



Certificación ISO 9001:2008 ‡

EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE CABLES POSTENSADOS CON APLICACIÓN ESTRUCTURAL EN EL SECTOR TRANSPORTE

José Trinidad Pérez Quiroz
José Luis Ramírez Reyes
Jorge Terán Guillén
Guadalupe Lomelí González

**Publicación Técnica No. 348
Sanfandila, Qro, 2011**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE CABLES
POSTENSADOS CON APLICACIÓN ESTRUCTURAL
EN EL SECTOR TRANSPORTE**

Publicación Técnica No. 348
Sanfandila, Qro., 2011

Esta investigación y la consecuente transferencia de tecnología fue realizada por el Dr. José Trinidad Pérez Quiroz, el Dr. Jorge Terán Guillén y la Ing. Guadalupe Lomelí González, investigadores del Área de Materiales de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, así como el Dr. José Luis Ramírez Reyes del Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana.

Se agradecen las observaciones y recomendaciones técnicas del Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, encargado del Área de Materiales; y del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte.

Evaluación electroquímica de cables postensados con aplicación estructural en el sector transporte

Índice

Resumen	vii
Abstract	ix
Resumen Ejecutivo	xi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Alcance	1
Capítulo 2. Antecedentes	5
2.1 Durabilidad de la subestructura en puentes	6
2.1.1 Subestructura de puentes postensados	7
2.1.2 Aplicaciones del postensado en subestructuras de puentes	10
2.1.3 Concreto preesforzado	12
2.1.4. Clasificación y tipos	12
2.1.4.1 Pretensado	12
2.1.4.2 Postensado	13
2.1.4.3 Elementos pre y postensados	14
2.1.4.4 Acero de preesfuerzo	14
2.1.4.5 Requisitos químicos del acero	15
2.1.4.6 Requisitos físicos del acero	15
2.1.4.7 Dimensiones del torón	17
2.1.4.8 Patenting	17

2.1.5 Corrosión y deterioro de trenzas	17
2.1.5.1 Medidas adicionales para protección ante la corrosión	18
2.1.5.2 Corrosión de la armadura de acero en el concreto	19
2.1.5.3 Condiciones para que exista la corrosión	20
2.1.5.4 Investigaciones de concreto preesforzado	20
Capítulo 3. Metodología experimental	25
Capítulo 4 Desarrollo del estudio	27
4.1 Procedimiento y descripción de las actividades realizadas	27
4.1.1 Prueba de dureza	27
4.2 Prueba metalográfica	29
4.2.1 Corte de la muestra	29
4.2.2 Montaje de la muestra	29
4.2.3 Desbaste de la muestra	30
4.2.4 Pulido	31
4.2.5 Observación de la microestructura	31
4.2.6 Reactivos de ataque	32
4.3 Aplicación de la técnica de DCVG	33
Capítulo 5. Resultados	38
5.1 Medidas de dureza	38
5.2 Microestructura del acero	40
5.3 Resultados de la técnica DCVG	40
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	44

Bibliografía

47

Resumen

En el presente estudio se describe la cantidad de puentes postensados y preesforzados que se encuentran en México. Se hace referencia a la investigación realizada por el IMT, las condiciones a las cuales se encuentran los puentes expuestos y los problemas comunes que se presentan en el país. La revisión bibliográfica específica las condiciones de exposición y formas de ataque sobre la durabilidad de puentes, expone también la teoría básica de corrosión del acero en concreto y una revisión sobre el efecto de agrietamiento del concreto por corrosión. Se indica también la aplicación de la técnica de Corriente Directa Gradiente de Voltaje (DCVG, por sus siglas en inglés), para encontrar daño por corrosión en puentes postensados.

Abstract

The present study describes the amount of post-tensioned and prestressed bridges that are in Mexico. Reference to research by the IMT, the conditions which are exposed bridges and common problems that occur in the country. The literature review specific exposure conditions and forms of attack on the durability of bridges, it also exposes the basic theory of corrosion of steel in concrete and a review of the effect of concrete cracking due to corrosion. It also describes the application of the technique of Direct Current Voltage Gradient (DCVG) to find corrosion damage in posttensioned bridges.

Resumen ejecutivo

Esta investigación propone la aplicación de la técnica de Gradiente de Voltaje por Corriente Directa (DCVG, por sus siglas en inglés), para determinar el daño por de corrosión en elementos de concreto postensado, donde este tipo de deterioro afecta la durabilidad de las estructuras de concreto. El capítulo 1 es una introducción al proyecto e indica el objetivo y alcance de este. El capítulo 2 incluye los antecedentes teóricos del tema, desde cómo se distribuyen los puentes por el tipo de material hasta las aplicaciones del postensado y el deterioro por corrosión de este tipo de estructura. En el capítulo 3 se detalla la metodología para aplicar la técnica DCVG. El capítulo 4 muestra el desarrollo del estudio. El capítulo 5, los resultados experimentales y la característica principal de la técnica al detectar el daño por corrosión; que consiste, de manera cualitativa, en el incremento de la intensidad de corriente en el defecto debido a la aplicación de la corriente. Se sugiere extender la aplicación de la técnica DCVG a elementos estructurales de mayor tamaño para evitar la interacción de los campos eléctricos de los defectos y en sistemas diferentes de acero de preesfuerzo-manguera de plástico – mortero.

1 Introducción

En la década de los ochenta, se reconoció internacionalmente el problema de la corrosión de las armaduras como uno de los principales mecanismos de deterioro de las estructuras de concreto; lo cual las debilita e incluso puede llegar hasta el colapso de estas.

Los costos de mantenimiento de la estructura y la rehabilitación o contención de las patologías generadas por el fenómeno, son económicamente significativos, como para que se estimule la investigación científica y tecnológica, así como los procesos de aplicación rápida de los resultados obtenidos. A nivel mundial, este problema ha producido pérdidas cuantiosas; así, la mitad de los 575 000 puentes de EU afectados por corrosión debido principalmente al uso de sales de deshielo y al menos un 40% de estos se han considerado como deficientes a nivel estructural. Los costos de reparación a nivel mundial ascienden a 50 mil millones de dólares y esta cifra crece continuamente.

También en el Reino Unido, los puentes de las grandes autopistas requieren atención, debido a las condiciones severas de corrosión por el uso de sales de deshielo. Se estima que los costos de reparación pueden ascender a más de 620 millones de libras, en los próximos 10 años.

1.1 Objetivo

Demostrar la funcionalidad de la técnica de Corriente Directa Gradiente de Voltaje para detectar de forma cualitativa el daño por corrosión en una estructura concreto que simule un elemento de concreto postensado con ducto de polietileno de alta densidad (HDPE).

Elaborar una metodología para la evaluación de elementos de concreto postensados que garanticen la calidad y el buen desempeño de las materiales y estructuras en servicio y la aplicación de esta en la infraestructura del país.

Determinar las condiciones óptimas de operación de la técnica DCVG para determinar el daño por corrosión de elementos de concreto postensado

1.2 ALCANCE

Se analizarán elementos fabricados de concreto que simulen un elemento de concreto postensado, para el desarrollo de la metodología y los parámetros óptimos de detección de daño por corrosión mediante la técnica DCVG.

2 Antecedentes

En México se ha contabilizado la cantidad de puentes, con el SISTEMA DE PUENTES DE MÉXICO (SIPUMEX) bajo la supervisión que la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC); quien tiene a su cargo la atención de los 7,231 puentes de la red federal de carreteras libres de peaje; de los cuales se requiere programar su atención oportunamente, en función de los recursos disponibles; para ello se utiliza el Sistema de Puentes de México (SIPUMEX).

El sistema cuenta con una base de datos en la que se tiene el inventario de todos los puentes con sus características geométricas y estructurales básicas, su ubicación, los materiales de que están contruidos figura 2.1, su estado físico y los datos de tránsito de los vehículos que soportan.



Figura 2.1 Distribución de puentes por tipo de material^[1].

Personal de los Centros SCT realiza las inspecciones visuales de los puentes que lo ameriten, según una previa programación, y se actualiza la base de datos central localizada en la DGCC. Tal actualización, que en promedio se realiza cada dos años para cada uno de los puentes, permite detectar deterioros y deficiencias causadas por un diseño inadecuado o un procedimiento constructivo incorrecto; ello, por consiguiente, reduce al mínimo la probabilidad de que se colapse alguna estructura por causas ajenas a emergencias hidrometeorológicas o sísmicas. Cabe mencionar que cuando se presentan dichas emergencias, los puentes son inspeccionados nuevamente.

