicamente. Finalmente, el alambre se hace pasar a través de una o varias hiladoras o trefilas, que son matrices con orificios de diámetro decreciente. Al pasar por estas matrices, el diámetro del alambre se reduce progresivamente, deformándose plásticamente sin calentamiento, lo que aumenta su resistencia a la tracción, límite elástico, y dureza, debido al endurecimiento por deformación.

2.1.1 Diferencias principales con los cables de acero utilizados en puentes atirantados

Si bien los cables de acero utilizado en puentes atirantados pueden ser fabricados con la misma geometría que los cordones postensados descritas al final de la Sección 2.1 y con capacidades mecánicas similares, las condiciones de trabajo y, por lo tanto, los requerimientos para cada uno de ellos, pueden llegar a variar notablemente.

Una de las diferencias más importantes radica en la tensión de trabajo. Los cordones postensados están diseñados para ser tensados a aproximadamente un 70% de su tensión de rotura, por lo que el mayor foco de atención en los mismos se encuentra en lograr una baja relajación que impida que dicha tensión disminuya considerablemente en el tiempo, mientras que los cables de acero para puentes atirantados trabajan normalmente a una tensión máxima de entre un 40% y 60% de su tensión de rotura, poniendo especial atención a la resistencia a la fatiga, puesto que el paso del tráfico en los puentes es capaz de hacer variar de manera cíclica con una amplitud considerable la tensión de trabajo.

Otra diferencia que podría considerarse la más evidente es el mecanismo utilizado para dar protección contra la corrosión. Si bien los cordones postensados adherentes están pensados para trabajar en conjunción con una inyección de mortero de grout, y en el caso de cordones internos también con la protección adicional de un recubrimiento de hormigón, los cables usados en puentes atirantados, que normalmente se encuentran más expuestos a la agresividad del ambiente, recurren a un complejo sistema de engrasado y envainado de cables individuales, encerado de conjuntos de cordones, fundas exteriores de polietileno de alta densidad y sellado de anclajes para evitar el contacto con la humedad del ambiente (Figura 2.4), aunque esto último también podría ser aplicable a cordones postensados no adherentes.

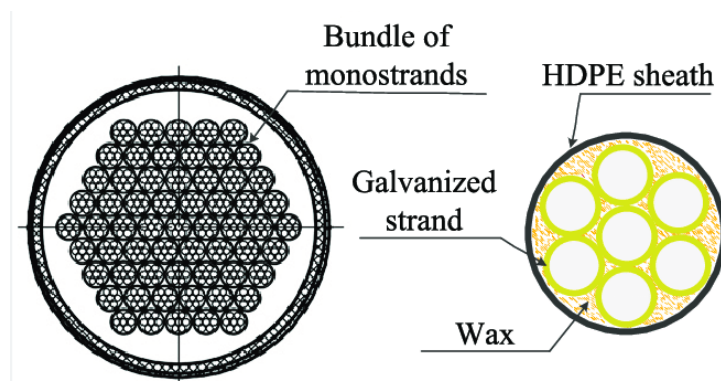


Figura 2.4 Sección típica del sistema de protección y lubricación de un cable formado por varios cordones de acero para puente atirantado [5]

2.1.2 Tipologías de cordones de acero postensado: internos y externos

Si bien existen varios criterios para clasificar las distintas tipologías de cordones de acero postensado, una de las más evidentes es la de agruparlas en cordones internos o externos.

Los casos más comúnmente conocidos son los de cordones internos, lo cuales se encuentran en el interior de los elementos estructurales de hormigón con recubrimientos adherentes, tal y como se describe en la Figura 2.2, pero también es posible encontrar casos de cordones externos a la estructura de hormigón (Figura 2.5), como es el caso de un puente tipo cajón [6] en el cual se analizó el estado de degradación de unos cordones externos alojados en unos ductos rellenos con una lechada cementicia tipo grout, aunque como se describió al final de la Sección 2.1.1, es posible encontrar casos en los cuales no se cuente con dicha protección de grout, contándose con un sistema protector no adherente en su lugar.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio



Figura 2.5 Cordones postensados externos en un puente de estructura tipo cajón [1]

2.2 Deterioro de cordones postensados por exposición a ambientes agresivos

La corrosión del acero en el hormigón constituye una de las principales causas de degradación estructural. En las estructuras de hormigón pretensado, el elevado nivel de esfuerzos en los tendones modifica significativamente el proceso de corrosión del acero, provocando la aparición, junto a la corrosión convencional, de procesos de corrosión bajo tensión. La corrosión bajo tensión se caracteriza por la interacción entre la corrosión convencional (ataques por picaduras en ambientes con cloruros) y la microfisuración del acero, esta última inducida por el alto nivel de tensiones y el fenómeno de fragilización por hidrógeno.

La microfisuración del acero puede provocar una rotura frágil del acero de pretensado incluso ante niveles muy bajos de corrosión y bajo condiciones normales de carga de servicio. En tales casos, la rotura del tendón puede ocurrir sin ninguna señal visible previa, lo cual compromete de manera significativa la capacidad estructural del elemento [7].

En el acero postensado, los tendones internos inyectados están encapsulados dentro de un sistema compuesto por lechada, conducto y hormigón, lo que dificulta detectar la corrosión en curso antes de que sea demasiado tarde. Puede observarse un esquema típico de tendón multi-cordón en la Figura 2.6. La implementación de tecnologías de evaluación no destructiva para determinar las condiciones de los tendones representa

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

un desafío en algunas ubicaciones críticas—como las zonas de anclaje, diafragmas y bloques de desvío—donde una red densa de armaduras de acero está encerrada en grandes volúmenes de hormigón (Figura 2.7).

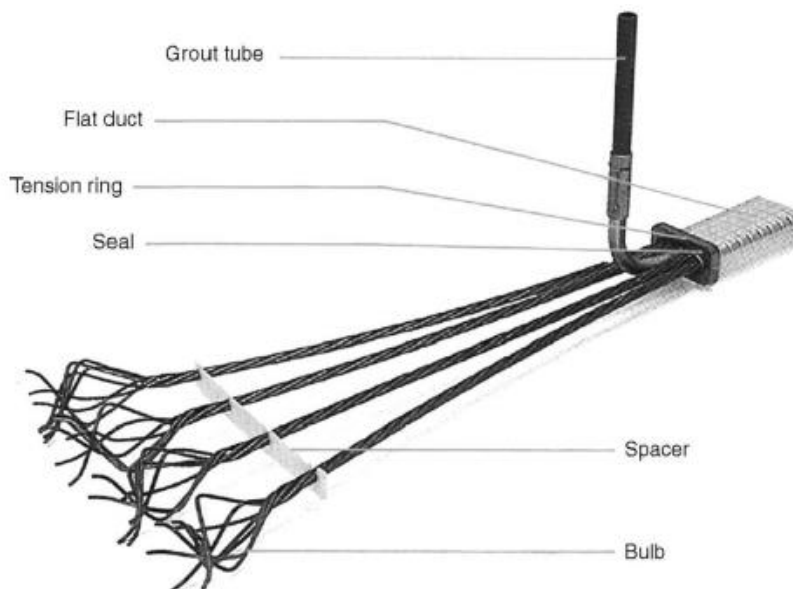


Figura 2.6 Esquema típico de tendón multi-cordón [1]



Figura 2.7 Red de armaduras pasivas y ductos de armaduras activas [1]

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

De acuerdo al estudio de diez casos de fallas en tendones postensados en los Estados Unidos [8], todos los problemas de corrosión en elementos postensados observados estaban relacionados al agua, a ambientes húmedos o relleno de grout deficiente. El agua puede ingresar mediante fuentes externas o puede formarse internamente debido a la segregación del agua del grout de relleno. Una vez que comienza el proceso de la corrosión, pueden influir muchos factores como la disponibilidad de oxígeno, el contenido de humedad, la resistencia eléctrica del grout, el grado de carbonatación, concentración de iones y segregación del grout.

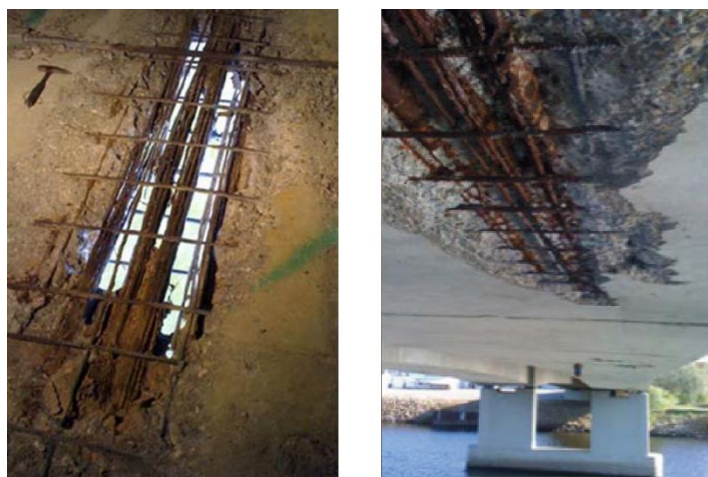


Figura 2.8 *Puente de la Avenida Plymouth en Minnesota, Estados Unidos, en el año 2010 [8]. Se observa el desprendimiento de hormigón en la cara inferior de un puente tipo cajón por corrosión de las armaduras activas y pasivas.*

También es interesante mencionar el caso estudiado [9] en el cual se produjo la falla de uno de los cables de un puente atirantado luego de encontrarse expuesto a un ambiente altamente agresivo por treinta años, lo cual produjo la pérdida de sección útil debido a la corrosión, pero en el cual no se habrían detectado mayores efectos nocivos en su comportamiento a la plastificación o fractura producidos por la fragilización.

2.2.1 Efectos de la corrosión

La corrosión de los cordones postensados supone una de las mayores razones de deterioro de puentes pretensados. Mundialmente se han reportado accidentes en puentes de hormigón pretensado debido a la corrosión. Por ejemplo, entre 1951 y 1979

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

se han encontrado más de 200 casos en todo el mundo de problemas de durabilidad en puentes asociados al deterioro por corrosión de armaduras activas, así como también se ha reportado por el departamento ferroviario de China en 1994 que más de 6000 puentes de hormigón defectuosos se encontraban operativos, lo cual representaba el 18.8% del total en aquel entonces [3].

La corrosión en elementos pretensados es más compleja que en el acero ordinario debido al efecto combinado de la corrosión electroquímica, corrosión bajo tensión y la corrosión-fractura. La misma puede presentarse con dos morfologías diferentes: corrosión uniforme y corrosión localizada (por picaduras). La corrosión uniforme produce una pérdida de material distribuida de manera uniforme sobre toda la superficie del acero expuesta al ambiente corrosivo, mientras que la corrosión por picaduras genera una pérdida localizada de material en la superficie del acero, formando pequeñas cavidades (picaduras) que provocan un aumento en la concentración de esfuerzos. Es causada por la presencia de cloruros que participan en la reacción electroquímica.

El entorno de hormigón y grout de relleno inicialmente protege al acero de refuerzo, actuando como una barrera física frente al ambiente debido a la alta alcalinidad que presenta ($\text{pH} \sim 12.5$), que crea una película protectora delgada en la superficie de la barra de acero. La carbonatación del hormigón produce una disminución del pH. Esta caída del pH en la superficie del acero provoca la ruptura de la película protectora y el inicio de los procesos electroquímicos de corrosión. La reacción de corrosión se acelera si hay presencia de iones cloruro. Los cloruros reaccionan con la película protectora, disolviéndola localmente. Luego, el hierro disuelto acumulado en la picadura reacciona con los cloruros y el agua, produciendo ácido clorhídrico, lo cual acelera aún más la reacción.

El ataque por picaduras es reconocido como el tipo más severo de corrosión del acero por dos razones. Primero, la naturaleza localizada del ataque implica que puede ocurrir una pérdida considerable de sección antes de que haya señales visibles de advertencia. Segundo, la corrosión por picaduras afecta no solo la resistencia, sino también la

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

ductilidad, reduciéndola de manera significativa. Esto es preocupante, ya que las normas actuales de diseño y evaluación se basan en la garantía de una ductilidad adecuada, la cual podría no ser válida bajo corrosión por picaduras, lo que supondría un riesgo para la seguridad.

La corrosión tiene efectos más graves en las estructuras pretensadas, donde la combinación del pretensado con la pérdida de sección de los cordones debido a la corrosión puede aumentar el riesgo de una falla frágil [10].

La investigación actual muestra que la vida en servicio de las estructuras de hormigón en condiciones secas y de ambiente no corrosivo es de 2 a 3 veces mayor que las de aquellas estructuras que se encuentran en condiciones de humedad y ambiente corrosivo [3].

2.2.2 Efectos de la fragilización por hidrógeno

Cuando el hidrógeno penetra en la red cristalina del acero, tiende a difundirse y ubicarse en zonas con mayor deformación, como dislocaciones o bordes de grano. Esto puede llevar al fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno (HE), que es un proceso complejo con múltiples mecanismos posibles. Entre ellos se incluyen la formación de hidruros frágiles, cavidades internas, burbujas de alta presión, pérdida de cohesión interna o microplasticidad localizada. La fragilización por hidrógeno puede ocurrir incluso cuando el acero no se encuentra tensionado, volviéndose evidente recién cuando se aplica una carga.

Cuando el hidrógeno entra en la matriz metálica, inhibe el deslizamiento de dislocaciones y favorece la fragilización. Cerca del extremo de una grieta, el estado de tensión triaxial expande la red cristalina y atrae átomos de hidrógeno desde zonas menos tensadas. Si se acumula suficiente hidrógeno y la tensión es elevada, puede iniciarse una microfractura que desencadene una grieta real [11].

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

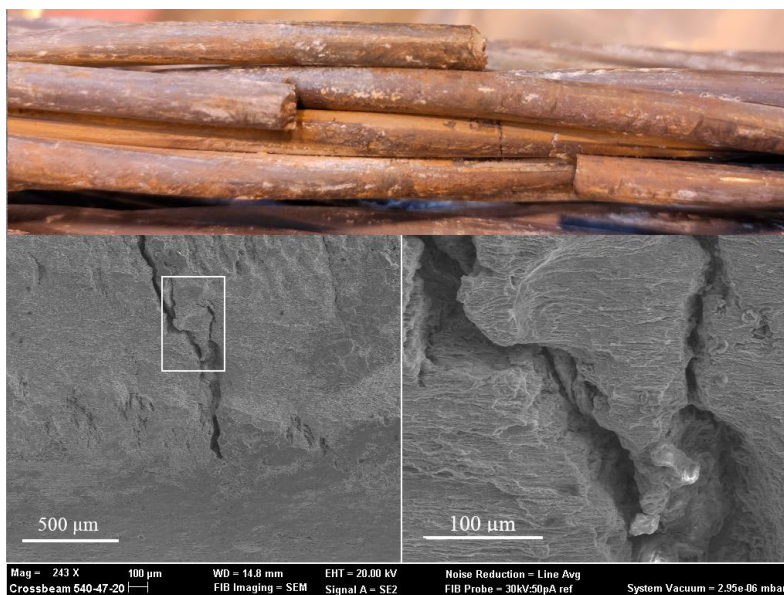


Figura 2.9 Fisuración asistida por hidrógeno en un alambre de cordón postensado [12]

Desde el punto de vista del comportamiento mecánico, la fragilización por hidrógeno tiende a reducir la ductilidad del acero, produciéndose la falla del mismo con deformaciones inferiores a las esperadas, pudiendo incluso llegar al extremo de no mostrar deformaciones plásticas previamente a la rotura.

Debido al gradiente de tensiones presente en el material, tanto el hidrógeno gaseoso absorbido del aire como aquel que se encuentre presente dentro de la microestructura del metal, se trasladan para acumularse en la región de mayor tensión mediante un fenómeno conocido como difusión. Cuando la concentración local de hidrógeno alcanza un valor crítico bajo tensión, se produce la fractura de acuerdo al esquema observable en la Figura 2.10. Usualmente, el origen del hidrógeno se clasifica en interno y externo, siendo el hidrógeno interno producido durante los mismos procesos de preparación del material, como fundición, soldadura o tratamientos superficiales, mientras que el hidrógeno externo se genera durante la vida en servicio del material debido a la corrosión, gas de hidrógeno o ambientes en presencia de gas H_2S .

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

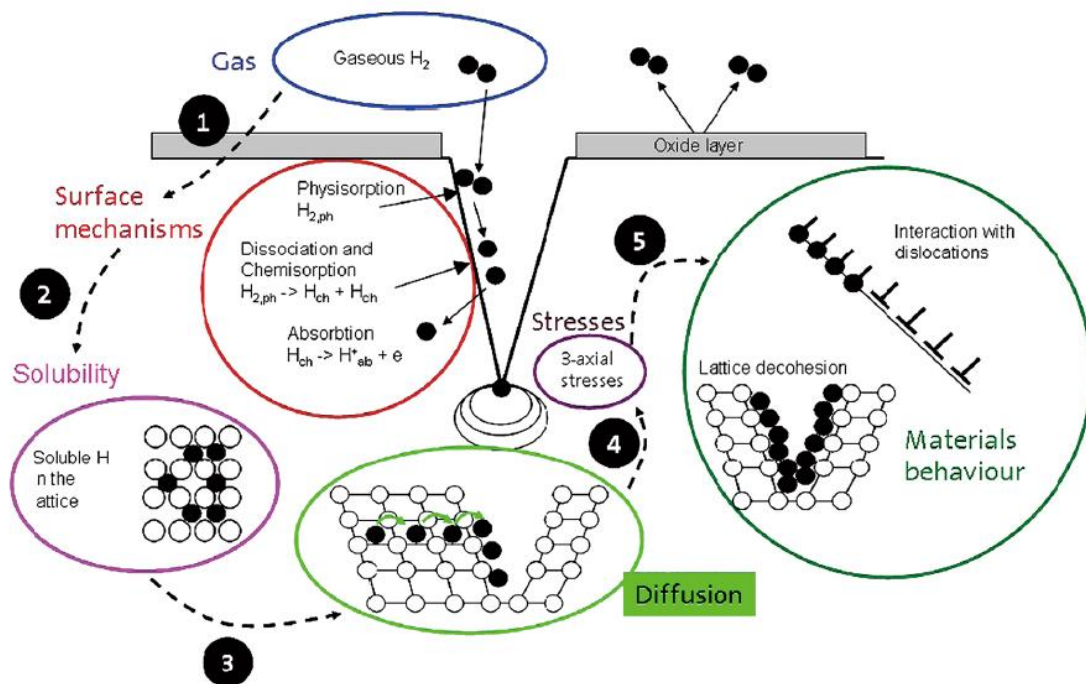


Figura 2.10 Mecanismos de absorción y difusión del hidrógeno que causa la fragilización del acero [13]

De acuerdo al estudio [6], de análisis de integridad de cordones postensados externos de un puente tipo cajón, se observa una correlación directa entre un modo de falla frágil con menos de 1% de deformación hasta rotura con un alto contenido de hidrógeno, el cual es notablemente aún más alto localmente en la región específica donde se produce la rotura. 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.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

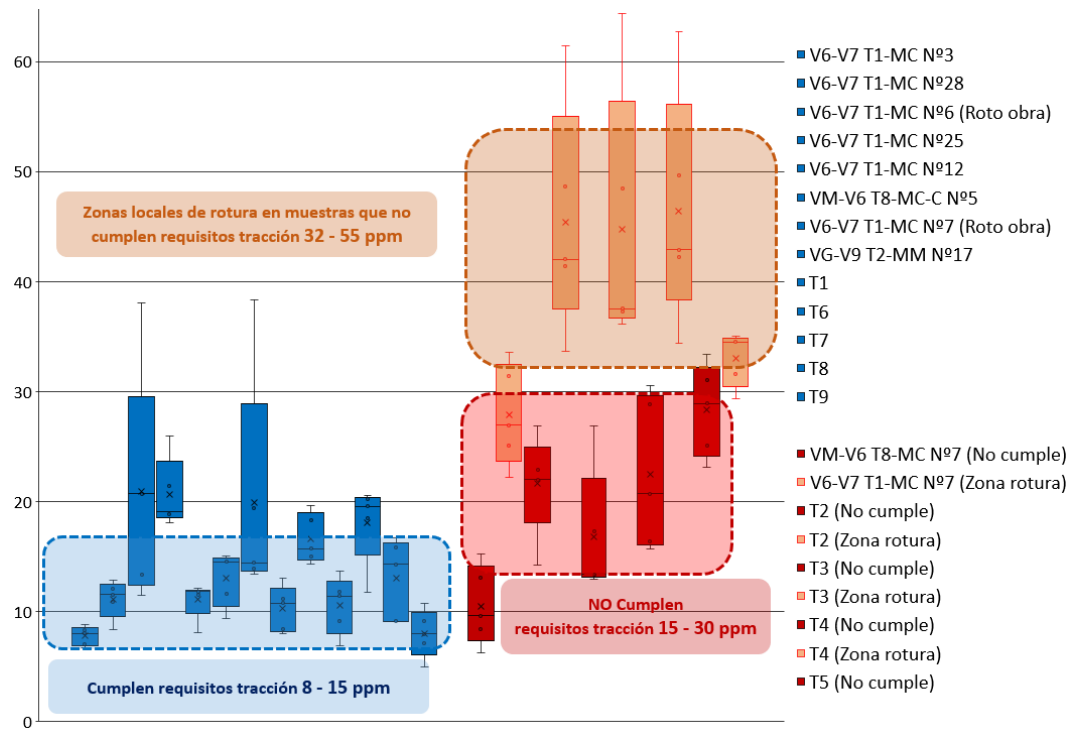


Figura 2.11 Influencia del contenido de hidrógeno en el comportamiento mecánico de unos cordones de acero pretensado [6]

3. Planteamiento del trabajo y metodología experimental

3.1 Descripción del puente [2]

El puente objeto del siguiente trabajo está formado por 29 vanos isostáticos de 44 de luz entre ejes de apoyos y un vano metálico basculante de 90 m de luz libre. Los 29 vanos de acceso se dividen en 12 en el lado occidental y 17 en el lado oriental.

La longitud total del viaducto es de 1366 m, siendo el ancho constante de 12.85 m. El trazado del puente es recto en planta. En alzado, el viaducto tiene una pendiente variable, ascendente desde el estribo hasta el tramo móvil

3.1.1 Características de la estructura del puente

Los vanos tipo del puente son tramos simplemente apoyados de 44 metros de luz entre ejes de apoyos, resueltos mediante un tablero de vigas prefabricadas con sección doble T que apoyan a media madera sobre los estribos y sobre los dinteles de las pilas. La longitud de las vigas es de 43.90 m.

El tablero está formado por seis vigas doble T de 2.75 metros de canto, dispuestas con un intereje de 2.03 m. El tablero de vigas prefabricadas no tiene losa de compresión de hormigón in situ ya que son las alas superiores de las vigas, con un ancho de 1.90 m cada una, las que dan forma a la plataforma superior del tablero, salvo unas franjas longitudinales hormigonadas in situ entre vigas.

Las vigas están pretensadas mediante seis cables con 7 cordones de 0.60" cada uno. El pretensado tiene trazado parabólico y el pavimento está dispuesto directamente sobre la cara superior de las vigas (Figuras 3.1 y 3.2).

