

## Recomendaciones para la rehabilitación y protección contra la corrosión de un puente de acero de 100 años de antigüedad (Durgadee) sobre un río muy contaminado cerca de Mumbai, India

S. S. Bhonge<sup>1</sup>, P. Dalwi<sup>2</sup>,  
J. K. Kulkarni<sup>3</sup>, S. K. Manjrekar<sup>4</sup>

\*Contact author: [bhongess@gmail.com](mailto:bhongess@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i2.476>

Recepción: 09/12/2019 | Aceptación: 15/04/2020 | Publicación: 30/04/2020

### RESUMEN

Este artículo describe la propuesta de rehabilitación, metodología de evaluación de daño y las posibles medidas correctivas para el puente de acero de 100 años en el río Ulhas, cerca de Mumbai. El puente se construyó en el año 1914 aparentemente durante la era británica, ahora puente patrimonio ya que se construyó con una disposición estructural única de cubierta de arco plano y vigas de celosía con verticales. Después de una auditoría estructural en el año 2000, se reveló el deterioro de las piezas de acero y concreto iniciado desde hace mucho tiempo debido a la atmósfera húmeda y la contaminación en el área. El puente Durgadee mostró varios signos de daño como grietas importantes en los pilares de mampostería, corrosión intensa de los miembros estructurales de acero dulce (MS), disfuncionalidad de las juntas de expansión y los cojinetes, falla de las placas de techo del arco plano, desprendimiento de concreto y refuerzo expuesto, etc. El artículo discute recomendaciones para rehabilitación y protección contra la corrosión

**Keywords:** protección contra la corrosión; rehabilitación; daño; estructura de acero; LCNR.

**Citar como:** Bhonge, S. S., Dalwi, Pradeep, Kulkarni, J. K., Manjrekar, S. K. (2020), "Recomendaciones para la rehabilitación y protección contra la corrosión de un puente de acero de 100 años de antigüedad (Durgadee) sobre un río muy contaminado cerca de Mumbai, India", Revista ALCONPAT, 10 (2), pp. 259 – 273, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i2.476>

<sup>1</sup> The Superintending Engineer, Designs Circle (BR), P.W.D., Govt of Maharashtra, India.

<sup>2</sup> Executive Engineer, PW Division Thane, India.

<sup>3</sup> Retired Executive Engineer, MIDC, Govt of Maharashtra, Mumbai, India.

<sup>4</sup> Director, Sunanada Speciality coatings, Mumbai, Hon. Member ACI India, India.

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2020.

## **Recommendations for rehabilitation and corrosion protection of a 100-year-old steel bridge (Durgadee) across heavily polluted river near Mumbai, India**

### **ABSTRACT**

This paper describes the rehabilitation proposal, methodology of evaluation of distress and likely remedial measures for 100 years old steel bridge on Ulhas river, near Mumbai. The bridge is constructed in year 1914 during British era apparently now heritage bridge as it was constructed with unique structural arrangement of jack arch decking and warren truss girder with verticals. After structural audit in 2000, it revealed the deterioration of steel parts and concrete initiated long back because of humid atmosphere and pollution in the area. Durgadee bridge showed various signs of bridge distress like major cracks in masonry abutments, heavy corrosion of Mild Steel (MS) structural members, non -functioning of expansion joints and bearings, failure of jack arch roof plates, de-bonding of concrete and exposed reinforcement etc. Paper discusses recommendations for rehabilitation and corrosion protection.

**Keywords:** corrosion protection; rehabilitation; distress; steel structure; LCNR

## **Recomendações para reabilitação e proteção contra a corrosão de uma ponte de aço de 100 anos (Durgadee) sobre um rio fortemente poluído perto de Mumbai, Índia**

### **RESUMO**

Este artigo descreve a proposta de reabilitação, metodologia de avaliação de sofrimento e prováveis medidas corretivas para uma ponte de aço de 100 anos no rio Ulhas, perto de Mumbai. A ponte é construída no ano de 1914, durante a era britânica, aparentemente agora como ponte patrimonial, uma vez que foi construída com um arranjo estrutural exclusivo de decks em arco e viga de treliça com verticais. Após a auditoria estrutural em 2000, revelou a deterioração das peças de aço e concreto iniciadas há muito tempo por causa da atmosfera úmida e poluição na área. A ponte Durgadee mostrou vários sinais de desgaste da ponte, como grandes rachaduras nos pilares de alvenaria, corrosão pesada dos membros estruturais de Mild Steel (MS), não funcionamento das juntas de expansão e rolamentos, falha das placas do telhado do arco maciço, desmoldagem do concreto e reforço exposto O documento discute recomendações para reabilitação e proteção contra corrosão.

**Palavras chave:** proteção contra corrosão; reabilitação; angústia; estrutura de ferro; LCNR.

### **ABREVIATURAS Y ACRONIMOS:**

Estructura de Puente Patrimonio: Estructura reconocida por el Gobierno del Estado por su importancia histórica y estética.

PWD: Departamento de Obras Públicas del Gobierno del Estado a cargo de la construcción y mantenimiento de la infraestructura.

MPCB: Oficina de Control de Contaminación del Estado de Maharashtra que monitorea la contaminación.

LCNR: Revestimiento protector de reticulantes de nylon de cadena larga.

IRC: Congreso de carreteras de la India, una organización en India que controla los estándares de diseño de carreteras y puentes.

## 1. INTRODUCCIÓN

Este artículo describe la necesidad de una propuesta de rehabilitación, una metodología de evaluación de daño y posibles medidas correctivas para el puente de acero de 100 años (también conocido como puente Durgadee) en el río Ulhas en el km 1/800 en la carretera Bhiwandi, Kalyan, cerca de Mumbai.

