



*Certificación ISO 9001:2008 ‡*

---

# **EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE CABLES DE PREESFUERZO PARA APLICACIÓN ESTRUCTURAL EN EL SECTOR TRANSPORTE 2ª ETAPA**

Isaac Mejía Sánchez  
José Trinidad Pérez Quiroz  
José María Malo Tamayo  
Jorge Terán Guillén  
María Guadalupe Lomelí González  
Miguel Martínez Madrid

**Publicación Técnica No. 380  
Sanfandila, Qro. 2011**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Evaluación electroquímica de cables de preesfuerzo  
para aplicación estructural en el sector transporte  
2ª etapa**

**Publicación Técnica No. 380**  
**Sanfandila, Qro. 2011**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. José Trinidad Pérez Quiroz, Dr. Jorge Terán Guillén y la Ing. María Guadalupe Lomelí González.

Se agradece la colaboración del Ingeniero Isaac Mejía Sánchez del Instituto Tecnológico de Querétaro y del Dr. José María Malo Tamayo del Instituto de Investigaciones Eléctricas, así como los comentarios y sugerencias del Dr. Miguel Martínez Madrid y el Dr. Andrés Torres Acosta del Instituto Mexicano del Transporte.

# Índice

---

Resumen	iv
Abstract	vi
Resumen ejecutivo	viii
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Antecedentes	11
Capítulo 3. Desarrollo experimental	25
Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados	35
Capítulo 5. Conclusiones	43
Capítulo 6. Recomendaciones	41
Bibliografía	43
Anexo 1	47

---

# Resumen

---

El deterioro por corrosión de cables postensados embebidos en concreto no necesariamente muestra daños en la superficie de la estructura. Debido a que este daño no es visible. Se ha requerido de métodos no destructivos para determinar la integridad de cables postensados. Durante décadas se han buscado técnicas de ensayos no invasivos para la evaluación de estos elementos. Trabajos previos de investigación en este campo, incluyendo programas de la "National Cooperative Highway Research Program" (NCHRP), el cual identifica métodos que aunque prometedores, aún no han dado lugar a la aplicación generalizada de una técnica práctica y segura. En este trabajo se evalúa la aplicación de la técnica gradiente de voltaje en corriente directa (DCVG) para la inspección de elementos de concreto postensado como una contribución a la detección de daños en cables causados por corrosión.

Los resultados muestran que es factible la aplicación de la técnica para detectar defectos en el revestimiento aislante en un arreglo tipo elemento de concreto postensado con la técnica de gradiente de voltaje en corriente directa. En las condiciones de ensayo, la intensidad del gradiente de voltaje se localiza directamente por encima del defecto real.





# Abstract

---

The corrosion deterioration of post-tensioned wires embedded in concrete does not necessarily show damage over the structure surface. Since this damage is not visible, non-destructive methods are required to assess the integrity of the embedded post-tensioned wires. For decades, noninvasive test have been sought for the evaluation of these elements. Previous research in this field, including NCHRP programs, identify methods that although promising, have not yet led to widespread implementation of a practical and safe technique. This paper evaluates the application of direct current voltage gradient technique (DCVG) for the inspection of pre-stressed concrete elements as a contribution to detection of cable damage caused by corrosion.

The results show that it is feasible to apply the technique to detect defects in the insulation of an array type pre-stressed concrete element with the direct current voltage gradient technique. In the test conditions, the intensity of the voltage gradient is located directly above the actual defect.

## **Resumen ejecutivo**

---

Esta investigación continua con el estudio de la aplicación de la técnica de Gradiente de Voltaje en Corriente Directa (DCVG, por sus siglas en inglés) expuesto en la publicación 348, para determinar el daño por 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. El capítulo 2 incluye e indica el objetivo y alcance de éste, así como 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 en elementos que simulan un elemento de concreto postensado con mayores dimensiones. El capítulo 4 muestra el desarrollo del estudio. El capítulo 5 muestra los resultados experimentales y la característica principal de la técnica al detectar el daño por corrosión, que consiste en el incremento de la intensidad de corriente en el defecto debido a la aplicación de la corriente aplicada de manera externa.



# 1 Introducción

---

La corrosión es el proceso de deterioro de un material debido a las reacciones con el entorno. Tal como lo define la *Random House Unabridged Dictionary*: "La corrosión es el acto o proceso de desgaste gradual de algún tipo de material, sobre todo por una reacción química." Los materiales que están sujetos a la corrosión y/o degradación son los metales, cerámicas, polímeros e incluso los propios dientes.

Sin embargo, la corrosión se refiere a la oxidación de los metales por medios químicos y/o procesos electroquímicos. El ejemplo más común de la corrosión del metal se refiere a su reacción con el oxígeno y el agua.

La oxidación del acero debido a la exposición al aire húmedo o agua es un ejemplo bien conocido de la corrosión electroquímica. En este proceso, el metal reacciona con el agua y el oxígeno formando óxidos de hierro (reacción química), con el tiempo causando daño al acero.

Hace ya un siglo que el concreto armado <sup>[1]</sup> empezó a destacar como material de construcción y desde entonces su empleo ha sido masivo. Sus características mecánicas y de durabilidad junto a su costo relativamente bajo lo han puesto a la cabeza de los materiales de construcción. A partir del empleo del hormigón armado, los nuevos códigos <sup>[2]</sup> incluyen pautas para proyectar estructuras que alcancen la vida útil acordada en función del tipo de estructura y de las condiciones de agresividad ambiental. Sin embargo, la estrategia de durabilidad ante determinados ambientes agresivos, como el marino, o ambientes con elevada contaminación por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), puede llevar a fallas prematuras de las estructuras de acero debidas a corrosión, en particular en aquellos casos que por diseño no sea posible garantizar una protección suficiente a partir del recubrimiento de concreto.

En estos casos resulta de gran interés plantearse el empleo de métodos de protección adicionales que llevarán asociado un aumento de la vida útil de las estructuras, de modo que puedan contribuir a disminuir las importantes pérdidas económicas que el fenómeno de la corrosión de armaduras provoca anualmente.

Hasta ahora los códigos contemplan la posibilidad de aplicar medidas adicionales basadas en mejorar la funcionalidad del recubrimiento y únicamente definen de forma somera otras medidas de protección alternativas, aunque no definen ni las características esperables de cada medida ni las condiciones de aplicación.

Al momento de plantear la aplicación de un método de protección adicional, será necesario conocer cada problemática particular, de modo que pueda proponerse la aplicación de la metodología más adecuada. Todos los métodos de protección estarán enfocados al aumento de la vida útil de una estructura. Sin embargo, el momento de actuación de cada método de protección particular así como el tipo de riesgo al que esté expuesta una estructura, definirá las condiciones óptimas de aplicación. Por ello en la actualidad existe un gran interés en la investigación del comportamiento de las armaduras de acero en concreto.

El concreto es un material complejo formado por fases sólidas entre las que quedan poros que contienen una fase líquida muy alcalina. De este modo, el revestimiento de hormigón protege de forma natural a las armaduras, no sólo al actuar como una barrera física que dificulta la penetración del agente agresivo, sino además favoreciendo por su composición alcalina la formación de una película de óxidos estable que evita la disolución de la armadura durante largos periodos de tiempo y por tanto su corrosión. De este modo, la vida útil de una estructura estará controlada por diferentes parámetros como la dificultad del agente agresivo para penetrar a través de los poros, la resistencia frente a la corrosión de la película pasiva o las condiciones de exposición ambiental a las que se encuentre expuesta la estructura. Así pues, proponer el empleo de un método de protección u otro dependerá del tipo de actuación asociado a cada método, pudiéndose distinguir entre:

- Métodos que actúan sobre el concreto, dificultando la penetración de los agentes agresivos, como la aplicación de revestimientos o pinturas sobre la superficie del concreto.
- Métodos que actúan sobre la armadura, incrementando la resistencia de la misma a la corrosión. Entre estos métodos se puede destacar el empleo de otro tipo de armaduras (galvanizadas, acero inoxidable, poliméricas), la aplicación de una protección catódica y; el empleo de inhibidores de corrosión.

La evaluación del transporte de los elementos agresivos a través del concreto así como el estudio de la película pasiva sobre la superficie de la armadura, son de suma importancia no sólo para valorar la durabilidad de una estructura, sino además a la hora de plantear la aplicación de una protección adicional.

Son múltiples los estudios que se están llevando a cabo para evaluar la durabilidad del concreto en cuanto a su resistencia a la penetración de elementos agresivos como el ión cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) o el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico a partir de la definición de parámetros controlantes como la porosidad del concreto, los coeficientes de difusión del agresivo o el coeficiente de absorción capilar.

Sin embargo, son más escasos los estudios enfocados a la evaluación de la resistencia frente a la corrosión de la película pasiva. La formación de la capa de

óxidos estable, como consecuencia del contacto de la armadura con la naturaleza alcalina del concreto, es lo que se conoce como pasivación del acero.

La película pasiva generada sobre la superficie de la armadura protege a la misma de una corrosión activa, de modo que su resistencia frente a la corrosión ante la llegada de los agentes agresivos, dependerá directamente de las propiedades de esta película pasiva. De este modo, la pasivación se convierte en un fenómeno que debe ser considerado en los modelos integrales de predicción de vida útil de las estructuras de concreto armado. De hecho, el periodo de tiempo que transcurre desde que un agente agresivo alcanza el nivel de la armadura, hasta que se produce una disolución del acero a una velocidad apreciable (inicio de la corrosión), estará controlado por las propiedades de la película pasiva. Así pues, la concentración crítica del agente agresivo, la cual produce el inicio de la corrosión, será una función directa de las propiedades de la película pasiva.

Frecuentemente, se han promocionado las estructuras de concreto armado como construcciones con una vida en servicio ilimitada y con mínimas exigencias de mantenimiento<sup>[3]</sup>.

Sin embargo, en ciertas circunstancias especialmente desfavorables, esto deja de ser cierto, pues existen algunos factores de corrosión capaces de despasivar al acero embebido en el concreto<sup>[4]</sup>, dando lugar a velocidades de corrosión que pueden plantear serios daños en pocos años. En estas condiciones los deterioros conducen a la adopción de medidas preventivas, de reparaciones costosas o incluso a la demolición, dependiendo de la periodicidad en la cual se hayan realizado inspecciones a tiempo, a destiempo o excesivamente tarde. Cuando los daños afectan una parte importante de la estructura, el procedimiento convencional de reparación implica la eliminación del concreto carbonatado o contaminado con cloruros hasta detrás de las armaduras, la limpieza de éstas en todo su perímetro, el remplazamiento del concreto afectado y, frecuentemente, la aplicación de algún tipo de protección que evite nuevas reparaciones<sup>[5]</sup>.

## **Postensado**

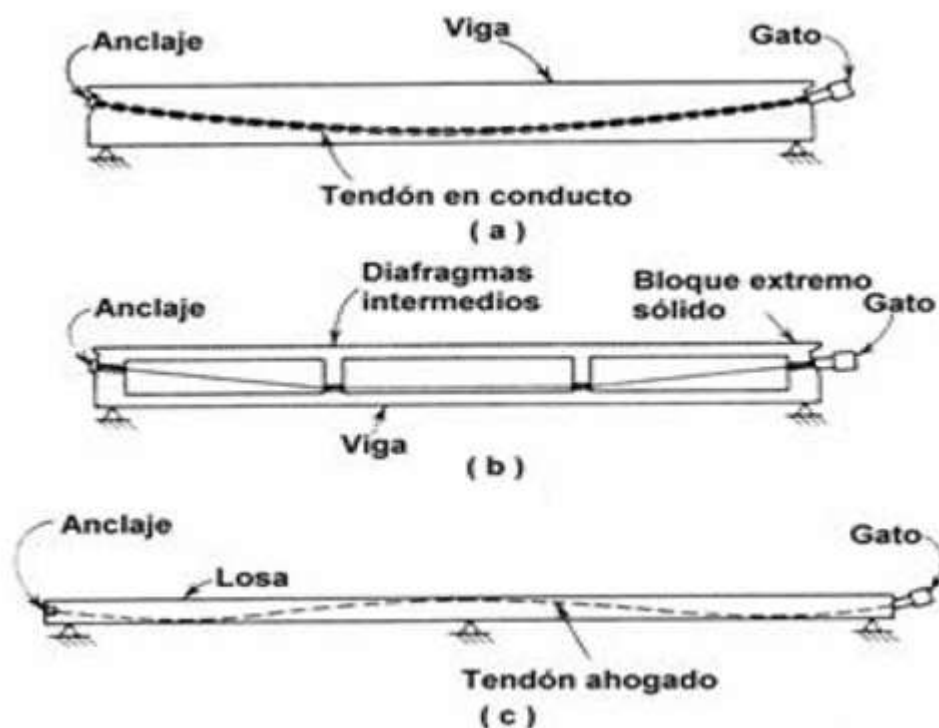
El postensado es el método de preesfuerzo que consiste en tensar los torones y anclarlos en los extremos de los elementos después de que el concreto ha fraguado y alcanzado su resistencia necesaria. Previamente al colado del concreto, se dejan ductos perfectamente fijos con la trayectoria deseada, lo que permite variar la excentricidad dentro del elemento a lo largo del mismo para lograr las flechas y esfuerzos deseados. Los ductos serán rellenados con mortero o lechada una vez que el acero de preesfuerzo haya sido tensado y anclado.

Las funciones primordiales del mortero son las de proteger al preesfuerzo de la corrosión y evitar movimientos relativos entre los torones durante cargas dinámicas. En el postensado la acción del preesfuerzo se ejerce externamente y

los tendones se anclan al concreto con dispositivos mecánicos especiales (anclajes), generalmente colocados en los extremos del tendón.

Este postensado puede emplearse tanto para elementos fabricados en planta, a pie de obra o colados en sitio. Las aplicaciones más usuales son para vigas de grandes dimensiones, dovelas para puentes, losas con preesfuerzo bidireccional, diafragmas de puentes, vigas hiperestáticas, cascarones y tanques de agua, entre otros.

Las trayectorias del preesfuerzo pueden ser curvas, lo que permite diseñar con mayor eficiencia elementos hiperestáticos y evitar esfuerzos en los extremos del elemento (Figura 1.1).



**Figura 1.1 Trayectorias típicas de torones en vigas postensadas**

Los principales componentes de la protección del torón de elementos postensados son el ducto y el mortero. El postensado ha sido ampliamente utilizado en las superestructuras de puentes, pero se ha limitado en la aplicación estructural de los mismos. Hay muchas situaciones posibles donde se puede utilizar el postensado, en las subestructuras de los puentes para proveer beneficios estructurales y económicos a largo y corto plazo. Algunos de los beneficios posibles del postensado aparecen en la Tabla 1.1.