El estado físico de los puentes se denota con una calificación que va de "cero" (puentes que no requieren atención) a "cinco" (condición crítica de los puentes que requieren atención en el año en curso o en el siguiente). Utilizando como parámetros la calificación de los puentes y el tránsito diario promedio anual de vehículos, se obtiene un listado de puentes en orden de prioridad, que incluye el costo estimado de los trabajos requeridos. Este listado da origen al programa de estudios y proyectos de puentes del año en que se realiza la jerarquización y al programa de obras de reconstrucción de puentes del año siguiente.

Tabla 2.1 Calificación de puentes según SIPUMEX

Calificación	
0	Estructuras recientemente construidas o reparadas, sin problemas
1	Puentes en buen estado no requieren atención
2	Estructuras con problemas menores plazo de atención indefinido
3	Daño significativo, reparación necesaria en un plazo de 3 a 5 años
4	Daño grave, reparación necesaria en plazo de 1 ó 2 años
5	Daño extremo o riesgo de falla total. Se requiere reparación inmediata a la año siguiente

2.1 Durabilidad de la subestructura de puentes [2]

La durabilidad es la habilidad de una estructura para soportar diversas formas de ataque del medio ambiente. Para subestructuras de puentes; la preocupación más común es la corrosión del acero de refuerzo, el ataque de sulfatos, los daños por congelación-deshielo y las reacciones álcali-agregado. Las tres últimas son las formas de ataque contra el concreto. Muchas investigaciones se han desarrollado a estos temas y en su mayor parte estos problemas han sido resueltos para nuevas estructuras.

El aspecto de mayor preocupación para subestructuras postensadas es la corrosión del acero. La potencialidad del acero de refuerzo de sufrir corrosión es mayor en algunas zonas. En las regiones donde suceden nevadas, los puentes pueden ser sometidos a productos químicos de deshielo que conducen a los graves daños a la corrosión como se muestra en la Figura 2.2a. A lo largo de la costa del Golfo de México, el medio ambiente caliente, húmedo de agua salada también puede producir graves daños por corrosión, como se muestra en la Figura 2.2b.



a) Exposición a sales de deshielo
ataque desde la parte superior



b) exposición zona marina
ataque desde abajo

Figura 2.2 Daños típicos en puentes causados por corrosión

En 1998, la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) produjo una "tarjeta de informe" para calificar la infraestructura de los Estados Unidos de acuerdo con el daño que presentan, como se muestra en la Figura 2.3. Puentes que se veían mejor que la mayoría de otras áreas de infraestructura, recibían una calificación de C-.

Sin embargo, una calificación de C- es punto grave y los comentarios de la ASCE que acompañaban la nota indicaban que casi un tercio de todos los puentes eran estructuralmente deficientes o funcionalmente obsoletos. Estas estadísticas significan que hay muchos puentes que necesitan ser reparados o reemplazados. Además estas también indican que se debe prestar más atención a la durabilidad durante el proceso de diseño, ya que la falta de durabilidad es uno de los mayores contribuyentes al mal estado de la infraestructura.

Subject	Grade
Roads	D-
Bridges	C-
Mass Transit	C
Aviation	C-
Schools	F
Drinking Water	D
Wastewater	D+
Solid Waste	C-

Figura 2.3 Evaluación de la condición de la infraestructura reportada por la ASCE

Larosche ^[3] desarrolló un análisis de la condición de la subestructura de puentes del estado de Texas usando el sistema de evaluación BRINSAP; dicho sistema contiene información de más de 30 000 puentes, los resultados mostrados por el análisis describía que el 10% de los puentes tienen deficientes sus subestructura. Esto sugería que debería de ponerse más atención en la durabilidad de la subestructura de los puentes.

2.1.1 Subestructura de puentes postensados

Beneficios del postensado

El postensado ha sido ampliamente usado en las superestructuras de los puentes, pero ha sido limitado a pocas aplicaciones en subestructura de estos. Existen algunas situaciones donde es posible utilizar postensado en la subestructura de puentes para proporcionar beneficios estructurales y económicos. En la tabla 2.2 se muestran algunos beneficios del postensado.

Tabla 2.2 Beneficios del postensado

Benefit	structural Behavior	Construction	Durability
Control of deflections	X		
Increased Stiffness	X		
Improved Crack Control (Higher cracking moment, fewer cracks, smaller crack widths)	X		X
Reduced Reinforcement congestion	X	X	X
Continuity of reinforcement	X		X
Efficient utilization of high strength steel and concrete	X		X
Quick efficient joining of precast elements	X	X	X
Continuity between existing components and additions	X	X	X

Aunque el postensado y el pretensado son seleccionados normalmente por razones de construcción o estructurales, algunos de estos pueden mejorar la durabilidad. Por ejemplo, la reducción de la longitud y ancho de la grieta ofrecen un gran potencial para mejorar la protección contra la corrosión proporcionada por el concreto. La reducción en la cantidad de refuerzo y la continuidad del refuerzo significa que es más fácil de colocar y compactar el concreto con menos oportunidad para formación de cavidades dentro del concreto.

A menudo se utiliza postensado en conjunto con prefabricados, ya que estos últimos ofrecen mejor control de calidad, condiciones de curado y calidad del concreto; lo cual lleva a mejorar la protección contra la corrosión. En condiciones de concreto de unión postensada (bonded post-tensioning), que es el término utilizado para el método de aplicación de compresión después de vaciar el concreto y el proceso de curado se ha terminado, de tal manera que existe una unión entre el cable y el concreto. Este sistema ofrece la oportunidad de múltiples

niveles de protección contra la corrosión para el tendón o cable pretensado, como se muestra en la Figura 2.4. Las medidas de protección incluyen los tratamientos de superficie en concreto, el propio concreto, el ducto, la lechada y el recubrimiento de cable o barra por medio de epóxico o galvanizado. Postensado también ofrece la oportunidad de aislar eléctricamente el sistema de pretensado del resto de la estructura.

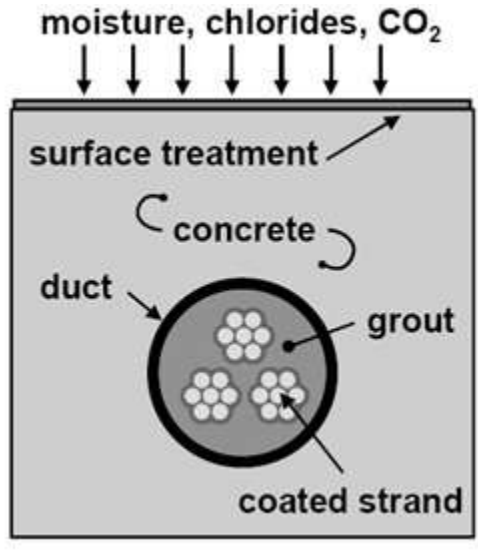


Figura 2.4 Protección multinivel contra la corrosión de tendones “bonded post-tensioning”

2.1.2 Aplicaciones del postensado en subestructuras de puentes

El postensado ha sido utilizado con éxito en muchas subestructuras de puentes. Las posibles aplicaciones del postensado sólo están limitadas por la imaginación del diseñador. Diversas aplicaciones de pretensado a subestructuras se muestran en la Figura 2.5 (a) a 2.5 (h).