El puente se construyó en el año 1914 aparentemente durante la era británica, ahora puente patrimonio, ya que fue construido por ingenieros británicos con una disposición estructural única de cubierta de arco plano y viga de celosía Warren con verticales. El puente es una estructura de acero con dos columnas rellenas de concreto con superestructura de acero que consiste en una lámina de soporte de cubierta tipo arco plano.

Las estructuras de acero en ambiente severo deben enfrentar una variedad de fuerzas ambientales. A pesar de diversos procesos de deterioro, el ataque químico aún representa severos desafíos y problemas para muchas importantes estructuras de acero. El rápido desarrollo de la tecnología en los últimos años ha facilitado el control de los procesos de deterioro.

El acero estructural ofrece varias ventajas:

**Alta resistencia:** el límite elástico del acero en tensión y compresión es casi el mismo, lo que nos ayuda en el uso del acero como puentes de claros largos y estructuras altas.

**Durabilidad:** esta propiedad del acero permite una deformación progresiva sin una pérdida significativa de resistencia y rigidez, incluida la resistencia a la acción de la intemperie.

**Prefabricación:** las piezas de acero se elaboran en fábrica bajo estricta supervisión y control de calidad para que solo haya pequeñas variaciones en las propiedades del material. El material puede transportarse en el sitio y ensamblarse, lo que ayuda a una construcción rápida y garantiza una mejor calidad.

**Desmontable:** la estructura de acero se puede desmontar y reutilizar si es necesario. Se puede reciclar fácilmente reduciendo el desperdicio. Incluso las reparaciones y la adaptación de la estructura de acero y su refuerzo son mucho más simples y fáciles que la estructura de hormigón.

**Limitaciones:** la estructura de acero es susceptible a la corrosión cuando se expone al aire y al agua. Aunque el acero estructural no es combustible, pierden su fuerza rápidamente durante el incendio. Estéticamente, la estructura de acero no da una apariencia agradable. El costo de la estructura de acero es mayor que el del concreto.

La elección de la sección en una estructura de acero se rige por:

- Área de sección transversal, para resistir la tensión o la compresión.
- Módulo de sección para resistir la tensión de flexión y corte.
- El radio de giro para proporcionar rigidez al pandeo en compresión.

## 2. ESCENARIO GENERAL EN LA INDIA

India alberga varias características geográficas, como ríos, montañas, valles, mesetas, largas costas, desiertos y terrenos llanos. India es el séptimo país más grande del mundo y cubre un área total de 3,287,263 km<sup>2</sup>. La costa del país se extiende por 7,517 km.

India tiene una de las redes de carreteras más grandes del mundo con aproximadamente 5,900,000 km de longitud de carreteras, incluidas las autopistas nacionales (NH), vías rápidas, las autopistas estatales, las carreteras de distrito, otras carreteras de distrito y las de aldeas. En India, la infraestructura vial se utiliza para transportar más del 60% del total de mercancías y el 85% del tráfico total de pasajeros. India ha inventariado más de 400,000 puentes / estructuras construidas a través de varios organismos gubernamentales.

Los puentes en las zonas costeras se construyeron frente a varios factores adversos, como la dificultad de desviar el camino del agua, los requisitos de navegación, las alineaciones de los

aproxches, los problemas de cimentación, las condiciones salinas, la dificultad de construcción de la superestructura y los bancos de aproximación, los requisitos de navegación. Estos, a su vez, a veces requerían puentes con largos tramos que implicaban procedimientos de construcción sofisticados. Los cimientos generalmente eran profundos en los puentes del arroyo y el agua estancada representaba un problema importante en la construcción.

Debido al aumento extraordinario en las densidades de tráfico, particularmente en y alrededor de las principales ciudades del estado, el Gobierno ha emprendido un programa de construcción de pasos elevados, pasos subterráneos y carreteras de desvío. Pero antes de una decisión de nueva construcción, se da prioridad a la rehabilitación y la retro adaptación de puentes existentes. Como el puente Durgadee ha superado y demostrado su durabilidad debido a su robusta disposición estructural. Un puente después de la rehabilitación, puede actuar como puente para LMV (vehículos ligeros y medianos) y usuarios de la ciudad de Kalyan.

### 3. ESCENARIO PRESENTE DEL PUENTE DURGADEE

Kalyan está cerca de Mumbai y es un lugar histórico y fue un famoso centro de comercio debido a la costa del arroyo Kalyan. Existe un fuerte conocido como el fuerte Durgadee a lo largo del lado del puente que tiene alrededor de 400 años. Del mismo modo, Bhiwandi es un lugar de Taluka e igualmente importante Centro de Comercio histórico. En los primeros años del siglo XIX, el gobierno británico decidió conectar Kalyan y Bhiwandi a través de un puente de acero que cruce el río Ullas cerca del fuerte Durgadee. La construcción del puente comenzó en algún momento del año 1908 y se contrató en 1914. (Ubicación del sitio del puente: 19 °14'43" N 73°6'59" E).