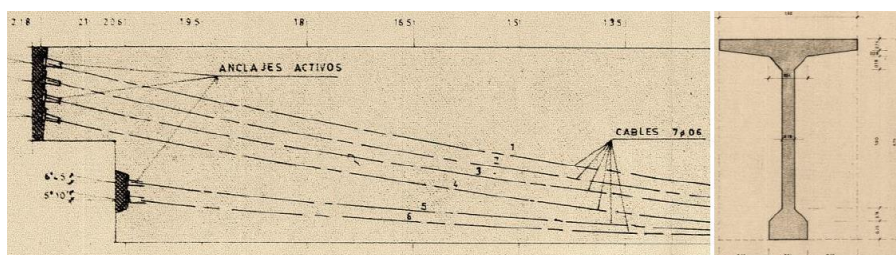


Figura 3.1 Alzado de pretensado y sección transversal tipo

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

El ancho total del tablero es de 12.85 m, con dos aceras de 1.175 m cada una, y 10.50 m que albergan 3 carriles para el tráfico de vehículos, siendo el carril central reversible.

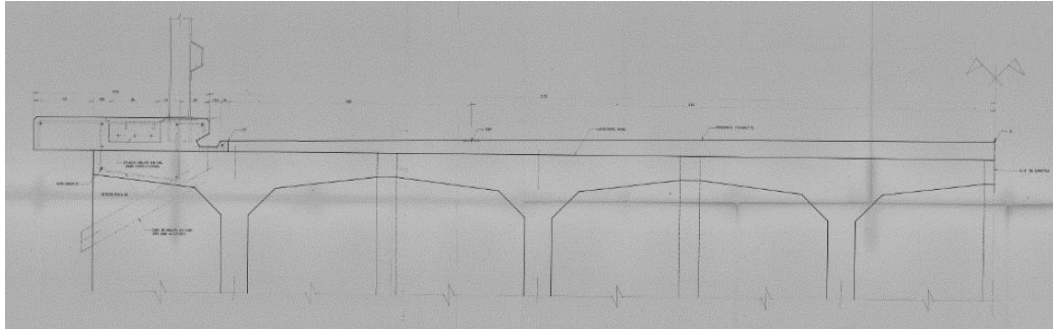


Figura 3.2 *Semi-sección transversal del tablero*

Las vigas están conectadas en la dirección transversal por riostras dispuestas en las alineaciones de apoyos y en cuatro secciones intermedias en cada vano. Las riostras tienen, según planos, dos cables de pretensado.

Además de este pretensado transversal de las riostras, en las obras de demolición del vano 30 se ha constatado que existe un pretensado transversal dispuesto en el nivel del ala superior de las vigas, cada 2 o 3 m, y que comprende todo el ancho del tablero.

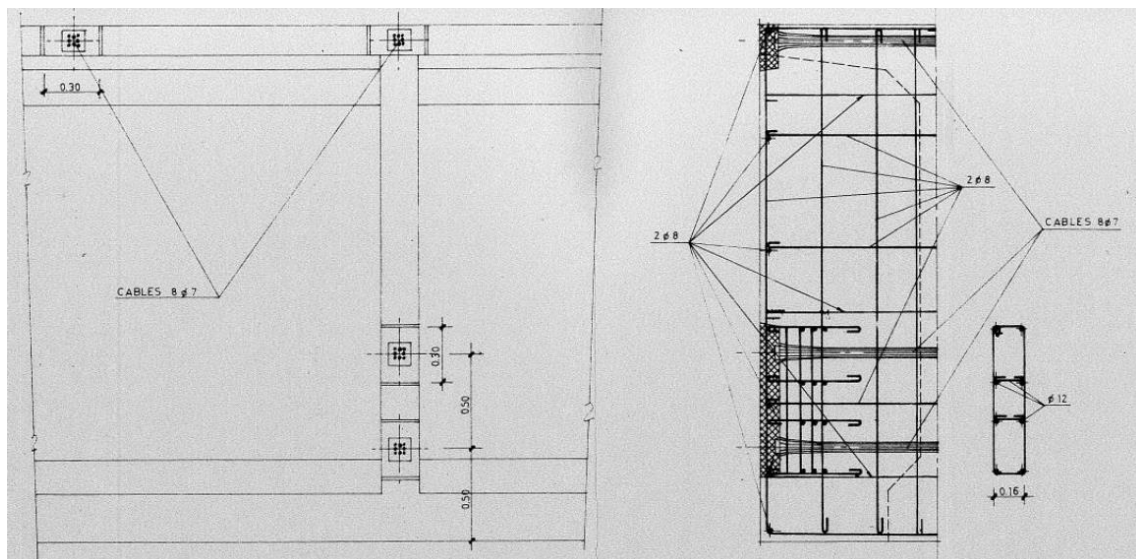


Figura 3.3 *Esquema de la disposición del pretensado transversal en riostras y entre riostras*

3.1.2 Daños detectados

Los daños que han propiciado la declaración de la emergencia y la consecuente sustitución de parte de la estructura del Vano Nro 30 se localizan en las vigas, en las que se aprecia a simple vista la pérdida de recubrimiento en el ala inferior de varias vigas, con corrosión del acero activo, y roturas totales o parciales de algunos de los cables de pretensado



Figura 3.4 *Rotura de cordones de pretensado en alas inferiores en centro de vano de vigas 1, 2 y 3 del Vano Nro 30*



Figura 3.5 *Rotura diagonal en ala inferior y fisura diagonal del alma coincidiendo con inicio de roturas en pre-tensado inferior*

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

Durante una inspección visual en junio del 2014 ya fueron detectados los primeros cordones rotos, como se observa en la Figura 3.6.



Figura 3.6 *Primeras roturas de cordones de pretensado inferior en vigas en junio de 2014.*

Como consecuencia de los daños observados, fueron demolidas y sustituidas las seis vigas principales, las vigas riostras y todos los elementos que conformaban el tablero del Vano Nro 30, y tal como se describe en la introducción del presente trabajo, se encargó al laboratorio de LADICIM de la Universidad de Cantabria el análisis de unas muestras de cordones y alambres pretensados que fueron extraídos de dicha demolición para determinar el nivel de daño sufrido, los mecanismos que lo propiciaron y determinar si los demás vanos del puente podrían encontrarse en peligro de sufrir un deterioro similar.

3.2 Muestras recibidas

Las muestras recibidas consisten en cordones conformados por 7 alambres con un diámetro nominal de 15.2 mm, en los que queda un alambre central recto de diámetro $\varnothing=5.2$ mm rodeado por los restantes seis alambres perimetrales de $\varnothing=5$ mm en forma helicoidal, así como alambres individuales de $\varnothing=7$ mm no grafilados. Las probetas preparadas en base a las mismas se clasifican en cuatro grupos:

Grupo 1: 4 tramos de cordones muy corroídos pertenecientes a la zona baja de una viga longitudinal colapsada, obtenidos de la zona en la cual se produjo la falla de la estructura. De estas muestras se han preparado 2 probetas, denominadas Cordón 1 y Cordón 2 (Figura 3.7).



a) Cordones recibidos



b) Probetas elaboradas en base a los cordones recibidos, una vez ensayadas a tracción

Figura 3.7

Grupo 2: Una fracción de cable pretensados formada por 4 tramos de cordones, correspondientes a la zona inferior de una viga longitudinal. Los cordones tienen dos tramos bien diferenciados: uno que aún estaba dentro de la vaina, rodeado de lechada, pero con síntomas de corrosión; y otro tramo de cordón al aire, con zonas al final claramente rotas. De estas muestras se han preparado 3 probetas, denominadas Cordón 7, 8 y 9 (Figura 3.8).

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio



a) Cordones recibidos



b) Probetas elaboradas en base a los cordones recibidos, una vez ensayadas a tracción

Figura 3.8

Grupo 3: Un tramo de pretensado de la viga longitudinal con su vaina procedente de la zona más alta de la viga y alejada de la zona de rotura, conteniendo un total de 7 cordones con longitud aproximada 1.60m. De estas muestras se han preparado 4 probetas, denominadas Cordón 3, 4, 5 y 6 (Figura 3.9).



a) Cordones recibidos



b) Probetas elaboradas en base a los cordones recibidos, una vez ensayadas a tracción

Figura 3.9

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

Grupo 4: Un tramo de pretensado transversal, con 8 alambres en su vaina, de longitud aproximada entre 80cm a 1m. De estas muestras se han preparado 3 probetas, denominadas Alambre 1, 2 y 3 (Figura 3.10).



a) Alambres en su vaina recibidos



b) Alambres limpios y catalogados

Figura 3.10

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

La Figura 3.11 contiene un esquema con la localización de las muestras recibidas

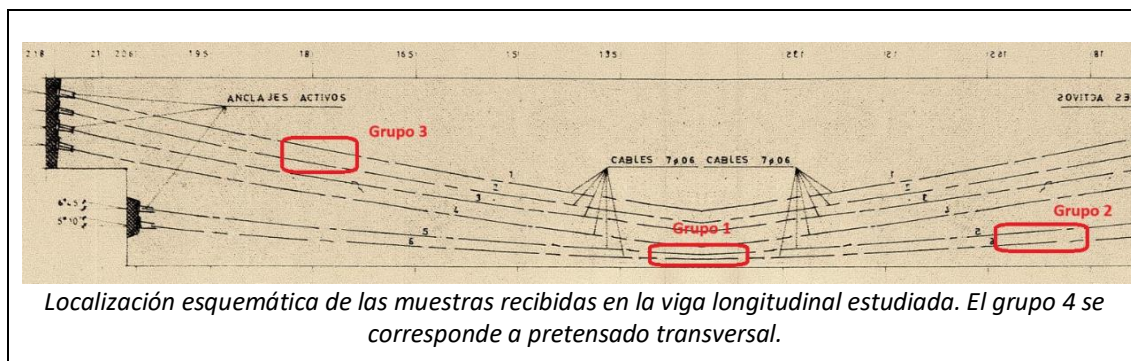


Figura 3.11

Sobre las probetas preparadas se planificaron, y posteriormente realizaron, los siguientes ensayos:

- Ensayo de tracción simple de 9 muestras de cordones pretensados de las vigas longitudinales del puente.
- Ensayo de tracción simple de 3 muestras de alambres pretensados transversales.
- Ensayo de tracción simple de 6 muestras de alambres centrales de los cordones de las vigas longitudinales.
- Ensayo de contenido de hidrógeno en acero de las diferentes muestras.
- Tomografía axial computarizada (TAC) de las muestras ensayadas a tracción.
- Análisis de fractografía por microscopio electrónico de barrido (SEM) de las muestras ensayadas a tracción.

3.3 Ensayo de tracción simple

Los ensayos de tracción de los cuatro grupos se realizaron según la normativa UNE-EN_ISO_15630-3 [14]. El objetivo de estos ensayos es determinar el límite elástico, la tensión de rotura, el módulo de elasticidad y la deformación máxima de cada muestra.

Para establecer los requisitos mínimos del comportamiento mecánico de las muestras, se ha tomado como referencia la norma prEN 10138-2:2012 [15] y se ha considerado que el material del cual están fabricadas las muestras de los cordones de vigas

longitudinales es un acero Y1770C, mientras que el de los alambres transversales es un acero Y1570C.

3.4 Ensayo de contenido de hidrógeno

El método utilizado es el Análisis de Desorción Térmica (TDA por sus siglas en inglés Thermal Desorption Analysis). Se basa en la extracción, a elevada temperatura, del hidrógeno de una probeta. A medida que aumenta la temperatura, se produce un flujo de salida del hidrógeno en función de la misma. Se emplea un gas (comúnmente el nitrógeno o el helio) como transportador del hidrógeno hacia el medidor. Para mayor precisión y fiabilidad del resultado, es necesario hacer el vacío previamente al ensayo. La forma de la probeta no está definida, aunque es frecuente el uso de probetas cilíndricas de 1 g de masa y la duración del ensayo suele ser 180 segundos o hasta que la velocidad de extracción de hidrógeno sea menor a un cierto valor relativo al total extraído hasta el momento. El ensayo proporciona una curva que representa el hidrógeno extraído en función del tiempo de ensayo y del contenido de hidrógeno total en ppm, buscando que esta tenga una tendencia asintótica cercana al eje de abscisas cero al final del ensayo [16].

Para el siguiente trabajo se ha utilizado un medidor de hidrógeno LECO RH 402 con un horno de inducción, mostrado en la Figura 3.12, tomando entre 4 y 5 muestras de aproximadamente 1 g de masa por cada cordón o alambre ensayado.



Figura 3.12

3.5 Tomografía axial computarizada (TAC)

Este ensayo consiste en la realización de una tomografía axial computarizada (TAC) al extremo de uno de los alambres perimetrales rotos durante el ensayo de tracción. Para ello, se tomó una muestra de cada cordón ensayado previamente, así como una muestra de uno de los alambres transversales (Grupo 4), los cuales fueron sometidos a un tratamiento de ultrasonidos por 25 minutos en una solución de acetona para eliminar impurezas y residuos de corrosión superficial. El objetivo de dicho ensayo consiste en visualizar la pérdida de sección sufrida a causa de la corrosión, así como la textura superficial de las muestras.

En la Figura 3.13 puede observarse el equipo utilizado, que consiste en un microscopio 3D de rayos X, modelo Bruker Skyscan 1172.



Microscopio 3D de rayos X Bruker Skyscan 1172

Figura 3.13

3.6 Análisis fractográfico

El análisis fractográfico consiste en realizar una observación con un microscopio electrónico de barrido (SEM) a la sección de rotura de las muestras que fueron previamente ensayadas a tracción, con el objetivo de determinar los micro mecanismos que dan lugar a la falla del material.

Para el presente análisis se utilizaron las mismas muestras extraídas para el ensayo de tomografía axial computarizada (TAC).

En la Figura 3.14 puede observarse el equipo utilizado, que consiste en un microscopio electrónico de barrido, modelo ZEIZ EVOMA 15.



Microscopio ZEIZ EVOMA 15

Figura 3.14

4. Resultados y discusión

4.1 Ensayo de tracción simple

4.1.1 Ensayos de cordones del Grupo 1

Cordones correspondientes a la zona baja de la viga longitudinal, en la región en la que se produjo la falla que provocó el colapso de la estructura. Las Figuras 4.1 y 4.2 contienen las gráficas del ensayo y el análisis de los parámetros obtenidos correspondiente a los Cordones 1 y 2, respectivamente.

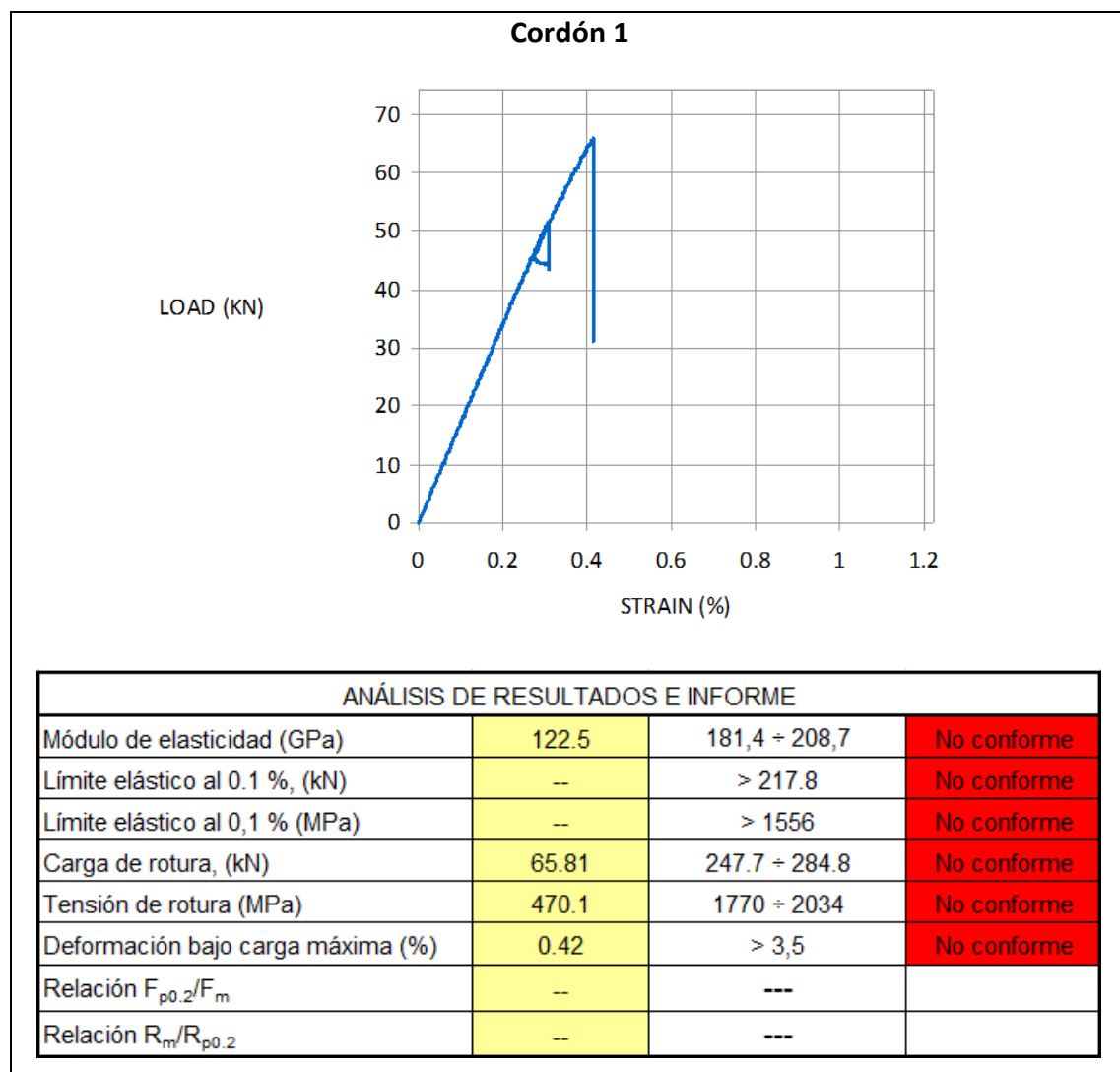


Figura 4.1

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

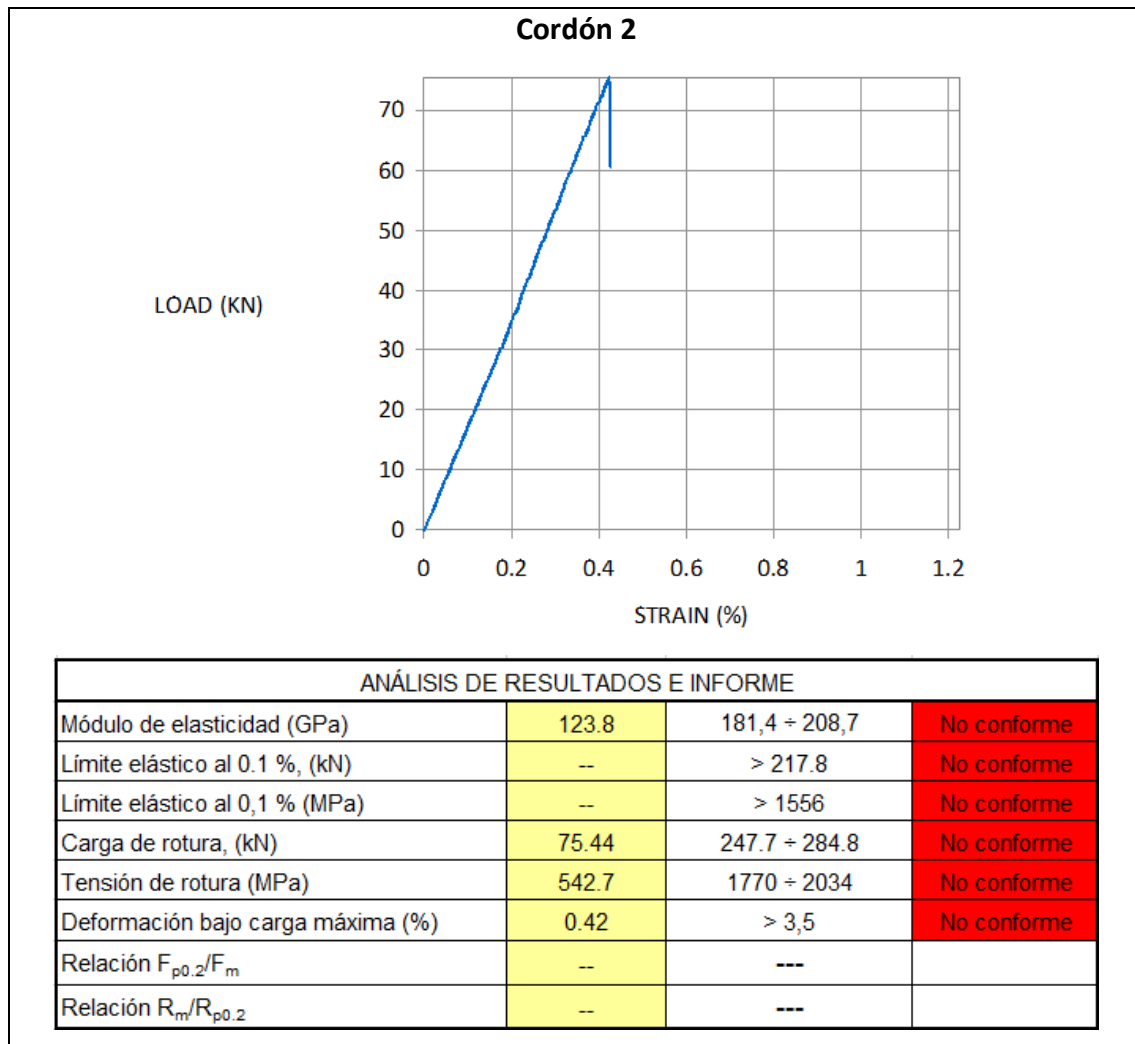


Figura 4.2

4.1.2. Ensayos de cordones del Grupo 2

Cordones correspondientes a la zona baja de la viga longitudinal, en una región alejada de en donde se produjo la falla que provocó el colapso de la estructura. Las figuras del 4.3 al 4.5 contienen los resultados obtenidos.