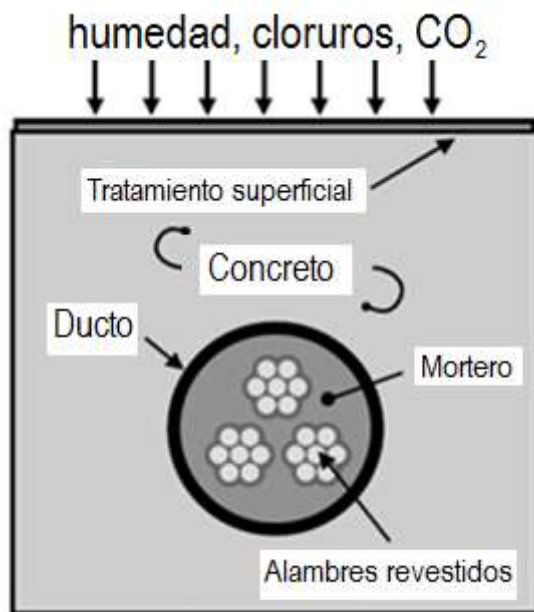
**Tabla 1.1 Posibles beneficios del postensado**

Beneficios	Comportamiento estructural	Construcción	Durabilidad
Control de desviaciones	✓		
Aumento de la rigidez	✓		
Mejorar el control de la grieta (mayor momento de fisuración, menor número de grietas, menores anchos de fisura)	✓		✓
Reducción de la cantidad del refuerzo	✓	✓	✓
Continuidad del refuerzo	✓		✓
Utilización eficiente del concreto y del acero de alta resistencia	✓		✓
La rápida y eficiente unión de elementos prefabricados	✓	✓	✓
Continuidad entre los componentes existentes y adicionales	✓	✓	✓

Aún cuando el pretensado o postensado se elige normalmente por motivos estructurales o de construcción, existen muchos factores que pueden mejorar la durabilidad. Por ejemplo, ofrece la reducción de ancho de fisuras y grietas, para mejorar la protección contra la corrosión proporcionada por el concreto. Reducir la cantidad del refuerzo y la continuidad del refuerzo, significa que es más fácil de colocar y compactar el concreto con menos oportunidad de generar huecos o espacios vacíos en el mismo.

El postensado se utiliza a menudo en combinación con la prefabricación, los concretos prefabricados ofrecen un mejor control de calidad del concreto y las condiciones de curado, lo cual conlleva a una protección contra la corrosión. El sistema postensado también ofrece la posibilidad de múltiples niveles de protección contra la corrosión de los torones pretensados, como se muestra en la Figura 1.2. Las medidas de protección incluyen tratamientos superficiales sobre el concreto, el concreto en sí, el conducto, lechada de cemento (mortero) y los alambres revestidos, tipo epoxi o galvanizados. El postensado también ofrece la

oportunidad de aislar eléctricamente el sistema de pretensado del resto de la estructura [6].



**Figura 1.2 Múltiples niveles de protección contra la corrosión para tendones postensados**

### **Mortero para elementos de concreto postensado**

El mortero (arena fina + agua + cemento) une los torones postensados al concreto circundante y proporciona protección contra la corrosión para el torón. La protección contra la corrosión actúa en forma de barrera física contra la humedad y penetración de iones cloruro en presencia de un medio alcalino para los torones.

Un mortero óptimo para el postensado combina nuevas propiedades con una buena protección contra la corrosión. Las propiedades de éste influyen según el mortero llene de manera adecuada el ducto.

La protección contra la corrosión dada por el mortero sería ineficiente si el ducto está parcialmente lleno, esta situación puede llevar al torón a condiciones severas que propicien la corrosión. La presencia de vacíos o un relleno discontinuo también podrían permitir la filtración de la humedad y los cloruros a lo largo de la longitud total del torón

Las estructuras deben permanecer resistentes y aptas para su uso durante la vida útil de diseño. Una forma de lograr esto es usando materiales postensados que con buen mantenimiento, no se degrade durante este tiempo [7]. La protección de torones postensados de fuentes corrosivas externas como el agua, oxígeno, iones cloruro e infiltración de productos químicos de deshielo es de primordial

importancia<sup>[7]</sup>. Aunque el objetivo es el postensado interno, los tendones externos también pueden protegerse, siguiendo estas recomendaciones. La causa principal de deterioro de los puentes postensados es el ataque por cloruros. El mecanismo de transporte para cloruros está influenciado por los efectos combinados del viento, agua y temperatura<sup>[7]</sup>. ¿Cómo es que el agua contaminada alcanza y ataca los torones?<sup>[6]</sup>. Los siguientes puntos son defectos donde el agua puede alcanzar los torones y causar corrosión.

- Falla de barreras externas
- Defectos por desgaste (ejemplo, grietas)
- Falta o falla de membrana impermeable, incluyendo bordes
- Tomas defectuosas de tanques y tuberías
- Mala colocación de drenaje losa rodamiento e impermeabilizante
- Falta de juntas de expansión
- Grietas y filtración en las juntas de construcción
- Insertos (por ejemplo para electricidad)
- Cubierta de concreto defectuosa
- Falla del sistema de protección de corrosión del torón
- Entradas y salidas de lechada total o parcialmente abiertas
- Fugas en ductos metálicos dañados mecánicamente o por corrosión
- Concreto y ducto agrietados
- Huecos de lechada en torones, puntos altos y bajos

La eliminación de vías de acceso de los agentes corrosivos, que pueden entrar en contacto con los torones evitará el ataque contra el acero de alta resistencia. El objetivo es proteger torones internos de elementos postensados y alcanzar una vida útil de 100 años.

Aunque la durabilidad de las estructuras de concreto pretensadas y postensadas del país se considera satisfactoria, la edad de una parte considerable de estas estructuras se aproxima a la de diseño común, una vida útil de 50 años. La técnica actual de evaluación de elementos de concreto se basa en la condición de inspección visual. Sin embargo, el deterioro en las trenzas del cable pretensado o tendones no siempre se refleja en daño visible en la superficie del concreto.

Por lo descrito anteriormente, en este trabajo se propone el uso de la técnica electroquímica gradiente de voltaje en corriente directa (DCVG), para detectar el deterioro de los torones dentro del ducto postensado.

## 2 Antecedentes

La corrosión es un proceso electroquímico en el cual el acero se ve afectado por un entorno particular, que resulta en una pérdida apreciable de metal. Los efectos perjudiciales de la corrosión se ilustran en la Figura 2.1.

La corrosión del acero de refuerzo implica que el hierro está siendo retirado del acero. Los iones ferrosos liberados forman compuestos complejos con iones hidroxilo y forman diversos productos de corrosión en función de la disponibilidad de oxígeno. Los productos de corrosión pueden ocupar hasta seis veces el volumen del acero <sup>[8]</sup>, que conduce a la ruptura y la alteración del concreto. La corrosión del acero de refuerzo en el concreto puede afectar significativamente la integridad estructural a través de la reducción de la capacidad de carga o la fractura de la armadura de acero, debido a la pérdida de enlace entre el acero y el concreto o a través del agrietamiento y desprendimiento del concreto.



Figura 2.1 Mecanismo de deterioro para corrosión del acero en concreto

## Protección de la corrosión para estructuras de concreto postensado

Muchos aspectos de la protección contra la corrosión para estructuras de concreto postensado son similares a la protección contra la corrosión de las estructuras convencionales de concreto armado. Los fundamentos de la protección contra la corrosión de estructuras de concreto armado son proporcionados por diversas fuentes. Algunos que describen el tema incluyen "Corrosion of Metals in Concrete" (ACI 222R-96), [9]. "Guide to Durable Concrete" (ACI 201.2R-92) [10]; y "Durable Concrete Structures – CEB Design Guide" [8]. El concreto postensado presenta variables extras en la protección de la corrosión, incluyendo aditamentos adicionales y la inyección de materiales en los ductos del tendón.

La corrosión de armaduras de acero o de acero pretensado en concreto es un fenómeno complejo donde influyen muchos factores. Por esta razón, lo mejor es acercarse a protección contra la corrosión, proporcionando medidas para protegerse de influencias, averías o limitaciones de cualquier medida de protección individual. Esta estrategia se refiere a menudo a proporcionar protección contra la corrosión en varios niveles. Protección contra la corrosión en el concreto postensado puede tomar muchas formas.

**Tabla 2.1 Métodos y mecanismos de protección contra la corrosión**

MECANISMO DE PROTECCIÓN	METODO DE PROTECCIÓN
Previene la penetración de iones cloruro al concreto	1) Reducción permeabilidad: -Baja relación a/c -Uso de ceniza volante, humo de sílice, escoria -Elimina huecos (compactación, detallando refuerzo) -Curado con humedad o vapor -Reduciendo / Controlando agrietamiento 2) Membranas impermeables 3) Impregnar superficie con polímero 4) Forma estructural 5) Detalle estructural (drenaje, anclaje) 6) Limitando ancho de grieta
Previene que los cloruros alcancen el acero aún cuando estos han penetrado	1) Incremento del recubrimiento 2) Refuerzo y torones cubiertos (epoxi, cobre, níquel) 3) Sistemas de postensado encapsulado 4) Ductos de plástico para postensado 5) Lechada base cemento (unión en postensado) 6) Grasas y ceras (postensado no unido)
Controla las reacciones de corrosión	1) Refuerzo o torones galvanizados 2) Inhibidores de corrosión 3) Aislamiento eléctrico 4) Protección catódica
Remueve sustancias reactivas del acero	1) Refuerzo de FRP y cables 2) Refuerzo y torones de acero inoxidable

Con el fin de proporcionar información sobre los puntos de entrada de los agresivos y tipo de exposición, el Boletín 33 del FIB, EN 206-1 y EHE-08 definen

la clasificación de los ambientes principales a los que las estructuras de concreto están expuestas y corrosividad de estos entornos.

Para estructuras postensadas se consideran seis clases de agresividad:

1. Sin riesgo de corrosión o ataque: X0
2. Corrosión inducida por carbonatación: XC
3. Corrosión inducida por cloruros de una fuente diferente al agua de mar: XD
4. Corrosión inducida por cloruros provenientes del agua de mar: XS
5. Congelamiento/deshielo con y sin agentes de deshielo: XF
6. Ataque químico: XA

La costa es uno de los ambientes más severos para las estructuras de concreto. El riesgo de daño es mayor para los componentes estructurales situados directamente en el agua de mar, como en el caso de puentes. El agua de mar contiene sales disueltas que afectan la durabilidad del concreto, en orden de importancia son el sodio, magnesio y cloruros de potasio y magnesio, calcio y sulfato de potasio.<sup>[8]</sup>

Estas sales constituyen la fuente de cloruros y sulfatos, que pueden inducir la corrosión del refuerzo y el ataque de sulfatos en el concreto. En menor medida, estas sales también proporcionan una fuente de álcalis que puede conducir a reacciones expansivas álcali-agregado, si los agregados reactivos están presentes. Hay cuatro principales sitios de exposición para una estructura en una estructura en zona marina. Cada zona y las formas asociadas de ataque se describen a continuación y se muestra en la Figura 2.2.

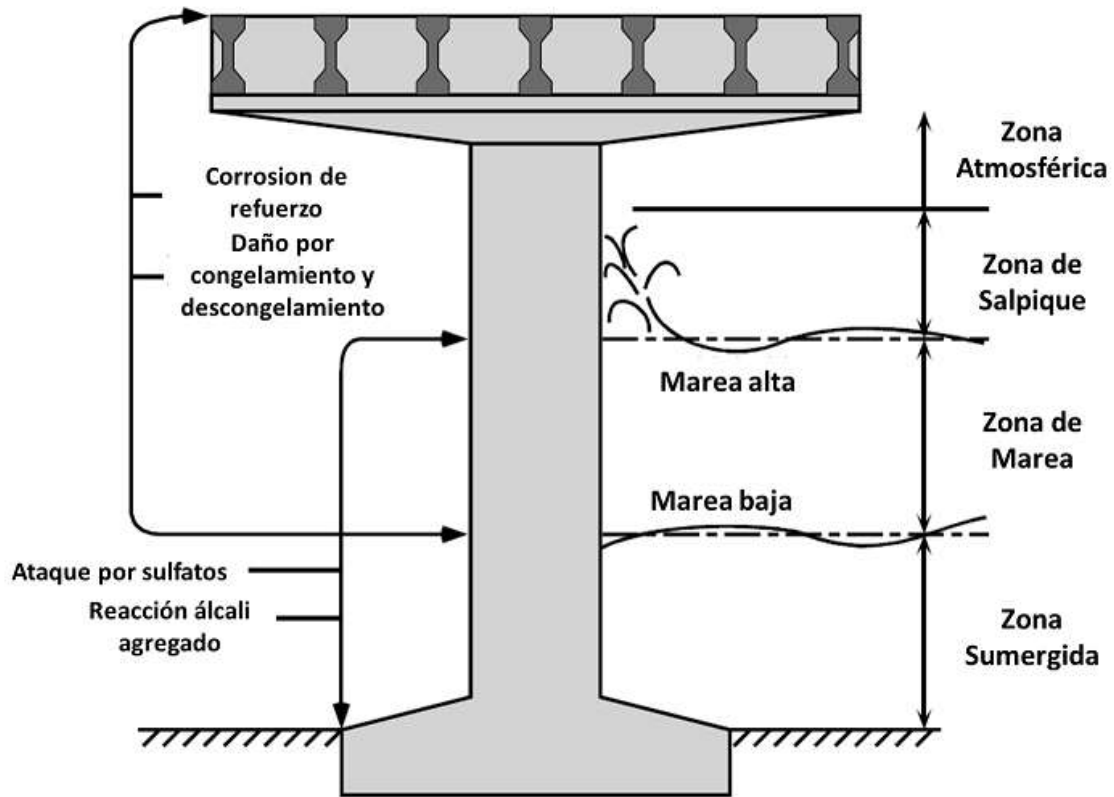


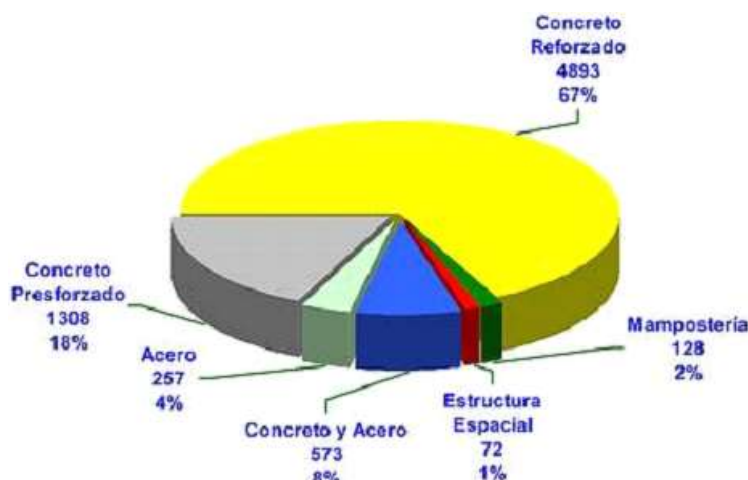
Figura 2.2 Zonas de exposición de la subestructura y formas de deterioro en zona marina <sup>[11]</sup>

## 2.1 Información general de infraestructura de concreto en México

La Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) tiene a su cargo la atención de los 7,351 puentes de la red federal de carreteras libres de peaje. Se requiere programar su atención oportunamente, en función de los recursos disponibles, y 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 (ver Figura 2.3), su estado físico y los datos de tránsito de los vehículos que soportan.