- **Estribos:** son estribos de mampostería de escombros en ambos lados, sin embargo, el estribo en el lado Bhiwandi parece estar en condiciones muy peligrosas y necesita ser reemplazado.
- **El puente** consta de 10 tramos de 36 m cada uno con una longitud total de 360 m y superestructura con disposición de armadura pasante y, un arreglo de cubierta: hay un sistema de piso continuo de arco plano sobre la viga del larguero para los 10 tramos. Los signos de deterioro de la capa de BT muestran que existe una necesidad inmediata de reemplazo. Las juntas de dilatación del puente están completamente dañadas y bloqueadas.
- **Revestimiento del camino:** Existe necesidad inmediata de desmantelar el revestimiento bituminoso eliminando y limpiando los escombros en el rodamiento del puente y sobre la lámina de cubierta del arco plano. La condición de las placas de acero de la cubierta en el arco plano debido a la corrosión sería visible solo después de quitar la capa de desgaste y las capas debajo. El mapeo de daños de la superestructura es necesario exponiendo uno o dos tramos después de desmantelar el revestimiento.
- **Rodamientos:** El tipo de rodamiento es de tipo de balancín y rodillo de acero y no es visible debido a la gran cantidad de escombros depositados en la ubicación del rodamiento. La disposición de los rodamientos de tipo balancín / rodillo no funciona debido a la falta de mantenimiento.
- **Subestructura:** Consiste en una columna de acero doble hueca llena de concreto y atada con arriostramientos transversales.
- **Cimentación del puente:** Consiste en una pila de cimentación con revestimientos de acero. El revestimiento MS en la zona de salpicadura, es decir, la porción entre los niveles de agua alto y bajo, muestra corrosión extrema.
- **Disposiciones actuales de protección contra la corrosión:** No se brinda protección a las superficies expuestas contra la corrosión / carbonatación y otras contaminaciones atmosféricas. Además, de lo anterior, las causas generales de envejecimiento en la estructura han jugado un papel importante en el daño de la estructura y la reducción de la vida útil.



Después de la auditoría estructural en el año 2000, se reveló el deterioro de las piezas de acero y concreto iniciado hace mucho tiempo debido a la atmósfera húmeda en el área de Kalyan, carbonatación del concreto, entrada de cloruros, lixiviación, ataque por sulfato, que conducen a la corrosión y, en última instancia, a la reducción de la vida de la estructura. El puente está cerrado para el tráfico desde 2001. La Figura 1 muestra la ubicación del puente por Google maps.

La vida útil de cualquier estructura del puente estará sujeta a cambios químicos y físicos. Una estructura duradera es aquella en la que estos cambios ocurren a un ritmo más lento que no afecta negativamente su rendimiento dentro de su vida útil prevista. Según los códigos de la India y otros códigos contemporáneos, las estructuras de acero están diseñadas para una vida operativa libre de mantenimiento de 60 a 100 años. Sin embargo, las diversas estructuras en y alrededor del área de Mumbai muestran un deterioro severo (o falla en muchos casos) en un lapso muy corto debido al ambiente agresivo y la humedad en la atmósfera. En el caso presente, el ambiente generalmente agresivo agregado por el agua contaminada del río Ulhas está jugando un papel importante en el deterioro.

Según los estudios, el agua del río no puede considerarse segura incluso para fines de riego. El contenido de cloruro en el efluente de las aguas residuales fue de un valor promedio de 1,377 mg / L. Los resultados indican que el contenido de cloruro está muy por encima del límite aceptable de 200 mg / L establecido por la OMS. Los resultados indicaron un alto nivel de contaminación debido a metales pesados tóxicos como el cromo (Cr), cadmio (Cd), níquel 6 (Ni), zinc (Zn), cobre (Cu), plomo (Pb) y hierro (Fe). Se encontró que la concentración de todos estos metales pesados era muy superior al nivel de toxicidad aguda.

Debido a la fuerte contaminación en el río Ulhas, al agua, la humedad y debido a la cercanía de la orilla del mar, el estado del puente está muy deteriorado. Hay una fuerte corrosión de las piezas de acero utilizadas en la estructura. La estructura debe haber sido diseñada para el agua normal del río en 1914. Sin embargo, se ve que el color del agua del río es negruzco, lo que puede deberse a la mezcla de las aguas residuales de las áreas urbanas circundantes y los desechos industriales. El agua del río contiene productos químicos orgánicos e inorgánicos además de varios gases como H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y NH<sub>3</sub>, etc., que se forman debido a la descomposición de las aguas residuales. Esto conduce a un deterioro más rápido de la estructura de acero y el concreto.



Figura 1. Mapa del Puente en Google.

#### 4. DAÑOS OBSERVADOS EN EL PUENTE DURGADEE

El puente de Durgadee mostró varios signos de daño como se describe abajo:

- Grietas de menores a mayores en estribos de mampostería en ambos lados. El estribo del lado Bhiwandi está en condiciones peligrosas a punto de ceder.
- No hay funcionamiento de las juntas de dilatación y rodamientos.
- Corrosión fuerte de los miembros estructurales de MS. Sin embargo, se observó una pérdida de sección de hasta 3 mm debido a la corrosión en menos del 10% del área.
- Fugas a través de la cubierta Jack Arch y cerca de los rodamientos.
- La falla y el deterioro de las placas de techo Jack Arch para la cubierta del puente, así como el relleno de concreto sobre él, está incluido en el desgaste.
- Despegado de concreto y armaduras expuestas en concreto debajo de la cubierta de desgaste.

El Departamento de Transporte del Estado (llamado como PWD) ya ha detenido el tráfico de vehículos en el puente desde 2001.

#### 5. PROYECTO DE POLÍTICA / ETAPAS PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN Y REPARACIÓN

Todo el programa de restauración de este puente se puede dividir en las siguientes partes.

##### 1. Estudio de registros antiguos relacionados con el puente

- Verificación del trabajo de diseño original realizado por PWD, especificaciones de materiales utilizados durante el período de construcción.
- Estudio de restauración, reparación realizada por PWD de vez en cuando en el pasado.
- Mapeo detallado, dimensiones y preparación de dibujos detallados para la estructura del Puente Viejo con ayuda de Drone y levantamiento físico. Incluirá el uso de drones para la preparación de dibujos por Autocad y dibujos acotados que serán necesarios para el análisis y modelado estructural.