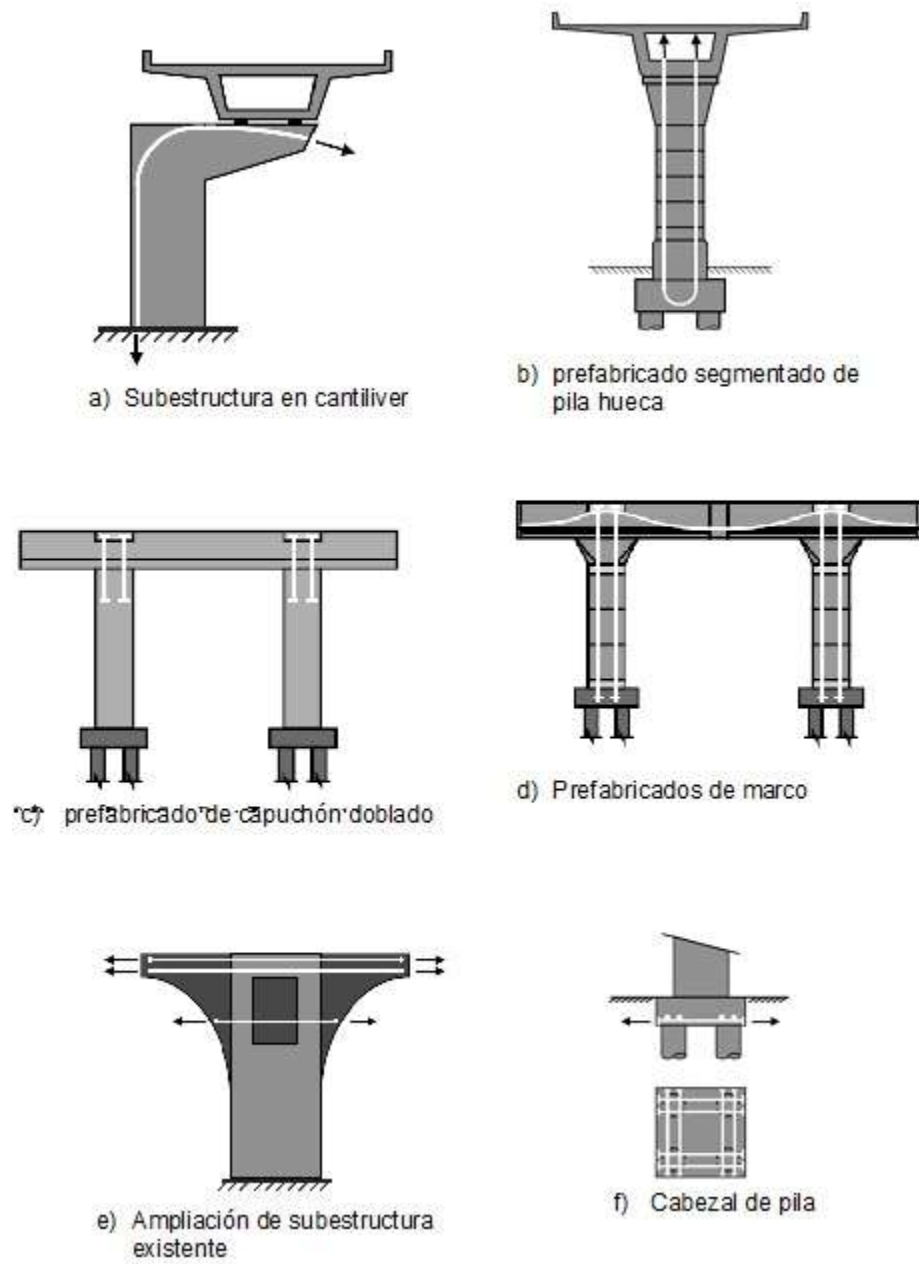


Figura 2.5 Aplicaciones del postensado en subestructuras de puentes

2.1.3 Concreto preesforzado

Se denomina concreto preesforzado a los elementos estructurales de concreto sometidos a esfuerzos de **compresión** previos a su puesta en servicio. Esta compresión se logra mediante la tensión y anclaje de cables de acero en el concreto. La primera aplicación del preesforzado en el concreto se atribuye al ingeniero P. A. Jackson, de San Francisco, Estados Unidos, el cual patentó en el año de 1872 un esquema novedoso para la construcción de arcos y bóvedas; en este método, Jackson hizo pasar tirantes tensores de hierro a través de bloques de mampostería o concreto y los fijó por medio de tuercas.

Después de cincuenta años de haber sido desarrollado el novedoso método de construcción de Jackson, se registró un progreso relativamente pequeño en el concreto preesforzado. Algunos ingenieros, tanto norteamericanos como europeos, aplicaron la misma idea a estructuras diferentes con algunas variantes.

En 1907, J. G. F. Lund inició la fabricación de bóvedas preesforzadas construidas por bloques de concreto, unidos mediante mortero. En este método, el preesforzado se logró por medio de tirantes tensores de hierro y la compresión se transmitió a los bloques por medio de placas de apoyo en los extremos. En 1908 se inició el método similar por parte de G. R. Steiner, quien propuso apretar inicialmente los tirantes de preesforzado en contra del concreto húmedo, con objeto de destruir la traba o ligazón y luego aumentar la tensión después del endurecimiento del concreto.

En 1928, el ingeniero Francés E. Freyssinet introdujo una importante innovación al utilizar el acero de alta resistencia para el preesforzado. Esto no solo redundó en la economía considerable de acero, sino que permitió un preesforzado tan alto que, aun después de las pérdidas de fuerza de tensión remanente, era suficiente para ejercer esfuerzos de compresión de gran magnitud en la trabe o viga. En sus trabes, ligó el acero con el concreto, lo que originó un material homogéneo. Asimismo, Freyssinet demostró claramente el efecto de la deformación progresiva o escurrimiento en el concreto y, mediante el uso de acero de alta resistencia, demostró que la mayor parte del preesfuerzo puede conservarse. Se considera que esto constituye el principio del concreto preesforzado, tal como se conoce en la actualidad ^[3].

2.1.4. Clasificación y Tipos

2.1.4.1 Pretensado

El término pretensado se usa para describir cualquier método de preesforzado en el cual los tendones se tensan antes de colocar el concreto.

Los tendones, que generalmente son de cable torcido con varios torones de varios alambres cada uno, se re-estiran o tensan entre apoyos que forman parte permanente de las instalaciones de la planta, como se ilustra en la Figura 2.6.

Se mide el alargamiento de los tendones, así como la fuerza de tensión aplicada por los gatos hidráulicos.

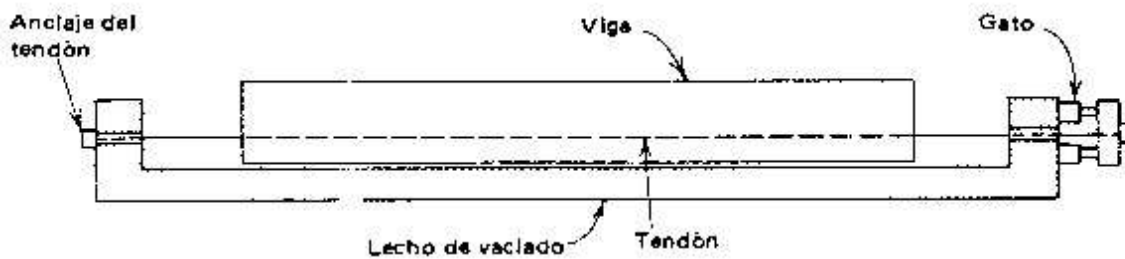


Figura 2.6 Fabricación de un elemento pretensado

Con la cimbra en su lugar, se vacía el concreto en torno al tendón esforzado. A menudo se usa concreto de alta resistencia en corto tiempo, a la vez que curado con vapor de agua, para acelerar el endurecimiento del concreto. Después de haberse logrado suficiente resistencia, se libera la presión en los gatos, los torones tienden a acortarse, pero no lo hacen por estar ligados por adherencia al concreto. En esta forma, la fuerza del preesfuerzo es transferida al concreto por adherencia, en su mayor parte cerca de los extremos de la viga, y no se necesita de ningún anclaje especial.

Características

1. Pieza prefabricada
2. El preesfuerzo se aplica antes que las cargas
3. El anclaje se da por adherencia
4. La acción del preesfuerzo es interna
5. El acero tiene trayectorias rectas
6. Las piezas son generalmente simplemente apoyadas (elemento estático)

2.1.4.2 Postensado

Contrario al pretensado, el postensado es un método de preesforzado en el cual el tendón que va dentro de unos conductos es tensado después de que el concreto ha fraguado. Así, el preesfuerzo es casi siempre ejecutado externamente contra el concreto endurecido, y los tendones se anclan contra el concreto inmediatamente después del preesforzado. Este método puede ser aplicado tanto para elementos prefabricados como colados en sitio.