**Figura 2.3 Distribución de puentes por tipo de material** [12]

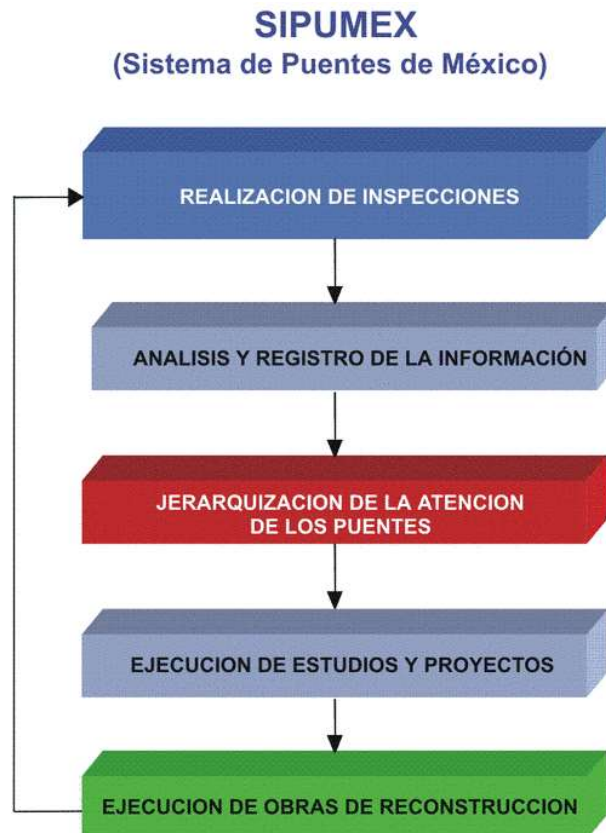
Personal de los Centros SCT realiza las inspecciones visuales de los puentes que lo ameriten según una previa programación y se actualiza la base de datos central localizada en la DGCC. Tal actualización, que en promedio se realiza cada dos años para cada uno de los puentes, permite detectar deterioros 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 meteorológicas 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) como se muestra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Calificación del estado físico de los puentes** [12]

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 plazo de 3 a 5 años
4	Daño grave, reparación necesaria en un plazo de 1 a 2 años
5	Daño extremo o riesgo de falla total. Se requiere reparación inmediata o el año 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, en el que se 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 (Figura 2.4) de puentes del año siguiente.



**Figura 2.4. Programa de obras de reconstrucción** <sup>[12]</sup>

En general, el registro de desempeño histórico de 100,000 estructuras pretensadas de puentes de concreto en Estados Unidos de Norteamérica (EUA) se considera satisfactoria. No obstante, el efecto de deterioro del acero pretensado y su ruptura tiene graves consecuencias en términos de la resistencia y confiabilidad proyectada de un puente de concreto. Además, el deterioro de los cables pretensados embebidos en concreto no necesariamente refleja daño en la superficie de la estructura, y los componentes de concreto pretensado de la infraestructura han llegado hasta el punto donde la vida útil remanente y la evaluación de durabilidad deben realizarse con mayor frecuencia. Por lo tanto, la necesidad de medios no destructivos para determinar la integridad de los torones pretensados, ha sido necesaria.

Se han buscado durante décadas, técnicas de ensayos no invasivos de la integridad de cables pretensados. Trabajos previos de investigación en este

campo, incluyendo programas de “*National Cooperative Highway Research Program*” (NCHRP), aunque la identificación de métodos prometedores, no ha dado lugar a la aplicación generalizada de una técnica práctica y segura.

La administración federal de carreteras (Federal Highway Administration) en inspecciones realizadas en 1987 y 1992, determinó 20 de las principales estructuras de concreto pretensado en servicio, representantes de la infraestructura vial y destacó la necesidad de un mejor diseño para un mejor servicio. Estas inspecciones de elementos de concreto pretensado y postensado de diferentes configuraciones y exposición ambiental, no encontraron signos graves de corrosión de los torones pretensados u otro tipo de degradación sistémica.<sup>[13]</sup>

La durabilidad es la capacidad de una estructura para soportar diversas formas de ataque durante su vida de servicio, incluyendo intemperismo, ataque químico, corrosión, abrasión o cualquier otra forma de deterioro. En estructuras de puentes de hormigón, las formas más comunes de ataque del medio ambiente son la corrosión de la armadura, el ataque de sulfatos en el concreto, daños por congelamiento y deshielo, reacciones álcali-agregado. Para que se produzca un proceso de deterioro, deben ocurrir interacciones entre los materiales de la estructura y el medio ambiente. Estas interacciones dependen de muchos factores, incluyendo las propiedades del material, la forma estructural, detalles de diseño, calidad en la construcción, curado del concreto, tipo y severidad del medio ambiente. El medio ambiente se refiere tanto al clima atmosférico como al que se encuentra alrededor de la estructura y condiciones locales alrededor de los diferentes elementos de la estructura.

Los requisitos de diseño para el estado límite de durabilidad son principalmente dictados por las condiciones ambientales. En general, la severidad del medio ambiente se ve afectada por la disponibilidad de humedad, la presencia de agentes agresivos en la humedad y temperatura. Hay tres ambientes generales donde la durabilidad de la subestructura puede ser una preocupación: la exposición costera, la exposición de congelación y suelos agresivos. Estas exposiciones se pueden presentar solas o en combinación.<sup>[11]</sup>

### **Detalles del sistema unión postensado**

Las formas comunes de construcción de estructuras postensadas es de múltiples alambres unidos con barras de pretensado. La protección contra la corrosión para los sistemas postensados consta de varios componentes, incluyendo los ductos, la lechada y el anclaje. Los revestimientos para el acero pretensado también proporcionan una capa adicional de protección contra la corrosión. Cables pretensados recubiertos de epoxi o galvanizados son dos opciones de sistemas de elementos postensados.

La forma más común de acero pretensado, utilizado en América del Norte consta de siete alambres de alta resistencia y una barra de acero de alta resistencia. La selección del alambre pretensado o barra para una aplicación en particular depende principalmente de los requisitos estructurales y consideraciones de construcción, más que de condiciones de durabilidad.

La técnica actual de evaluación de elementos de concreto se basa en la condición de inspección visual. Sin embargo, el deterioro en las trenzas del pretensado o torones no siempre se refleja en daño visible en la superficie del concreto. Además, el efecto de deterioro del acero pretensado es más destructivo comparado con el acero de refuerzo. El torón, debido a sus características metalúrgicas y de alta resistencia mecánica, es más pequeño en la sección transversal que el acero convencional de refuerzo y se ve más afectado por la pérdida de sección. El material también es susceptible, aunque menos frecuente y menos previsible a formas de deterioro, tales como corrosión bajo tensión, daño asistido por hidrógeno, corrosión fatiga, corrosión por rozamiento.

Las Metodologías para evaluar la integridad de puentes pretensados, ha evolucionado debido al desarrollo de métodos precisos y cuantitativos de ensayos no destructivos para estructuras pretensadas y postensadas. Aunque actualmente se cree que será difícil de lograr. La detección de forma rutinaria y precisa del grado de deterioro del acero embebido en concreto se ha buscado desde la década de 1970. Los investigadores han estudiado diversas técnicas tales como: magnética, radiografía, acústica/ultrasonido, radar, termografía, corrientes de Eddy, electroquímica y emisión acústica.

La *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) revisó y sintetizó los avances en ensayos no destructivos (END). Además, evaluó las tecnologías para identificar métodos que permitan la identificación de la pérdida de sección transversal en cables, atribuida a corrosión y agrietamiento. Su investigación, pretende:

- (a) Identificar y seleccionar una técnica conveniente, para la evaluación de elementos pretensados y postensados.
- (b) Desarrollar una herramienta práctica y rentable de Ensayos No Destructivos (END).

En Suiza recientemente se desarrolló un método de ensayo no destructivo para cables, se basa en la reflectometría de dominio del tiempo (TDR). Esta técnica se aplica en el mismo cable, que actúa como un sensor de alta frecuencia a través del cual se envían pulsos eléctricos. Las discontinuidad de impedancia causadas por anomalías físicas a lo largo del cable, dan como resultado una reflexión parcial del pulso. Estas reflexiones son detectadas por el equipo TDR y usadas para la detección de fallas en los cables. La NCHRP, concluye que la técnica de medición no es adecuada para su uso en los sistemas de postensado.

Una revisión de las recientes mejoras en los métodos de ensayos no destructivos, reporta que el estado del arte de las técnicas no permite una evaluación precisa del estado del torón embebido en concreto, aunque se han reportado mejoras en la recopilación de datos del método de fuga de flujo magnético. Estos avances podrían, con una correlación experimental y mejoras en las técnicas de interpretación de datos automatizados, adaptarse a END con éxito en vigas postensadas

Las vigas pretensadas estándar representan aproximadamente una tercera parte del puente de concreto. Así pues, incluso dentro de sus limitaciones, la tecnología de fuga de flujo magnético tal como está configurado, parece generar un beneficio considerable y potencial para la inspección de dichas estructuras <sup>[14]</sup>.

La siguiente lista cita algunos de los puntos involucrados en la inspección, mantenimiento y reparación de cables atirantados, se resumen brevemente los pros y contras conocidos del uso de estas técnicas. <sup>[15]</sup>

- Inspección general (visual): Inspecciones visuales son en la mayoría de los casos, el único método utilizado para puentes atirantados.
- Evaluación de la condición del elemento de tensión principal (MTE) en longitud libre (pérdida de flujo magnético): Este sistema tiene una larga historia en la inspección de cables industriales y cuerdas.
- Evaluación de la condición del elemento de tensión principal (MTE) (mediciones de cable de fuerza): Este método es el más utilizado y a veces se considera erróneamente como método de evaluación no destructiva.
- Evaluación de la condición del elemento de tensión principal (MTE) (pruebas de ultrasonido): Este método se ha utilizado en algunos puentes para evaluar la condición en anclajes de tipo “Hi-Am”.
- Evaluación de la condición del elemento de tensión principal (MTE) (radiografía): Teóricamente, este método tiene el potencial para evaluar correctamente las condiciones de anclajes del cable donde hay acceso al perímetro.
- La detección de fallas en cables a medida que ocurren (monitoreo acústico): Laboratorios que realizan ensayos de fatiga calificados de tirantes, han utilizado durante mucho tiempo este método para detectar fallas en cables.
- La detección de huecos en la lechada al interior del ducto de polietileno de alta densidad (HDPE) (radar de impulso): El equipo de radar de impulso se puede colocar sobre el cable y éste se desplaza longitudinalmente para identificar vacíos o huecos en el interior del revestimiento de cables.

- Reparación de huecos grandes de lechada (inyección al vacío): Este método ha sido utilizado en aplicación de torones postensados.
- Medición de la fuerza del cable (vibración basada en el uso de un vibrómetro láser): Un vibrómetro láser se utiliza para medir pequeñas vibraciones del cable de una gran distancia.
- Medición de la fuerza del cable (vibración basada en el uso de un acelerómetro): Similar al método laser descrito anteriormente.
- Medición de fuerza en cables (basado en la medición de la flexión del cable): Aunque la tensión en un cable está relacionada con el cuadrado de la frecuencia, también es inversamente proporcional a la flexión del cable, por lo tanto, las mediciones de la flexión del cable también pueden emplearse para estimar la tensión del cable.
- Detección de fracturas, cuarteaduras o grietas ocultas en polietileno de alta densidad (termografía infrarroja): El equipo de termografía infrarroja puede usarse para detectar fracturas en las tuberías de polietileno de alta densidad que se ocultan bajo la cinta de protección.
- Detección de daños en la cinta de fluoruro polivinilo (termografía infrarroja): Similar al método discutido para la detección de fracturas ocultas en tuberías de polietileno de alta densidad HDPE.
- Evaluación de vibraciones del cable (monitoreo utilizando acelerómetros a largo plazo): Cuando las vibraciones del cable son sospechosas, los sensores (acelerómetros) pueden montarse en los cables seleccionados para monitorear las vibraciones durante un período de varias semanas, meses o años.
- Evaluación de vibraciones del cable (cámaras de video en el puente): No hay casos conocidos de la utilización de cámaras de video para monitorear vibraciones en puentes atirantados. Esta opción se discutió para dos puentes ubicados en la ruta de huracanes, pero no fue implementado.
- Evaluación de la amortiguación del cable (método del decaimiento de la vibración): Hay diferentes enfoques para la medición de la amortiguación de los cables. En uno, un acelerómetro se une primero al cable.

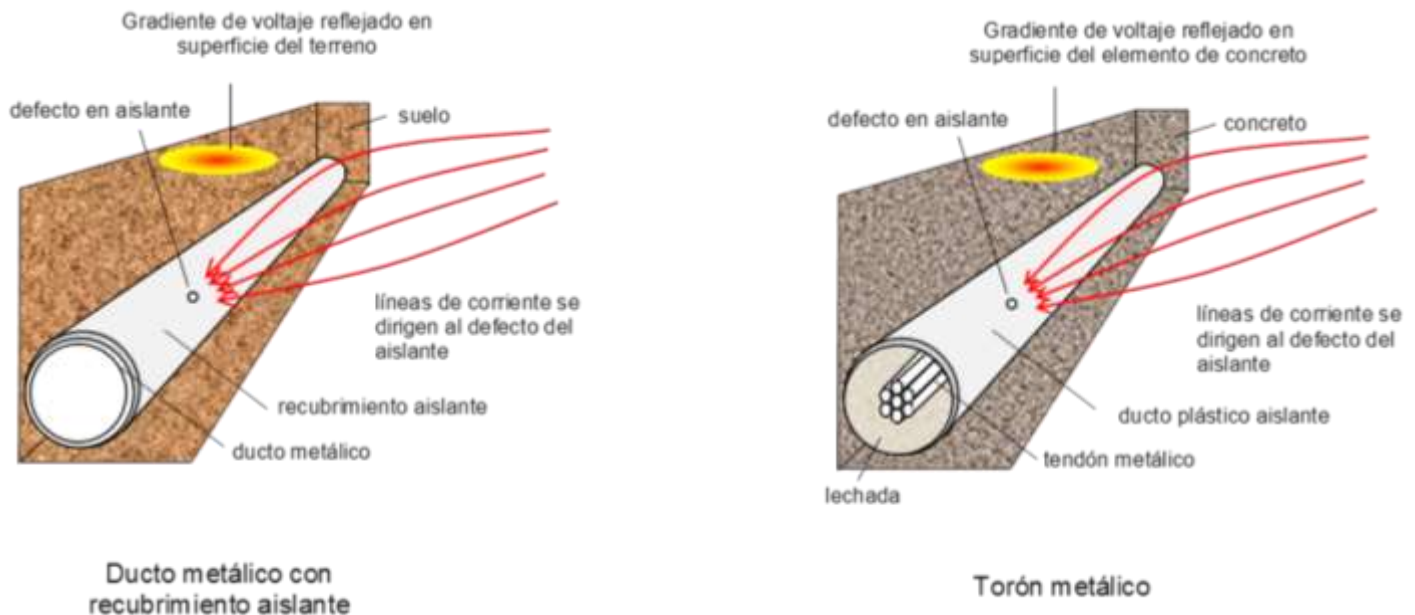
## **2.2 Método gradiente de potencial en corriente directa (DCVG)**

El método DCVG fue inventado por el australiano John Mulvany, un ingeniero en telecomunicaciones en la década de los 80. El desarrollo y perfeccionamiento de la técnica se hizo en conjunto con el Dr. John Leeds, un experto en ingeniería de

la corrosión de Kent, Inglaterra. Hoy en día, la técnica DCVG es universalmente aceptada.