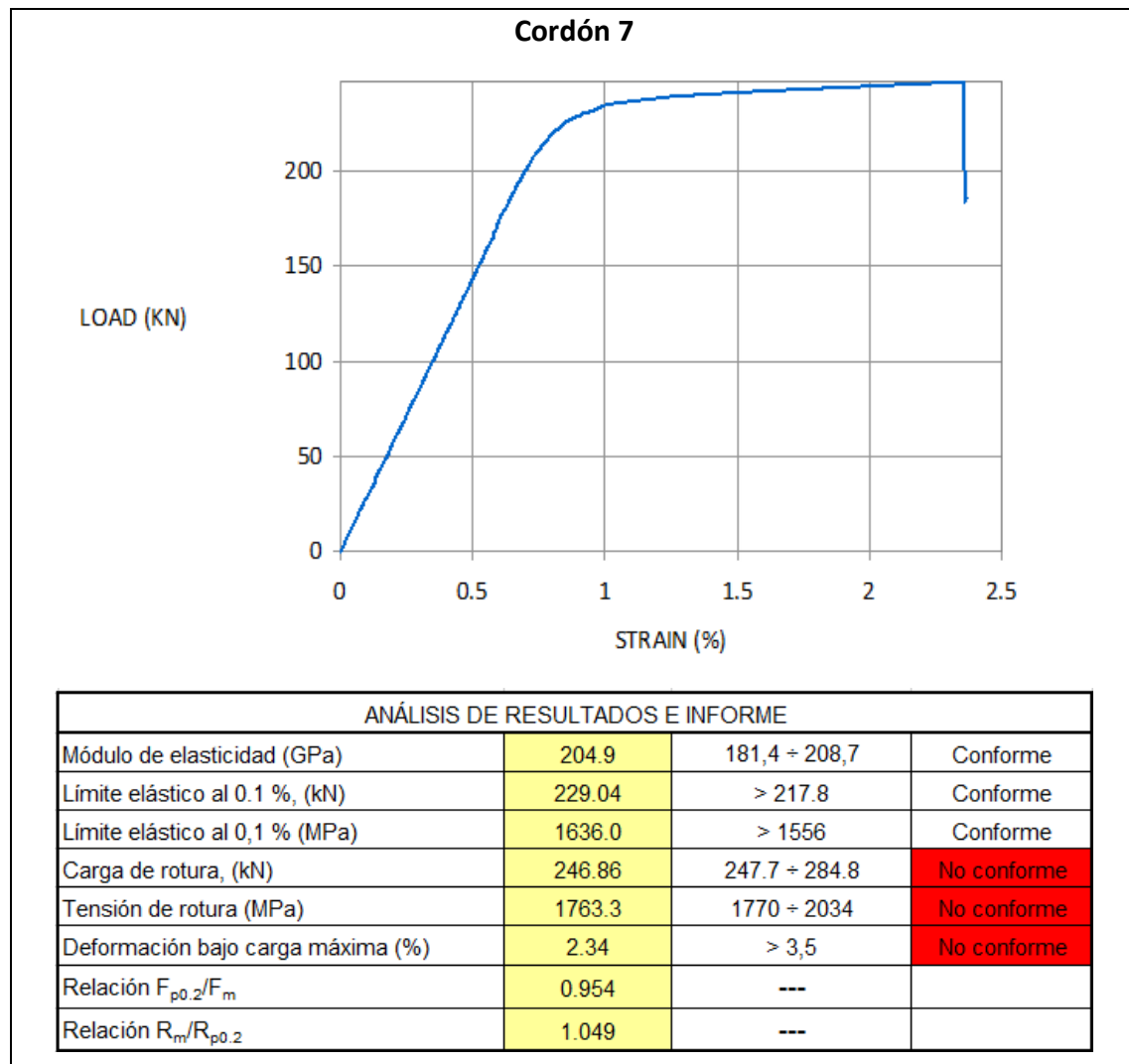


Figura 4.3

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

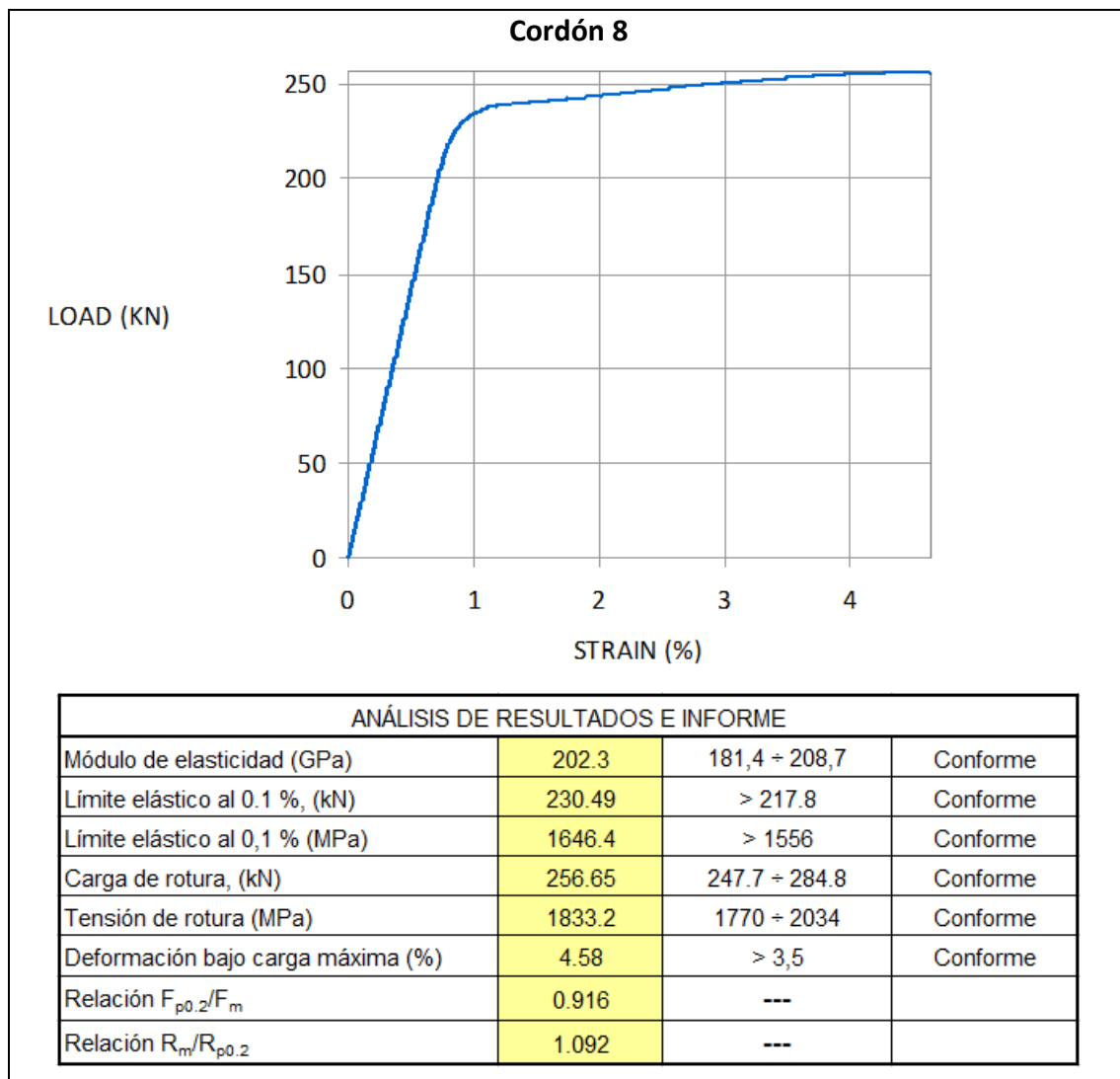


Figura 4.4

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

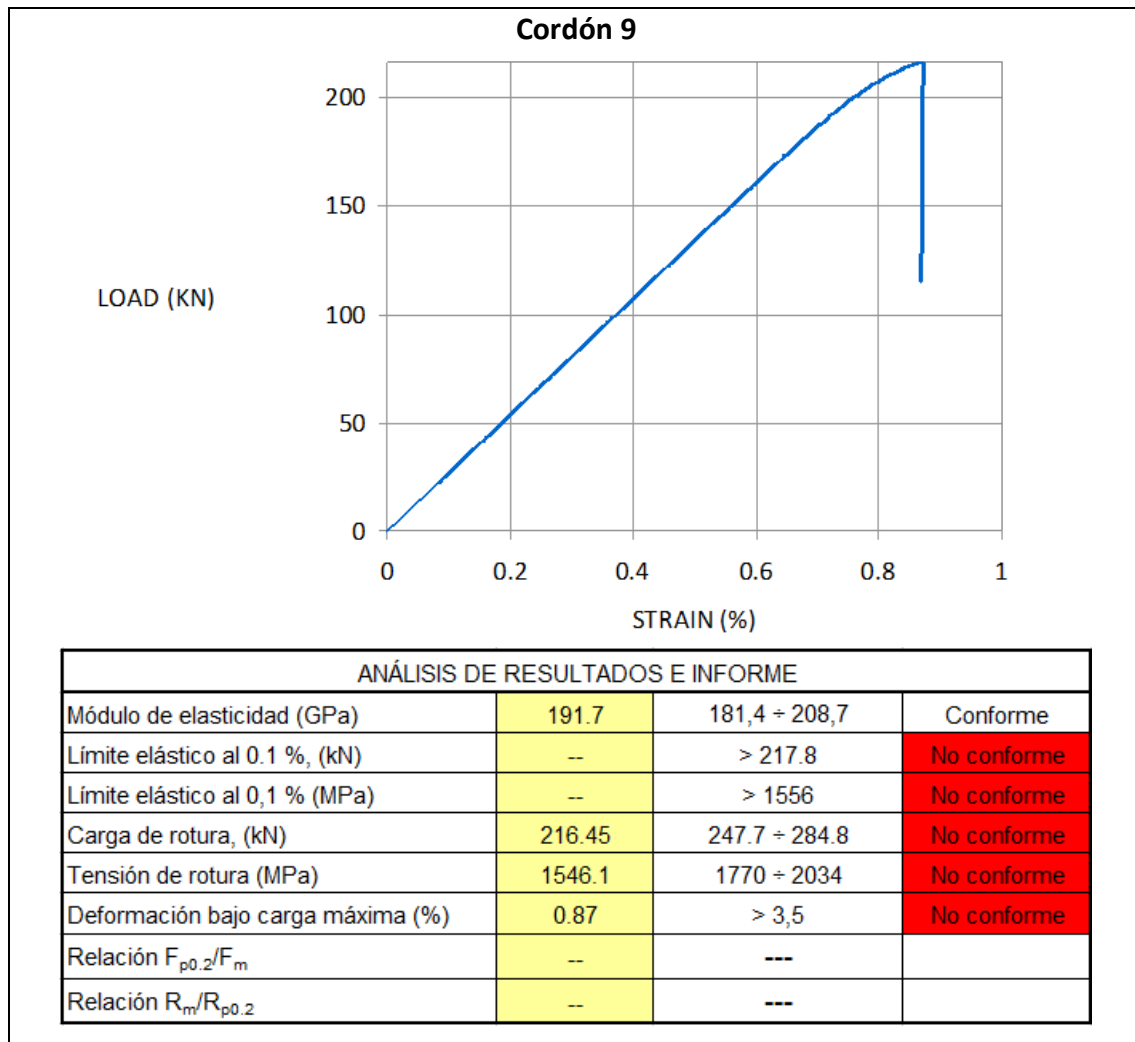


Figura 4.5

4.1.3. Ensayos de cordones del Grupo 3

Cordones correspondientes a la zona alta de la viga longitudinal, en una región alejada de en donde se produjo la falla que provocó el colapso de la estructura. Las figuras del 4.6 al 4.9 contienen los resultados obtenidos.

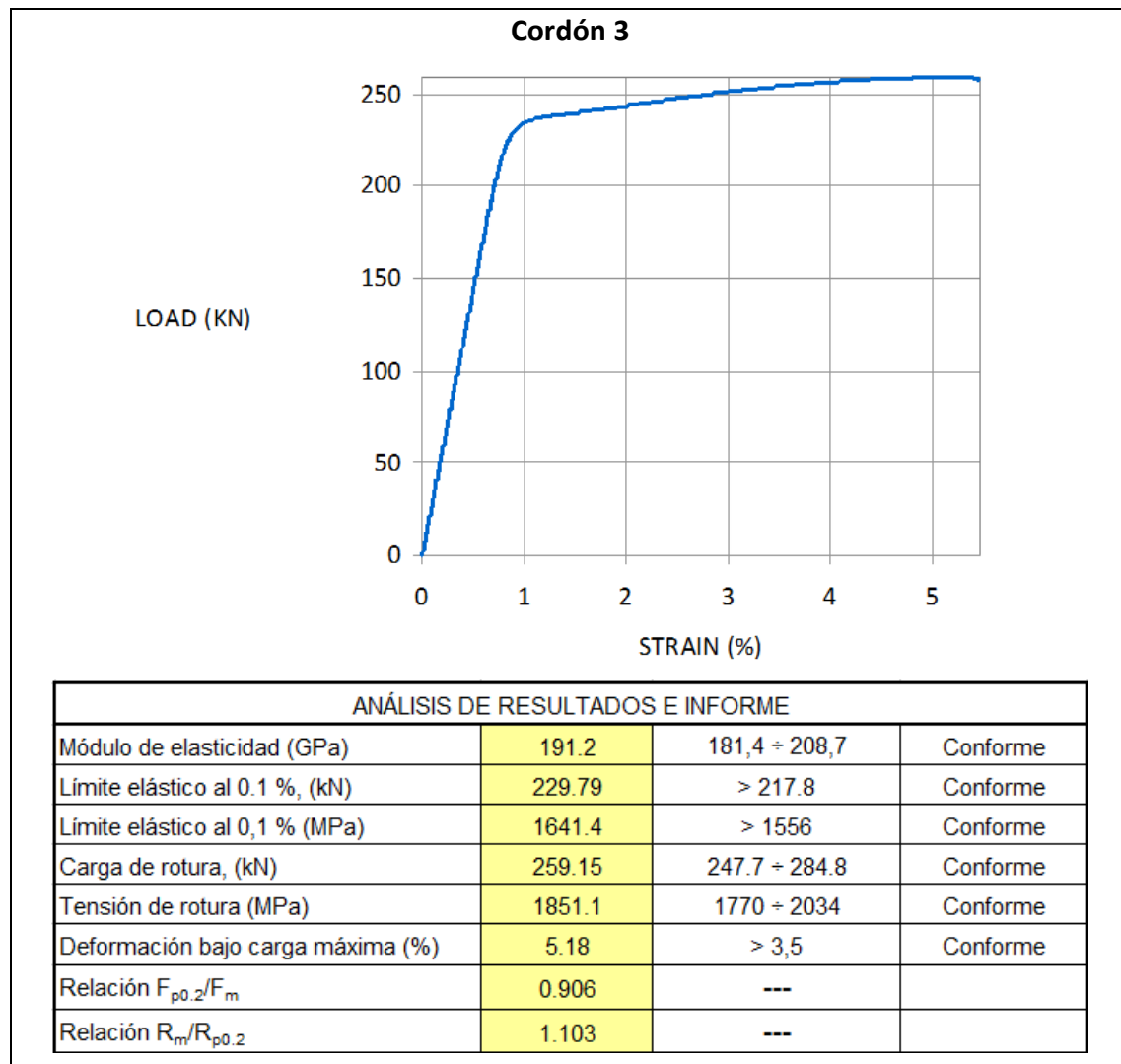
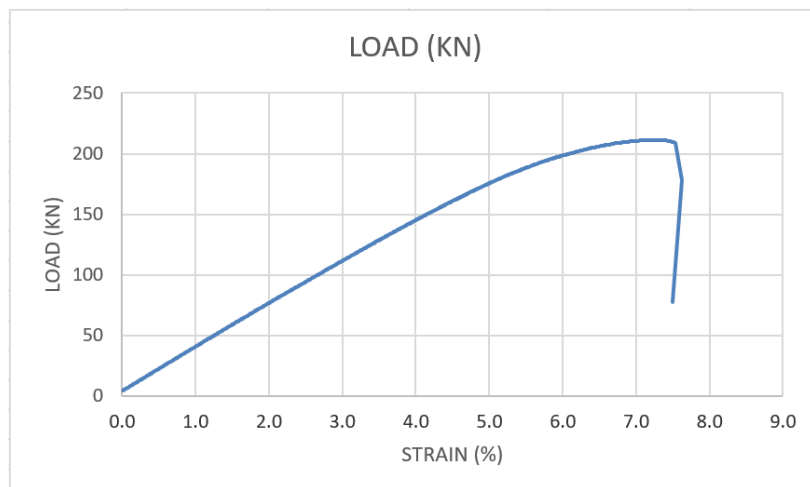


Figura 4.6

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

Cordón 4



ANÁLISIS DE RESULTADOS E INFORME			
Módulo de elasticidad (GPa)	25.0	181,4 ÷ 208,7	No conforme
Límite elástico al 0.1 %, (kN)	--	> 217.8	No conforme
Límite elástico al 0,1 % (MPa)	--	> 1556	No conforme
Carga de rotura, (kN)	211.55	247.7 ÷ 284.8	No conforme
Tensión de rotura (MPa)	1410.3	1770 ÷ 2034	No conforme
Deformación bajo carga máxima (%)	7.24	> 3,5	Conforme
Relación $F_{p0.2}/F_m$	--	---	
Relación $R_m/R_{p0.2}$	--	---	

Observación: este ensayo ha sido invalidado, puesto que la rotura de uno de los alambres de la probeta ocurrió dentro del casquillo del cual se sujeta la mordaza de la prensa, lo cual provocó que se obtuvieran valores no representativos de su comportamiento mecánico.



Fallo de uno de los alambres del Cordón 4 ocurrido en el interior del casquillo, además de que el resto de los alambres también han roto muy cerca de esta región

Figura 4.7

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

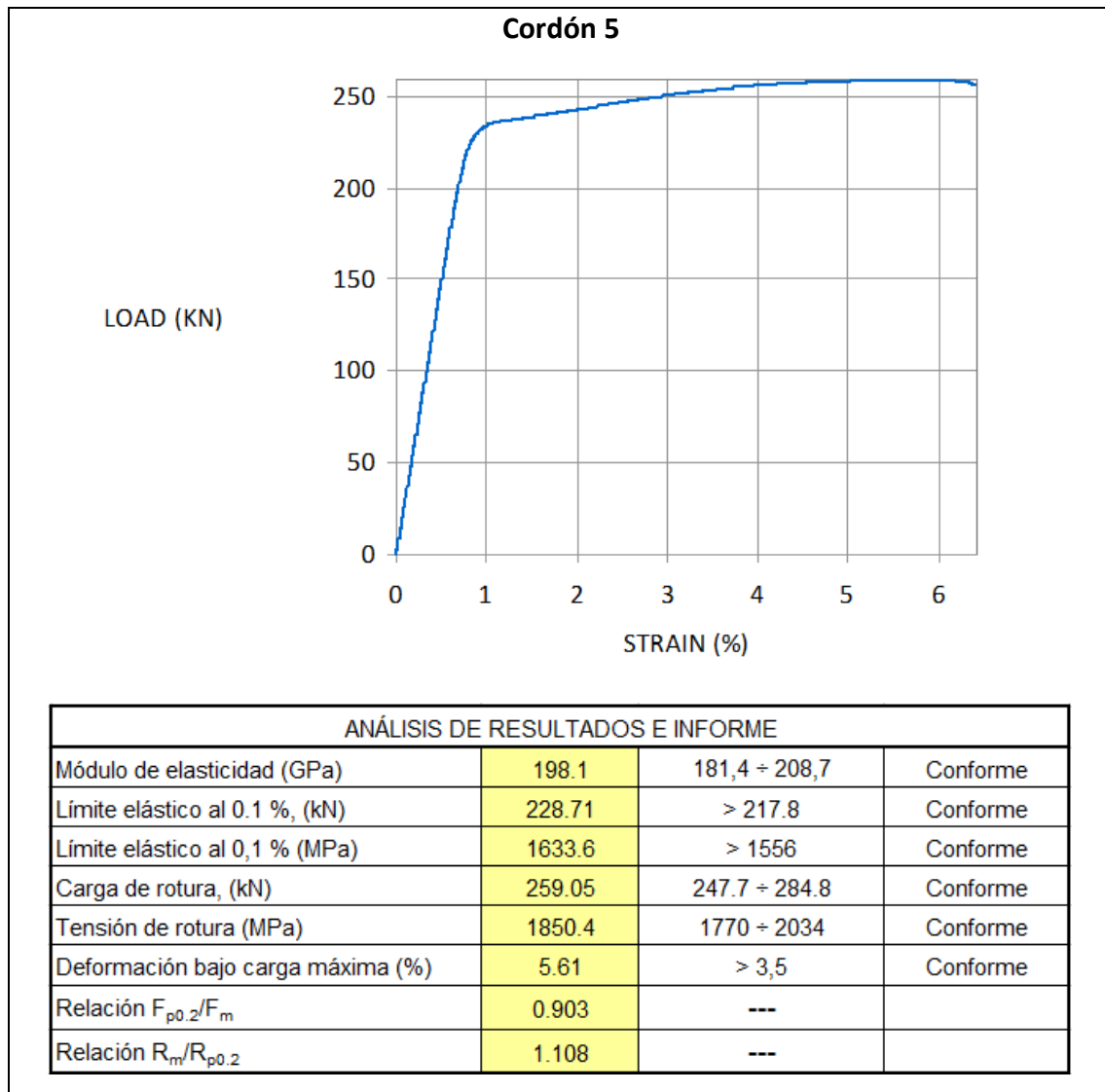


Figura 4.8

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

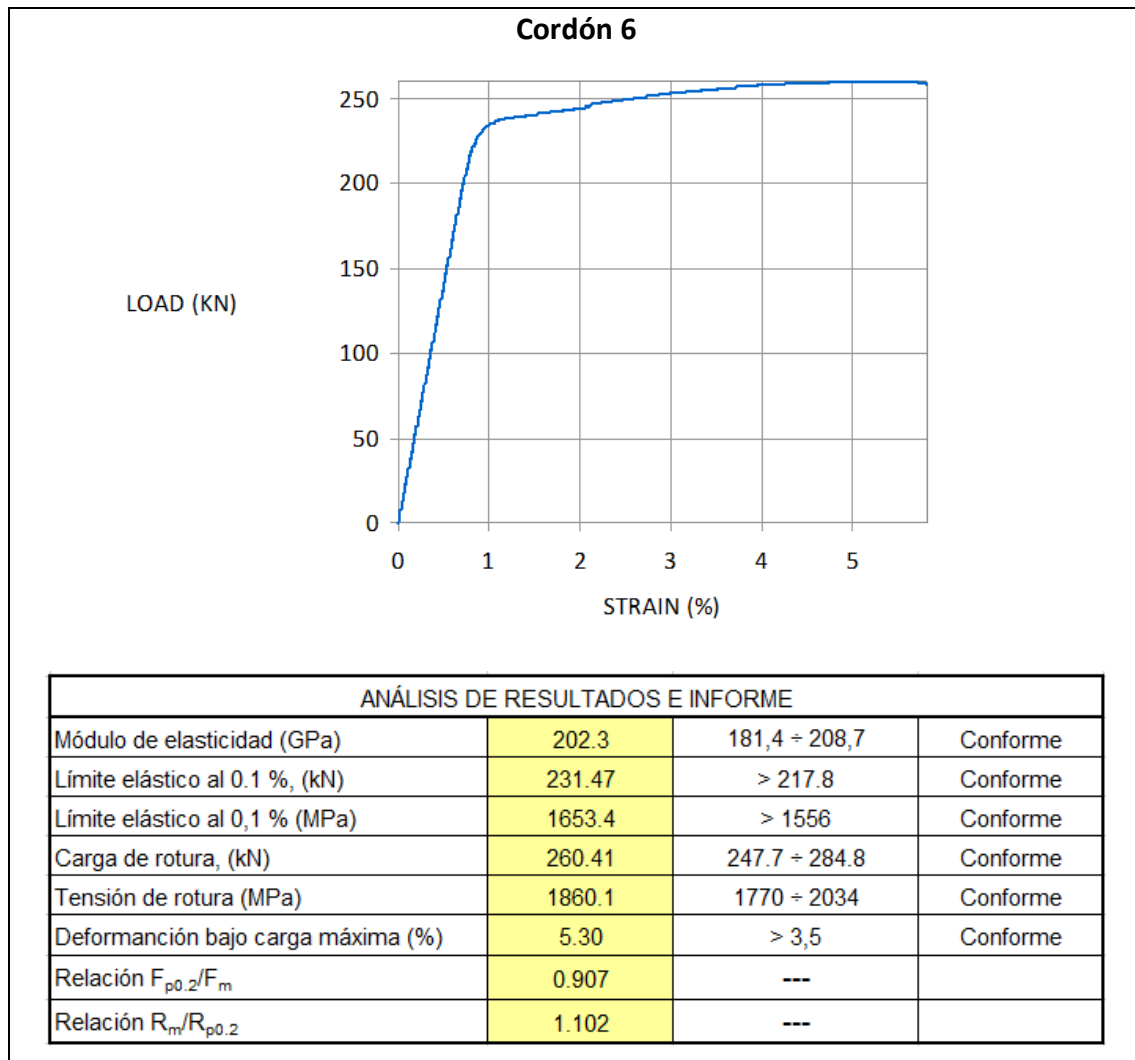


Figura 4.9

4.1.4. Ensayos de alambres del Grupo 4

Alambres correspondientes a la viga transversal, que al ser ensayados mostraron los resultados que se contemplan en las Figuras que van desde la 4.10 a la 4.12.