Generalmente se colocan en los moldes de la viga conductos huecos que contienen los tendones no esforzados, y que siguen el perfil deseado, antes de vaciar el concreto; como se ilustra en la figura 2.7:

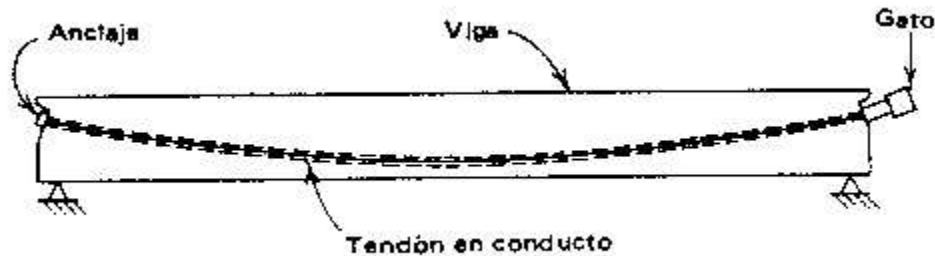


Figura 2.7 Fabricación de un elemento postensado

Características

1. Piezas prefabricadas o coladas en sitio
2. Se aplica el preesfuerzo después del colado
3. El anclaje requiere de dispositivos mecánicos
4. La acción del preesfuerzo es externa
5. La trayectoria de los cables puede ser recta o curva
6. La pieza permite continuidad en los apoyos (elemento hiperestático)

2.1.4.3 Elementos pre y postensados

Hay ocasiones en que se desean aprovechar las ventajas de los elementos pretensados pero no existe suficiente capacidad en las mesas de colado para sostener el total del preesfuerzo requerido por el diseño del elemento; en otras, por las características particulares de la obra, resulta conveniente aplicar una parte del preesfuerzo durante alguna etapa posterior a la fabricación. Al menos ante estas dos situaciones, es posible dejar ahogados ductos en el elemento pretensado para postensarlo después; ya sea en la planta, a pie de obra o montado en el sitio.

2.1.4.4 Acero de preesfuerzo

El acero de preesfuerzo es un cable denominado torón, compuesto de seis alambres dispuestos en forma helicoidal sobre uno central, con un paso uniforme no menor de doce ni mayor de dieciséis veces el diámetro nominal del torón. Los torones se clasifican en dos grados según su resistencia última mínima, como se indica en la Tabla 2.3 ^[5].

Tabla 2.3 Clasificación de los torones según su resistencia última

Grado	Resistencia ultima MPa (kg/cm ²), mínimo
176	1 725 (17 590)
190	1 860 (18 967)

2.1.4.5 Requisitos químicos del acero

El material base para la fabricación de los torones será acero al carbono. Debido a que los torones básicamente por sus propiedades mecánicas, no se especifica la composición química de los alambres y por consiguiente no es necesario identificar la colada, ya que es posible que se requieran alambres provenientes de diferentes coladas ^[5].

2.1.4.6 Requisitos físicos del acero

El acero será de calidad tal que cuando sea estirado en frío para formar alambre redondo con el diámetro nominal requerido, posteriormente será sometido a un proceso de fabricación para formar el torón, y un relevado de esfuerzos después de torcerse para obtener las propiedades mecánicas exigidas ^[6].

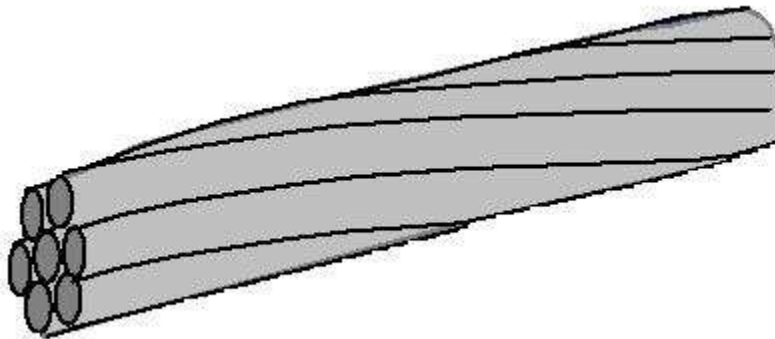


Figura 2.8 Alambre de acero de alta resistencia

2.1.4.7 Dimensiones del torón

El torón terminado se clasifica con el diámetro nominal, en milímetros, como indica la Tabla 2.4, con una tolerancia para los torones grado 176, ($\pm 0,40$) milímetros y para grado 150 de (+0,66) o (-0,15) milímetros; dicho diámetro será medido como muestra la Figura 2.9. ^[11]

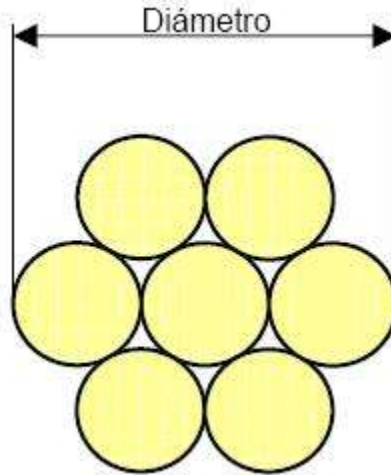


Figura 2.9 Sección transversal del torón

El diámetro del alambre central de cualquier torón será mayor que el diámetro de cualquiera de los seis alambres exteriores que lo constituyen, conforme con lo indicado en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Diámetro nominal del torón y otras características

Diámetro nominal del torón (mm)	Diferencia mínima entre el diámetro central y el diámetro de cualquier alambre exterior (mm)	Área nominal del torón mm ²	Masa nominal kg/m
Grado 176			
6,35	0,025	23,22	0,182
7,94	0,038	37,42	0,294
9,52	0,051	51,61	0,405
11,11	0,63	69,68	0,548
12,7	0,76	92,9	0,73
15,24	0,102	139,35	1,094
Grado 150			
9,52	0,051	54,84	0,432
11,11	0,63	74,19	0,582
12,7	0,76	98,71	0,775
15,24	0,102	140	1,102

El área nominal del torón terminado será la que se indica en la Tabla VII, según su diámetro nominal. Las variaciones en el área de la sección transversal, como consecuencia de la variación en el diámetro del torón, no serán motivo de rechazo; siempre y cuando las diferencias en el diámetro de los alambres individuales y el diámetro del torón estén dentro de las tolerancias indicadas ^[5].

2.1.4.8 Patenting

Este tratamiento suele ser utilizado en la industria de trefilería para la fabricación de alambres de alta resistencia. Unas veces se emplea como tratamiento intermedio, para destruir el efecto de estirado y conseguir estructuras muy finas de tipo perlítico o bainítico, muy convenientes para los trabajos de trefilería; pues tienen gran tenacidad y una excelente aptitud para el estirado, y otras veces se emplea como operación final para que el alambre de acero quede con una resistencia muy elevada.

El patenting es especialmente interesante en el caso de aceros de alto contenido de carbono (0.50 a 0.70% de C), que en general son muy difíciles de estirar. Este problema no suele presentar cambio en los aceros de menos de 0.30% de C, porque la ferrita, que en ellos se encuentran paralelas a esa dirección, no ejercen una influencia tan perjudicial ^[6].

2.1.5 Corrosión y deterioro de trenzas

La protección por corrosión del acero de preesfuerzo es más crítica para el acero de preesfuerzo. Tal precaución es necesaria debido a que la resistencia del elemento de concreto preesforzado está en función de la fuerza de tensado, que a su vez está en función del área del tendón de preesfuerzo. La reducción del área del acero de preesfuerzo debido a la corrosión puede reducir drásticamente el momento nominal resistente de la sección preesforzada, lo cual puede conducir a la falla prematura del sistema estructural. En elementos pretensados, la protección contra la corrosión se provee con el concreto alrededor del tendón. En elementos postensados, la protección se puede obtener inyectando con lechada los ductos después de que el preesforzado esté completo.

Otra forma de deterioro de alambres o trenzas es la corrosión bajo esfuerzo, que se caracteriza por la formación de grietas microscópicas en el acero, el cual se vuelve frágil y falla. Este tipo de reducción en la resistencia puede ocurrir sólo bajo esfuerzos muy altos y, aunque es poco común, es difícil de prevenir.

Los tendones en el concreto pretensado están adheridos a este a lo largo del elemento, como en el refuerzo no tensado y transmiten su fuerza por adherencia. Para construir un elemento pretensado, es necesario que antes de colocar el concreto se mantengan tensados los tendones o alambres entre anclajes externos, hasta que el concreto haya endurecido; entonces se pueden liberar los tendones y producir la transmisión del preesfuerzo al elemento.

Comúnmente para todos estos, el papel del cable preesforzado puede tomar forma por rolado en frío, alambre de alta resistencia o alambre roscado en forma helicoidal para formar una cuerda o rolado de alta resistencia de alambres entrelazados. Los cables pretensados para construcción de puentes proporcionan típicamente una resistencia a la tensión de 270 ksi. ^[4].