La técnica DCVG fue desarrollada para localizar fallas en los recubrimientos o revestimientos, cuantificar su severidad y medir la efectividad del uso de la protección catódica sin tener que afectar a la tubería.

La forma de aplicación en tuberías se muestra en la Figura 2.5, donde una fuente externa realiza el envío de corriente al ducto. En el caso de un ducto metálico enterrado en un suelo, el envío de corriente es continuo e ininterrumpido y forma parte de una estrategia de mantenimiento que protege al ducto. En el caso de un elemento preesforzado, con el torón en el ducto plástico, es necesario instalar una fuente de corriente directa temporal para el envío de esa corriente.



**Figura 2.5 Analogía entre ductos con protección catódica y ductos plásticos en elementos preesforzados, ambos con corriente impresa**

Suponiendo que el ducto postensado que se encuentra embebido en el concreto está protegido usando protección catódica (como en este caso), entonces cualquier defecto en el recubrimiento resultará en una corriente eléctrica que fluye desde el suelo circundante y dentro del ducto. Estas corrientes causan gradientes de voltaje que se mostrarán en el suelo, los cuales pueden ser medidas usando un multímetro. Al observar la dirección de estos gradientes, serán ubicadas las fallas del recubrimiento en el ducto. La dirección de los gradientes de voltaje alrededor de la falla, será deducida por el tipo y naturaleza de la falla.

En teoría, un multímetro electrónico estándar podría utilizarse para llevar a cabo un estudio de DCVG, pero en la práctica podría ser muy difícil tomar lecturas

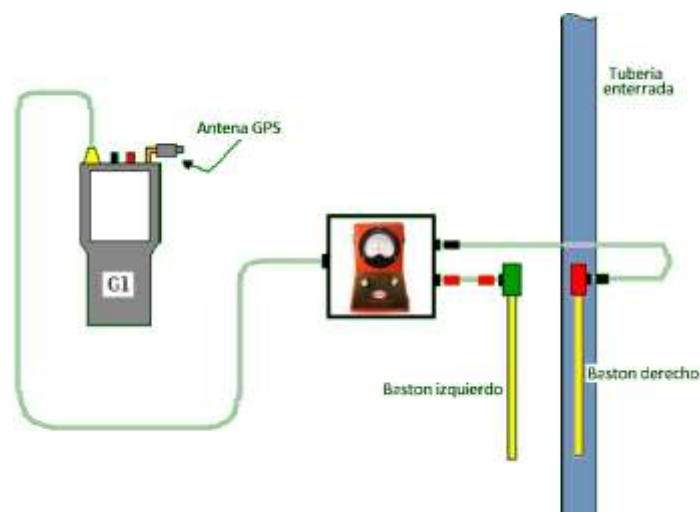
precisas y evaluar la dirección de los gradientes de voltaje correctamente. Un multímetro digital es inadecuado debido a la dificultad para evaluar rápidamente la dirección del gradiente de voltaje.

Existen multímetros diseñados especialmente a los intervalos de la medición de los voltajes encontrados en estructuras de campo.

El método de la NACE <sup>[19]</sup> internacional (Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión, por sus siglas en inglés), requiere mediciones que se hagan empleando un par de electrodos de referencia de cobre/sulfato cobre en lugar de simples probetas metálicas. Además, la aplicación de un sistema de protección catódica se hace actuar como un interruptor (switch) de apagado (off) y encendido (on) repetidamente usando un equipo electrónico comúnmente llamado interruptor. Así, dos lecturas de voltaje (potenciales de on y off) se toman en cada posición del defecto.

Contra toda intuición, se considera en realidad el potencial de apagado (off) (medido con respecto a la distancia de tierra) como más indicativo de la eficiencia de la PC aplicada a la tubería.

La técnica (DCVG) aplicada a tuberías consiste en recorrer la línea en estudio por parte de un operador con un voltímetro, conectado a dos bastones, a través de los cuales cada borne del instrumento se une eléctricamente al terreno, como se muestra en la Figura 2.5. Los defectos se localizan examinando los gradientes de potencial en el suelo (en este trabajo sobre el concreto) y determinando la dirección del flujo de la corriente.



**Figura 2.6 Esquema de un sistema gradiente de voltaje por corriente directa (DCVG)**

Dado que la protección catódica consiste de un flujo de corriente hacia los puntos expuestos del acero en el suelo y/o concreto, los defectos se pueden localizar



individualmente. La alta sensibilidad de los instrumentos de gradiente de voltaje por corriente directa (DCVG) permite la localización de defectos muy pequeños con una exactitud aproximada de su posición de 10 cm.

En cada falla detectada se realizan mediciones complementarias a fin de determinar la magnitud de dichas fallas. La importancia del defecto se determina midiendo la caída de potencial entre el epicentro del defecto y la tierra remota. Este valor se expresa como una fracción del cambio de potencial del concreto (el aumento de potencial debido a la aplicación de protección catódica) para calcular un porcentaje denominado %IR.

Los defectos son designados de acuerdo a las siguientes cuatro categorías, según sus respectivos valores de %IR (de acuerdo a la RP NACE 0502-2002):

- Categoría 1: 0 a 15%
- Categoría 2: 16 a 35%
- Categoría 3: 36 a 60%
- Categoría 4: 61 a 100%

La técnica gradiente de voltaje por corriente directa (DCVG) se emplea para enfocar las áreas problemáticas, la condición exacta del revestimiento en esos puntos, identificando la ubicación, severidad y longitud de los defectos.

Por este motivo, con los datos de la inspección gradiente de voltaje por corriente directa (DCVG), el operador del ducto recibirá una plantilla con recomendaciones para elaborar una estrategia de reparaciones. Algunas de las variables más importantes (no limitativas) para categorizar las áreas son las siguientes:

- *Categoría A:* Incluye áreas de subprotección, donde los potenciales ducto-suelo no cumplen los criterios de protección a causa de defectos en el revestimiento y analizados con gradiente de voltaje por corriente directa (DCVG). Estas áreas se consideran críticas y se recomienda su inmediata reparación.
- *Categoría B:* Incluye los defectos de revestimiento severos (todos los de categoría 4 y parcialmente los de categoría 3 de %IR) ubicados por gradiente de voltaje por corriente directa DCVG. Estos defectos se recomiendan para reparación a mediano plazo para eliminar altos consumos de corriente de protección catódica en estas áreas y permitir una mejor distribución de la energía en el recorrido completo del ducto.

*Categoría C:* Incluye los defectos menores (todos los de categoría 3 y parcialmente los de categoría 2 de %IR). En estos defectos se recomienda su reparación a largo plazo de acuerdo a criterio de los operadores del ducto.

No hay un método único que de respuesta a todas las preguntas sobre el estado de los cables tensados. En la mayoría de los casos, la combinación de técnicas de

ensayos no destructivos, junto con la experiencia, conocimiento y juicio de los ingenieros, inspectores y técnicos podrán conducir a una respuesta adecuada. La eficacia y la precisión de muchos de los métodos puede mejorar significativamente si las mediciones de referencia comparativas están disponibles cuando se sabe que el puente está libre de defectos. Debido a lo anterior en este trabajo se propone el uso de una técnica electroquímica para detectar fallas de recubrimientos en tuberías, dicha técnica se conoce como gradiente de voltaje en corriente directa (DCVG).

## **2.2 Hipótesis**

Es la técnica de DCVG (*Direct Current Voltage Gradient*) capaz de localizar el daño por corrosión de elementos postensados embebidos en concreto por agrietamiento del ducto de polietileno, con precisión, rapidez y no perjudicial para estos elementos.

## **2.3 Objetivos**

### **2.3.1 Objetivo principal**

Determinar la factibilidad de la aplicación de la técnica DCVG para evaluar el daño por corrosión en elementos de concreto postensados de la infraestructura de concreto en México.

### **2.3.2 Metas particulares**

- Establecer el comportamiento electroquímico de un cable de acero embebido dentro de un ducto de plástico y relleno de mortero (arena + cemento).
- Aplicar la técnica de DCVG a la evaluación de daños por corrosión en elementos de concreto postensado.
- Determinar las condiciones óptimas de aplicación de la técnica DCVG así como la fiabilidad de los resultados obtenidos por ésta.

## **2.4 Justificación**

A lo largo de los años se ha observado que el deterioro de estructuras de concreto ha sido un problema para la estabilidad y durabilidad de las mismas, a lo largo y ancho del país, los caminos y puentes están bajo condiciones ambientales propicias para la corrosión. Esto conlleva a disminuir su eficiencia estructural reduciendo así su durabilidad.

Mediante diversas formas y estrategias, se ha establecido un criterio de los daños causados parciales o totales de la infraestructura de concreto para la construcción de los puentes en México, el sistema carretero mexicano cuenta con un sistema de administración para la conservación y mantenimiento de su infraestructura, que permite conocer de manera genérica, el estado actual que guarda cada obra, para programar las reparaciones, de acuerdo al nivel de daño observado.

Actualmente, no se ha establecido el nivel de la degradación que por corrosión se está llevando a cabo en las estructuras de acero/concreto, y no se han identificado los daños específicos causados por el deterioro ambiental. Debido a la cantidad de estructuras existentes, es necesario que cada revisión se realice en el menor tiempo posible, obteniendo datos y estadísticas que se analicen desde una central, para dar soluciones integrales a cada caso en específico, esperando disminuir los costos y riesgos que se presentan en cada reparación.

Eliminar factores colaterales de suma importancia como:

- Daños en las subestructuras y materiales de los puentes, debido a la obtención de muestras.
- Disminuir el riesgo de lesiones a todo el personal encargado de supervisar las estructuras a lo largo y ancho del país.
- Que las diferentes agencias, dependencias y departamentos en general que tengan que ver con la infraestructura de puentes en México, colaboren como un grupo de cooperación y apoyo mutuo, para analizar y dar las mejores soluciones a los diferentes problemas que genera la corrosión.

Por lo anterior es importante priorizar el hecho de no dañar las estructuras al momento de revisar y modificar los elementos del concreto de caminos y puentes de México. Por esto se realizan estudios y experimentación con tecnologías no destructivas, que pueden generar datos concretos y confiables a los diferentes problemas como el de la corrosión. En este trabajo se comprueba que el manipular y probar estructuras de concreto mediante análisis no destructivo, es el camino más eficiente para dar soluciones rápidas y económicas a los problemas de la corrosión que existen en México.

Actualmente, no se ha establecido el nivel de la degradación que por corrosión se está llevando a cabo en las estructuras de concreto-acero, ni se han identificado los daños específicos, producto del deterioro ambiental. Durante las inspecciones (visuales) es común que se confundan agrietamientos estructurales causados por asentamientos propios de los movimientos de la estructura con los causados por corrosión.

Por lo tanto, no se tienen elementos suficientes para normalizar el tipo de concreto, ni los refuerzos a emplear en la construcción de obras de infraestructura

de este tipo, que resistan adecuadamente los efectos de la corrosión. Solamente se cuenta con criterios generales que correlacionan la degradación de la infraestructura de concreto-acero con los ambientes marinos y urbanos, por ejemplo.

Por lo tanto, ¿cómo evaluar de una manera eficiente, el daño material (estructural) y corrosivo, de una estructura de concreto con elementos pretensados, sin importar las condiciones ambientales?

Se han desarrollado tecnologías en el mundo, no destructivas para la evaluación de la infraestructura, que se basan en las propiedades físicas y monitoreo por medio de ondas, frecuencias, diferencias de potencial, rayos x, entre otras, para el diagnóstico y medición del daño estructural causado por corrosión, a toda la infraestructura de caminos y puentes de México.

En este trabajo se propone una técnica electroquímica llamada gradiente de voltaje en corriente directa (DCVG) por sus siglas en inglés [Direct Current Voltage Gradient], la cual se profundizará en su definición a lo largo de este trabajo.

## 3 Desarrollo experimental

Para llevar a cabo este trabajo experimental, se fabricaron dos muestras de concreto con acero como refuerzo, la cual se dividió en dos secciones (tipo sándwich), con el fin de simular un elemento de concreto postensado se utilizó acero pretensado, manguera de plástico y mortero. Para facilitar un mejor control y manipulación de las muestras e intercambiar los elementos que simulan un elemento postensado. Se fabricaron tres probetas que simulan un ducto postensado. Éstas se hicieron con manguera de plástico de longitud de 2.60 metros y se rellenaron con mortero (arena fina + cemento). A cada ducto se le realizaron tres perforaciones de 0.15 mm de diámetro en los extremos del ducto de plástico y al centro de éste, para obtener un elemento de ensaye que represente características de un acero/ducto dañado por corrosión, como se muestra en la Figura 3.1.

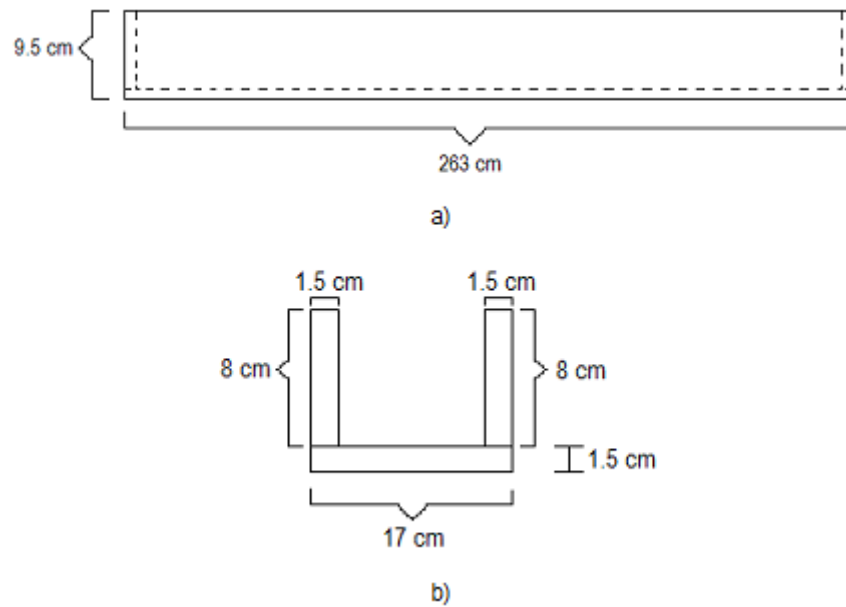


**Figura 3.1 Muestra de la sección de concreto que simula un elemento postensado con manguera de plástico**

### 3.1 Materiales

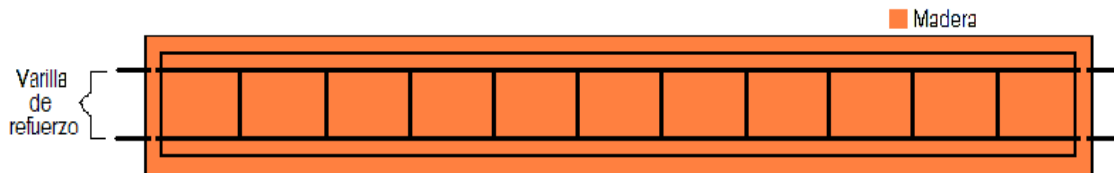
- Materiales: cemento, arena, grava, clavos, varilla de refuerzo, cable pretensado, manguera de plástico, madera, pijas.
- Equipos: revolvedora trompo, martillo, taladro, desarmador plano y de cruz, equipo para técnica DCVG.