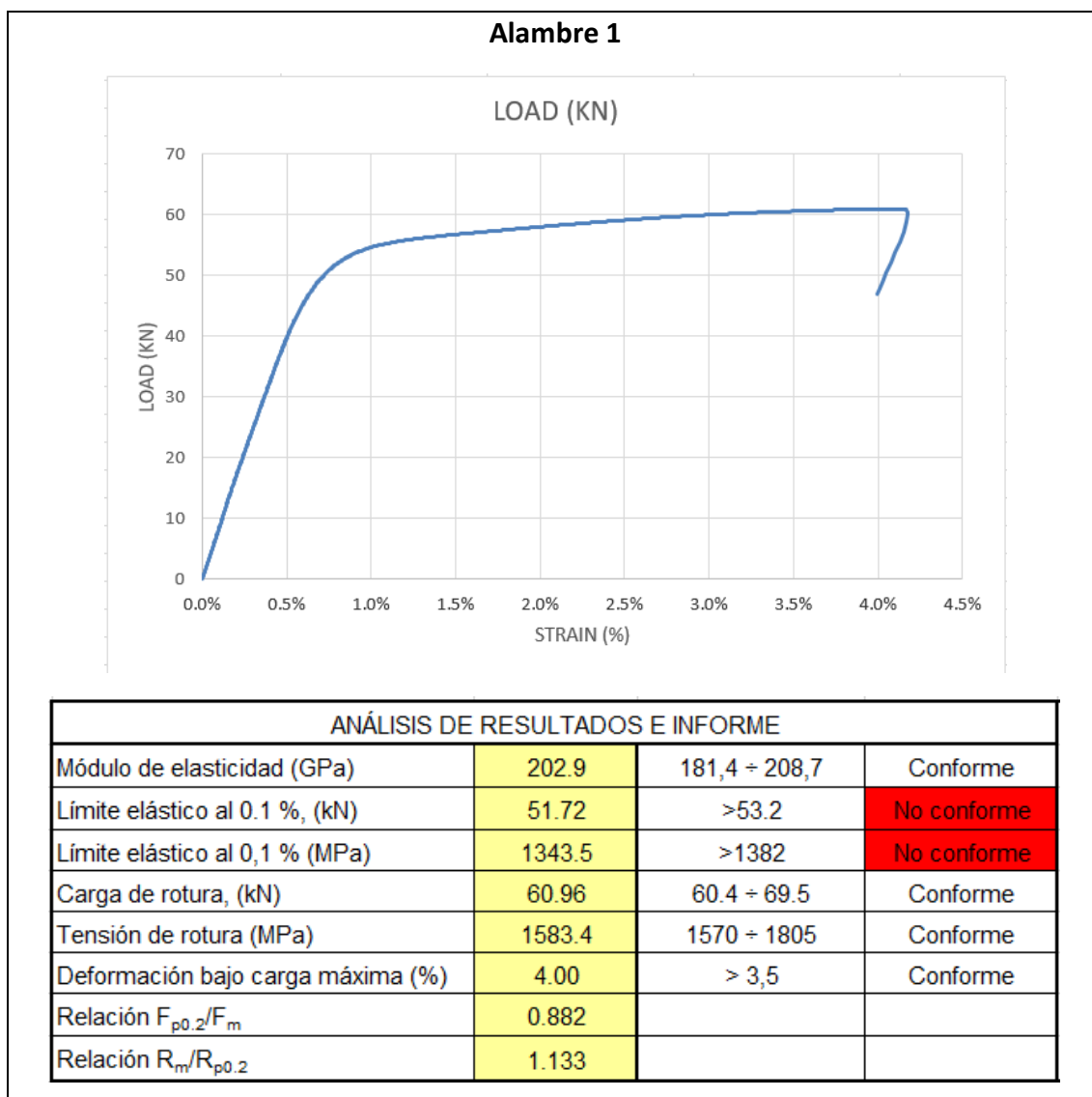


Figura 4.10

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

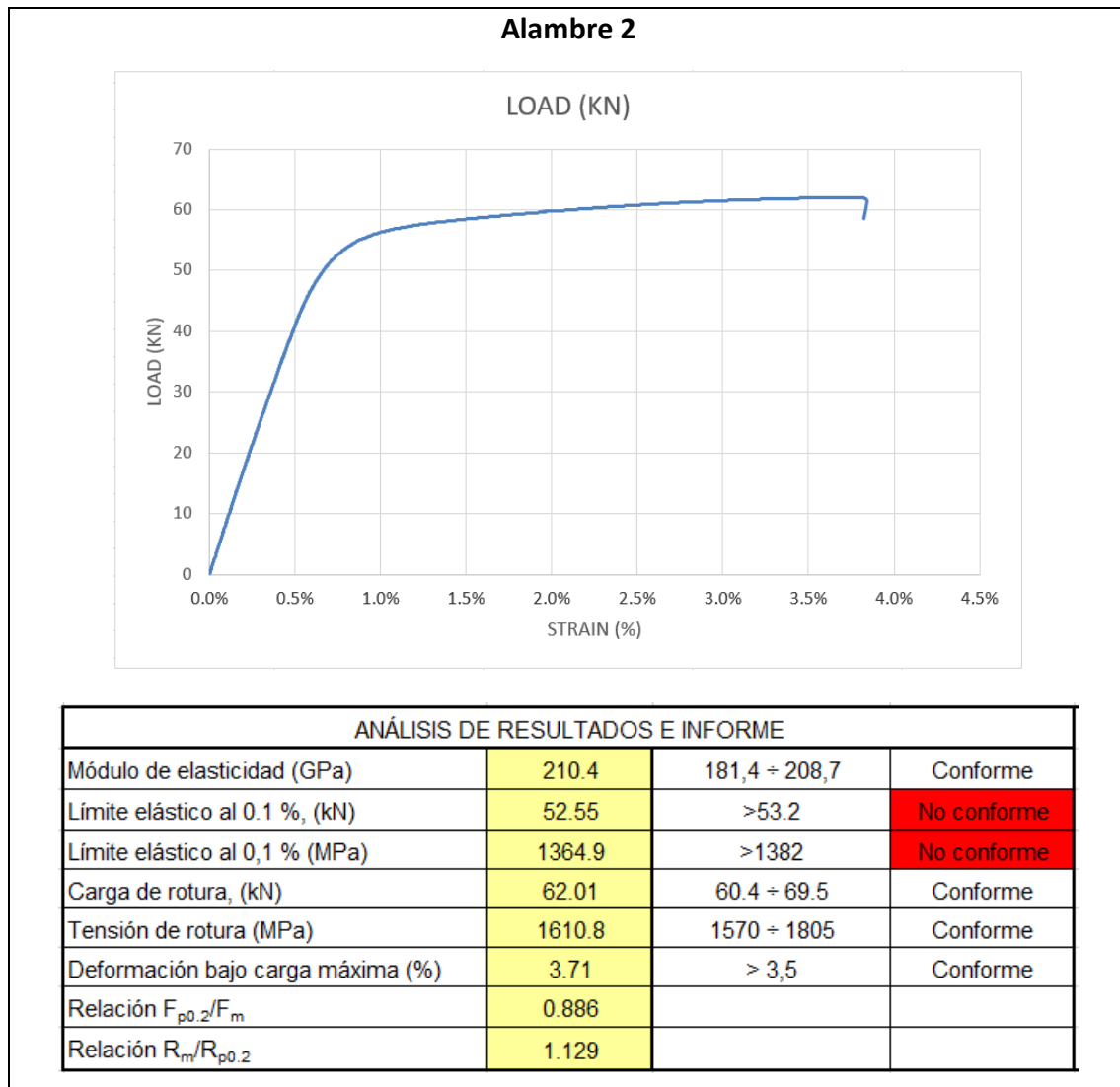


Figura 4.11

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

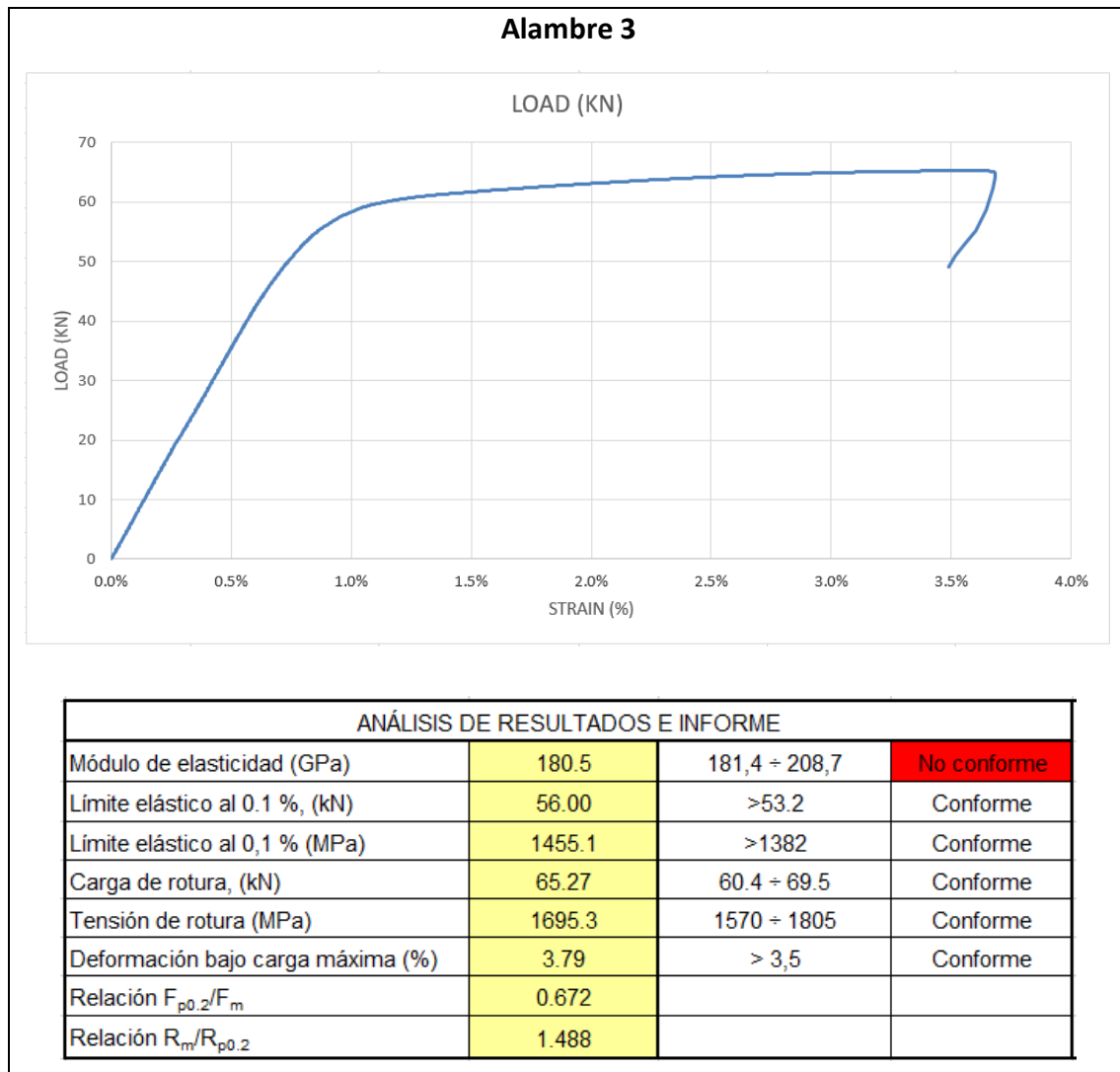


Figura 4.12

4.1.5. Estimación de la sección útil remanente por tensión de rotura

Al comparar los resultados del comportamiento mecánico del material de los tres grupos de cordones (1 al 3) y de los alambres, se observa una importante pérdida de las propiedades mecánicas en las del Grupo 1, debido a priori a la pérdida de sección como consecuencia del deterioro observado por su elevado grado de corrosión.

Considerando así que la pérdida de las propiedades mecánicas de las muestras se debe a la reducción de la sección media debido a los efectos de la corrosión, se realizan las siguientes estimaciones del porcentaje de sección útil remanente en base a las mediciones de la tensión de rotura:

$$A_{\text{remanente}}(\%) = \frac{\sigma_{\text{rotura medida}}}{\sigma_{\text{rotura mínima}}} * 100$$

		Sección útil remanente estimada por tensión de rotura (%)
Grupo 1	Cordón 1	26.6
	Cordón 2	30.7
Grupo 2	Cordón 7	99.7
	Cordón 8	100.0
	Cordón 9	87.4
Grupo 3	Cordón 3	100.0
	Cordón 4	Ensayo inválido
	Cordón 5	100.0
	Cordón 6	100.0
Grupo 4	Alambre 1	100.0
	Alambre 2	100.0
	Alambre 3	100.0

Tabla 4.1

Se observa que solo existe una pérdida teórica de la sección útil remanente considerable en los casos de los cordones que se encuentran en la zona de mayor deterioro (Grupo 1, zona baja de la viga longitudinal, cerca de la zona de fallo de la estructura).

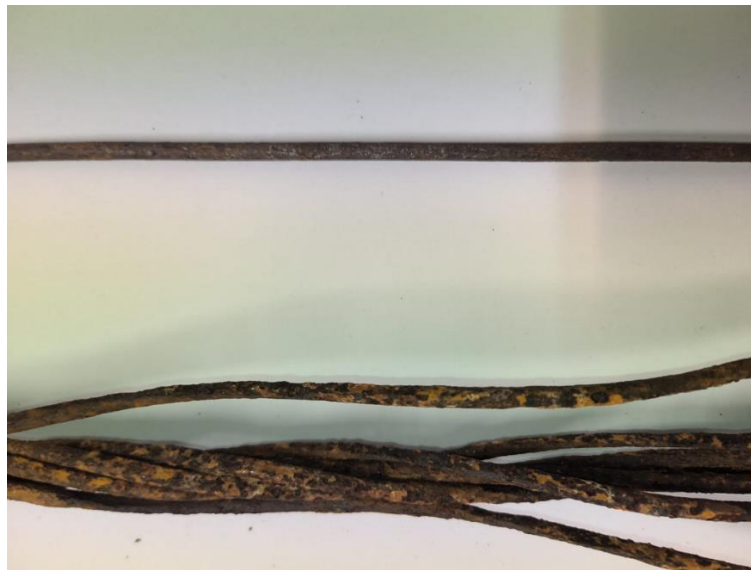
4.1.6. Ensayos adicionales – Alambres centrales de los cordones ensayados

Para determinar el grado de penetración de la corrosión en los cordones, se han ensayado a tracción los alambres centrales correspondientes a los Grupos 1, 2 y 3, extrayéndose y ensayándose dos muestras por cada grupo.

Las figuras 4.13 al 4.18 muestran los resultados obtenidos para los alambres de los grupos 1 al 3 de forma secuencial. Por cada grupo se muestra la fotografía que compara el estado superficial entre el alambre central y los periféricos seguido de los resultados de los ensayos de tracción en la primera figura, así como la comparación de estos comportamientos a tracción con la del cordón correspondiente en la segunda figura.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

Alambres centrales del Grupo 1



Comparación del alambre central (arriba) y de los alambres perimetrales (abajo). Se observa un menor grado de deterioro en el alambre central.

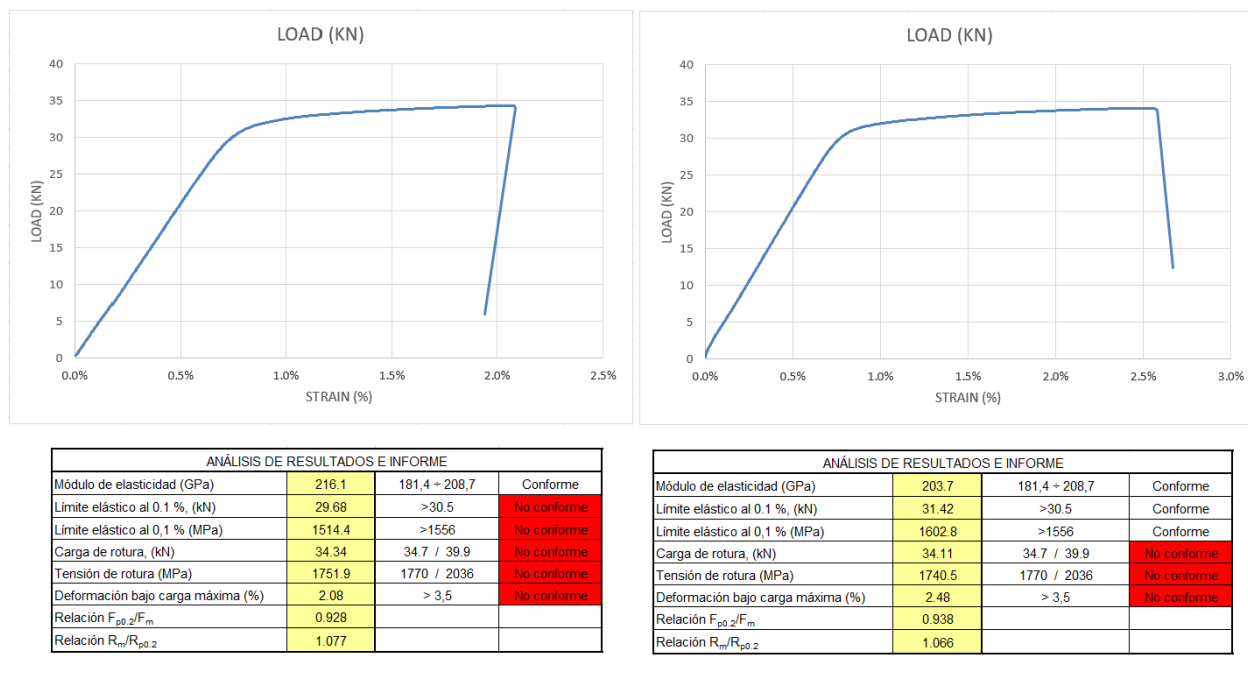


Figura 4.13

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

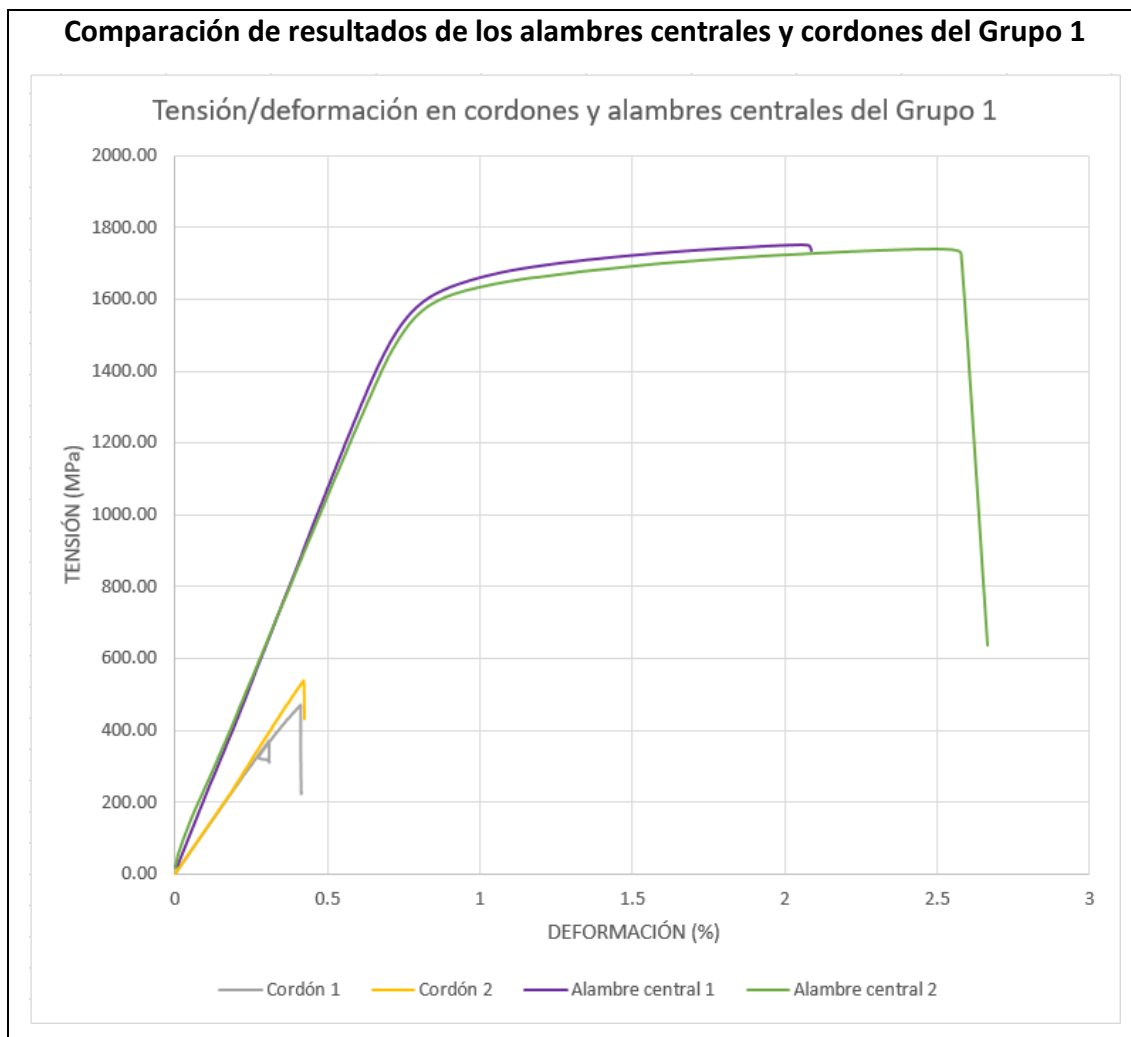


Figura 4.14

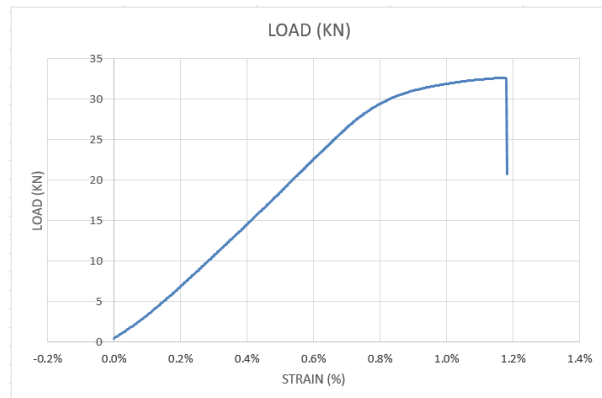
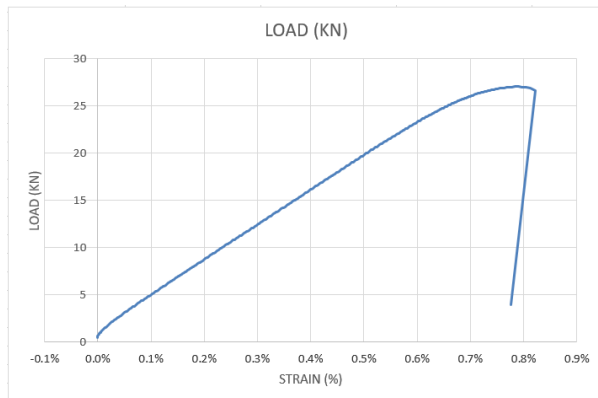
Los resultados obtenidos para los alambres ensayados muestran que, a pesar de no cumplir con los requisitos de resistencia mecánica y de alargamiento bajo carga máxima, el comportamiento de los alambres centrales es mucho mejor que el de los cordones del mismo grupo. De este resultado podría deducirse que el alambre central se encuentra más protegido de la corrosión que los alambres perimetrales, lo cual se encuentra evidenciado en que el fallo de los Cordones 1 y 2 ocurrió por la rotura de alambres perimetrales individuales, acompañado de un aspecto menos deteriorado del alambre central en comparación con el resto del cordón.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

Alambres centrales del Grupo 2



Comparación del alambre central (arriba) y de los alambres perimetrales (abajo). Se observa un grado de deterioro similar.