##### 2. Inspección

El puente de acero será inspeccionado con el propósito de identificar cualquier defecto que pueda estar presente en la estructura y establecer las causas de estos defectos. Se prevé que los defectos que puedan afectar la resistencia, la seguridad o la capacidad de servicio de un puente se atiendan como parte del ciclo de trabajo de reparación y mantenimiento.

- Fotografías (tanto recientes como históricas); Los informes de inspección más recientes; Historial de mantenimiento reciente.
- Cálculos de fuerza y calificación. El estudio de la condición del puente conducirá a la estimación de la vida residual de la estructura.
- Una inspección visual cubrirá sistemáticamente toda la superficie de la estructura de acero en espacios cerrados prestando especial atención a estas áreas.
- Los siguientes puntos son críticos para el éxito de una inspección de un puente de acero:
- Se deben tomar notas detalladas del estado del recubrimiento protector en todas las partes de la estructura utilizando un método estándar de evaluación.
- Deben buscarse signos de manchas de óxido alrededor de las cabezas de los sujetadores. Esto puede indicar que están sueltos.
- Se deben tener en cuenta los sujetadores que no cumplen con los estándares de instalación adecuados.
- El perno o remache con mayor carga en una junta debe examinarse cuidadosamente en áreas que se espera que sean susceptibles a la fatiga.

- La presencia de una posible grieta debe confirmarse mediante pruebas no destructivas, es probable que las técnicas de penetración de colorante y partículas magnéticas se utilicen en primera instancia. También se pueden usar métodos radiográficos y ultrasónicos para casos específicos.
- Las deformaciones y distorsiones a menudo aparecerán como pintura agrietada o descamada. Se deben registrar las mediciones de cualquier desviación significativa de la línea verdadera.
- La ubicación y la descripción de todos los defectos deben registrarse metódicamente para permitir una evaluación adecuada de sus efectos y su posterior monitoreo o reparación.

### 3. Estudio de los parámetros de corrosión relacionados con varios componentes del puente que es el mapeo de corrosión.

### 4. Varios tipos de NDT (pruebas no destructivas) para evaluar el daño

### 5. Pruebas para el agua de río.

### 6. Planificación de plataforma de trabajo para trabajo y maquinaria

Se necesitará una plataforma suspendida o colgante para trabajar debajo de la estructura. Se prepararán dibujos detallados para los casos anteriores considerando la situación del sitio y la metodología de reparación. Idealmente, el pontón flotante con bote pequeño junto con la máquina cabrestante será muy útil para la ejecución rápida del trabajo. La Figura 2 es una foto del puente que muestra la ubicación de la junta de rodamiento y expansión.

### 7. Evaluación subacuática de la parte de la subestructura y los cimientos.

Mapeo de daños. Se necesitarán tipos especiales de cámaras y buzos certificados debido a la turbidez debida a la contaminación. Implicará la videografía subacuática y la toma de fotografías y detalles de la revisión, envío de éstas en copias digitales y un informe del estado de la revisión subacuática. El número total de muelles a ser revisados en el puente será de 9.



Figura 2. Foto del puente que muestra la ubicación de la junta de rodamiento y expansión

### 8. Evaluación de los defectos

Todos los defectos observados influirán en la resistencia o capacidad de servicio del puente. Los defectos que reducen la capacidad o durabilidad del puente requieren medidas correctivas. El



propósito de la evaluación es determinar la importancia relativa de cada defecto para que la capacidad de carga del puente pueda ser reevaluada y para que cualquier trabajo de reparación requerido tenga la prioridad adecuada. La evaluación también ayudará a determinar estrategias futuras para mantenimiento o reemplazo.

La evaluación del efecto de algunos defectos requiere una comprensión exhaustiva del comportamiento de la estructura en cuestión. Es necesario apreciar la interacción de los elementos portadores de carga primarios y secundarios, el efecto de juntas imperfectamente fijadas y la posible presencia de rutas de carga alternativas. Es necesario un conocimiento básico de la fatiga del metal y la mecánica de grietas para evaluar problemas de esta naturaleza.

### **9. Análisis de factores para decidir la metodología de rehabilitación / reforzamiento**

La reparación estructural y el mantenimiento de las estructuras de acero incluyen el reemplazo y mantenimiento de recubrimientos protectores, la reparación de miembros corroídos, el reemplazo de miembros dañados y fijaciones defectuosas, y el trabajo de reparación asociado con el agrietamiento por fatiga. Estos problemas han sido identificados durante el proceso de inspección y evaluación.

El comportamiento de fatiga está muy influenciado por la presencia de concentraciones de esfuerzo como agujeros, soldaduras, cambios bruscos de forma, grietas u otros defectos.

### **10. Evaluación de vida residual y calificación de puentes**

- a) Evaluación de vida residual y calificación del puente según el análisis de diseño antes y después de la rehabilitación.
- b) Evaluaciones para mejorar la vida residual en más de 15 a 20 años.
- c) Evaluar la capacidad de carga existente que puede variar de 30 R a 60 R para decidir la idoneidad del puente para el tráfico de vehículos.

### **11. Plan de acción para la protección contra la corrosión.**

La evaluación detallada del material corroído se llevará a cabo mediante pruebas de laboratorio en ICT (Instituto de Tecnología Química), Matunga Mumbai, India y pruebas metalúrgicas de acero en el Departamento de Metalurgia, IIT (Instituto Indio de Tecnología) Powai Mumbai, India.