Se construyeron dos moldes de madera para el vaciado de la mezcla de concreto con relación  $a/c = 0.5$ , para obtener la geometría deseada como se muestra en la Figura 3.2.



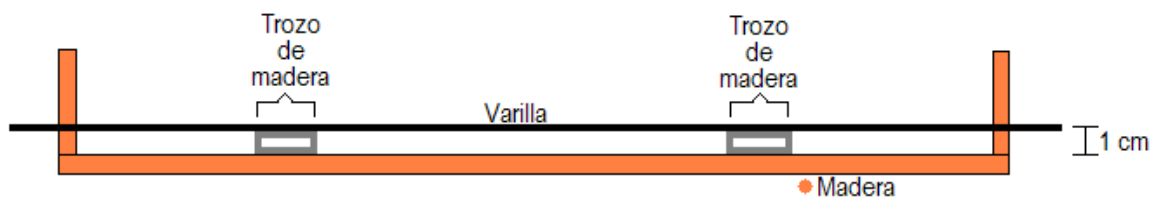
**Figura 3.2 a) Parte lateral del molde, b) Parte frontal del molde**

Se colocaron varillas de refuerzo para evitar que la probeta se fracture (Figura 3.3).



**Figura 3.3 Vista de planta del molde**

Se colocaron bajo las varillas unos trozos de madera pequeños (Figura 3.4) los cuales mantienen a la varilla nivelada a un centímetro, para que ésta se mantuviera dentro del concreto al momento de que éste fraguara.



**Figura 3.4 Vista lateral del molde**

Se utilizó un bulto de cemento para las dos muestras, por lo que las proporciones se ocuparon a la mitad, para obtener una resistencia de  $250 \text{ kg/cm}^2$  requeridas para columnas y losas, según especificaciones del fabricante de cemento.

## 3.2 Preparación de la muestra

- Medio bulto de cemento [3]
- Bote y medio de arena [4]
- Dos botes de grava
- Tres cuartos de bote de agua

Para ambas muestras se ocuparon exactamente las mismas proporciones.

Con los materiales listos, se vacían dentro del trompo sólo una parte de arena, grava, agua, se mezcla y posteriormente se agregan el material restante arena, cemento, agua, en este orden, como se observa en las Figuras 3.5 y 3.6.



**Figura 3.5 Trompo con los elementos para mezclar y elaborar el concreto de las muestras**



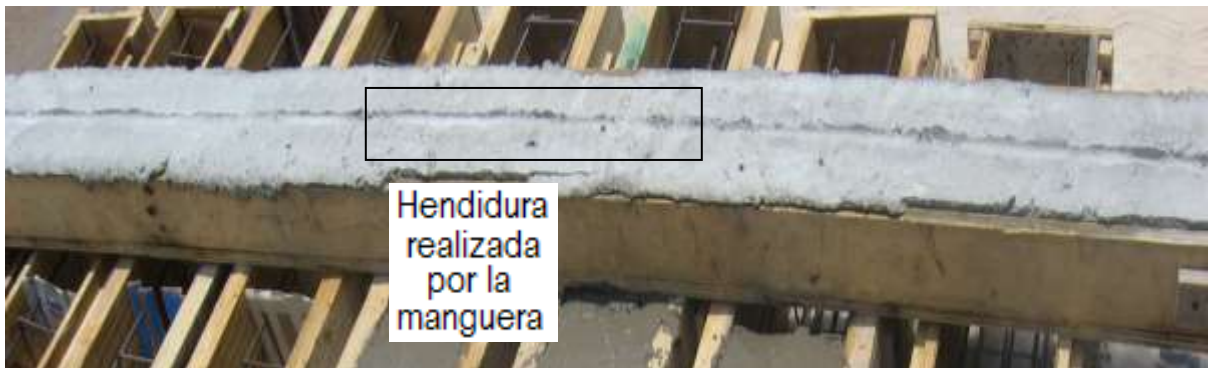
**Fotografía 3.6 Trompo revolviendo la mezcla de concreto**

---

[3] Bulto de cemento: 50 kilos

[4] Un bote: 20 litros

Antes del fraguado completo y después de aplanar, se realizó una muesca a lo largo de toda la muestra para dejar un espacio donde se colocó la manguera que simula al elemento postensado, la marca se realizó presionando la misma manguera que simula al acero postensado, hasta observar que se formó una hendidura al centro y a lo largo de toda la muestra, como se muestra en la Figura 3.7



**Figura 3.7 Hendidura a lo largo de la muestra**

Una vez realizados los pasos arriba descritos se obtuvo la muestra de concreto, la cual se mantuvo húmeda al menos siete días después del colado de la muestra, para que las muestras cumplan con el proceso de curado.

Una vez realizado el curado de las muestras obtenemos muestras listas para usarse (Figura 3.8).





a)



b)

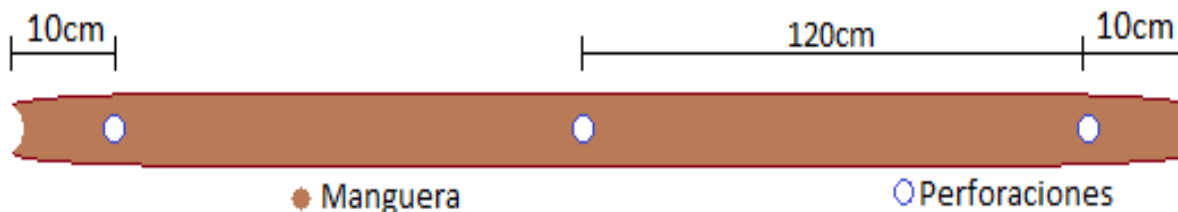
**Figura 3.8. Fabricación de muestras, a) vista de planta, b) vista lateral**

### **3.3 Fabricación del ducto de postensado**

La aplicación de la técnica DCVG, a elementos de concreto postensado no ha sido utilizada aún en estructuras de concreto reales, sólo se ha aplicado a tuberías de conducción de fluidos. Debido a que esta técnica detecta defectos en recubrimientos orgánicos, en la manguera de plástico se hicieron tres orificios que actúan en este caso como el ducto de un elemento postensado, el primer defecto se hizo a 10 cm de un extremo, el siguiente a los 10 cm del otro extremo y el tercero, en la parte central, a 120 cm de distancia de cualquiera de los orificios anteriores como se muestra en la Figura 3.9. Cabe mencionar que los defectos tenían un diámetro de 0.15 mm.

Ya que la técnica de DCVG detecta las fallas en los recubrimientos de ductos, que son los puntos donde la corrosión del acero puede ocurrir al contacto con el terreno, en el caso de los elementos de concreto preesforzado las tres perforaciones simulan tres defectos del ducto de plástico, donde podría iniciarse la

corrosión de los tendones, con el objetivo de comprobar la eficacia de la técnica y que los resultados obtenidos sean confiables.



**Figura 3.9 Perforaciones de la manguera**

Se colocó el cable postensado por la parte central de la manguera de plástico. Una vez centrada, se selló un extremo para que al momento de vaciar el mortero no se saliera de la manguera.

Se fabricaron tres mangueras como muestras en las cuales varían su proporción. La primera manguera se llenó completamente sin dejar vacíos, es decir, un relleno uniforme.

- 750 ml de agua
- Un kilo de arena
- Un kilo de cemento

Se mezclaron las cantidades de material en un recipiente y una vez obtenida la consistencia (viscosidad) deseada, se inició el vaciado dentro de la manguera.

En la segunda manguera se realizaron las mismas proporciones que en la primera, pero con la excepción de que el vaciado en la manguera sería un relleno parcial, no uniforme.

En la tercera manguera se utilizaron las mismas proporciones, pero se agregó un elemento más, sal (NaCl) en una cantidad de 500 gr por 750 ml de agua, esto para incluir cloruros y que se lleve a cabo la corrosión a causa de iones cloro, el vaciado fue uniforme para no dejar espacios vacíos.

### **3.4 Muestra de concreto con el ducto de elemento postensado**

Una vez cumplidos los siete días de curado, se retiró la muestra de concreto del molde de madera, de igual forma se verificó que los ductos con el cable, en este caso las mangueras de plástico, hallan fraguado completamente colocando la manguera con el cable y rellena de mortero sobre la hendidura que se le realizó a la muestra de concreto, como lo muestra la Figura 3.10.



**Figura 3.10 Colocación de la manguera de plástico sobre la muestra de concreto**

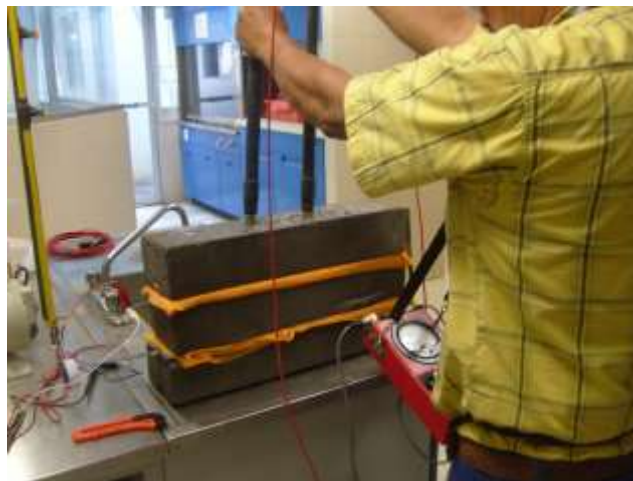


## 4 Resultados y análisis de resultados

---

Cabe mencionar que la técnica sólo da información cualitativa, aunque en algunos casos se puede obtener la corriente que fluye por los defectos encontrados. En este caso sólo se reporta si la técnica fue capaz o no de encontrar con precisión los defectos.

Se realizaron las mediciones en las muestras con dos equipos, uno proporcionado por el Dr. José Luis Ramírez Reyes del Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana (IIUV)<sup>[20]</sup> y otro proporcionado por el Dr. José María Malo Tamayo del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). La diferencia entre estas pruebas estriba en las dimensiones de las muestras, para el IIUV la muestra fue de 60 cm de largo x 15 cm alto x 15 cm de ancho, y para las muestras ensayadas en el IIE la dimensión fue de 260 cm de largo x 10 cm de ancho x 10 cm de alto. La razón por la cual las muestras fueron de distinto tamaño fue para facilitar su traslado en el primer caso y continuar con el proyecto en el caso obtener una buena respuesta al utilizar el equipo DCVG. Como se observa en las Figuras 4.1 y 4.2 respectivamente. Observando el flujo de corriente y la variación de los voltajes (swing).



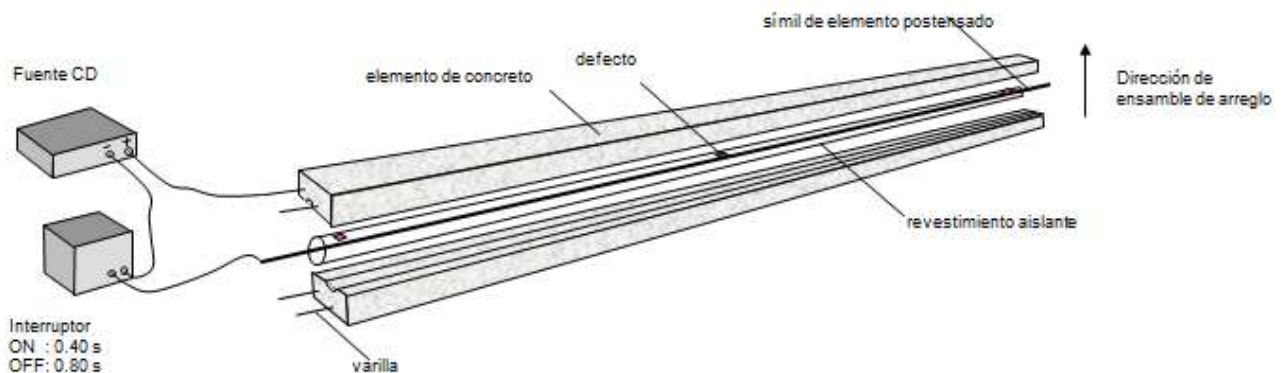
**Figura 4.1 Ensayos de la técnica gradiente de voltaje por corriente directa (DCVG) con el equipo en la Universidad Veracruzana <sup>[16]</sup>**



**Figura 4.2 Ensayos de la técnica gradiente de voltaje en corriente directa (DCVG) con el equipo en el Instituto de Investigaciones Eléctricas**

#### 4.1 Características del ensayo

- Elemento metálico en un revestimiento aislante que presenta 3 defectos de ubicación conocida, embebido en elemento de concreto con varilla de refuerzo Figura 4.3.
- Estímulo eléctrico: Fuente de corriente directa operando a 12 V y 1 A. Figura 4.4.



**Figura 4.3 Esquema del ensamble de la prueba**



**Figura 4.4 Aditamentos para realizar el estímulo eléctrico**

La aplicación de la técnica gradiente de voltaje por corriente directa (DCVG) se realizó como se describió en el punto 3.5, la medición se inició en un extremo y se terminó en el otro, para comprobar la detección de los defectos en los puntos realizados previamente y así determinar la confiabilidad de la prueba.

Teniendo en cuenta los factores naturales, la humedad del ambiente, las características del concreto en lo que a fabricación se refiere, no existe variación alguna en cuanto a la medición, por lo que no se toma en cuenta. La prueba se basa principalmente en el enfoque y variación de las características que se encuentra el acero embebido dentro del ducto de plástico y el mortero.

En la Figura 4.5 se describe la manera como el flujo de potencial actúa. El resultado de dicha evaluación fue el esperado, la técnica detectó las perforaciones realizadas en el ducto de plástico, de esta manera se confirma la validación de la técnica. Cabe mencionar que la muestra de concreto se humedeció <sup>[17]</sup> lo suficiente antes de realizar la prueba gradiente de voltaje por corriente directa (DCVG) para minimizar la resistencia eléctrica del concreto y facilitar la ubicación del defecto por medio de la distribución de equipotenciales.