El acero embebido dentro del concreto (o cemento mortero) está normalmente protegido contra la corrosión, debido a la presencia de una película pasiva en la superficie del metal; la cual se forma en el ambiente altamente alcalino del cemento hidratado, con un pH de alrededor de 13. Mientras la película pasiva se mantenga, el acero no se corroerá. Para asegurar la protección ante la corrosión a largo plazo, la masa del concreto debe ser lo suficientemente impermeable para limitar el transporte de especies como lo son el agua, iones cloruro, oxígeno y dióxido de carbono; a través del concreto hasta lo profundo del refuerzo. La presencia de niveles críticos (también llamados de umbral) de estas especies, las cuales normalmente son llevadas a lo profundo del agua disueltas en agua, puede cambiar la naturaleza del concreto o alterar las condiciones del acero embebido. En ambos casos, la corrosión del acero puede iniciar.

Por ejemplo, la presencia de iones cloruro en concentraciones por encima de la de umbral tiene un efecto de despasivación en el acero; incluso si el pH del concreto adyacente se mantiene alto. Por otro lado, el dióxido de carbono y otros gases que penetran el concreto en solución acuosa reaccionan con el agua de poro altamente alcalina y pueden disminuir el pH del concreto por debajo del valor al cual el acero se mantiene pasivo. Este proceso, conocido como carbonatación, se refiere específicamente a la neutralización de la solución saturada de hidróxido de calcio en el poro, la cual reacciona con el dióxido de carbono disuelto en el agua (ácido carbónico).

Se puede estar casi seguro de que la manera más efectiva y costeable de minimizar el riesgo de corrosión en concreto reforzado es asegurarse de que el recubrimiento del refuerzo tiene el espesor adecuado y que el concreto es denso y poco permeable. La función primaria del concreto que cubre al acero de refuerzo es protegerlo y solo puede hacerlo si la estructura y la mezcla han sido adecuadamente diseñadas con los materiales adecuados para soportar las condiciones a las que estarán expuestos: si el refuerzo ha sido ubicado de manera precisa, si el recubrimiento ha sido alcanzado; si la mezcla ha sido bien colocada, compactada y curada.

2.1.5.1 Medidas adicionales para protección ante la corrosión

- Uso de recubrimientos tipo membrana aplicados en la superficie del concreto
- Pintado del concreto
- Impregnación del concreto con materiales que reduzcan su permeabilidad
- Adición de inhibidores de corrosión al concreto
- Uso de materiales resistentes a la corrosión que reemplacen a los aceros de refuerzo comunes

- Protección catódica del refuerzo
- Aplicación de recubrimientos al refuerzo mismo

2.1.5.2 Corrosión de la armadura de acero en el concreto

La corrosión de la armadura en el concreto consiste en la oxidación destructiva del acero, por el medio que lo rodea. Así la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste de cuatro elementos principales a) un cátodo b) un ánodo c) un electrolito d) un conductor metálico, en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el fluido de iones en un medio acuoso.

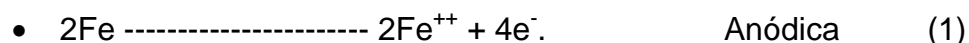
La corrosión electroquímica del acero en el concreto resulta de la falta de uniformidad en este (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la superficie del acero), contactos con metales menos activos, así como también de las heterogeneidades en el medio químico o físico (concreto) que rodea el acero. Ahora bien, aunque la potencialidad para la corrosión electroquímica puede existir debido a la falta de uniformidad del acero en concreto, la corrosión normalmente se previene por la formación de esa película de óxido de hierro "pasivante". Pero, cuando las condiciones de servicio cambian y el concreto se altera o a través de él penetran sustancias agresivas, se produce el rompimiento de esta película y la corrosión de las armaduras se desencadena con una triple consecuencia:

- ✓ El acero disminuye su sección o incluso se conviene completamente en óxido.
- ✓ El concreto puede agrietarse o delaminarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo al formarse.
- ✓ La adherencia armadura-concreto disminuye o desaparece.

Para que la corrosión de acero pueda iniciarse y mantenerse, existen dos mecanismos que en general son los más aceptados:

- Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbón u otro material ácido.
- Por la acción electroquímica que involucra al Ion cloruro en presencia de oxígeno.

Así, el acero se corroe por la reacción anódica que permite que se disuelva como ión ferroso. Debe haber una reacción catódica simultánea, como la reducción de oxígeno; todo esto en presencia de agua.





Es importante resaltar que sin la presencia simultánea en el concreto de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión y, sin una cantidad mínima crítica, no es posible que se desarrolle con una velocidad apreciable. Ambos factores tienen un carácter ambivalente, pues cuando las armaduras están pasivadas, una cierta cantidad de oxígeno y humedad pueden servir para engrosar la capa pasivante. Pero cuando las armaduras se corroen activamente, actúan acelerando notablemente el ataque. En su ausencia, sin embargo, lo detienen completamente ^[13].

2.1.5.3 Condiciones para que exista la corrosión

Para que haya corrosión:

- ✓ *pH < 8.0 oxígeno y agua*
- ✓ *pH > 8.0 oxígeno, agua y cloruros*

Para que no haya corrosión:

- ✓ *Mantener fuera del concreto armado el oxígeno, agua y cloruros.*
- ✓ *Colocar en el concreto armado iones hidroxilos, iones ferrosos, potencial negativo sobre el acero, inhibidores, etc.*

Así, los problemas de corrosión del acero están íntimamente asociados a la despasivación de este, por el proceso electroquímico resultante de las variaciones del medio químico sobre las distintas interfaces concreto – acero y las diferencias metalúrgicas y mecánicas del metal. Estas variaciones originan gradientes de potencial, con flujo de corrientes eléctricas que lo llevan a la formación de áreas anódicas y catódicas que constituyen las celdas de corrosión ^[13].

2.1.5.4 Investigaciones de concreto preesforzado

En comparación con investigaciones de concreto reforzado, existe muy poca investigación para concreto pretensado y postensado. Algunos investigadores han estudiado la corrosión de concreto pretensado, pero los ensayos no se realizaron considerando grietas o carga estructural; tal es caso de las investigaciones hechas por Houston, et al ^[7] que no consideran el efecto del ancho de grieta, como medidas especiales del sistema de preesfuerzo. Poston R. W. ^[8] diseñó un programa experimental para examinar postensado transversal como un método para mejorar la durabilidad de losas de rodamiento; la efectividad de la protección del preesfuerzo fue el uso de 20.32 cm de espesor de recubrimiento y las sometió a un ambiente de cloruros. Las condiciones de exposición fueron de un ciclo de mojado – secado cada catorce días. Las variables que midió fueron ocurrencia de corrosión, ancho de grieta, penetración de ion cloruro para muestras pretensadas

y el efecto del espesor de recubrimiento. Poston postula que el mecanismo adecuado para la durabilidad de losas de rodamiento mejor debe controlarse el ancho de grietas y el agrietamiento. Moore et al ^[9] desarrolló una serie de ensayos de corrosión sobre vigas pretensadas; el propósito fue evaluar el efecto de huecos entre acero y concreto, efecto de la cubierta de concreto, efecto de cargas vivas, efecto del dimensionamiento tensil de grietas en concreto y efecto de cargas accidentales.

Los resultados relacionados con grietas y corrosión reportados por Moore se pueden resumir como sigue:

1. Efecto de grietas: se aprecia mayor corrosión en grietas abiertas, corrosión por picadura fue determinada en grietas del orden de 0.1 mm.
2. Efecto de carga temporal: grietas en columnas causadas por sobrecargas breves tienden a cerrar después de meses de exposición. No se aprecia incremento de corrosión en los sitios de agrietamiento.
3. Efecto del nivel de carga: no existe correlación entre el nivel de carga y corrosión, con excepción de las muestras cargadas hasta agrietamiento.
4. Efecto de cubierta: la cubierta de concreto de 38.1 mm y mayores previenen la corrosión en las muestras sin grietas durante los 10 meses de exposición, se encontró corrosión en todos los especímenes con 19 mm o menor recubrimiento.