Planificar las diversas tecnologías y materiales disponibles para reparación y su metodología con referencia a consideraciones económicas. Sistema de protección contra la corrosión para proteger el puente durante más de 25 años, incluido el sistema de ánodo de sacrificio para evitar una mayor corrosión y su acción dañina.

### **12. Selección de medidas apropiadas de reparación, restauración y rehabilitación de diversas estructuras.**

## **6. METODOLOGÍA PROPUESTA: CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS DE SALIDA A CONSIDERAR**

### **6.1 Reparación de vigas de acero**

La Figura 3 es una foto del puente que muestra la estructura tipo truss de Warren. El trabajo de reparación de vigas de acero construidas restaurando o reemplazando elementos dañados o deteriorados incluye, pero no se limita a, proporcionar soportes temporales para el levantamiento; modificar vigas para aceptar cargas de elevación; soportar o reducir temporalmente las cargas transportadas por vigas; desconectar o quitar elementos de vigas quitando pernos o remaches; perforar y escariar agujeros; rectificadas para proporcionar el acabado requerido o tolerancias en superficies de acero; hacer reparaciones menores a las cubiertas dentro del área de trabajo; montaje



de elementos reparados o reemplazados y elementos incidentales mediante soldadura o atornillado de alta resistencia a la tracción; y preparando superficies dañadas o dejadas al descubierto por el trabajo y aplicando una capa de pintura.



Figura 3. Foto del puente que muestra la estructura tipo Warren Truss.

## 6.2 Falla del revestimiento protector

Es raro que una capa protectora dure más que la vida de la estructura. La descomposición de la pintura o la pérdida de cualquier recubrimiento es inevitable y debe anticiparse. Esto generalmente resulta de la condensación y puede aumentar por la absorción de humedad por sales transportadas por el viento en áreas que no están sujetas a la lluvia. La acumulación de escombros, excrementos de pájaros, escamas, pintura, etc. retendrá la humedad y promoverá la corrosión.

Además de la falla eventual de un sistema de recubrimiento por intemperie, la falla prematura puede resultar de:

- Pérdida de adherencia del recubrimiento debido a una especificación o aplicación defectuosa;
- Incompatibilidad de capas sucesivas;
- Oxidación de la subcapa debido a una preparación inadecuada de la superficie y / o pintura de imprimación;
- Falla localizada debido a daños mecánicos
- Construcción de película inadecuada en bordes afilados, soldaduras y áreas de sombra de pintura.

## 6.3 Pérdida de sección

Cuando no se le ha dado mantenimiento al revestimiento protector o no se ha reparado un área de revestimiento dañado, generalmente sigue la corrosión que resulta en una pérdida de sección. La velocidad de corrosión depende en gran medida de la proximidad del puente a la costa.

La corrosión también puede ser acelerada por las siguientes situaciones:

- Presencia de grietas y hendiduras.
- Diferentes metales en contacto
- Estancamiento de humedad.
- Concentración de sales por evaporación; óxido y escombros.

- La pérdida de sección también puede ser el resultado del desgaste de los pasadores o de la abrasión mecánica donde los miembros se rozan.

#### **6.4 Fijaciones flojas o defectuosas**

Ya sea que opere en cizalla o en una junta de agarre de fricción, las fijaciones deben instalarse correctamente para funcionar correctamente. A veces, debido a la vibración excesiva, el sobreesfuerzo, la corrosión o la instalación incorrecta, las fijaciones pueden aflojarse y deben reemplazarse.

Los problemas específicos típicamente asociados con varios tipos de fijaciones son:

- Los pernos de acero suave tienden a corroerse rápidamente si el recubrimiento protector no está intacto. Este tipo de perno también puede aflojarse con vibración a menos que se proporcionen arandelas o tuercas de seguridad adecuadas;
- Los pernos de alta resistencia también se corroerán a menos que se mantenga la capa protectora. Los pernos galvanizados suelen ser mejores que el acero pintado "negro". Los pernos con torque incorrecto se aflojarán y los pernos que se hayan instalado a través de bridas muy afiladas sin arandelas afiladas adecuadamente pueden flexionarse y tensarse demasiado.

#### **6.5 Grietas**

El agrietamiento de cualquier componente del puente es potencialmente grave y debe investigarse a fondo. Las grietas en los miembros del puente de acero pueden ser causadas por fatiga del metal, fragilización, daños por impacto o defectos de fabricación, como fallas de rodadura, y pueden extenderse con el tiempo. Es muy probable que las grietas estructurales hayan comenzado a concentraciones de tensión obvias, como un orificio de perno o remache, extremidades de soldaduras, cambios abruptos de sección o muescas.

Las grietas por fatiga podrían no ser obvias hasta que un miembro haya estado sujeto a muchas reversiones o fluctuaciones de estrés.

#### **6.6 Daño por impacto**

El daño accidental a los miembros del puente a través del impacto del vehículo es un asunto grave y debe investigarse de inmediato. El daño obvio generalmente será en forma de miembros doblados y distorsionados y fijaciones sobreesforzadas

#### **6.7 Deformación y distorsión**

La resistencia de un miembro estructural a las fuerzas de compresión se reduce considerablemente si los componentes son girados o distorsionados fuera del plano. Los miembros a la tracción pueden actuar de manera impredecible. La deformación y la distorsión pueden ocurrir como resultado de:

- Daño accidental.
- Sobreesfuerzo axial.
- Cizallamiento excesivo en almas finas.
- Cojinetes desgastados.
- Disposiciones inadecuadas para la expansión.
- El asentamiento de la subestructura también puede provocar distorsiones en los miembros.

Las deformaciones provocan que los miembros diseñados para la tensión se vean obligados a soportar cargas de compresión.