### a) Ubicación de defectos



### b) Localización de defectos con DCVG

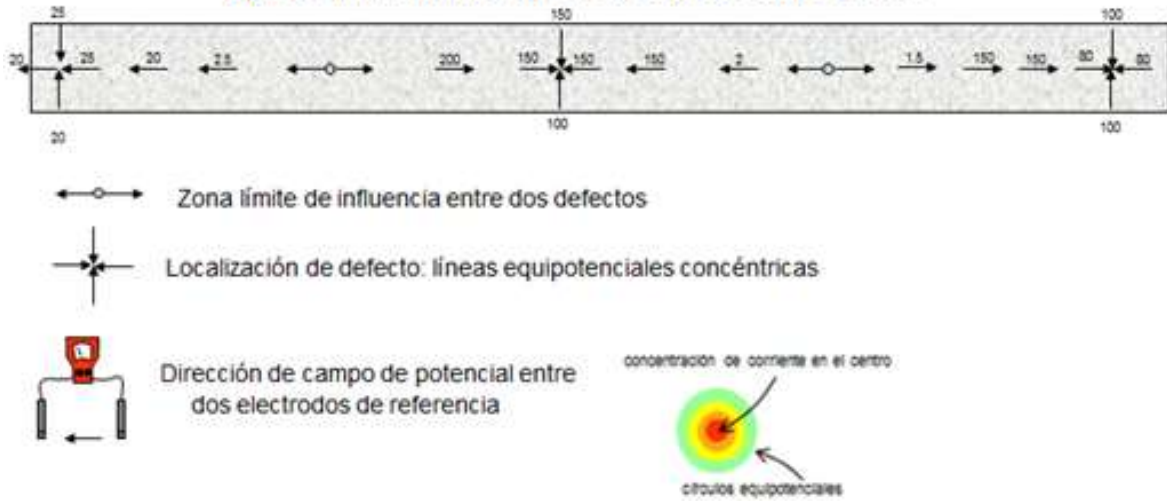


Figura 4.5 a) Ubicación de defectos b) Localización de defectos con DCVG



## 5 Conclusiones

---

Los resultados que genera la técnica gradiente de voltaje por corriente directa (DCVG) son cualitativos, pues detecta la presencia del daño por corrosión según las muestras en la Figura 4.5.

La técnica puede llegar a ser cuantitativa si determinan la magnitud del gradiente de voltaje.

Es factible detectar defectos en el revestimiento aislante en un arreglo tipo elemento postensado con la técnica de gradiente de voltaje de corriente directa.

Bajo las condiciones de prueba, el punto de concentración del gradiente de voltaje se localiza exactamente encima del defecto real.

Se comprobó que la técnica es confiable en concretos de elementos postensados, por lo que es factible utilizar el equipo en problemas reales de estructuras de concreto.

Dada la exitosa localización y valoración de defectos en elementos a escala laboratorio, se plantea extender los estudios a elementos preesforzados de estructuras reales en operación para evaluar la factibilidad de su aplicación a éstas.



## 6 Recomendaciones

---

Es importante profundizar en los siguientes aspectos:

1. Dada la exitosa localización y valoración de defectos en elementos a escala laboratorio, se plantea extender los estudios a elementos preesforzados de estructuras reales en operación para evaluar la factibilidad de su aplicación a éstas.
2. Determinar el efecto del grado de mojado del concreto, previo a la prueba, en la sensibilidad de la técnica de inspección.
3. Determinar el nivel de potencial y corriente directa en la sensibilidad y alcance de la técnica.
4. La existencia del contacto electrolítico entre el cable postensado y el concreto en casos reales.
5. Mejoras al contacto electrodo-concreto que favorezca la rapidez y sensibilidad de lectura de potencial en un caso real.
6. Revisar la forma de aplicar la técnica en un caso real y anticipar sus alcances y limitaciones.



## Bibliografía

---

1. Mercedes Sánchez, M<sup>a</sup> Cruz Alonso; Contribución de los métodos de protección en la vida útil de las estructuras de hormigón, Tecnología de la Construcción y de sus Materiales Ciclo nº 57; 26 de junio de 2008.
2. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.
3. J.A. González, E. Otero, A. Cobo y M.N. González, Consideraciones sobre los métodos electroquímicos de rehabilitación de las estructuras corroídas de concreto armado, jornadas SAM – CONAMET – AAS 2001, pp 625-632, septiembre de 2001.
4. J.A. González, M. Benito, A. Bautista y E. Ramírez, "Inspección y diagnóstico de las estructuras de hormigón armado", *Rev. Metal. Madrid*, 30 (1994), 271.
5. M. Fernández Cánovas, "*Patología y Terapéutica del Hormigón Armado*". 2<sup>a</sup> Edición. Editorial Dossat, S.A. Barcelona, 1984. pp. 443-473.
6. Matt, P., "Durability of Prestressed Concrete Bridges in Switzerland," *16th Congress of IABSE*, September 2000.
7. Bulletin 34, "Model Code for Service Life Design", *Model Code*, Fédération Internationale du Béton, Lausanne, 2006.
8. CEB, *Durable Concrete Structures – CEB Design Guide*, Bulletin D'Information No. 182, Comité Euro- International du Béton, Lausanne, June 1989, 310 pp.
9. ACI Committee 222, "Corrosion of Metals in Concrete" (ACI 222R-96), American Concrete Institute, Detroit, MI, 1996, 30pp.
10. ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete" (ACI 201.2R-92), American Concrete Institute, Detroit, MI, 1992, 41 pp.
11. J. S. West, C. J. Larosche, B. D. Koester, J. E. Breen, and M. E. Kreger; state-of-the-art report about durability of post-tensioned bridge substructures; research report 1405-1; Center for Transportation Research Bureau of Engineering Research the University of Texas at Austin October 1999.

12. [www.sct.gob.mx](http://www.sct.gob.mx).
13. J. C. Moulder, M. W. Kubovich, E. Uzal, and J. H. Rose, "Pulsed Eddy-Current Measurements of Corrosion-Induced Metal Loss: Theory and Experiment," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Eds., Vol. 14B. pp. 2065-2072, Plenum Press, New York, NY (1995);
14. C. Tai, J. H. Rose, and J. C. Moulder, "Thickness and Conductivity of Metallic Layers from Pulsed Eddy-Current Measurements," *Review of Sci. Instrum.*, Vol. 67, pp. 3965-3972 (November 1996).
15. A. T. Ciolko and H. Tabatabai, *Nondestructive Methods for Condition Evaluation of Prestressing Steel Strands in Concrete Bridges*; CTL Project 210408, march 1999.
16. HABIB TABATABAI, NCHRP SYNTHESIS 353, *Inspection and Maintenance of Bridge Stay Cable Systems a Synthesis of Highway Practice*, Transportation Research Board, WASHINGTON, D.C. 2005.
17. Publicación 548 IMT.
18. ASTM C876 - 09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
19. Standard Recommended Practice Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology ANSI/NACE Standard RP0502-2002 Item No. 21097.
20. José Trinidad Pérez Quiroz, José Luis Ramírez Reyes, Jorge Terán Guillén, Guadalupe Lomelí González; *Evaluación electroquímica de cables postensados con aplicación estructural en el sector transporte*; Publicación Técnica No. 348; Sanfandila, Qro, 2011







# Anexo 1

---

## Función del refuerzo pretensado

Las secciones geométricas transversales y procedimientos de diseño / construcción utilizados, representan una amplia gama de posibles configuraciones de diseño estructural. Común a todos ellos es el papel de la armadura de pretensado. Este componente puede tomar cualquiera de las formas siguientes: estirado en frío, alambre de alta resistencia o alambre enrollado helicoidalmente para formar filamento enrollado y barras roscadas de alta resistencia. El cable pretensado para la construcción de puentes se suministra normalmente con una resistencia a la tracción de 270 Ksi.

### A1.1 Pilotes cabeza de martillo

Tendones transversales postensados usando elementos tensados de barras o cadenas proveen un refuerzo eficaz para los pilotes de cabeza de martillo (Figura A1.1). Esto es especialmente cierto para los pilotes de martillo con voladizos importantes o en espacios verticales con profundidad limitada. Los torones se colocan dentro del ducto embebido en el concreto, se tensan y rellenan con mortero después de que el pilote de concreto ha alcanzado la suficiente fuerza.

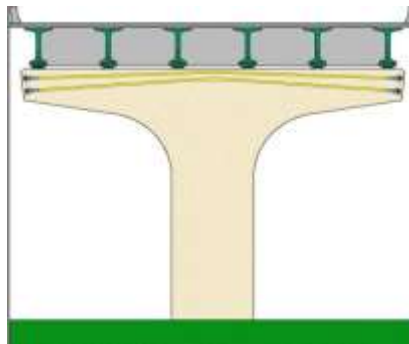


Figura A1.1 Pilote cabeza de martillo

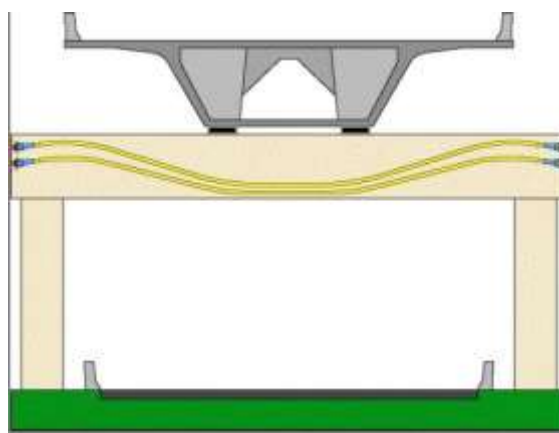
### A1.2 “Straddle bents (marco rígido)”

“Straddle bents” (marco rígido) son requeridas a menudo para apoyar las carreteras en complejos multinivel de intercambios (Figura A1.2). Los espacios verticales limitados a menudo restringen la profundidad de las capas de “straddle

bents” (marco rígido) resultando un mejor postensado, comparado con los elementos de concreto reforzado.

En un típico “straddle bents” (marco rígido), la cortina de tendones para un perfil establecido que debe ser similar a la cortina de la viga sobre soportes simples, o puede aumentarse por encima de las columnas donde se realizan las conexiones monolíticas para transferir momentos dentro de la columna y proporcionar marcos de acción. Las columnas deben de estar reforzadas o postensadas, dependiendo de la magnitud de las fuerzas y los momentos inducidos en el marco.

Los tendones en “straddle bents” (marco rígido) son internos y rellenos con mortero durante la construcción. Sin embargo, es posible aplicar torones externos de tipo similar para su reparación o rehabilitar un daño estructural



**Figura A1.2 “Straddle bent” (marco rígido)**

### **A1.3 Pilotes en cantiléver**

Los pilotes de cantiléver (C-piers) son a menudo usados en pasos multinivel o en pasos elevados de puentes donde una columna concéntrica podría introducirse dentro de un espacio horizontal (claro horizontal) asociado con una carretera subyacente. Para eficiencia estructural y económica, un pilote en cantiléver típico usualmente contiene postensados transversales y verticales (Figura A1.3) comparado con los que son solamente reforzados.

Los pilotes en cantiléver (Figura A1.4) deberían proporcionar el desarrollo apropiado para fuerzas pretensadas en el cantiléver, columnas y bases. Las anclas en las esquinas deben cruzar de una manera eficaz para oponerse a la tensión y el desarrollo de pre-compresión de todo el exterior del pilote. Una alternativa se podría usar para un torón continuo en vez de dos torones separados.

Los torones son internos, la tensión y el relleno del mortero se realizan durante la construcción. Tendones externos similares pueden ser usados para reparaciones o rehabilitaciones. Se podría necesitar atención especial, sin embargo, para el anclaje de los mismos y para el desarrollo de las fuerzas alrededor de la esquina superior y en la base.

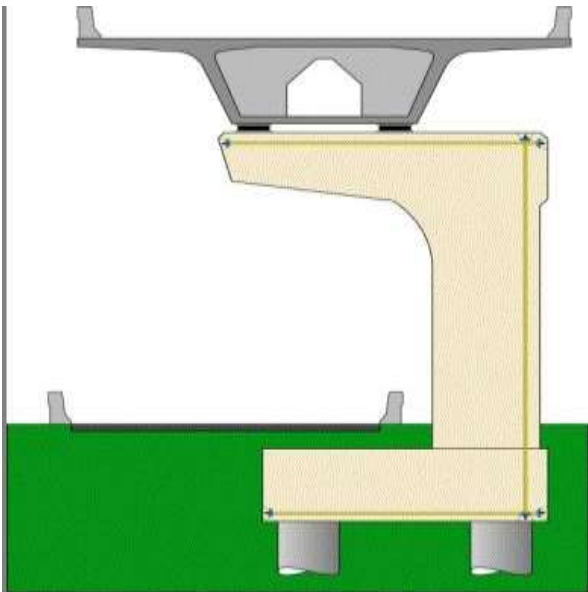


Figura A1.3 Pilote en cantiléver

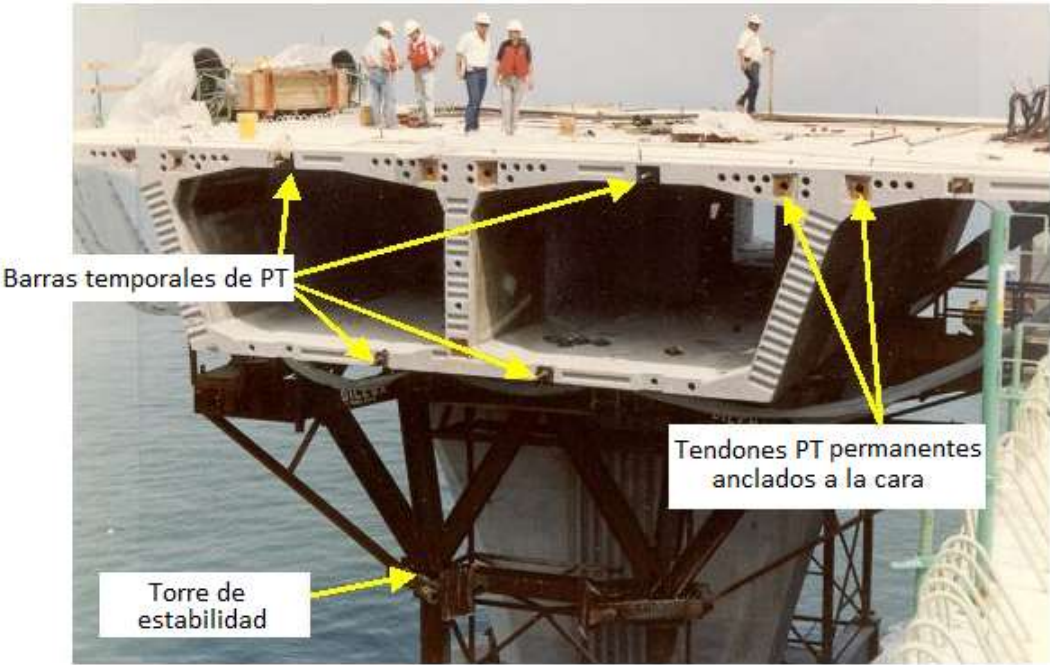
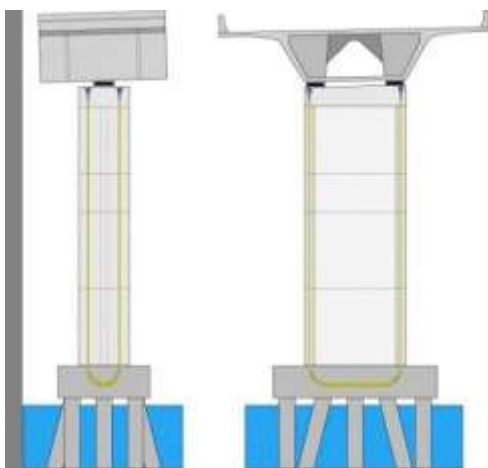


Figura A1.4 Fotografía de un pilote en Cantiléver

## **A1.4 Pilotes prefabricados**

Los segmentos de pilotes prefabricados de sección hueca, se han utilizado en varios proyectos. El postensado vertical usualmente consiste en barras de PT para tramos cortos y alturas moderadas, por encima de los 12 metros. Los torones son usualmente necesarios para pilotes más altos. Las barras son ancladas típicamente en las bases y se extienden hasta la tapa de los muelles. Los torones generalmente son continuos y se extienden desde el ancla en la base del pilote, bajo el pilote, en el bucle atravesando la base y elevándose del lado opuesto para anclarse en la tapa. Barras postensadas son usadas para asegurar temporalmente los segmentos prefabricados, así como éstas son elevadas primeramente para instalar permanentemente los torones. La sección hueca, segmentos con una estética forma octogonal exterior con caras cóncavas.