ANÁLISIS DE RESULTADOS E INFORME			
Módulo de elasticidad (GPa)	188.5	181,4 ± 208,7	Conforme
Límite elástico al 0.1 %, (kN)	26.89	>30.5	No conforme
Límite elástico al 0.1 % (MPa)	1371.7	>1556	No conforme
Carga de rotura, (kN)	27.05	34.7 / 39.9	No conforme
Tensión de rotura (MPa)	1380.2	1770 / 2036	No conforme
Deformación bajo carga máxima (%)	0.79	> 3,5	No conforme
Relación $F_{p0.2}/F_m$	0.994		
Relación $R_m/R_{p0.2}$	1.006		

ANÁLISIS DE RESULTADOS E INFORME			
Módulo de elasticidad (GPa)	200.1	181,4 ± 208,7	Conforme
Límite elástico al 0.1 %, (kN)	30.69	>30.5	Conforme
Límite elástico al 0.1 % (MPa)	1566.0	>1556	Conforme
Carga de rotura, (kN)	32.65	34.7 / 39.9	No conforme
Tensión de rotura (MPa)	1666.0	1770 / 2036	No conforme
Alargamiento bajo carga máxima (%)	1.17	> 3,5	No conforme
Relación $F_{p0.2}/F_m$	0.978		
Relación $R_m/R_{p0.2}$	1.022		

Figura 4.15

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

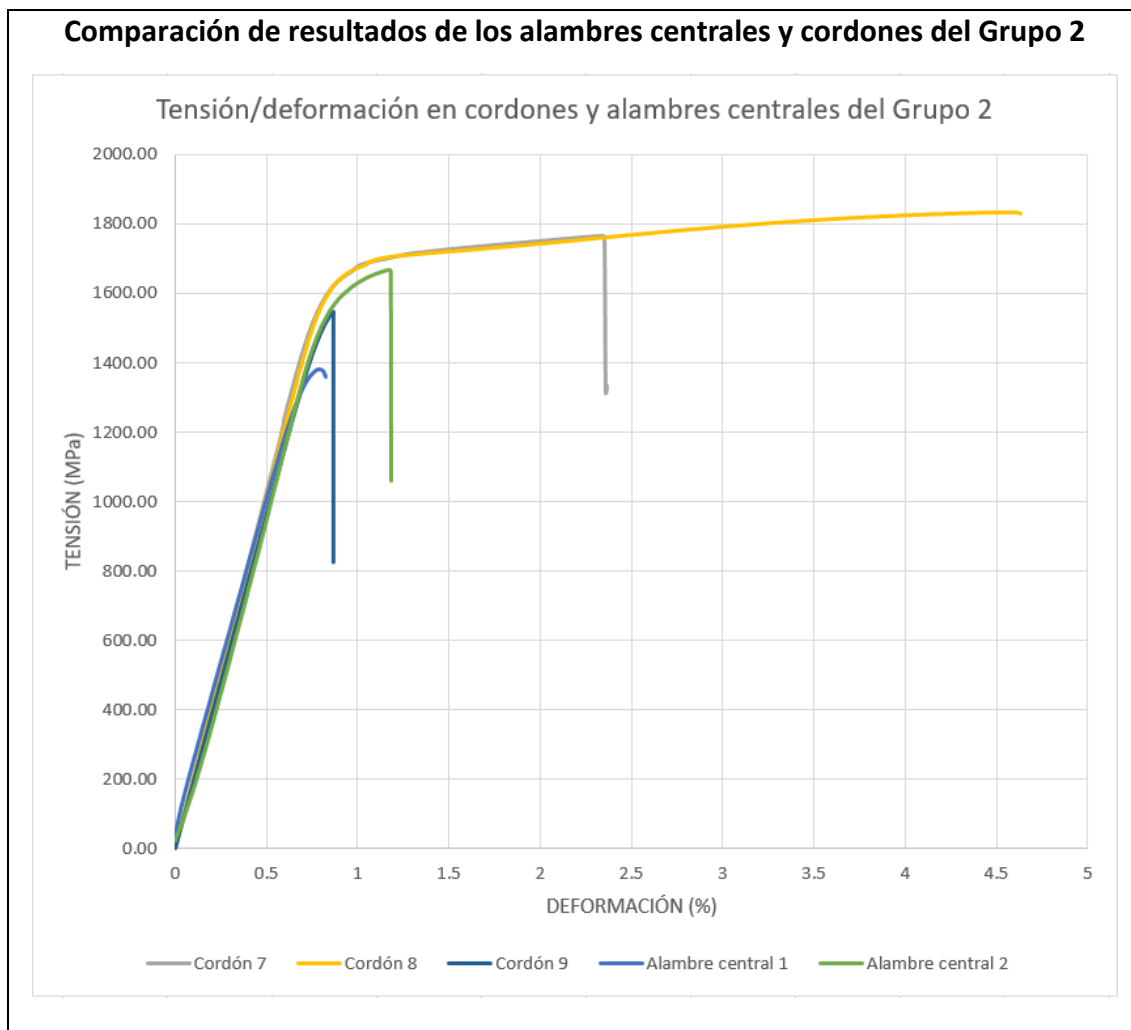


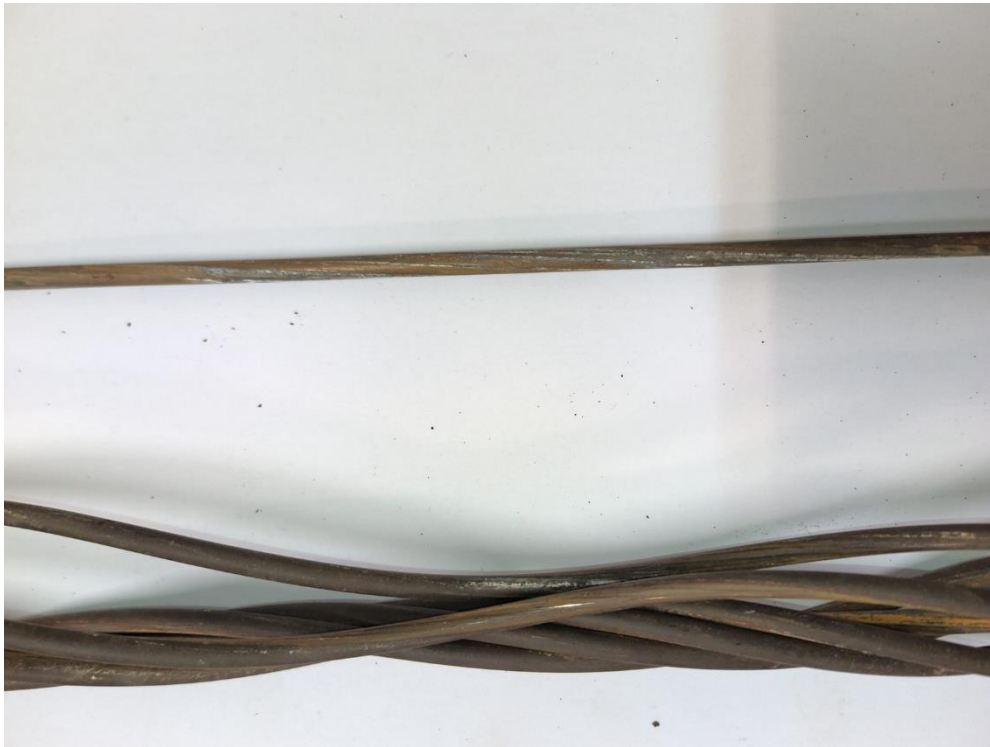
Figura 4.16

Los resultados obtenidos para el alambre central son concordantes con los obtenidos para el ensayo del Cordón 9. En ambos casos la rotura se produce con un comportamiento plástico con poco alargamiento bajo carga máxima.

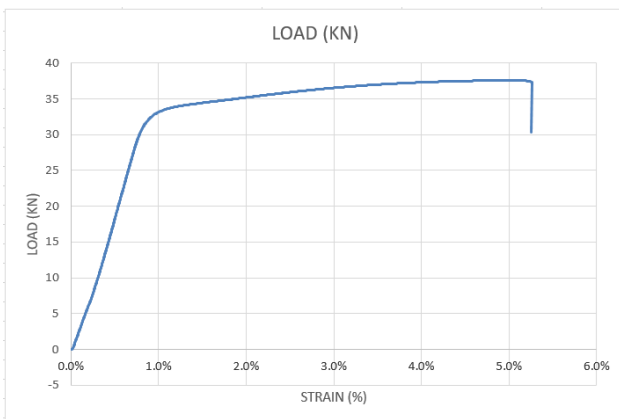
Debe destacarse que dentro del Grupo 2 se incluyen muestras que se encontraban diferentemente protegidas por la lechada cementicia (ver fotografía del apartado 3.1: Muestras recibidas correspondiente al Grupo 2), perteneciendo el Cordón 9 y los alambres centrales ensayados al grupo de cordones menos protegidos. Esto justifica su comportamiento similar y asimismo de menor capacidad de plastificación al compararla con la de los Cordones 7 y 8.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

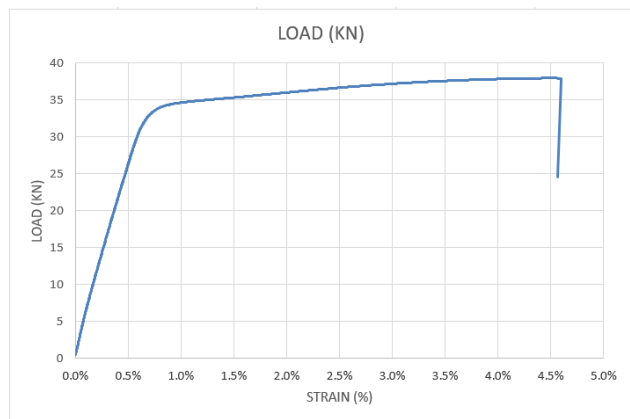
Alambres centrales del Grupo 3



Comparación del alambre central (arriba) y de los alambres perimetrales (abajo). Se observa un grado de deterioro similar, mínimo en ambos casos.



ANÁLISIS DE RESULTADOS E INFORME			
Módulo de elasticidad (GPa)	218.7	181.4 - 208.7	Conforme
Límite elástico al 0.1 %, (kN)	33.00	>30.5	Conforme
Límite elástico al 0.1 % (MPa)	1683.5	>1556	Conforme
Carga de rotura, (kN)	38.09	34.7 / 39.9	Conforme
Tensión de rotura (MPa)	1943.2	1770 / 2036	Conforme
Deformación bajo carga máxima (%)	5.16	> 3,5	Conforme
Relación $F_{p0.2}/F_m$	0.122		
Relación $R_m/R_{p0.2}$	8.167		



ANÁLISIS DE RESULTADOS E INFORME			
Módulo de elasticidad (GPa)	253.5	190.6 - 219.3	Conforme
Límite elástico al 0.1 %, (kN)	33.75	>30.5	Conforme
Límite elástico al 0.1 % (MPa)	1721.8	>1556	Conforme
Carga de rotura, (kN)	37.97	34.7 / 39.9	Conforme
Tensión de rotura (MPa)	1937.0	1770 / 2036	Conforme
Alargamiento bajo carga máxima (%)	4.50	> 3,5	Conforme
Relación $F_{p0.2}/F_m$	0.905		
Relación $R_m/R_{p0.2}$	1.105		

Figura 4.17

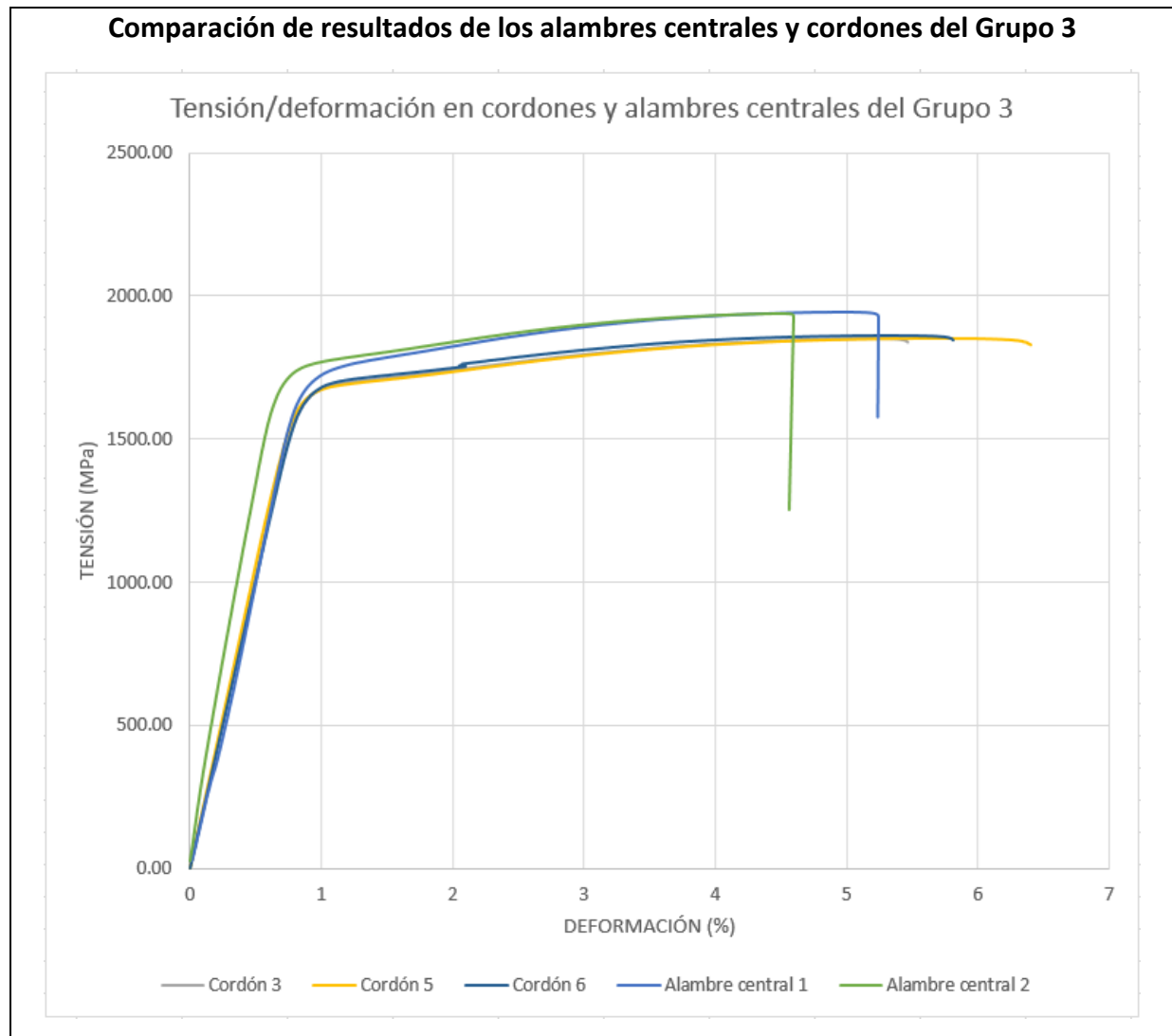


Figura 4.18

Los resultados obtenidos muestran la similitud de comportamiento entre el material del alambre central y los cordones. En ambos casos (alambre central y cordón) se observa muy poco deterioro y se cumplen todos los requisitos establecidos por la norma.

4.2 Ensayo de contenido de hidrógeno

Utilizando las mismas probetas elaboradas para los ensayos de tracción, se han tomado entre cuatro y cinco muestras de cada una para realizar la medición de la cantidad de hidrógeno contenida en las mismas.

Unidad de medida: ppm	Grupo 1		Grupo 2			Grupo 3			Grupo 4
	Cordón 1	Cordón 2	Cordón 7	Cordón 8	Cordón 9	Cordón 3	Cordón 5	Cordón 6	Alambre 1
Muestra 1	14.30	17.10	6.95	6.84	5.78	5.00	3.98	5.27	4.53
Muestra 2	12.00	12.00	6.39	5.84	9.48	5.37	5.53	6.77	4.47
Muestra 3	12.40	18.10	6.89	5.36	6.99	5.27	5.11	6.54	5.74
Muestra 4	10.70	12.10	8.25	5.67	8.59	4.98	6.11	5.48	4.91
Muestra 5				6.15	7.74	5.33	4.09	6.72	4.82
Media por cordón	12.35	14.83	7.12	5.97	7.72	5.19	4.96	6.16	4.89
Media por grupo	13.59		6.92			5.44			4.89
Desviación típica	2.51		1.17			0.80			0.45
Media por grupo eliminando muestras fuera de rango	12.56		6.62			5.35			4.89

Tabla 4.2

En la Tabla 4.2, dentro del Grupo 2 se observa una mayor cantidad de hidrógeno en el Cordón 9, seguido por el Cordón 7. Esto es concordante con los resultados obtenidos en los ensayos de tracción, en los que se observa la mayor pérdida de ductilidad de todo el grupo en el Cordón 9, seguido por el Cordón 7.

Luego de hallar la media y desviación típica por grupos, se procedió a recalcular dicha media omitiendo los resultados que no estuvieran contenidas en el rango de la desviación típica, de manera a conseguir una muestra con un nivel de confianza más aceptable.

Seguidamente, se recogieron los datos obtenidos en el ensayo de tracción sobre el comportamiento mecánico de los cordones respectivos para luego contrastarlos con los resultados de la cantidad de hidrógeno registrada (Tablas 4.3 y 4.4).

	Grupo 1		Grupo 2			Grupo 3			Grupo 4
	Cordón 1	Cordón 2	Cordón 7	Cordón 8	Cordón 9	Cordón 3	Cordón 5	Cordón 6	Alambre 1
Tensión en rotura (MPa)	470.1	542.7	1763.3	1833.2	1546.1	1851.1	1850.4	1860.1	1583.4
Tensión en rotura (media de grupo) (MPa)	506.4		1714.2			1853.9			1583.4
Deformación máxima (%)	0.42	0.42	2.34	4.58	0.87	5.18	5.61	5.30	4.00
Deformación máxima (media de grupo) (%)	0.42		2.60			5.36			4.00
Energía de rotura (MJ/m3)	0.99	1.13	33.02	71.86	7.14	83.19	90.79	85.31	56.06
Energía de rotura (media de grupo) (MJ/m3)	1.06		37.34			86.43			56.06

Tabla 4.3

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

Resumen	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Contenido de hidrógeno (ppm)	12.56	6.62	5.35	4.89
Energía de rotura (MJ/m ³)	1.06	37.34	86.43	56.06

Tabla 4.4

En las Figuras 4.19 y 4.20, por grupos y por ensayos respectivamente, se ha comparado la cantidad de hidrógeno medida en cada grupo con la deformación máxima como medida de la ductilidad y con la energía de rotura como indicador de la tenacidad del material, puesto que esta última es la propiedad mecánica mayormente afectada por la presencia de hidrógeno como agente fragilizante proveniente de las reacciones de corrosión del acero en medio acuoso y salino. Se puede observar que, a mayor concentración de hidrógeno, la energía de rotura se reduce considerablemente para los diferentes grupos de cordones longitudinales ensayados. Los alambres del Grupo 4 registraron las menores cantidades de hidrógeno, pero no los mayores niveles de tenacidad, lo cual se debe a que el tipo de acero de este grupo es de menores capacidades mecánicas que el de los demás grupos.