#### **6.8 Defectos de manufactura**

A pesar de las rigurosas especificaciones y las estrictas tolerancias de fabricación a las que se rolan y forman los componentes estructurales, los defectos de manufactura y fabricación pueden encontrar su camino en estructuras completas.

Los defectos de rodamiento pueden aparecer como delaminación, grietas, ampollas, hoyos o inclusiones, así como la rectitud fuera de tolerancia o falta de cuadratura.

### 6.9 Fallos en el detalle

Lamentablemente, los defectos se pueden construir en una estructura de puente a través de un diseño, detalles y especificaciones deficientes. En esta categoría se encuentran detalles como:

- La reducción abrupta de bridas de secciones de acero en miembros tensores.
- Excentricidades excesivas (tanto en plano como fuera de plano) en intersecciones conjuntas.
- Provisión inadecuada para la rotación.
- Pocas disposiciones de drenaje.
- Reducción de soldaduras en lugares inapropiados.

Los defectos de fabricación y los defectos de diseño a veces se pueden notar a través de un recorrido de drones como se ilustra en la figura 4.

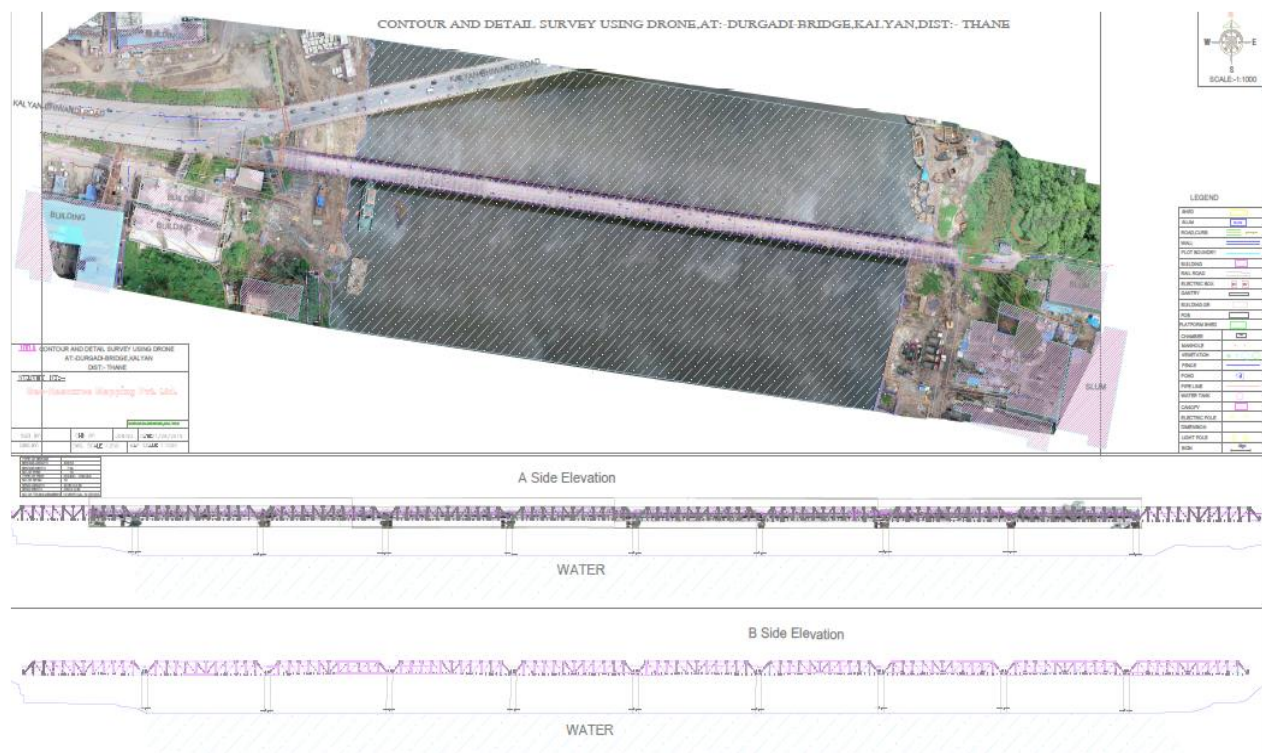


Figura 4. Revisión por Drone para mapa del puente

## 7. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO PROPUESTOS PARA LA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

### 7.1. El tratamiento compuesto de LCNR (reticulante de nylon de cadena larga) revestimiento resistente a rayos UV (ultravioleta) junto con protección electroquímica por ánodos de sacrificio

Será necesario desarrollar un sistema “Estado del Arte” de recubrimiento anticorrosivo, altamente adhesivo y resistente a los rayos UV, e incluir protección electroquímica para prolongar aún más la vida útil del sistema de protección. Este documento intenta elegir dicho sistema compuesto en función de los parámetros de prueba y los antecedentes de sistemas innovadores.

Los puntos a tener en cuenta para renderizar nuevos sistemas de protección:

- La superficie debe estar totalmente desprovista de cualquier pintura residual, así como incluso los restos de producto de corrosión, ya que la vida útil de los sistemas de protección contra la corrosión depende únicamente de la preparación de la superficie.
- La superficie libre de corrosión debe permanecer así (después del tratamiento de eliminación de corrosión) hasta que la superficie reciba el siguiente tratamiento del imprimador de polímero apropiado.
- La imprimación debe ir seguida de una matriz de polímeros especialmente reticulada y altamente impenetrable.
- Estos recubrimientos deben tener inmunidad total contra la descomposición debido al ataque de la radiación ultravioleta de la luz solar.
- La corrosión es un proceso electroquímico y en condiciones altamente susceptibles, como el puente Durgadee, es posible que se inicie rápidamente cada vez que se exponga la menor cantidad de metal desnudo debido a defectos que se hayan dejado inadvertidamente durante la ejecución debido a una disposición intrincada extremadamente alta de miembros de acero o durante la vida de servicio inicial debido a lesiones involuntarias a los sistemas de protección y luego toda la corrosión podría ser muy fuerte. Por lo tanto, es preferible proporcionar protección electroquímica como el uso de ánodos de sacrificio a intervalos regulares, generalmente en las uniones.