**Figura A1.5 Pilotes prefabricados**

## **A1.5 Selección de materiales para los tendones de postensado**

La forma más común de acero utilizado son los cables pretensados de alta resistencia, el cable pretensado de siete alambres y las barras pretensadas de alta resistencia. La selección de cualquiera de los anteriores materiales mencionados para su aplicación depende principalmente de los requerimientos estructurales y las consideraciones de construcción, más que de durabilidad.

En algunos países, aceros templados y revenidos han sido utilizados como aceros de pretensado. Este proceso de manufactura puede llevar al acero a ser susceptible a la corrosión bajo esfuerzos como los aceros estirados en frío.

### **A1.5.1 Recubrimientos metálicos y no metálicos**

Han sido investigados como un método de protección para el acero suave de refuerzo. Los más comunes y ampliamente usados son los recubrimientos epóxicos y galvanizados. Los recubrimientos no deben tener un efecto adverso en la resistencia o ductilidad del acero, deben de tener la suficiente flexibilidad (o al menos la requerida) y ductilidad. Por ejemplo, el revestimiento no debe tener un efecto adverso en la fuerza o en la ductilidad del acero, deberá tener suficiente flexibilidad y ductilidad para soportar durante la fabricación y el alargamiento durante la tensión sin que se agriete o astille. Los revestimientos no deberían tener un efecto que perjudique la adherencia entre el acero y el concreto y debe ser capaz de resistir la manipulación y colocación sin sufrir daños.

### **A1.5.2 Ductos para postensado**

Los ductos tienen varias funciones en el concreto postensado. Los ductos proveen los espacios que permiten colocar los torones tensados después de que el concreto ha sido colado, y transfiera la tensión entre el mortero del torón y el concreto. Como protección para la corrosión, el ducto trabaja como una barrera a la humedad y los cloruros. Para que tenga un éxito como barra de protección a la corrosión, debe de ser impermeable.

### **A1.5.3 Ductos para aceros galvanizados**

El uso de ductos de acero galvanizado se debe a que el acero es lo suficientemente fuerte para prevenir el aplastado y el daño durante la colocación del concreto, lo que lo hace resistente a fuerzas de fricción asociadas con el postensado. Sin embargo, estudios recientes, han encontrado que el daño de la corrosión, ocurre dentro del ducto, lo cual es común que ocurra en ambientes marinos expuestos a la sal.

### **A1.5.4 Ductos epóxicos como recubrimientos**

Los ductos de acero epóxicos eliminan varios de los problemas asociados con los ductos de acero galvanizados. Los recubrimientos epóxicos protegen el ducto de la corrosión y sella las juntas o uniones de los ductos.

Los ductos de recubrimiento epóxico no son ampliamente usados y podrían enfrentarse con algunas deficiencias. La calidad del recubrimiento epóxico y los niveles del daño del recubrimiento influyen en la eficiencia del recubrimiento como protección a la corrosión.

## **A1.5.5 Ductos de plástico**

El uso de ductos de plástico puede proveer el más alto nivel de protección contra la corrosión para torones postensados. Se sabe que el plástico no se afecta por la corrosión, ya que provee una barrera impermeable a los agentes agresivos. Los ductos de plástico se han desarrollado con fuerza suficiente, rigidez, resistencia a la abrasión y propiedades de enlace que satisfacen los requerimientos estructurales. Las pruebas muestran que los ductos de plástico son de baja fricción y aumentan la resistencia a la fatiga en comparación con los ductos de acero o de metal. Los ductos de plástico comercialmente disponibles para el postensado están fabricados con los empalmes y la conexión exacta para el equipo de anclaje.

Los ductos de plástico hechos de polipropileno están disponibles en dos formas (sencillos como filamentos) para los sistemas de losas (en puentes y grandes edificaciones estructurales) y el sistema multifilamentos (varios filamentos) para los torones de configuración por encima de los 12.7mm de diámetro.

## **A1.5.6 Mortero para el postensado**

El mortero (arena fina + agua + cemento) enlaza los tendones pos-tensionados al concreto circundante y proporciona protección contra la corrosión para el tendón. La protección a la corrosión actúa en forma de barrera a la humedad y a la penetración de los cloruros y en presencia de un ambiente alcalino para los tendones.

Un mortero óptimo para el pos-tensionado combina nuevas propiedades deseadas con una buena protección a la corrosión. Estas nuevas propiedades del mortero influyen en que tan bien el mortero rellena el ducto.

La protección a la corrosión dada por el mortero sería ineficiente si el ducto está parcialmente llenado, esta situación puede llevarnos a condiciones severas para propiciar la corrosión. La presencia de vacíos o un relleno discontinuo también podrían permitir la filtración de la humedad y los cloruros a lo largo de toda la longitud del tendón. Propiedades importantes son mencionadas abajo:

- **Fluidez:** La fluidez mide qué tan bien el mortero fluye. Con una fluidez insuficiente podría llevar a dificultades en la colocación de los tendones, en bloqueos de los tendones a la hora de tensar y serán propensos a la fractura.

La fluidez excesiva también cuestiona un problema, ya que puede formar vacíos cerca de la cresta en los perfiles de tendones cubiertos y así se realiza un relleno incompleto. La fluidez también afecta la habilidad de que el mortero rellene los espacios vacíos entre los filamentos o los cables del tendón ya sean en los perfiles de dos cables o multifilamento.

- **Resistencia al derrame:** Ésta es muy importante en los morteros para postensado, aunque en el concreto el derrame de agua se puede evaporar, el derrame de agua en los ductos con mortero pueden generar vacíos que llegan a los inicios del ducto, formando caminos para la humedad y cloruros.

Eventualmente, si el derrame de agua no alcanza a llegar al inicio del ducto, será reabsorbido dentro del mortero, por lo que generará vacíos. Los caminos de derrame son un gran problema en los perfiles verticales, a diferencia de los construidos como los horizontales.

- **Volumen de carga:** La reducción en el volumen o en la contracción en estado plástico del mortero (no completamente sólido) puede generar vacíos los cuales deben ser evitados. En algunos casos, puede ser deseable en el mortero poseer propiedades expansivas para compensar la contracción y posiblemente rellenar los vacíos resultantes de aire que quedó atrapado.
- **El tiempo:** Un mortero establecido rápidamente lleva a una fluidez insuficiente, escondiendo lugares para generar vacíos y obteniendo un mortero de relleno incompleto.

Las propiedades del mortero pueden ser controladas a través de la relación agua-cemento, por el uso de químicos minerales añadidos y por el tipo de cemento. Sin el uso de aditivos, la fluidez es primeramente una función de la relación agua-cemento. En la mayoría de los casos, es deseable reducir el contenido de agua para obtener menos permeabilidad y minimizar el derramamiento de la misma. En esta situación, la suficiente fluidez puede proveerse a través del uso de superplastificadores. El cemento se puede reemplazar parcialmente con ceniza volátil, lo que intensifica la fluidez.

El uso de aditivos a base de silicio o humo de sílice, lleva a reducir la fluidez debido al tamaño de partícula pequeña. El revenimiento puede ser reducido, bajando la relación de agua-cemento y por el uso de ceniza volátil o humo de sílice.

Con el uso de aditivos químicos se puede conseguir propiedades expansivas. Los aditivos para expandir y no contracción son generalmente categorizadas como la liberación de gas y oxidación del metal. El tiempo es normalmente controlado a través del uso de aditivos de retraso, también influye el tipo de cemento a utilizar (leer especificaciones al reverso del bulto de cemento).

## A1.6 Cables de acero

En nuestros tiempos cada segmento de nuestra moderna sociedad industrial depende de cables de alambre de acero, en alguna fase de su funcionamiento. Hoy en día, el cable de acero es una necesidad, la cual ha sido desarrollada y

elaborada con precisión. El uso del cable de acero es múltiple, ya que se puede encontrar trabajando como una piola de freno en diversos medios de transporte (bicicletas, automóviles, etc...), soportando el peso de personas en un ascensor o funicular, en des para pesca industrial y también se puede hallar trabajando en la maquinaria pesada de la minería, por lo que es importante saber qué características debe cumplir el cable para cada trabajo al cual será sometido.

Finalmente, el cuidado y mantenimiento adecuado que se debe tener con el cable es preponderante para obtener una mayor vida útil, por lo tanto es importante saber cuál es la forma más adecuada de manejo y cuáles son los agentes que más lo dañan.

El cable de acero es una máquina simple, que está compuesto de un conjunto de elementos que transmiten fuerzas, movimientos y energía entre dos puntos, de una manera predeterminada para lograr un fin deseado. El conocimiento pleno del inherente potencial y uso de un cable de acero, es esencial para elegir el cable más adecuado para una faena o equipo, tomando en cuenta la gran cantidad de tipos de cables disponibles. Cada cable de acero, con sus variables de diámetro, construcción, calidad de alambre, torcido y su alma, se diseñan y fabrican cumpliendo las Normas Internacionales como:

- American Petroleum Institute (A.P.I. Standard 9A)
- American Federal Specification (RR-W-410D)
- American Society for Testing & Materials (A.S.T.M.)
- British Standards Institute (B.S.)
- Deutsches Normenausschuss (D.I.N.)
- International Organization for Standardization (I.S.O.)

Para su fabricación, se describe aquí un cable de acero indicando el nombre de cada elemento que lo compone, con el fin de tener un vocabulario de acuerdo a lo que a continuación se menciona.

### **A1.6.1 Cable de acero y sus elementos**

En la Figura A1.6 se distinguen los elementos descritos abajo:

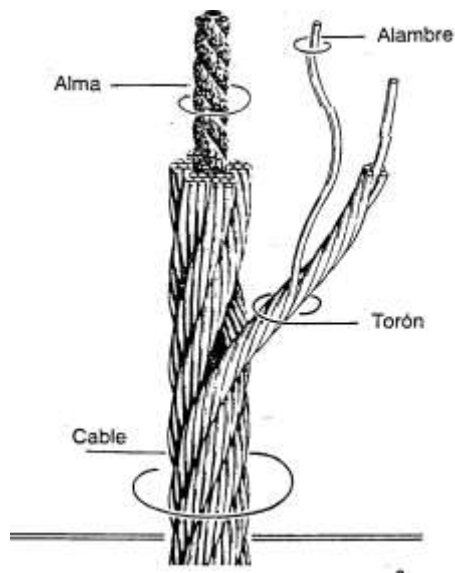
*Alambre:* Es el componente básico del cable de acero, el cual es fabricado en diversas calidades, según el uso al que se destine el cable final.

*Torón:* Está formado por un número de alambres de acuerdo a su construcción, que son enrollados helicoidalmente alrededor de un centro, en una o varias capas.



*Alma*: Es el eje central del cable donde se enrollan los torones. Esta alma puede ser de acero, fibras naturales o de polipropileno.

*Cable*: Es el producto final que está formado por varios torones, que son enrollados helicoidalmente alrededor de un alma.



**Figura A1.6 Diagrama de producción del cable de acero**

## **A1.6.2 Alambres para cables de acero**

Los alambres para la producción de cables de acero se clasifican en: tipos, clases y grados.

### **A1.6.2.1 Tipos**

Según su recubrimiento y terminación serán de tres tipos:

- Tipo NB: Negro brillante
- Tipo GT: Trefilados después de cincados
- Tipo G: Cincados después de trefilados

### **A1.6.2.2 Clases**

Según la cantidad de zinc por unidad de superficie serán de dos clases:

- Clase A: Cincado grueso (pesado)

· Clase Z: Cincado liviano

### A1.6.2.3 Grados

Según la calidad nominal del acero de sus alambres, definida por su resistencia nominal a la tracción, número de torsiones, doblados, adherencia del recubrimiento de zinc, uniformidad del recubrimiento de zinc y peso del recubrimiento de zinc, se designarán en la Tabla 4.

	<i>NOMBRE COMÚN</i>	<i>RESISTENCIA NOMINAL A LA TRACCIÓN [ Kg / mm<sup>2</sup> ]</i>
<b>Grado 1</b>	Acero de tracción	120 – 140
<b>Grado 2</b>	Arado suave	140 – 160
<b>Grado 3</b>	Arado	160 – 180
<b>Grado 4</b>	Arado mejorado	180 – 210
<b>Grado 5</b>	Arado extra mejorado	210 – 245
<b>Grado 6</b>	Siemens–Martin	70 mínimo
<b>Grado 7</b>	Alta resistencia	100 mínimo
<b>Grado 8</b>	Extra alta resistencia	135 mínimo

- El grado 1 sólo se usará con alambre sin zincar.
- Los grados del 2 a 5 se usarán con alambre con o sin cincado.
- Los grados del 6 al 8 se usarán sólo con alambre cincado.
- Cuando el alambre sea cincado se agregará una G en la designación.
- Los grados 1, 2, 3, 4 se considerarán corrientes.
- La calidad de los grados 5, 6, 7, 8 pueden ser establecidas por convenio entre comprador y productor o vendedor, el intervalo de resistencia a la tracción será inferior o igual a 20 Kg/mm<sup>2</sup>.

### A1.6.3 Designación de los alambres

- Los alambres para cables de acero se designan por su diámetro nominal, grado del acero, luego entre paréntesis se anota el intervalo de resistencia a la tracción, el tipo y clase de terminación.

### A1.6.4 Obtención de materiales

- Por trefilado en frío de aceros laminados en caliente. El acero utilizado debe cumplir requisitos tales como: Obtenerse por cualquier proceso básico, excepto el de convertidor Bessemer Thomas (aire o mezcla aire oxígeno).

- Tener un contenido de azufre inferior o igual a 0.050% y de fósforo inferior a 0.050%. En el caso que se requiera un alambre cincado, éste deberá aplicarse electrolíticamente o por inmersión en caliente, el zinc deberá tener una pureza igual o superior a 98.5%.

Los alambres obtenidos mediante este método son almacenados en rollos, bobinas o quesos. Los alambres que no han sido galvanizados son bañados en aceite para evitar su oxidación ya que esta influye en la resistencia a la tracción sobre todo en los alambres de menor diámetro. El resto de los alambres son almacenados sin ninguna clase de recubrimiento que los proteja.

### **A1.6.5 Formas, dimensiones y tolerancias**

Los alambres para cables de acero son de sección circular, con un diámetro que varía de 0.19 hasta 5 mm (la variación del diámetro depende del fabricante).