En la Figura 4.20 se observa una clara relación, prácticamente lineal, entre el mayor valor de hidrógeno y su efecto fragilizador, que se abandona para las muestras del Grupo 1 lo que sugiere que la alta concentración de hidrógeno ya no es el factor dominante, sino que este llega a un efecto máximo y que la pérdida de tenacidad aparente se asocia al efecto de la pérdida de sección y a la rugosidad superficial de estas muestras ensayadas. En la misma figura se ha trazado una curva que representa un ajuste aproximado de la tendencia del comportamiento mecánico observado con la cantidad de hidrógeno presente.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

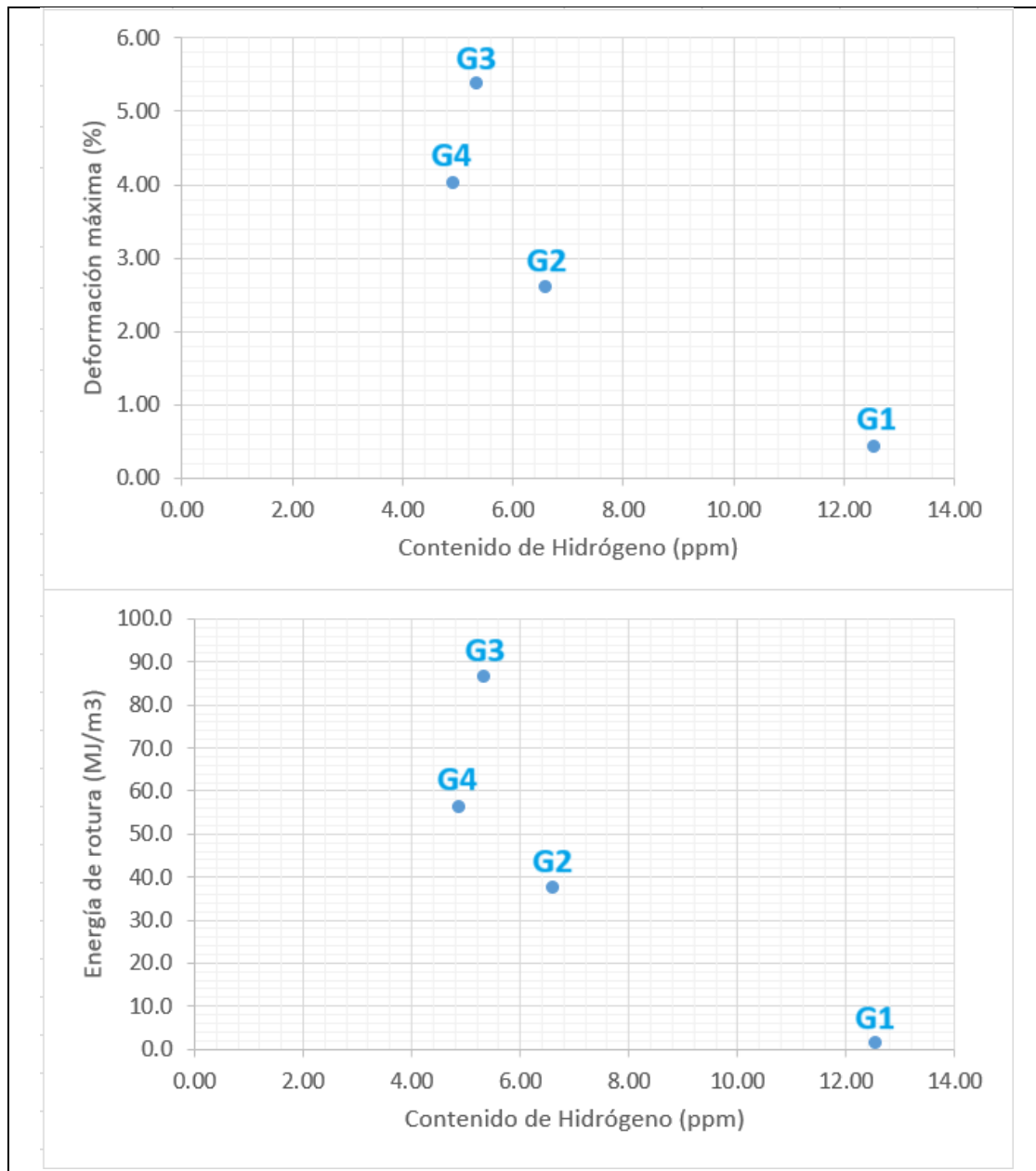


Figura 4.19

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

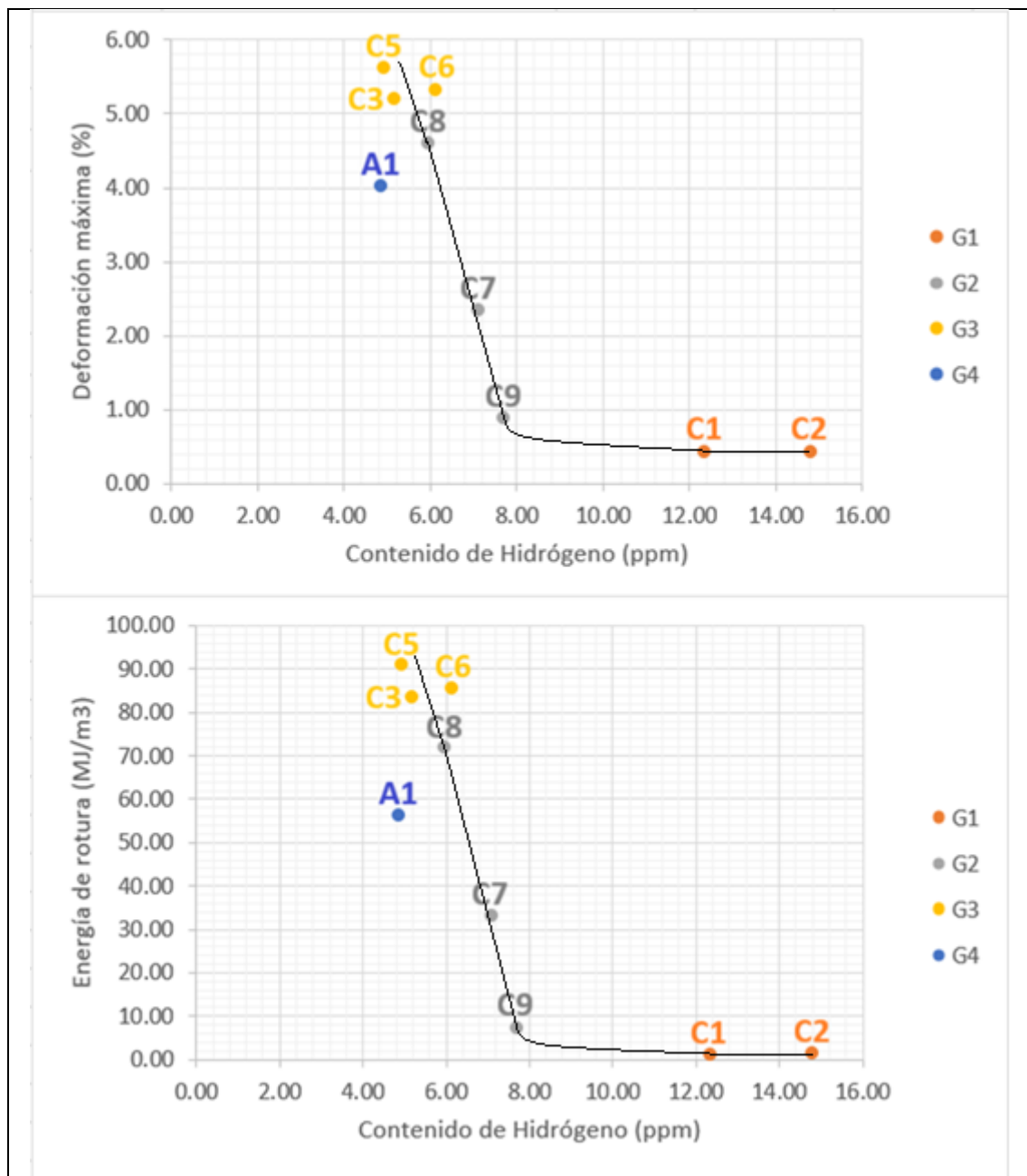


Figura 4.20

4.3 Tomografía axial computarizada (TAC)

Las figuras 4.21 al 4.24 muestran las secciones medidas en las distintas muestras a lo largo del segmento analizado. Se ha omitido el Cordón 4 en el Grupo 3, puesto que el ensayo de tracción del mismo había sido invalidado.

Como referencia, las secciones nominales que deberían medirse en un acero sin deterioro son las siguientes:

Alambres perimetrales de cordones (Grupos 1, 2 y 3): 19.62 mm².

Alambres de pretensado transversal (Grupo 4): 38.46 mm².

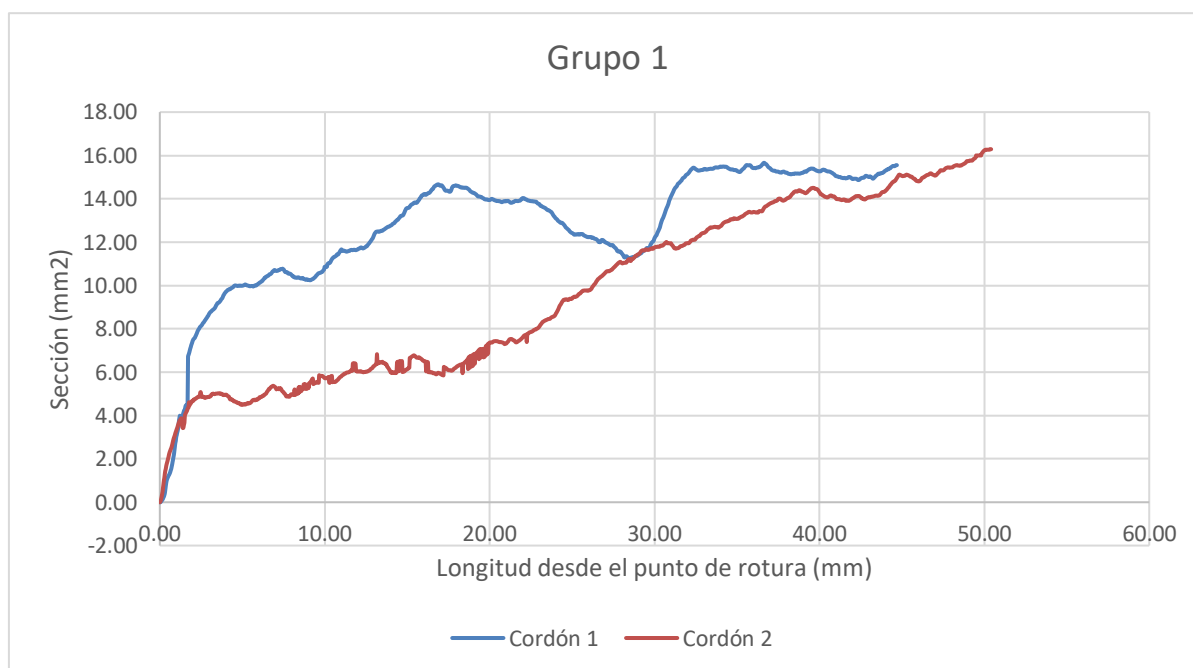


Figura 4.21

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

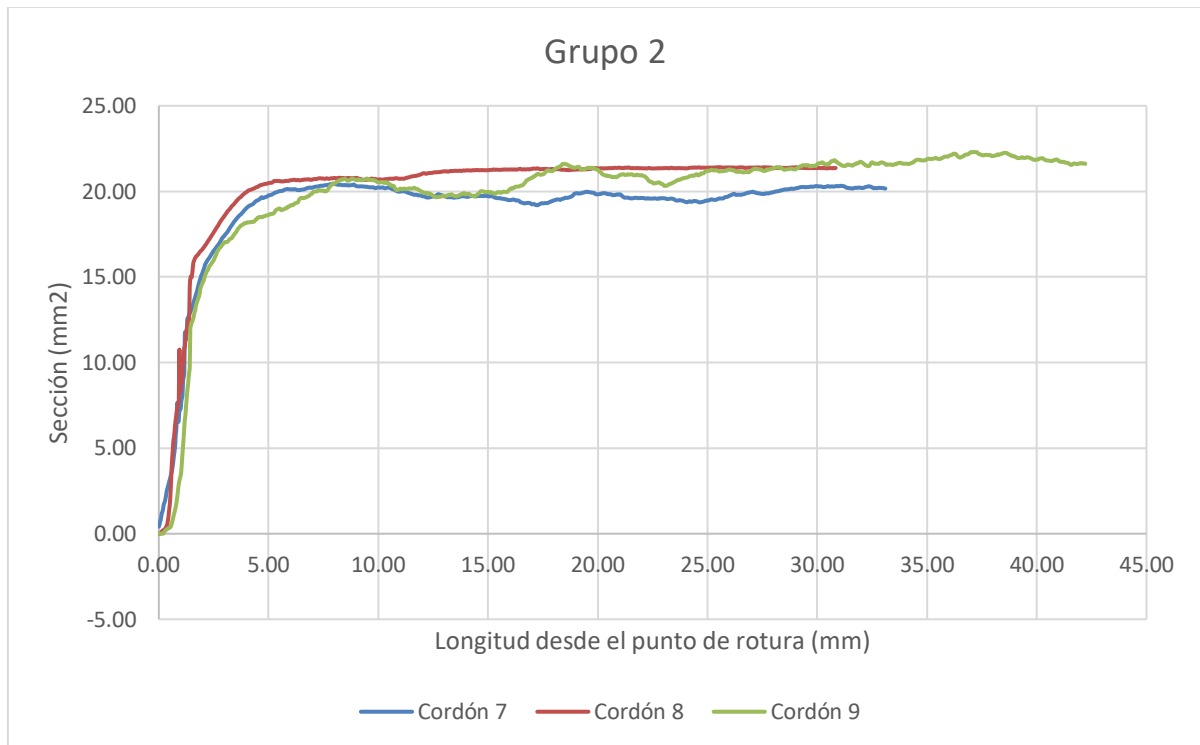


Figura 4.22

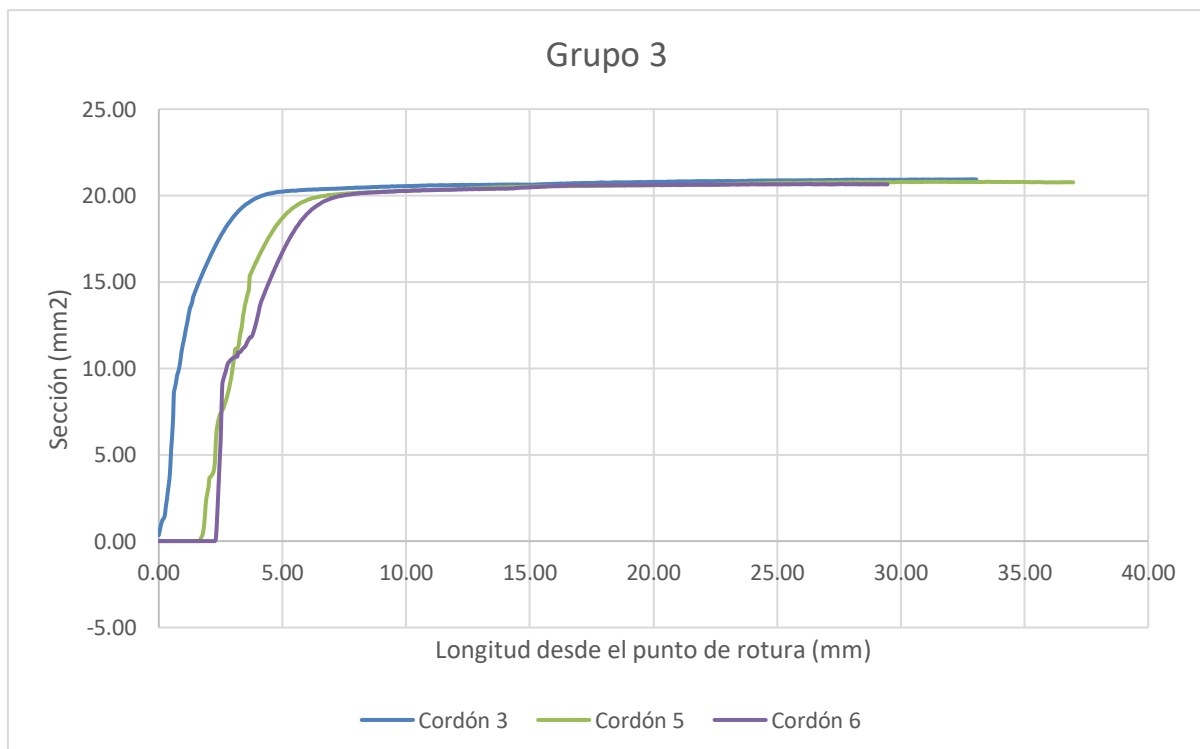


Figura 4.23

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

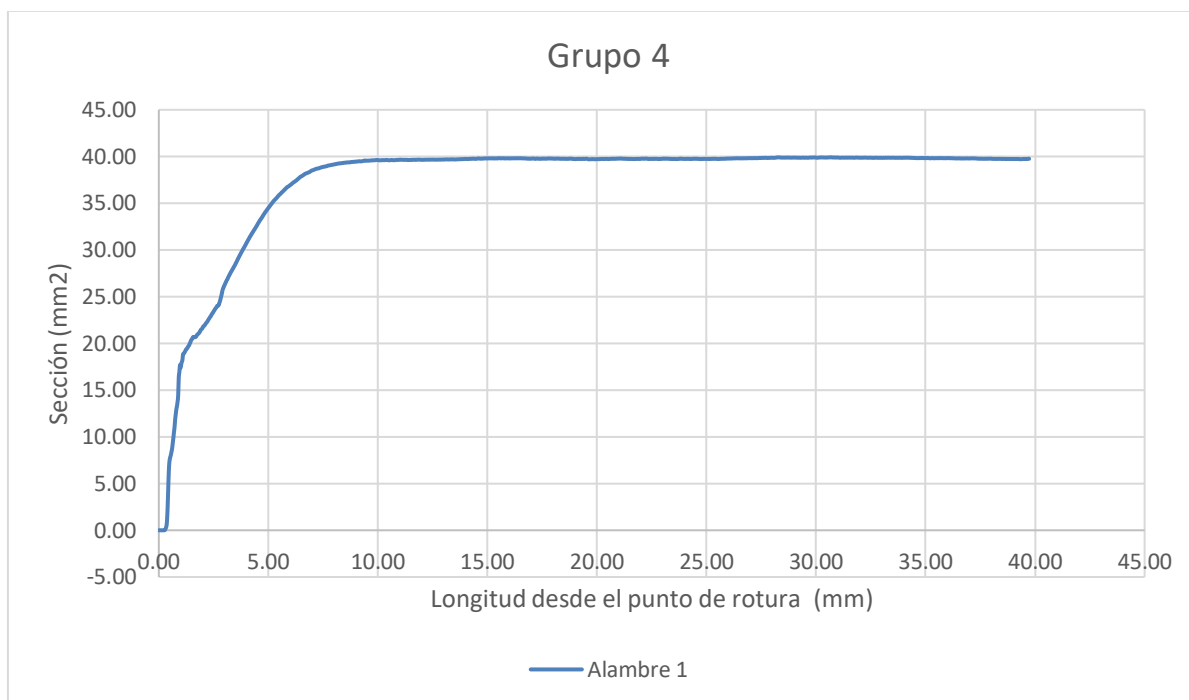


Figura 4.24

Como se puede observar en todos los resultados, la sección inicial tiende a ser muy inferior a la que se muestra luego en el resto de la longitud de las muestras. Esto se debe a que dicho segmento se encuentra afectado por ser el punto de rotura en el ensayo de tracción (planos de rotura que no son perfectamente transversales al alambre y reducción de área por estricción). Por lo tanto, se considera válida solo la medida obtenida a partir de una zona de estabilización a partir de los primeros 5 mm.

Considerado lo anterior, se observan pérdidas despreciables de sección en los Grupos 2, 3 y 4, pero en el Grupo 1 se registra una sección mínima de solo 5 mm², lo cual representa una pérdida de sección con respecto a la nominal del 74.5%. Este orden de magnitud de pérdida de sección es consistente con la tensión de rotura registrada durante el ensayo de tracción, el cual es un 71.4% menor a la mínima requerida para su tipo de acero.

En la Figura 4.25 se observa la textura superficial de las muestras, en donde es muy evidente la pérdida de sección en el Grupo 1 y que el estado del Cordón 9 representa una transición en proceso del estado de deterioro del Grupo 2 al mismo que el del Grupo

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

1. En el Cordón 9 se aprecia, por la rugosidad del mismo, el inicio de los efectos de pérdida de sección por corrosión, comenzando este efecto a sumarse al de fragilización por hidrógeno, siendo este último el proceso de deterioro dominante en los cordones 7 y 8.

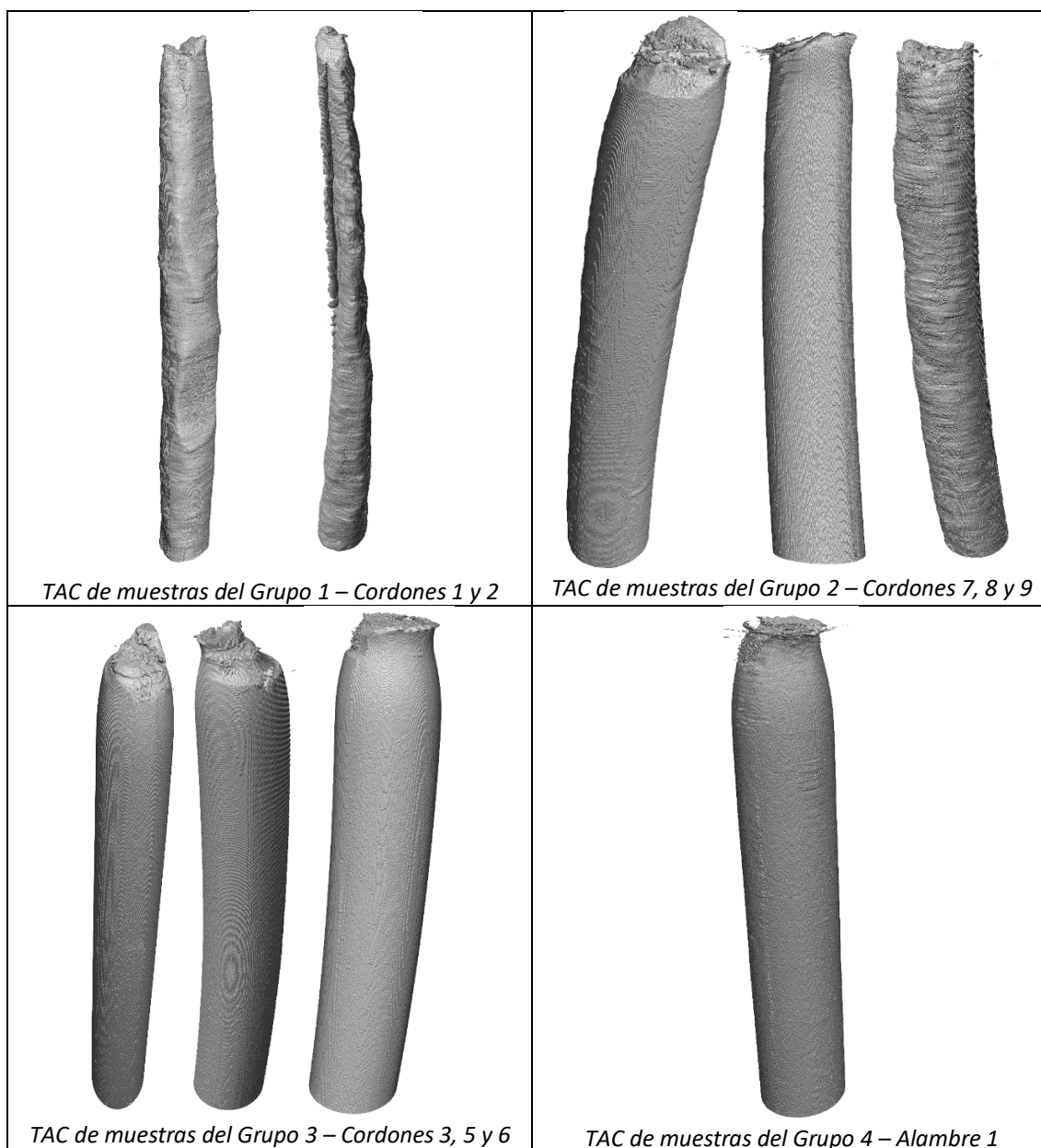


Figura 4.25

4.3.1. Comparación de la sección remanente con la sección útil estimada por tensión de rotura

En la sección 4.1.5 se habían estimado las secciones útiles remanentes de las muestras en base a las tensiones de rotura registradas en los ensayos de tracción. A continuación, se presenta una tabla comparativa de dichos valores con los medidos por medio de la tomografía axial computarizada (TAC).