## 7.2. Procedimiento de rectificaciones

- Dado que la eliminación completa de restos residuales de la pintura, así como de productos de corrosión difíciles hasta 100% seguro, es una situación difícil por medio del cepillado de alambre de acero, etc., la única opción es la limpieza por chorro de arena en toda la estructura de acero.

Como resultado de la limpieza con arena, los productos de corrosión y la pintura residual se eliminan por completo, sin embargo, esto también conduce a la creación de una superficie de acero muy vulnerable que es susceptible a la "corrosión instantánea" debido a la humedad y el oxígeno en las condiciones ambientales. Esta capa de óxido instantáneo puede ser visible incluso dentro de 2 a 3 horas después de la limpieza con arena en forma de capa de óxido de hierro rojizo. Esta capa en adelante crea un compromiso hasta cierto punto en la pérdida de adhesión de los subsiguientes recubrimientos de polímero / epoxi / poliuretano.

- Para evitar esta debilidad en el sistema de protección, tan pronto como termine el chorro de arena, se aplica una capa de Rusticida.  
El Rusticida se puede aplicar con residuos de algodón, cepillo suave, etc. El rusticide no solo elimina el óxido residual sino que también reacciona con los productos de corrosión para convertirlos en una película estable de nano pasivación en la superficie del acero y devolver el acero a su blanco grisáceo original. Colorea el acero de la oxidación instantánea. Como resultado de la aplicación de Rusticide, la superficie de acero se vuelve de color negro blanquecino.
- Ahora esta superficie está totalmente libre de productos de corrosión y lista para recibir la capa de imprimación de LCNR 100% puro - imprimación epoxi - Sunepoxy 358. La capa de epoxi es siempre una capa de imprimación por dos razones:
  - a) Tiene una adhesión extraordinaria al acero o cualquier otra superficie seca.
  - b) La excelente adherencia del epoxi garantiza el rendimiento exitoso de las posteriores capas protectoras.

Los recubrimientos epóxicos no deben administrarse como capas de acabado, ya que se desintegra fácilmente por los rayos ultravioleta o cualquier forma de energía externa.

Sunepoxy 358 es una imprimación epoxi especialmente hecha que tiene una molécula reticulante de nylon de cadena más larga que mejora su rendimiento en comparación con los recubrimientos epoxi generales disponibles habitualmente.



- Protección contra la corrosión con recubrimientos epóxicos de Sungard APR basados en reticulantes de poliisocianato acíclico (APR) no son estables para los rayos UV y, por lo tanto, necesitan protección adicional para la estabilidad a los rayos UV.

Después de 24 horas de aplicación de Sunepoxy 358, proporcionar y aplicar 2 capas de APR Sungard con un cepillo de pintura suave / pistola rociadora, etc. Los recubrimientos de poliuretano son resistentes al ataque de los rayos ultravioleta. Sin embargo, en el caso de Sungard APR, la molécula de poliuretano normal se ha agregado con las características de reticulación de poliisocianato acíclico, lo que hace que la matriz sea más compleja debido a la reticulación adicional y, por lo tanto, a la densidad adicional del polímero curado. Esto se suma a la robustez y protección en mayor grado.

Se necesitarán rodillos con mangos largos (palos de metal), zapatas con clavos en superficies horizontales.

- Como se mencionó anteriormente, la corrosión es un proceso electroquímico y el sistema de recubrimiento LCNr brindará protección a la superficie cubierta por el mismo. Sin embargo, la estructura del puente Durgadee tiene varios miembros de acero intrincados soldados entre sí. Además, en varios lugares las planchas o canales de acero están dispuestos uno sobre el otro, lo que significa que el recubrimiento no se puede hacer físicamente en esa área, ya sea por pulverización o brocha. Por lo tanto, las superficies tan desatendidas son vulnerables a la corrosión. La corrosión así iniciada será muy rigurosa como se ve en algunas de las fotografías. En tales situaciones, es muy útil operar el ánodo de sacrificio. Este ánodo de sacrificio está conectado a las áreas vulnerables mediante soldadura y donde sea que ocurra el ataque de corrosión, el ánodo de sacrificio que sea más vulnerable se corroerá preferentemente dejando la superficie de acero no afectada.

La colocación de los ánodos de sacrificio se centrará más en las juntas de soldadura de la placa de refuerzo y en las uniones principales, etc., donde la posibilidad de un revestimiento protector adecuado será difícil.

- La losa de la cubierta se volverá a hormigonar mediante el uso de pernos soldados para el anclaje. Se proporcionará una pendiente requerida del 2.5% para la comba y para facilitar el drenaje. Se proporcionará una junta de expansión tipo sello de banda y un nuevo rodamiento de rodillos oscilantes de acero.

## 8. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

### 8.1 El mantenimiento preventivo de un puente de acero comienza después de la finalización de la rehabilitación como se propuso anteriormente.