Se les realiza una comprobación de su diámetro con dos dimensiones, a 90° una de otra, en la misma sección del alambre, las cuales deben quedar dentro de las tolerancias dadas en la tabla referente a los grados.

### **A1.6.6 Selección**

El alambre para cable de acero se selecciona según el tipo de cable que se quiera fabricar, es así como se utiliza un alambre galvanizado para cables que trabajarán en ambientes húmedos. Depende también de la flexibilidad que se le quiera dar al cable, así como de la cantidad de alambres que llevara y del trato al cual será sometido éste.

### **A1.6.7 Ensayos**

Los alambres para cables de acero son sometidos a varios procesos de ensayo para comprobar su calidad. Los ensayos a los que son sometidos son:

- Ensayo de tracción
- Ensayo de torsión
- Ensayo de doblado
- Determinación de la adherencia del recubrimiento de zinc
- Ensayo de uniformidad del recubrimiento de zinc
- Determinación del peso del recubrimiento de zinc

### **A1.6.8 Torones**

Los Torones de un cable de acero, están formados por un determinado número de alambres enrollados helicoidalmente alrededor de un alambre central y dispuesto en una o más capas. A cada número y disposición de los alambres se les llama

CONSTRUCCION y son fabricados generalmente según el concepto moderno, en una sola operación con todos los alambres torcidos en el mismo sentido, conjuntamente en una forma paralela. En esta manera se evitan cruces y roces de los alambres en las capas interiores, que debilitan el cable y reducen su vida útil y puede fallar sin previo aviso.

Las principales construcciones de los torones, se pueden clasificar en tres grupos:

- Grupo 7: Incluyen construcciones que tienen desde 3 a 14 alambres.
- Grupo 19: Incluyen construcciones que tienen desde 15 a 26 alambres.
- Grupo 37: Incluyen construcciones que tienen desde 27 a 49 alambres.

El torón según el requerimiento del cable final, puede ser torcido a la derecha o a la izquierda.

### **A1.6.9 Almas**

El Alma es el eje central o núcleo de un cable, alrededor del cual van colocados los torones.

Su función es servir como base del cable, conservando su redondez, soportando la presión de los torones y manteniendo las distancias o espacios correctos entre ellos. Hay dos tipos principales de almas:

- Fibra (naturales y sintéticas)
- Acero (de torón o independiente)
- *Alma de fibras naturales*

Éstas pueden ser "Sisal" o "Manila", que son fibras largas y duras. Existen también de "Yute", "Cáñamo" o "Algodón", pero no se recomiendan por ser blandas y se descomponen rápidamente, pero sí está permitido usar estas fibras como un relleno en ciertas aplicaciones y construcciones.

En general las almas de fibras naturales se usan en cables de ingeniería (ascensores y cables de izaje de minas), porque amortiguan las cargas y descargas por aceleraciones o frenadas bruscas.

Se recomienda no usar en ambientes húmedos y/o altas temperaturas (sobre 80°C).

#### **A1.6.9.1 Alma de fibras sintéticas**

Se han probado varias fibras sintéticas, pero lo más satisfactorio hasta hoy día es el "polipropileno". Este material tiene características físicas muy similares a "manila" o "sisal", y tiene una resistencia muy superior a la descomposición provocada por la salinidad. Su única desventaja es ser un material muy abrasivo entre sí, por lo tanto, tiende a perder su consistencia si está sujeto a muchos ciclos

de operación sobre poleas con mucha tensión. Por esta razón un alma de "polipropileno" no es recomendable en cables para uso en ascensores o piques de minas. Generalmente se usa en cables galvanizados para pesca y faenas marítimas, dando en estas actividades excelentes resultados.

No debe emplearse en ambientes de altas temperaturas.

#### **A1.6.9.2 Alma de acero de torón**

Un cable con un alma de torón es un cable donde el alma está formada por un solo torón, cuya construcción generalmente es la misma que los torones exteriores del cable. Principalmente, esta configuración corresponde a cables cuyo diámetro es inferior a 9.5 mm (3/8").

#### **A1.6.9.3 Alma de acero Independiente**

Es en realidad otro cable de acero en el núcleo o centro del cable y generalmente su construcción es de 7 torones con 7 alambres cada uno (7 x 7). Un cable de acero con un alma de acero de torón o independiente, tiene una resistencia a la tracción y al aplastamiento superior a un cable con alma de fibra, pero tiene una menor elasticidad.

Se recomienda el uso de cables con alma de acero, donde hay altas temperaturas (superiores a 80°C) como en hornos de fundición o donde existan altas presiones sobre el cable, como por ejemplo en los equipos de perforación petrolera, palas o dragas mecánicas.

#### **A1.6.9.4 Alma de acero plastificada**

Últimamente se ha desarrollado alma de acero plastificada, cuya característica principal radica en eliminar el roce entre los alambres del alma con los alambres del torón del cable (su uso principal está en los cables compactados).

### **A1.6.10 Cables**

Como se ha dicho, el cable es el producto final y se identifica por el número de torones y el número de 2 alambres de cada torón, su tipo de alma y si son negros o galvanizados.

#### **A1.6.10.1 Grupos**

Los principales grupos de cables son:

- Grupo 6x7 (con 3 a 14 alambres por torón)

Aunque hay varias alternativas en esta serie, la más común es donde cada uno de los seis torones que forman el cable, está construido de una sola hilera de alambres colocado alrededor de un alambre central. Debido a que el número de alambres (7) que forman el torón es reducido, nos encontramos con una construcción de cable armado por alambres gruesos que son muy resistentes a la abrasión, pero no recomendable para aplicaciones donde requiere flexibilidad.

Diámetro mínimo de poleas y tambores. 42 veces el diámetro del cable.

- Grupo 6X19 (Con 15 a 26 Alambres por Torón)

Existen varias combinaciones y construcciones de cables en este grupo, los torones se construyen usando de 15 hasta 26 alambres, lo que facilita la selección del cable más adecuado para un trabajo determinado.

La construcción 6 x 19 está formada por seis torones de 25 alambres cada uno, que están integrados por dos capas de alambres principales colocados alrededor de un alambre central, con el doble de alambres en la capa exterior (12) a los que tienen la capa interior (6). Entre estas dos capas se colocan 6 alambres más delgados, como relleno, para darle la posición adecuada a los alambres de la capa exterior.

Diámetro mínimo de poleas y tambores: 26 veces el diámetro del cable. Con el pasar del tiempo ha surgido otra construcción que está remplazando el diseño anterior debido a que se ha demostrado que este nuevo diseño ofrece un mayor rendimiento y utilidad para los usuarios.

La construcción 6 x 26 está formada por seis torones con 26 alambres cada uno, que están integrados por tres capas de alambres colocados alrededor de un alambre central. En la capa exterior hay 10 alambres la capa intermedia hay 5 alambres de un diámetro y 5 alambres de un diámetro interior puestos en una manera alternada y la capa interior también tiene 5 alambres puestos sobre un alambre central.

Aunque esta construcción tiene una flexibilidad un poco menor que la construcción antigua (6 x 25), la construcción 6 x 26 tiene una sección de acero más sólida y alambres exteriores más gruesos, por lo tanto, tiene una mayor resistencia a la compresión y a la abrasión.

Diámetro mínimo de poleas y tambores. 30 veces el diámetro del cable. En este grupo hay una tercera construcción que tiene un alto volumen de consumo en trabajos bien definidos y ésta se llama 6x19 Seale.

Esta construcción está formada por 6 torones de 19 alambres cada uno, que están integrados por dos capas de alambres del mismo número (9), colocados alrededor de un alambre central. En este caso, los alambres de la capa exterior son más gruesos que los alambres de la hilera interno, con el objeto de darle una mayor

resistencia a la abrasión, pero su flexibilidad es menor que los 6 x 26, aunque no son tan rígidos como la construcción 6 x 7.

Diámetro mínimo de poleas y tambores. 34 veces el diámetro del cable.

- Grupo 6 x 37 (Con 27 a 49 Alambres por Torón)

Las construcciones de este equipo son más flexibles que las de los grupos 6 x 7 y 6 x 19, debido a que tienen un mayor número de alambres por torón. Este tipo de cables se utiliza cuando se requiere mucha flexibilidad.

No se recomiendan cuando son sometidos a una abrasión severa, porque el diámetro de sus alambres externos es pequeño.

En este grupo la construcción 6 x 37 es generalmente encontrada en cables con diámetros menores a 9 mm. En diámetros superiores a 8 mm los cables son fabricados con el concepto moderno con todos los alambres torcidos conjuntamente en una forma paralela en cada torón, evitando roce interno y logrando una mayor útil.

Como existen varias construcciones en este grupo, se presentan las de mayor uso y sus rangos de diámetros para obtener el óptimo rendimiento.

Diámetro mínimo de poleas y tambores. 23 veces el diámetro del cable.

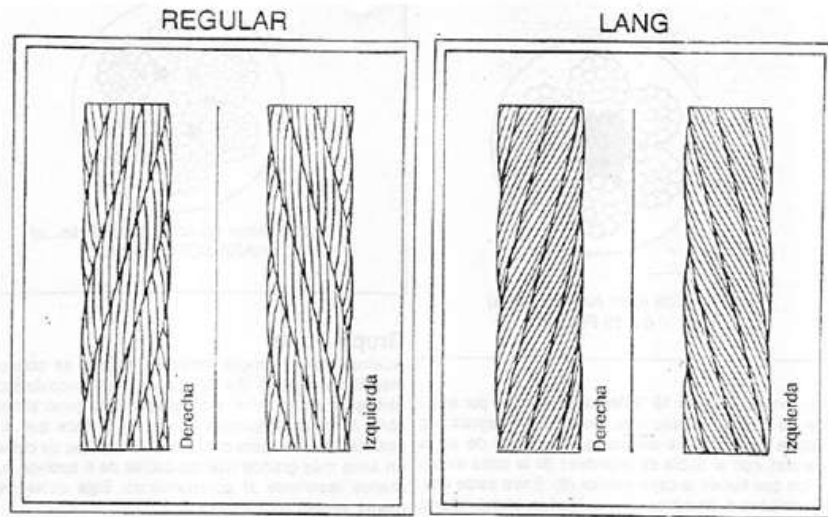
- Grupo 8 x 19

Además de los grupos antes señalados, es conveniente mencionar las series 8 x 19 que están fabricados con 8 torones alrededor de un alma (generalmente de fibra). Al utilizar 8 torones en vez de 6, hace que el cable sea más flexible, pero debido a que este tipo de cable tiene un alma más grande que los cables de 6 torones, lo hace menos resistente al aplastamiento.

Existen construcciones en esta serie tanto con almas de fibra, almas de acero y almas de acero plastificadas para usos bien especificados sobre los cuales hay antecedentes más adelante.

### **A1.6.10.2 Torcido de los cables**

Los cables generalmente se fabrican en torcido regular y torcido lang, en los cables con torcido regular, los alambres del torón están torcidos en dirección opuesta a la dirección de los torones en el cable. Los alambres y los torones en un cable torcido lang están torcidos en la misma dirección de los torones en el cable (Figura A1.7).



**Figura A1.7 Tipos de torcido de cables**

Los cables con torcido lang, son ligeramente más flexibles y muy resistentes a la abrasión y fatiga, pero tienen el inconveniente de tener tendencia a destorcerse por lo que únicamente deberán utilizarse en aquellas aplicaciones en que ambos extremos del cable estén fijos y no le permitan girar sobre sí mismos.

Los cables con torcido regular son más fáciles de manejar, son menos susceptibles a la formación de "cocas" y son más resistentes al aplastamiento y torsión. Presentan menos tendencia a destorcerse al aplicarles cargas aunque no tengan fijos ambos extremos.

Los cables pueden fabricarse en torcido derecho o izquierdo, tanto en el torcido regular como en el lang. En la mayoría de los casos, no afecta el que se use un cable con torcido derecho o izquierdo. Los cables con torcido derecho se conocen como los de "fabricación normal", por lo tanto, son los que se utilizan en la mayoría de las aplicaciones. Sin embargo, existen aplicaciones en que los cables con torcido izquierdo proporcionan ciertas ventajas, como en el caso de las máquinas perforadoras de percusión, al tender a apretar las roscas de los aparejos.

También existen otros tipos de torcidos conocidos como el torcido alternado o herringbone que consiste en alternar torones regulares y lang. Estos tipos de cables tienen muy pocas aplicaciones.

### **A1.6.10.3 Preformado**

El concepto de preformado significa que tanto los alambres individuales como los torones tienen la forma helicoidal exacta que llevarán en el cable terminado. Las principales ventajas del preformado son mayor flexibilidad, facilidad de manejo,



superior resistencia a las "cocas" y distribución uniforme de la carga entre todos los alambres y torones.

En los cables no preformados, los torones son mantenidos en su sitio a la fuerza, por lo que están sujetos grandes tensiones internas. En un cable preformado los alambres y torones están en reposo, dado que su forma definitiva le fue aplicada durante el proceso de fabricación.

La eliminación de esfuerzos internos en el cable preformado garantiza una mayor vida útil. Por las razones mencionadas, se fabrican según las normas de los cables en estado preformado.

#### **A1.6.10.4 Selección del cable apropiado**

La clave del problema de la selección del cable más indicado para cada trabajo está en equilibrar correctamente los siguientes factores principales:

- Carga de rotura (Resistencia)
- Resistencia a las flexiones y vibraciones (fatiga)
- Resistencia a la abrasión
- Resistencia al aplastamiento
- Resistencia de reserva
- Exposición a la corrosión

Muy pocas veces es posible seleccionar un cable que cumpla al máximo con los requerimientos de resistencia a la abrasión y aplastamiento, y posea también la máxima resistencia a la fatiga. En general, se debe privilegiar las características más sensibles a la operación que se deba realizar a cambio de una disminución relativa en aquellas características menos relevantes para el fin predeterminado.

### **A1.6.11 Resistencia**

#### **A1.6.11.1 Carga de Rotura**

El primer paso consiste en determinar la máxima carga que el cable deberá soportar, teniendo en cuenta no sólo la carga estática, sino también las cargas causadas por arranques y paradas repentinas, cargas de impacto, altas velocidades, fricción en poleas, etc. Por razones de seguridad se recomienda normalmente multiplicar, la carga de trabajo por un factor, indicado en la tabla de factor de seguridad.

## **A1.6.11.2 Fatiga**

### **A1.6.11.2.1 Resistencia a las flexiones y vibraciones**

Si un trozo de alambre se dobla varias veces, eventualmente se romperá. Esto es debido al fenómeno llamado "fatiga por flexión". Este mismo fenómeno tiene lugar siempre que un cable de acero se dobla alrededor de poleas, tambores o rodillos. A menor radio de curvatura mayor es la acción de la fatiga. Los aumentos de la velocidad de operación y las flexiones en sentidos contrarios también aumentan este efecto. El mismo fenómeno es producido por vibraciones en cualquier parte del cable.

La fatiga se reduce si las poleas o tambores tienen al menos los diámetros mínimos aceptables para cada tipo de cable.



**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 DEL  
TRANSPORTE**



[www.imt.mx](http://www.imt.mx)  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)