		Sección útil remanente estimada por tensión de rotura (%)	Sección remanente real medida por TAC (%)
Grupo 1	Cordón 1	26.6	51.0
	Cordón 2	30.7	25.5
Grupo 2	Cordón 7	99.7	97.8
	Cordón 8	100.0	100.0
	Cordón 9	87.4	94.9
Grupo 3	Cordón 3	100.0	100.0
	Cordón 4	Ensayo inválido	Ensayo inválido
	Cordón 5	100.0	100.0
	Cordón 6	100.0	100.0
Grupo 4	Alambre 1	100.0	100.0
	Alambre 2	100.0	100.0
	Alambre 3	100.0	100.0

Tabla 4.5

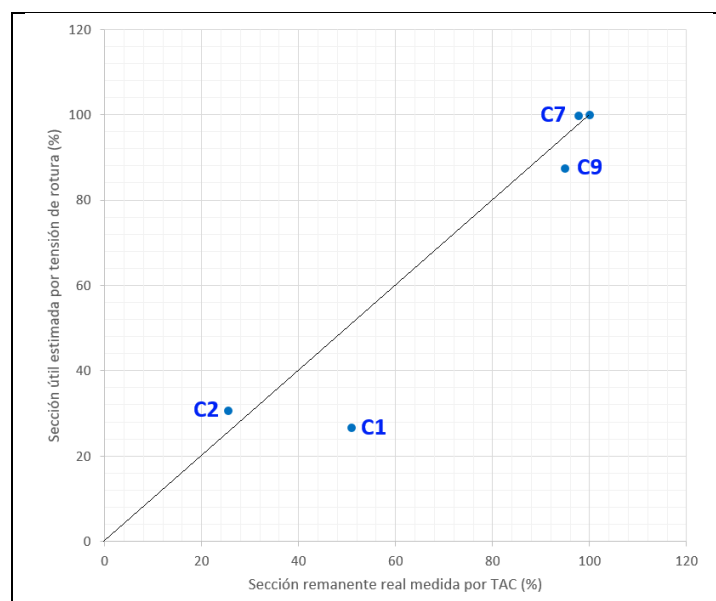


Figura 4.26

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

Se observa que existe una correspondencia entre los cálculos realizados por tensión de rotura y las mediciones por TAC. En el caso del Cordón 1, la sección útil calculada es muy inferior a la medida, lo cual se debe a que en el mismo existen entallas pronunciadas debidas al alto estado de corrosión, como se puede observar en la Figura 4.21, produciéndose la rotura justo en uno de dichos puntos.

4.4 Análisis fractográfico

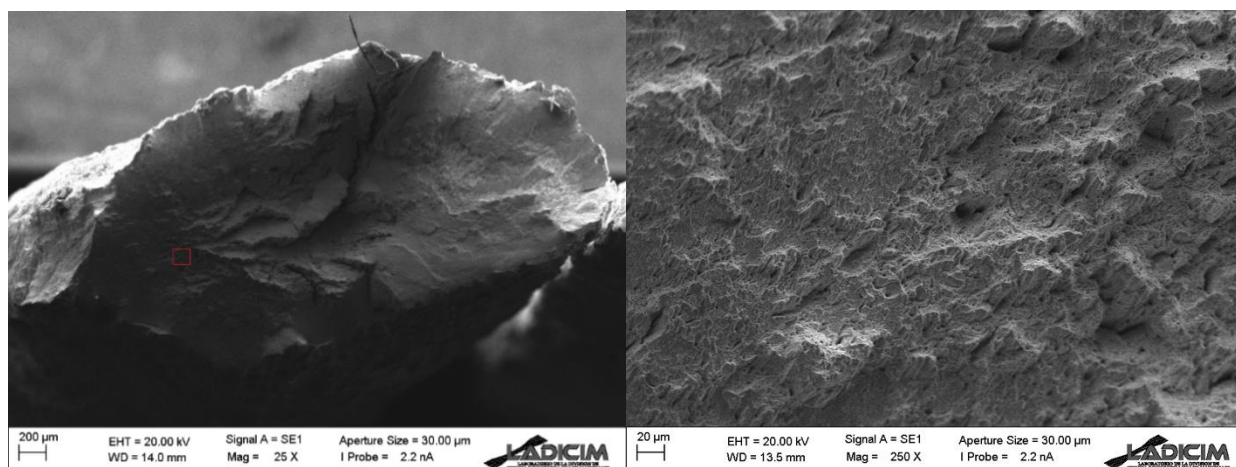
Para el análisis fractográfico se tomaron muestras de la zona de rotura de las probetas ensayadas a tracción, las cuales fueron observadas a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM). En total se cuenta con nueve muestras, ocho de ellas correspondientes a los alambres perimetrales de los cordones, y una de ellas correspondiente a uno de los alambres transversales.

Para cada muestra se tomaron dos fotografías: la primera muestra toda la sección de rotura, indicando con un cuadro de color rojo la región a la cual pertenece la segunda imagen, la cual muestra mayor nivel de detalle. Las Figuras 4.27 a 4.30 recogen las fotografías para cada grupo de muestras.

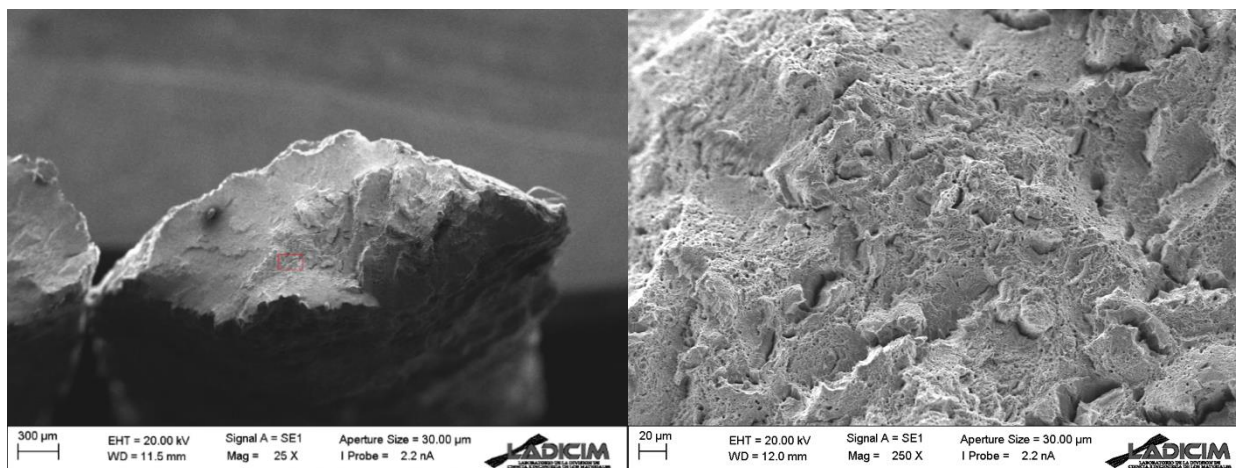
4.4.1. Grupo 1

En los dos cordones del Grupo 1 (Figura 4.27) se observa una considerable pérdida de sección, al punto de que ya no se conserva una forma de sección visiblemente circular. También es apreciable la presencia de distintos puntos en los cuales se han originado las micro fracturas localizadas que dieron lugar al fallo final de la pieza, siendo esta una forma de rotura frágil. Las roturas locales observadas corresponden a mecanismos con escasa capacidad de deformación, lo cual está asociado a un alto nivel de hidrógeno que limita el desarrollo plástico local.

Grupo 1 – Cordones 1 y 2



Sección de rotura de alambre perimetral del Cordón 1



Sección de rotura de alambre perimetral del Cordón 2

Figura 4.27

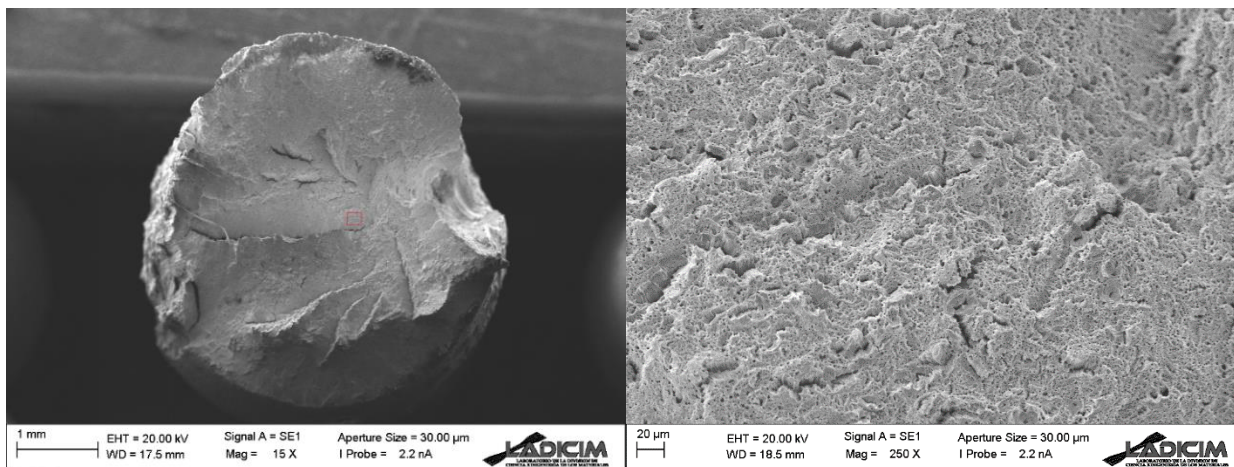
4.4.2. Grupo 2

De manera similar al caso del Grupo 1, en el Grupo 2 se observan distintos puntos de origen de concentración de fallas (Figura 4.28), los cuales acaban uniéndose para producir la rotura final de apariencia frágil. Se observan casos de grandes deformaciones en sentido longitudinal al alambre, especialmente en el Cordón 8, debido a la naturaleza laminar del elemento por su proceso de estirado.

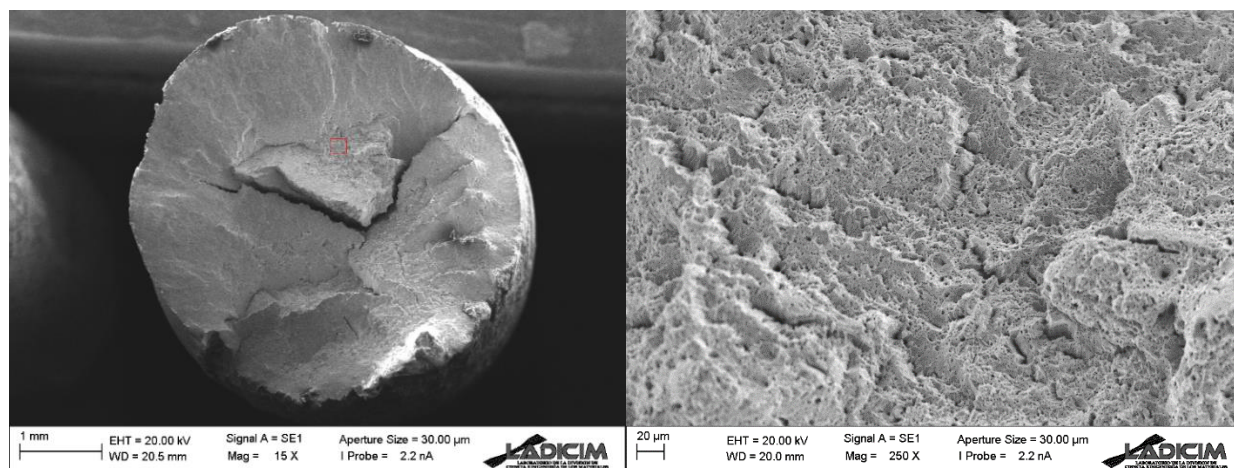
A escala local, la apariencia de la rotura es semejante a la del grupo anterior, si bien parece apreciarse en esta una rugosidad algo mayor, propia de un mayor grado de ductilidad, siendo esta aún escasa.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

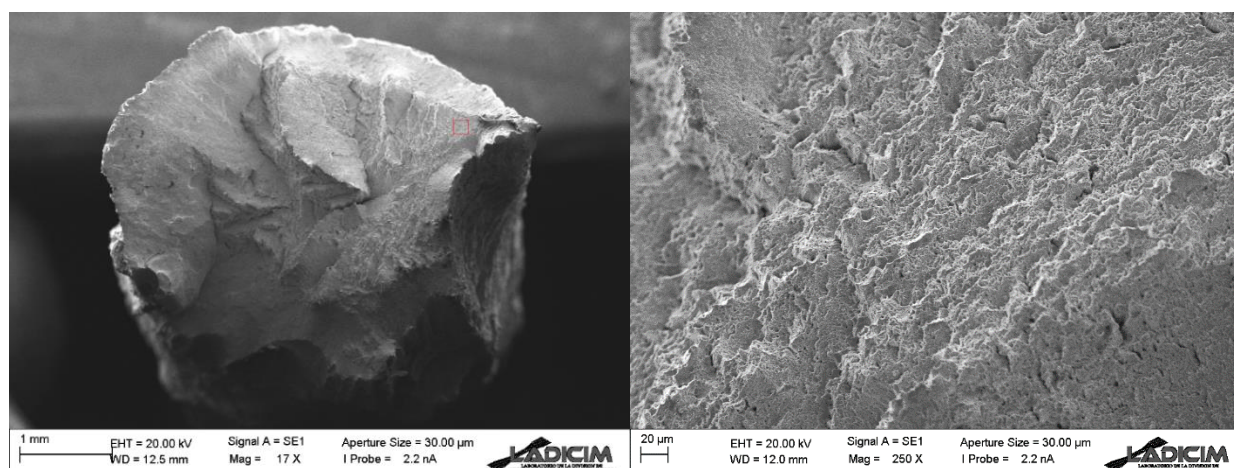
Grupo 2 – Cordones 7, 8 y 9



Sección de rotura de alambre perimetral del Cordón 7



Sección de rotura de alambre perimetral del Cordón 8



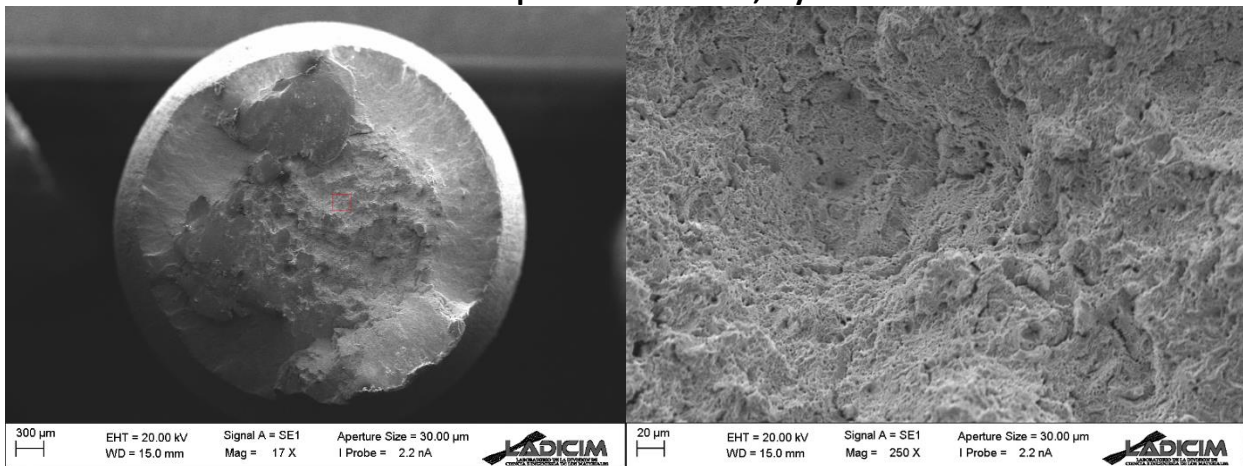
Sección de rotura de alambre perimetral del Cordón 9

Figura 4.28

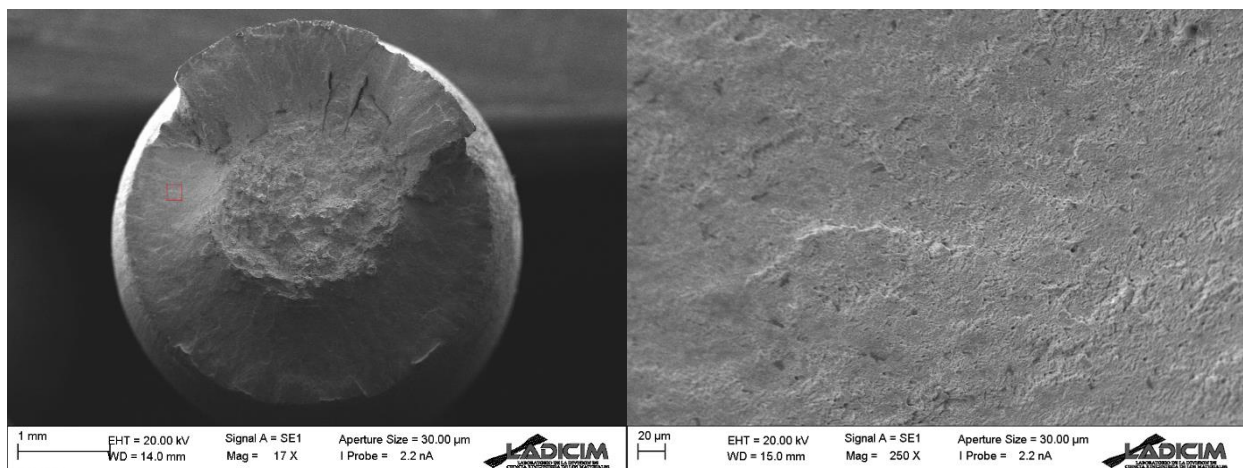
4.4.3. Grupo 3

En todas las muestras del Grupo 3 (Figura 4.29) se observa una concentración de procesos de micro roturas dúctiles en el centro de la pieza, lo cual se evidencia en los micro huecos visibles en las fotografías de mayor aumento (Cordones 3 y 6). Finalmente, la falla se produce por cortante en toda la región perimetral, lo que indica un modo de fallo típico conocido como copa y cono que es característico de roturas dúctiles, esperable en un elemento con propiedades mecánicas aceptables.

Grupo 3 – Cordones 3, 5 y 6



Sección de rotura de alambre perimetral del Cordón 3



Sección de rotura de alambre perimetral del Cordón 5

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

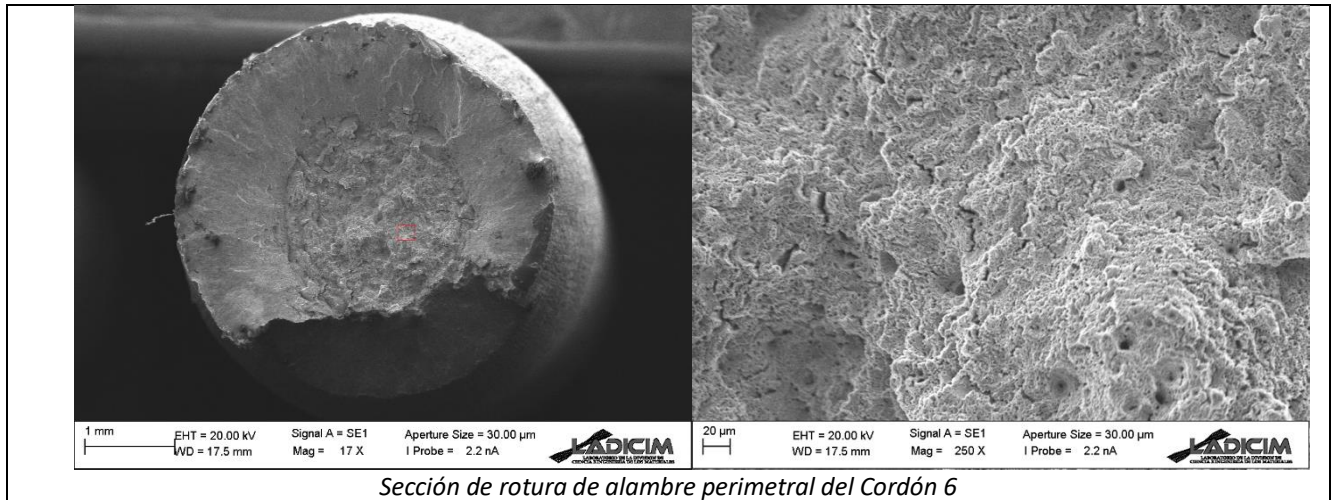


Figura 4.29

4.4.4. Grupo 4

En la muestra del Grupo 4 (Figura 4.30) el tipo de rotura apreciado es muy similar al observado en el Grupo 3, produciéndose una concentración de micro roturas dúctiles en el centro de la pieza, para luego fallar por cortante en toda la corona periférica de la sección. De nuevo, se trata de un tipo de fallo esperable en una pieza con comportamiento mecánico aceptable.

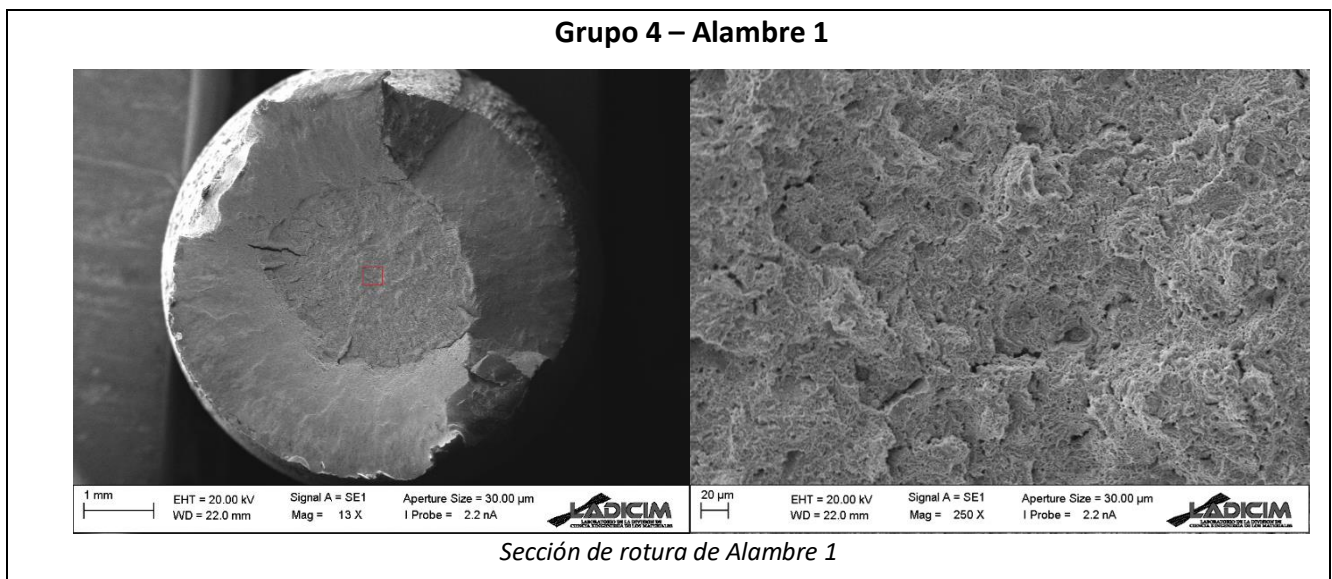


Figura 4.30

5. Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

La Tabla 6 contiene un resumen de los resultados obtenidos y sus observaciones genéricas.