Perenchio et al ^[10] realizó ensayos para evaluar la eficacia de torones cubiertos de epoxi y el efecto de las grietas en la durabilidad de elementos pretensados. Los resultados muestran que la corriente de corrosión de la macrocelda fue de cero para los torones cubiertos de epoxi. Lecturas ocasionales diferentes de cero indicaban la formación de una macrocelda inversa, indicando que el torón cercano a la cara sometida a compresión se estaba corroyendo. Cuatro puntos pueden resaltarse de esta investigación.

1. Efecto de agrietamiento: reduce el tiempo de inicio de corrosión e incrementa la severidad de ésta. Significativamente la corrosión ocurre también en muestras sin agrietar.
2. Ancho de grieta crítico: dados los resultados no se puede concluir.
3. Cubierta de concreto: una cubierta de 25 mm no fue suficiente para prevenir corrosión en muestras sin agrietar y agrietadas.
4. Torón cubierto de epoxi: este no muestra signos de corrosión durante la exposición. Sin embargo los resultados muestran la importancia del uso de este recubrimiento.

Si no se considera el control de la corrosión durante la etapa del diseño, los costos subsecuentes de control de la corrosión son normalmente mucho mayores que si

estos se consideran en el proceso del diseño. Igualmente, al no considerar a la corrosión en las etapas del diseño, se podrían esperar altos costos de reemplazo de piezas o fallas catastróficas en algunos sistemas.

Es posible realizar un balance económico a través de la consideración de todos los aspectos del control de la corrosión; incluyendo selección de materiales, compatibilidad de materiales, geometría, mecánica, superficie, protección, mantenimiento y otros aspectos.

Costos directos:

- Materiales de construcción inicial.
- Materiales requeridos para la operaron y mantenimiento.
- Costos de mano de obra directa, asociada con la construcción, operación y mantenimiento.
- Costo de medición en el control de la corrosión, recubrimientos, protección catódica, etc.
- Mano de obra de la inspección y materiales relacionados.
- Pruebas y evaluación de alternativas.
- Pérdidas de eficiencia.

3 Metodología Experimental

A continuación se describen las actividades desarrolladas durante este trabajo de investigación.

- Gestión de materiales: torones de acero de alta resistencia con alma de 7 alambres según norma de referencia de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes N°CMT*2*03*002/04 [2]; o alambre pretensado
- Gestión de reactivos y materiales para realizar ensayos electroquímicos y de corrosión
- Caracterización Mecánica de los torones:
 - ✓ Ensayo de tensión según ASTM A370-07a [11].
 - ✓ Aplicación de la técnica DCVG
- Se fabricaron 3 pares de bloques de concreto, con las siguientes dimensiones 60 cm de largo*10 cm de alto*10 cm de ancho. La fabricación de los bloques de concreto se hizo con cemento tipo II, con una relación agua/cemento de 0.5.
- Para representar el ducto de polietileno de alta densidad se utilizó una manguera de plástico de 1.27 cm de diámetro y 60 cm de longitud, con un espesor de pared de 3 mm.
- El acero utilizado fue pretensado con un diámetro de 4 mm y 65 cm de longitud.
- El mortero de relleno fue de arena fina, cemento en proporción de 1:1, y el agua necesaria para darle fluidez a la mezcla.

Posterior a los ensayos de corrosión:

- Inspección visual y caracterización química de los productos de corrosión.

4 Desarrollo del estudio

4.1 Procedimiento y descripción de las actividades realizadas

4.1.1 Prueba de dureza

De acuerdo con la norma ASTM E18 ^[12] la prueba de dureza para aceros de alta resistencia es la prueba Rockwell C (HRC); que utiliza una carga de 150 kilogramos (kg) y un cono de diamante como indentador. A la muestra se le realizó un desbaste con una lija 220 para obtener una superficie plana, ya que de lo contrario el indentador puede astillarse o dar una medición errónea de la dureza. Como se muestra en la figura 4.1, se hicieron tres mediciones a lo largo de la superficie de la muestra y se obtuvo el promedio de estas tres mediciones para obtener la dureza del acero.



Figura 4.1 Muestras de acero de alta resistencia para prueba de dureza

Cada alambre mide aproximadamente 1/8" de diámetro. Se cortaron pedazos del torón (7 alambres) de aproximadamente 1 in de longitud para enseguida realizar la prueba de dureza, en un durómetro modelo HOYTOM; con un porta muestras que se observa en la figura 4.2.



Figura 4.2 Durómetro

Enseguida se midió la dureza de la sección transversal del alambre.



Figura 4.3 Sección transversal del alambre

La resistencia a la penetración se realizó imprimiendo el indentador de diamante en forma de cono en la muestra que está en reposo sobre una plataforma rígida en V, bajo una carga estática de 150 kgf que se aplica directamente. La dureza se expresa por un número inversamente proporcional a la profundidad de la indentación para una carga y el indentador seleccionado.

La localización de impresiones deben estar al menos a 2 ½ diámetros de distancia de separación del borde de la muestra.

El espesor de la muestra debe ser lo suficientemente gruesa de modo que no aparezca alguna protuberancia sobre la superficie opuesta a la de la impresión. El espesor de la muestra recomendado es por lo menos diez veces la profundidad de la impresión. Todos los cables tienen un diámetro uniforme, sin defectos perjudiciales.

4.2 Prueba metalográfica ^[13]

4.2.1 Corte de la muestra

Primero se corta la muestra del acero de alta resistencia en la cortadora de disco sumergible marca Jean Wirtz modelo Cuto-35, algunas muestras las cortamos con segueta, para que al momento del corte la muestra de acero no se caliente demasiado y evitar cambios microestructurales.



Figura 4.4 Cortadora de disco sumergible

4.2.2 Montaje de la muestra

Las muestras fueron montadas para facilitar su pulido final, se montaron en una resina termoajustable; el material que se empleó para montar las muestras fue la baquelita, aunque también se utilizó acrílico, los polvos para moldear baquelita son fabricados en distintos colores, lo cual simplifica la identificación de las muestra montadas; el acrílico es transparente.

La muestra y una cantidad correcta de polvo de baquelita o acrílico son colocadas en el cilindro de la montadora hidráulica figura 4.4, después se ajusta la temperatura para fundir la baquelita a 180°C y para el acrílico es de 220°C aproximadamente, se aplica una presión de moldeo de 1000 lb/in² simultáneamente; el tiempo que se lleva la muestras dentro de la montadora hidráulica es de aproximadamente 20 minutos.

Después de que pasar el tiempo suficiente, la muestra se saca de la montadora hidráulica y se procede a desbastar hasta que se le borren todas las rayas que fueran hechas al momento de cortar.



Figura 4.4 Montadora Hidráulica

4.2.3 Desbaste de la muestra

Este desbaste fue con diferentes tamaños de lijas, comenzando por la más gruesa hasta la más finas; las lijas se colocaron en lijadora húmeda de disco, Jean Wirtz Modelo Dúo Fig. 4.5; este proceso se llevó acabo siempre mojando las lijas, los tamaños de las lijas fueron de 100, 150, 180, 220, 240, 320, 500, 600, 800, 1000, 2400, 4000 las lijas son de partículas de WC (carburo de tungsteno).



Figura 4.5 Lijadora húmeda de disco doble

Se comienza el desbaste y el cambio de lija fue hecho cuando las rayas, en la muestra, son menos profundas y visibles, también cuando estas se muestran en un solo sentido.

4.2.4 Pulido

Después de lijar la muestra, se pulió sobre una pulidora de mesa de disco doble: Jean Wirtz Modelo: TG-250/2 figura 4.6 sobre el paño cubierto con partículas abrasivas (pasta de diamante de 3 y 1 micra y con alúmina de 0.5, 0.3 y 0.05 micras); esto es para efectuar el pulido final. A la pasta de diamante se le agrega un lubricante y a la alúmina se la agrega agua destilada para obtener el mejor resultado posible.



Figura 4.6 Pulidora de mesa de disco doble

El pulido final de las muestras siempre debe hacerse con agua destilada, para eliminar todos los residuos de las partículas abrasivas ^[24].

Una vez que la superficie queda como espejo, se lava la muestra con agua destilada y/o con alcohol y se seca con aire (secadora). Después se procede a atacar la muestra con el reactivo químico adecuado; el ataque se hace para que las partes de la microestructura del acero queden claramente diferenciadas ^[25]. La selección del reactivo de ataque está determinada por el material y la estructura específica que se desea ver.

4.2.5 Observación de la Microestructura

Después del ataque químico, la muestra se colocó en el Microscopio metalográfico Marca: Olympus de platina invertida figura 4.7 y se utiliza un analizador de imágenes que utiliza el software Imagen Pro, para observar la microestructura del acero o las capas del galvanizado.