		Resultado	Observaciones
Grupo 1	Cordón 1	No conforme	La rotura se produjo antes de alcanzar el estado plástico. La tensión de rotura alcanza solo el 26.6 % del mínimo requerido, justificado por la pérdida de sección remanente debido a la fuerte corrosión y a la rugosidad superficial que produce posibles efectos de entalla. Presenta una cantidad muy elevada de hidrógeno en el acero.
	Cordón 2	No conforme	La falla se produjo antes de alcanzar el estado plástico. La tensión de rotura alcanza solo el 30.7 % del mínimo requerido, de nuevo. Se presenta una cantidad muy elevada de hidrógeno en el acero, aunque, como en el Cordón 1, su comportamiento está afectado por la pérdida de sección y por la rugosidad superficial debido a la corrosión.
Grupo 2	Cordón 7	No conforme	Si bien la muestra está próxima a cumplir los requisitos mecánicos mínimos, se observa una importante pérdida de ductilidad, debido a la alta concentración de hidrógeno.
	Cordón 8	Conforme	Se cumplen con todos los criterios.
	Cordón 9	No conforme	No se alcanzan los valores de resistencia mecánica mínimos, apenas llegando a la región de comportamiento plástico hacia el final del ensayo de tracción. Todo ello asociado a una alta concentración de hidrógeno y a la ya observable rugosidad superficial debido a la corrosión.
Grupo 3	Cordón 3	Conforme	Se cumplen con todos los criterios.
	Cordón 4	Inválido	Se desechó este ensayo al observarse que la rotura de uno de los alambres de la probeta ocurrió dentro del casquillo del cual se sujeta la mordaza de la prensa.
	Cordón 5	Conforme	Se cumplen con todos los criterios.
	Cordón 6	Conforme	Se cumplen con todos los criterios.
Grupo 4	Alambre 1	Conforme	Si bien la muestra no alcanzó el valor de límite elástico al 0.1% mínimo teórico, este se encuentra en un 97.2% de lo requerido, además de cumplir con todos los demás criterios, por lo que se puede considerar conforme.
	Alambre 2	Conforme	Si bien la muestra no alcanzó el valor de límite elástico al 0.1% mínimo teórico, este se encuentra en un 98.7% de lo requerido, además de cumplir con todos los demás criterios, por lo que se puede considerar conforme.
	Alambre 3	Conforme	Si bien la muestra no alcanzó el valor de módulo de elasticidad mínimo teórico, este se encuentra en un 99.5% de lo requerido, además de cumplir con todos los demás criterios, por lo que se puede considerar conforme.

Tabla 5.1

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

De acuerdo a los resultados anteriores, es posible concluir que las muestras presentan un estado de deterioro variable, en función de la zona de procedencia. De las muestras recibidas, y mediante la correlación de resultados obtenidos gracias a la metodología elaborada para la ejecución del presente trabajo, solo los cables pretensados del Grupo 3 (Viga longitudinal zona alta lejana a la zona de rotura) y del Grupo 4 (Alambres transversales) cumplen con los requisitos mínimos de seguridad, a pesar de que estos últimos podrían no ser representativos del estado de deterioro en las regiones de menor protección contra la corrosión entre alas de vigas. En las demás regiones se observa una pérdida considerable de las propiedades mecánicas, llegando estas a estar por debajo de lo mínimo esperado para garantizar la seguridad. Esta situación no es generalizable por la posición y procedencia de las armaduras, sino por el grado de exposición al ambiente debido a las condiciones constructivas de los recubrimientos de protección, lo que debe obligar a un proceso de inspección preciso para detectar aquellas zonas de máxima afectación.

Las conclusiones del estado del material recibido por zonas pueden resumirse en lo siguiente:

- **Viga longitudinal, zona baja cercana a la zona de rotura (Grupo 1):** Deterioro total. Durante el ensayo de tracción, las muestras fallaron antes de alcanzar el estado plástico, con cargas de rotura en torno al 30% de lo mínimo esperado. También se observan pérdidas de sección importantes y de integridad estructural asociada a su elevado deterioro por corrosión, así como una alta concentración de hidrógeno en el acero.
- **Viga longitudinal, zona baja alejada de la zona de rotura (Grupo 2):** Deterioro importante. Si bien una de las muestras superó el ensayo de tracción de forma conforme, las otras dos mostraron resultados por debajo de lo esperado, observándose una importante y creciente pérdida de ductilidad en ambas. La cantidad de hidrógeno medida alcanza valores considerables, aunque inferiores a los del Grupo 1. La pérdida de integridad estructural, menor tenacidad y ductilidad, se deben al creciente contenido de hidrógeno.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

- **Viga longitudinal, zona alta lejana a la zona de rotura (Grupo 3):** Deterioro mínimo/inexistente: Todas las muestras concluyeron de forma satisfactoria el ensayo de tracción, además de observarse niveles relativamente bajos de contenido de hidrógeno, una superficie sin rugosidad y un tipo de rotura dúctil por fractografía.
- **Pretensado transversal (Grupo 4):** Deterioro mínimo/inexistente: Al igual que en el Grupo 3, todos los ensayos de laboratorio arrojaron resultados satisfactorios. Es importante aclarar que la capacidad portante de dichos elementos es menor a la de los demás grupos debido al tipo de acero con el cual están fabricados, y no por un deterioro sufrido durante su vida útil.

Una observación importante que cabe realizar con respecto a los alambres transversales es que, en el informe de inspección proveído por el cliente, páginas 26 y 27 [2], se muestran fotografías de dichos alambres en un estado de deterioro total, mientras que las muestras enviadas al Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Cantabria se encuentran en mucho mejor estado, como lo muestran los resultados de los ensayos practicados. Esto significa que las muestras recibidas podrían no ser representativas del estado general de estos elementos, cuyo nivel de deterioro por corrosión pudiera ser no homogéneo, dependiendo de la zona y del estado de detalle constructivo local.

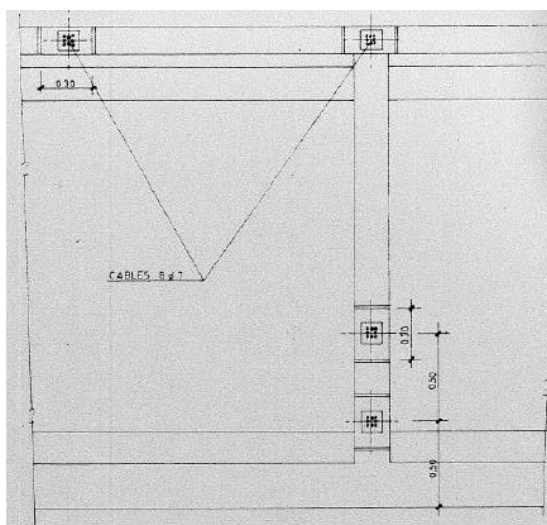
En la Figura 5.1 se observa una comparación entre uno de los alambres transversales encontrados en la inspección inicial del puente y uno de los enviados para los ensayos de laboratorio. Si bien en el informe de inspección se especifica que el alambre fotografiado se corresponde a uno transversal superior, es posible que esta se corresponda a la zona de unión entre alas superiores de vigas longitudinales, el cual es un punto que fue hormigonado in situ, recubriendo los alambres transversales con una manguera plástica cortada por una generatriz y cerrada por un alambre [2], por lo que el grado de protección contra la corrosión en estos puntos es menor que el encontrado en el interior de las alas de las vigas, siendo esta última la zona de donde se presume que se extrajo la muestra enviada para los presentes ensayos de laboratorio. En la Figura 5.2 se puede observar un esquema de la ubicación de alambres transversales.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio



Estado de un alambre transversal del informe de inspección (arriba) [2] y estado de un alambre transversal recibido para su ensayo (abajo)

Figura 5.1



Esquema de ubicación de alambres transversales

Figura 5.2

En cuanto a los ensayos de tracción adicionales realizados a los alambres centrales de los cordones de los Grupos 1, 2 y 3, se observa que en el caso del Grupo 1 el alambre central presenta un comportamiento mecánico mejor que el del cordón completo, produciéndose la rotura del cordón primeramente en los alambres perimetrales, pero en los Grupos 2 y 3 el comportamiento mecánico del alambre central es similar al del resto del cordón. Estos resultados confirman lo esperado mediante un análisis visual del

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

estado de las muestras, por lo que se puede concluir que los alambres perimetrales ofrecen un cierto grado de protección contra la corrosión al alambre central, aunque el mismo no es determinante para el comportamiento del conjunto.

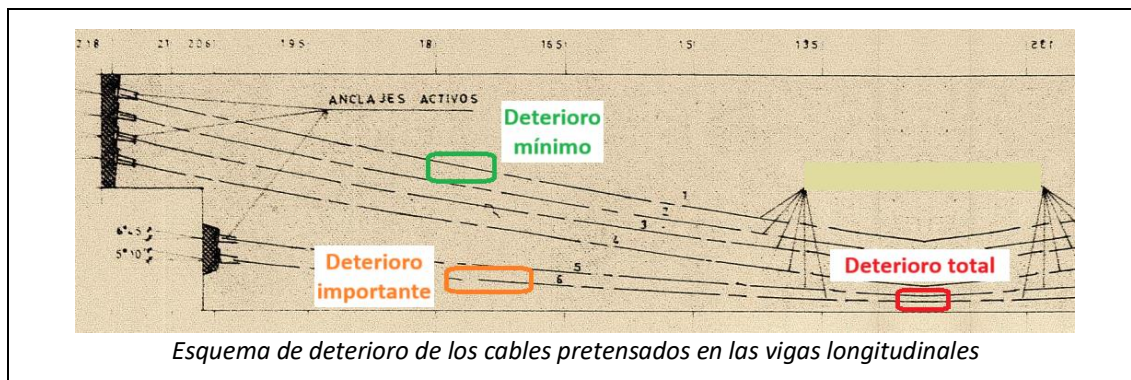


Figura 5.3

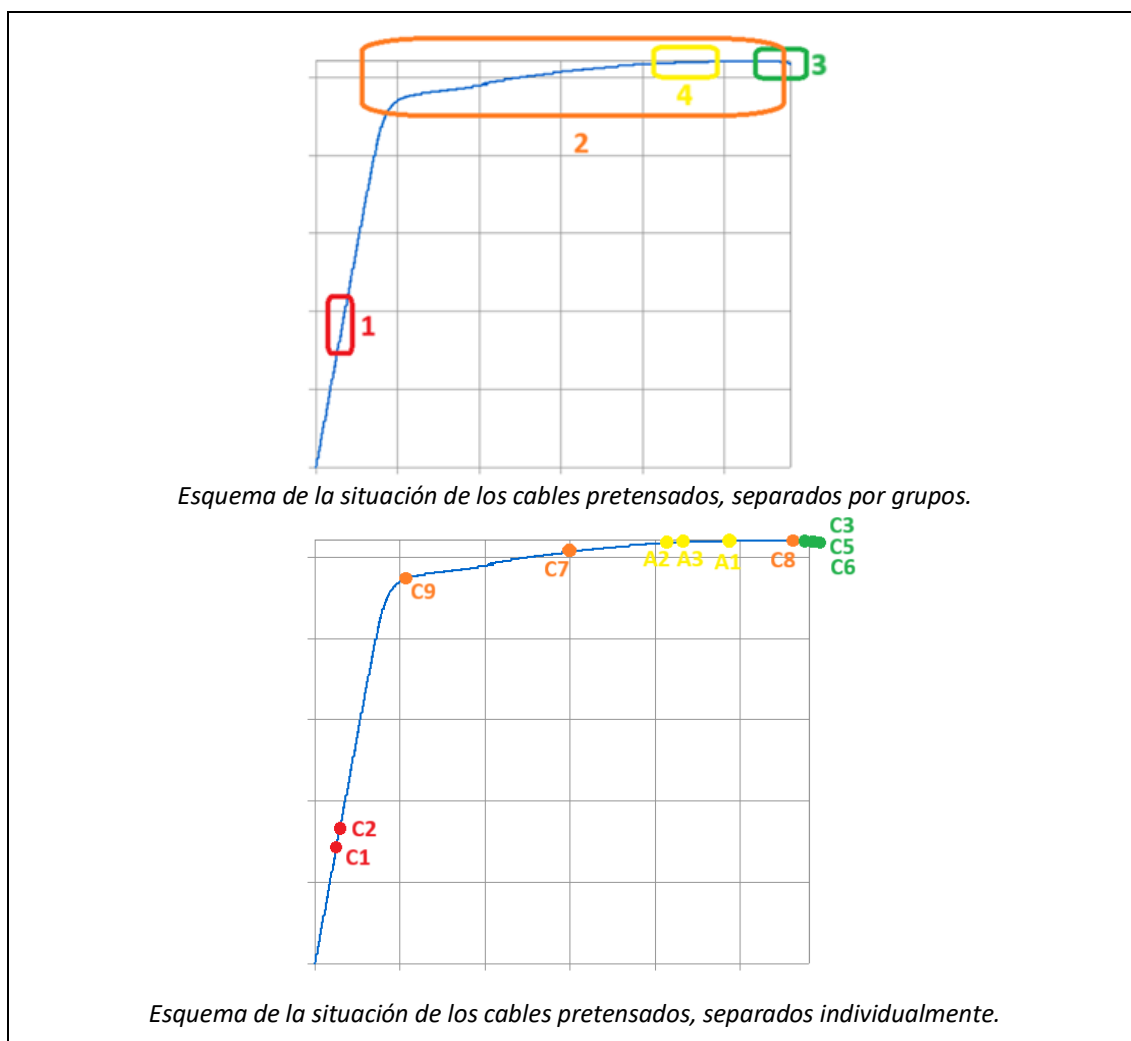


Figura 5.4

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

En base al esquema presentado en la Figura 5.3, a los resultados de los ensayos mecánicos de tracción esquematizados en la Figura 5.4, de contenido de hidrógeno y tomografía axial computarizada, se observa que los cordones del Grupo 1 muestran una importante pérdida de propiedades mecánicas como consecuencia directa de la pérdida de sección por corrosión. Mientras que el Grupo 2, si bien no presenta pérdidas de sección considerables ni tampoco grandes pérdidas de resistencia mecánica, sí presentan una pérdida creciente de ductilidad que viene asociada a las cantidades importantes y crecientes de hidrógeno en el acero que fueron registradas. Este efecto es especialmente notorio en el Cordón 9, que falla muy poco después de alcanzar el límite elástico y que presenta un contenido en hidrógeno medio superior al de los cordones de su mismo grupo, así como rugosidad superficial debido a la corrosión, lo cual justifica asimismo su comportamiento. Por lo tanto, y a modo general, queda comprobado que los altos contenidos de hidrógeno en acero producen pérdida de ductilidad y tenacidad por fragilización, pero apenas disminuyen la tensión de rotura.

También es importante observar que los cables correspondientes al Grupo 1 y al Grupo 2 son los mismos, analizados en distintos puntos de la estructura, por lo que es de esperar que con el tiempo la corrosión sea capaz de llevar el estado de las propiedades mecánicas del Grupo 2, de deterioro importante, al mismo nivel que las del Grupo 1, de deterioro total.

La Figura 5.5 representa esquemáticamente dos regiones de comportamiento: La Región I, en donde la creciente concentración de hidrógeno que se produce en las reacciones propias de la corrosión genera pérdida de ductilidad y tenacidad (fragilización), y la Región II, que es derivada de la creciente rugosidad, con efectos de entallamiento superficial y pérdida de sección debido a la elevada corrosión de zonas más expuestas.

Evaluación del daño de cordones y alambres postensados de un puente tras 45 años en servicio

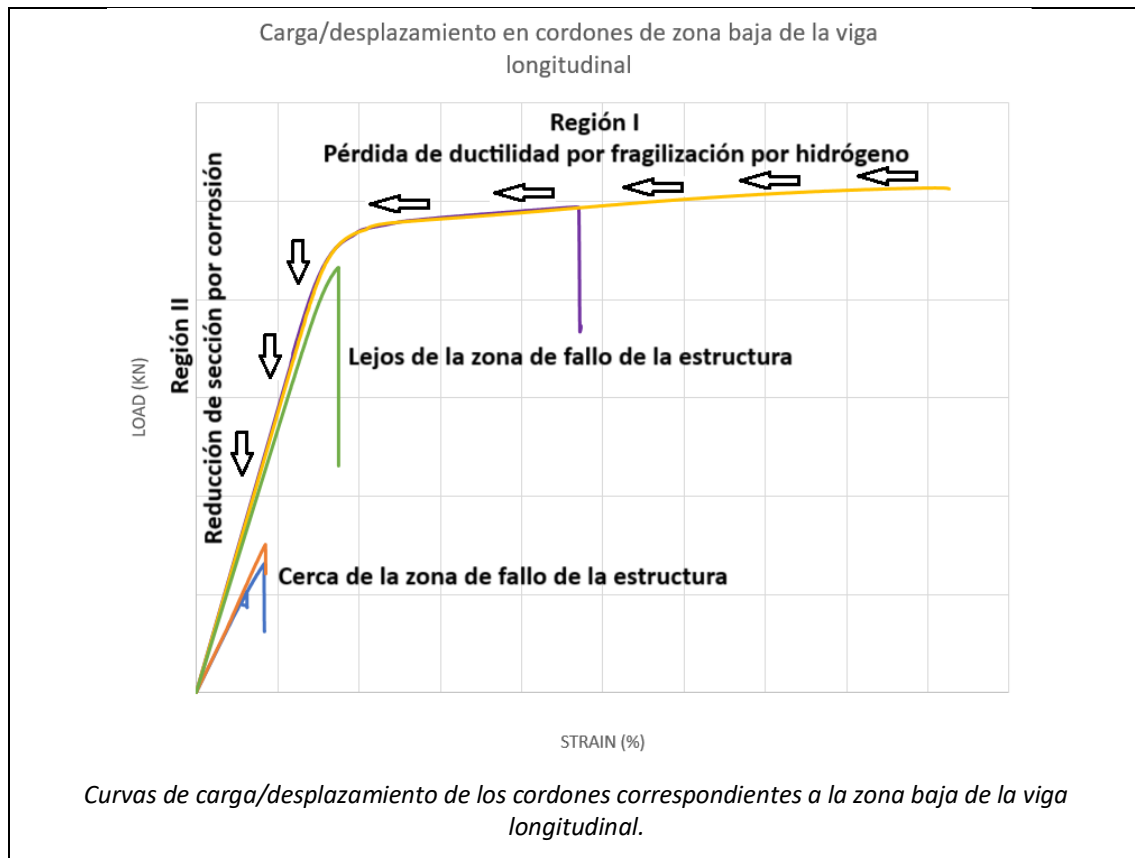


Figura 5.5

Gracias a la metodología seguida, en la que es posible no solamente obtener resultados de ensayos de laboratorio y elaborar conclusiones en base a ello, sino también encontrar una correlación entre dichos resultados, es posible estudiar la integridad de los componentes de acero pretensado encontrados en puente, por lo que las técnicas exploradas durante el presente trabajo pueden suponer una herramienta de gran utilidad en trabajos futuros.

5.2 Trabajo futuro

A continuación, se propone un listado de posibles líneas de investigación derivadas del presente trabajo:

- Desarrollo de una metodología para evaluar la integridad estructural de cordones de acero para pretensado dañados en servicio en vista de su vida remanente: Como se ha visto en el desarrollo del presente trabajo, al no existir una metodología estandarizada para la evaluación de casos como el estudiado, el conjunto de análisis a ejecutar y la interpretación de los resultados queda casi enteramente a criterio del investigador, por lo que contar con unos delineamientos objetivos puede ayudar a evitar juicios sesgados.
- Evaluación por métodos no destructivos de la integridad estructural de los cordones existentes en los demás vanos de la estructura estudiada: Uno de los mayores intereses a nivel práctico del presente trabajo podría ser el poder estimar el grado de daños al que pueden estar expuestos los demás vanos del puente, que cuentan con una idéntica disposición de vigas y pretensados que el vano estudiado, por lo que sería viable aplicar métodos de inspección localizada que no alteren la estructura existente, y relacionar los resultados obtenidos con lo observado en el Vano 30.
- Establecer una relación entre el grado de deterioro de cordones postensados con las propiedades químicas y físicas del grout de relleno y del hormigón de protección: Si bien son conocidas las propiedades protectoras contra la corrosión del grout de relleno y del hormigón de protección, poder cuantificarlas con ejemplos reales o simulados mediante cámara de niebla salina, podría ayudar a prever el estado de deterioro a lo largo de su vida útil, estableciendo así periodos de inspección optimizados.

6. Bibliografía

- [1] Hewson N.R., «Prestressed Concrete Bridges», 2nd edition, ISBN: 978-0-7277-4113-4 ICE. doi: 10.1680/pcb.41134.001
- [2] «Informe de supervisión de la inspección principal del puente. Confidencial, no publicable», 2024.
- [3] Wang L., «Strand corrosion in prestressed concrete structures», ISBN: 978-981-99-2056-3, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-99-2054-9>
- [4] UNE 36094, Norma Española – Alambres y Cordones de Acero para Armaduras de Hormigón Pretensado, 1997
- [5] Zhang Z., Dong C., Huang Y., «Fast Algorithm and its application in construction monitoring of parallel strand cables», Journal of Bridge Engineering, 2014. doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000699
- [6] Álvarez J.A., Arroyo B., Lacalle R., Gutiérrez-Solana F., «Evaluación del daño y la integridad estructural de cables de un puente postensado tras 25 años en servicio», en Actas del XL Encuentro del Grupo Español de Fractura, 2024
- [7] Coronelli D., Castel A., Anh Vu N., François R., «Corroded Post-tensioned Beams with Bonded Tendons and Wire Failure», Engineering Structures, vol. 31, issue 8, pp. 1687-1697, 2009
- [8] Federal Department of Transportation, Turner-Fairbank Highway Research Center, «Corrosion-Induced Major Tendon Failures in Post-Tension (PT) Concrete Bridges», 2024. doi: <https://doi.org/10.21949/1521593>
- [9] Valiente A., Iordachescu M., Aznar A., de Abreu M., «Damage tolerance of the prestressing steel in a bridge stay-cable after thirty years of service in a graded, extremely adverse environment», Construction and Building Materials, vol. 285, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122945>.

- [10] Menga A., Kanstad T., Cantero D., Bathen L., Hornbostel K., Klausen A., «Corrosion-induced damages and failures of posttensioned bridges: A literature review», *Structural Concrete Journal of the fib*, vol. 24, issue 1, pp. 84-99, 2022. doi: 10.1002/suco.202200297
- [11] Proverbio E., «Corrosion and brittle fracture of high strength steel in prestressed concrete structures: a critical review of the problem», *Procedia Structural Integrity*, vol. 62, pp 285-298, 2024
- [12] Messina D., Scionti G., Recupero A., Proverbio, E. «Failure behaviour of post-tensioned concrete beams with different corrosion damage in prestressing tendons», *Proceedings of the fib CACRCS DAYS 2020-Capacity Assessment of Corroded Reinforced Concrete Structures*, pp. 213 – 219, 2020
- [13] Li X., Ma X., Zhang J., Akiyama E., Wang Y., Song X., «Review of hydrogen embrittlement in metals: hydrogen diffusion, hydrogen characterization, hydrogen embrittlement mechanism and prevention», *Acta Metallurgica Sinica*, vol. 33, pp 759-773, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/s40195-020-01039-7>
- [14] UNE-EN ISO 15630-3, «Aceros para el Armado y el Pretensado del Hormigón - Métodos de Ensayo - Parte 3: Aceros para Pretensar», 2019
- [15] prEN 10138-2, «European Standard – Prestressing Steels Part 2: Wire», 2000
- [16] Analytical Methods Committee AMCTB No. 97, «Thermal desorption part 1: Introduction and instrumentation», *Analytical Methods*, vol. 12, pp 3425-3428, 2020. doi: 10.1039/d0ay90082f