Figura 4.7 Microscopio metalográfico

4.2.6 Reactivos de ataque

Para revelar la estructura del acero

El propósito de este ataque es hacer visible las características microestructurales del acero, el proceso se lleva a cabo con tal cuidado que las partes de la microestructura deben quedar claramente diferenciadas ^[23].

Reactivo 3. Solución a) Metabisulfito de Sodio

Agua Destilada

Solución b) Acido pícrico

Etanol ^[14]

Preparación de la solución de ataque: Se pesa 1 gr. de metabisulfito de sodio y se colocan en 100 ml de agua, después se colocan 4 ml de ácido pícrico en 100 ml de etanol; una vez preparadas estas dos soluciones por separado, se mezclan en otro recipiente limpio y seco (para evitar la contaminación de la solución) estos se mezclan en proporciones iguales, el tiempo de ataque de la muestra de acero es de 5 a 10 seg.

Para las estructuras de aceros al carbono y para dar un contraste diferente entre distintas estructuras; en estructuras de dos o más fases los componentes se revelan durante la acción química, al atacar preferencialmente el reactivo a uno o más de estos constituyentes, debido a la diferencia de composición química de las fases.

Reactivos 4: Ácido nítrico

Etanol ^[12]

Preparación del reactivo: Primero se miden 3 ml de ácido nítrico, con una pipeta; después, se midieron 97 ml de etanol, se mezclaron en un recipiente de vidrio. El tiempo de ataque de la muestra varía desde 5 hasta 30 segundos.

4.3 Aplicación de la técnica de DCVG ^[15].

La técnica DCVG empleada en sistemas de protección catódica del tipo de corriente impresa permite detectar zonas en donde el proceso de corrosión está activo o que tienen un comportamiento anódico. El electrodo conectado a la terminal negativa del multímetro se coloca cerca de la estructura y el electrodo conectado a la terminal positiva se ubica de 1 a 30 metros de esta, en sentido perpendicular al eje. El signo de las lecturas proporcionadas por el voltímetro permite conocer si la zona es anódica o catódica. Cuando la lectura es **negativa, se localiza una zona anódica; y cuando es positiva, se localiza una zona catódica.**

La técnica de gradiente de potencial permite detectar zonas de la línea de tubería que tienen comportamiento anódico y catódico, aun con protección catódica aplicada y que cumpla con los criterios de protección estandarizados. **La técnica de gradientes de potencial de corriente directa “DCVG” es más sensible para detectar el proceso de corrosión de líneas subterráneas que la técnica de inspección de potenciales;** desafortunadamente en la actualidad existe resistencia para aceptar que existan zonas con comportamiento anódico en líneas de tubería en las cuales se tienen perfiles de potenciales que indican que estos cumplen con alguno de los criterios estándar establecidos para la técnica de medición de potenciales.

Si durante la inspección con la técnica DCVG se obtienen lecturas negativas, esto indica que existen celdas de corrosión. La magnitud de las lecturas es proporcional al tamaño de las zonas anódicas o a la intensidad del proceso de corrosión. La técnica DCVG no es una técnica de calibración, sino una técnica predictiva que informa que el proceso de corrosión está ocurriendo y por lo tanto debemos aplicar el mantenimiento preventivo para disminuir su efecto.

Para la aplicación de esta técnica se llevó a cabo la fabricación de 3 tres muestras de concreto en forma de “sándwich”, con la finalidad de colocar entre ellas un ducto de plástico que contiene una pieza de acero pretensado en su interior y relleno de mortero (arena con cemento).

Durante la fabricación de los ductos de plástico, se realizaron tres perforaciones; dos de ellas a 10 cm de los extremos y uno más al centro de la longitud total, esta perforación tuvo la finalidad de permitir que llenara completamente el ducto de mortero y además se utilizó como un daño causado por corrosión, simulando que el ducto de plástico ya había fallado debido a este fenómeno de corrosión.

En la figura siguiente se aprecian las muestras y el dispositivo utilizado para hacer la detección del daño con la técnica DCVG.



Figura 4.8a Muestra los bloques de concreto, el sistema de protección catódica y el equipo de DCVG

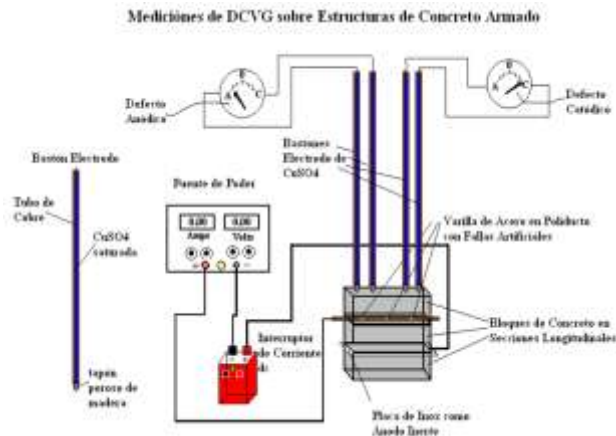


Figura 4.8b Muestra el esquema de la colocación de los bloques de concreto así como de los electrodos y los contraelectrodos para detectar defectos en el ducto de plástico con el equipo de DCVG

En la figura 4.9 Se aprecia el bloque en forma de “Sándwich”, donde se coloca el ducto de plástico con acero y para garantizar continuidad en el medio se colocaron pedazos de tela húmedos, para así realizar un buen sistema de protección catódica; donde el ducto con acero hizo la función de cátodo y la placa de acero hizo la función de contraelectrodo, con una fuente de corriente se hizo circular la corriente y entre el polo negativo de la fuente de corriente y el ducto con acero se conectó un interruptor de corriente que cada minuto suspendía la corriente de protección catódica que requiere el equipo DCVG y de esta manera se podía localizar la distancia a la cual el elemento de concreto presentaba daño.



Figura 4.9 Muestra los bloques de concreto y posición de electrodos en uno de los extremos para identificar daño por corrosión

En la figura 4.10, se aprecia que el equipo DCVG tiene una caratula analógica; la cual cuando encuentra un defecto, la aguja se desplaza hacia el lado negativo, como se describió anteriormente; cuando no encuentra daño, esta aguja se desplaza hacia el lado positivo.



Figura 4.10 Muestra la caratula analógica del equipo que indica la zona anódica y catódica

La figura 4.8, 4.11 y 4.12 muestran los diferentes sitios donde fueron colocados los electrodos para detectar los daños hechos expreso para este ensayo; como se mencionó anteriormente, se hicieron defectos en los extremos del ducto (aproximadamente a 10 cm de ambos extremos), y al centro de la muestra de ensayo como se aprecia en la figura 4.12.



Figura 4.11 Muestra la posición de los electrodos en el extremo para detectar el posible daño causado por corrosión

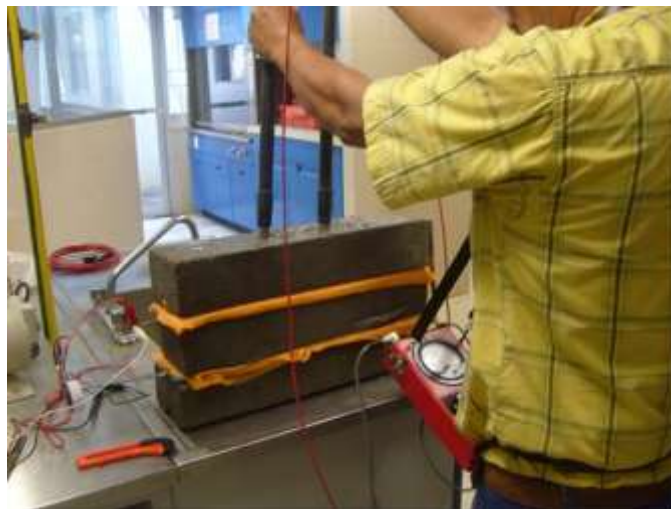


Figura 4.12. Muestra el sitio donde se colocan los electrodos del equipo DCVG para detectar el daño causado por corrosión

5 Resultados

5.1 Medidas de dureza

Tabla 5.1. Registro de prueba de dureza

Prueba de dureza según la norma ASTM E18-03	
Carga: 150 kgf	Indentador de Diamante
Sección transversal	HRC
1)	46,9
2)	48
3)	44,5
Promedio:	46,46
Sección longitudinal	HRC
a)	42,3
b)	37,8
c)	39,7
Promedio:	39,93

5.2 Microestructura del acero

El ataque realizado con el reactivo 4 por 5 segundos. Las dos microestructuras corresponden a alambres distintos.

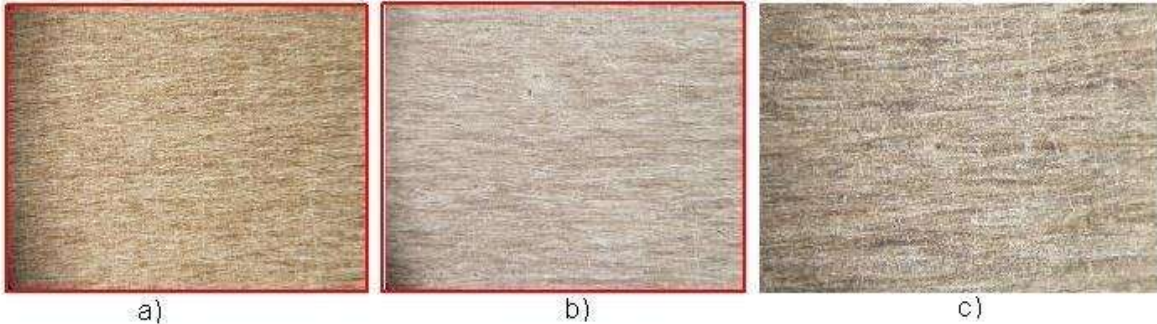


Figura 5.1 a) Microestructuras alambre sección longitudinal 20X, b) La misma a 50x, c) La misma a 100x

Sección transversal del alambre, atacada con el reactivo 3 por 13 y 16 segundos respectivamente



Figura 5.2 a) Atacado 13 seg. Sección transversal 100x, b) La misma atacada 16 seg. 100x.

El análisis metalográfico muestra una estructura característica de un acero perlítico, donde la perlita es fina; por lo que es muy difícil de apreciar con el microscopio óptico tal como se observa en la figura 5.2.

5.3 Resultados de la técnica DCVG

Debido a que la técnica de DCVG es una técnica cualitativa y que el equipo empleado solo indica si existen zonas anódicas o catódicas, no hay un resultado numérico sólo cualitativo que indica que este equipo fue capaz de detectar el daño generado a las distancias mencionadas anteriormente.

De acuerdo con las figuras 4.8, 4.9, 4.11 y 4.12, se puede apreciar la colocación de los electrodos de cobre/sulfato de cobre en las zonas donde se hicieron los defectos para determinar el daño por corrosión utilizando la técnica DCVG, dicha técnica está descrita en el punto 4.1.3.

La técnica de gradiente de voltaje en corriente directa (DCVG por sus siglas en inglés) requiere de la aplicación de una corriente que será interrumpida en intervalos de 40 segundos en “off” y 80 segundos en “on”; suponiendo que el ducto de polietileno de alta densidad (HDPE) de un elemento de concreto postensado tenga algún daño causado por corrosión del acero de preesfuerzo. Este defecto o daño generara un defecto en el ducto de polietileno el cual entrara en contacto con el concreto que se encuentra en las inmediaciones del ducto de plástico y existirá continuidad iónica entre el mortero del ducto de plástico y el concreto del elemento postensado.

Por lo anterior, y tomando en cuenta la teoría de la electroquímica ^[16], el metal formara un campo eléctrico que será detectado por el equipo de la técnica DCVG, y la intensidad del defecto se verá incrementada debido a la corriente aplicada lo que facilita la detección del defecto.

La localización del defecto se hizo desplazando los electrodos sobre la superficie del elemento de concreto como se aprecia en figura 4.8, 4.9, 4.11 y 4.12; la ubicación del defecto se hizo como lo muestra la figura 5.3

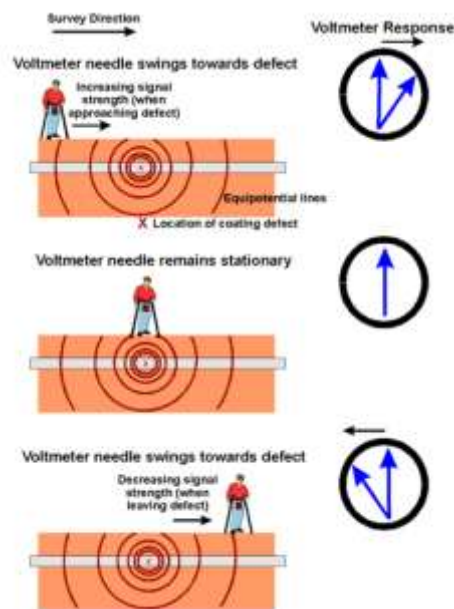


Figura 5.3 Muestra la forma de localizar un defecto

Si la aguja del multímetro se desplaza hacia el lado derecho, implica que el defecto se encuentra delante de la posición de los electrodos; si la aguja se

desplaza hacia la izquierda, significa que el defecto se encuentra atrás de la posición de los electrodos; y si la aguja deja de moverse, indica que se ha localizado el defecto.

6 Conclusiones y recomendaciones

La técnica DCVG aplicada en este trabajo para identificar daños por corrosión en elementos de concreto postensado resulta precisa y adecuada, porque los daños que se habían hecho con premeditación se encontraron a la distancia indicada previamente.

Se recomienda continuar el estudio con un elemento sujeto a tensión, para demostrar que aun cuando se aplica protección catódica al acero, la corriente es tan pequeña que no genera daño en el acero mismo, ni favorece la reacción de evolución de hidrogeno ya que no se alcanzan los valores de voltaje reportados en la literatura.

Se recomienda fabricar elementos de concreto de mayor longitud que permitan separar más los defectos y evitar interferencias -entre estos- de su campo eléctrico generado, así como fabricar diferentes sistemas de acero de preesfuerzo-manguera plástico – mortero para simular las condiciones reales de un elemento estructural postensado real. y validar la aplicación de la técnica DCVG, y el siguiente paso sería aplicar la técnica en un elemento postensado para determinar la factibilidad del uso de estas técnica.

Bibliografía

1. www.sct.gob.mx/conservacioncarreteras
2. State-of-the-Art Report About Durability of Post-Tensioned Bridge Substructures, J. S. West, C. J. Larosche, B. D. Koester, J. E. Breen, and M. E. Kreger; Center for Transportation Research Bureau of Engineering Research the University of Texas at Austin, october 1999
3. Larosche, C.J., "Test Method for Evaluating Corrosion Mechanisms in Standard Bridge Columns," Master of Science Thesis, The University of Texas at Austin, August 1999.
4. Narberg Khachaturian y German Gurfinkel. "Concreto Presforzado" Ed. Diana.1979
5. ASTM A416 - 10 / A416M - 10 Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven Wire for Prestressed Concrete
6. José Apraiz Barreido, "Tratamientos térmicos de los aceros", 10 edición, editorial Dossat, 2000.
7. Houston, J.T., Atimtay, E., and Ferguson, P.M., "Corrosion of Reinforcing Steel Embedded in Structural Concrete," Research Report 112-1F, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, March 1972
8. Poston, R.W., "Improving Durability of Bridge Decks by Transverse Prestressing," Doctor of Philosophy Dissertation, The University of Texas at Austin, December 1984
9. Moore, D.G., Klodt, D.T., and Hansen, J., "Protection of Steel in Prestressed Concrete Bridges," NCHRP Report 90, 1970, 86 p.
10. Perenchio, W.F., Fraczek, J., and Pfeifer, D.W., "Corrosion Protection of Prestressing Systems in Concrete Bridges," NCHRP Report 313, February 1989, 25 pp.)
11. ASTM A370 - 09 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
12. ASTM E18 - 08b Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials
13. Vander Voort. "Metallography Principles And Practice" Ed. Mc Graw Hill
14. Richard Henry Greaves "Metalografía Microscópica Práctica" Ed. McGraw Hill

15. *Pedro Serrano Baizabal, ficha técnica IMA-PC*
16. Modern Electrochemistry 2A: Fundamentals of Electrodeposition John O'M. Bockris , Amulya K.N. Reddy, Maria E. Gamboa-Aldeco

CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671



**INSTITUTO
MEXICANO DE
TRANSPORTE**



www.imt.mx
publicaciones@imt.mx