También debe considerarse la provisión de acceso para facilitar futuras inspecciones y mantenimiento. Otras prácticas que ayudarán a minimizar el mantenimiento de un puente en servicio incluyen:

- Selección adecuada del tipo de recubrimiento protector, preparación adecuada de la superficie y aplicación sobre toda la superficie recubierta y su periodicidad de aplicación.
- Lavado y limpieza regular de superficies de revestimiento protector.
- Limpieza regular y limpieza de puertos de drenaje. Mejora del drenaje en áreas que no están drenadas adecuadamente.
- Asegurarse de que los cojinetes funcionan correctamente.
- Mantener la presencia de juntas de expansión adecuadas.
- Además, se deben identificar las áreas problemáticas potenciales y tomar las medidas apropiadas antes de que se manifiesten los defectos estructurales. Tales asuntos incluyen:

- i. Deben mejorarse los detalles que involucran placas de cubierta acortadas abruptamente en las bridas porque es probable que se conviertan en riesgos de fatiga;
- ii. Las soldaduras deficientes deben rectificarse y reemplazarse;
- iii. Los remaches seleccionados se pueden reemplazar con agarres de fricción de alta resistencia, sujetadores para mejorar las características de fatiga de un grupo de remaches (por ejemplo, los remaches principales en una junta o placa de cubierta);
- iv. Las excentricidades en las juntas y conexiones pueden mejorarse para reducir las tensiones de flexión no deseadas;
- v. El punto de apoyo de los cojinetes puede redefinirse para mejorar los efectos de movimiento excéntrico.

## 8.2 Sistemas de instrumentación de puentes para su monitorización dinámica.

El desarrollo de un modelo de línea base de un puente es esencial para el monitoreo de la salud estructural, que puede desempeñar un papel importante para asegurar la integridad del sistema, minimizar el costo de mantenimiento y mantener la longevidad de los puentes. El monitoreo de la salud estructural y el modelo de línea base se requieren periódicamente, especialmente después de daños por terremotos, la degradación de la estructura debido al envejecimiento o las acciones ambientales o si hay un evento que causa daños, como un impacto debido a un accidente o un desastre natural.

La tecnología global de monitoreo de la salud estructural consta de dos aspectos: (1) Instrumentación de puentes con sensores como acelerómetros y galgas extensométricas y, lo que es más importante, (2) Metodologías para obtener información significativa sobre las condiciones de salud estructural, si corresponde, a partir de los datos medidos.

Los avances en la detección, digitalización, grabación y comunicaciones de datos han llevado a los sistemas de monitoreo actuales capaces de detectar, registrar y analizar / mostrar de forma remota información dinámica de entrada y respuesta para puentes y otras estructuras.

La generación actual de sensores para acelerómetros sísmicos tiene grandes rangos dinámicos, lo que permite la medición simultánea de temblores sísmicos, vibraciones inducidas por el viento de baja frecuencia y vibraciones ambientales.

Se propone el desarrollo de un modelo de línea base para este puente, que será instrumentado para el monitoreo global de la salud estructural. Se instalarán sistemas de monitoreo que incluyen acelerómetros, galgas extensométricas, sensores de presión y sensores de desplazamiento.

Un sistema de monitoreo de salud estructural puede detectar un comportamiento estructural inusual en una etapa temprana, reduciendo así el riesgo de falla repentina y catastrófica. El monitoreo apropiado requiere el desarrollo de un modelo informático preciso que caracterice de manera efectiva toda la estructura, incluidas las condiciones de continuidad y límite.

## 9. CONCLUSIONES

El puente de acero ha sobrevivido a su vida útil; sin embargo, todavía está en condiciones de servicio con fortalecimiento de Ingeniería y protección contra la Corrosión. También goza de estatus de estructura patrimonial. Se resalta el fortalecimiento apropiado del acero y el deterioro del concreto. Su mejora de la vida útil se puede hacer con el modelo Life 365 de ACI, ya que el daño y la rectificación se centran en recubrimientos con propiedades mejoradas para el ataque de cloruro y otros contaminantes agresivos. El mayor énfasis en el control de la corrosión será crear barreras a largo plazo para la protección contra los contaminantes pesados que entren en contacto con el acero. El tratamiento de protección también se sugiere considerando las condiciones costeras de Mumbai y sus alrededores. El programa de protección se basa en un historial exitoso de estructuras similares en condiciones similares. La restauración servirá para propósitos como retener

la estructura del patrimonio al mismo tiempo que será útil durante al menos LMV durante unos años más para reducir la carga de tráfico en el puente existente.

## 10. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de Designs Circle, PWD, Gobierno de Maharashtra, Mumbai y PW Division (Thane), Thane en la redacción de este documento.

## 11. BIBLIOGRAFÍA Y NORMATIVA

- Malhotra, M. M. (2007), *Design od steel structure*. Edition: 7, Reprint Publisher: Jain Brothers.
- Indian Road Congress (IRC) (1990), *IRC: SP:35-1990: Guidelines for Inspection and Maintenance of Bridges*. (Reprint-2000), Indian Road Congress Special Publication. New Delhi.
- Indian Road Congress (IRC) (1996), *IRC: SP:18-1996: Manual for Highway Bridge Maintenance Inspection*. Indian Road Congress Special Publication. New Delhi.
- Indian Road Congress (IRC) (1999), *IRC: SP:52-1999: Bridge Inspector's Reference Manual*. Indian Road Congress Special Publication. New Delhi.
- Indian Road Congress (IRC) (2007), *IRC: SP:74-2007: Guidelines for Repair and Rehabilitation of Steel Bridges*. Indian Road Congress Special Publication. New Delhi.
- Indian Road Congress (IRC) (2008), *IRC: SP:75-2008: Guidelines for Retrofitting of steel Bridges by Pre-stressing*. Indian Road Congress Special Publication. New Delhi.
- Indian Road Congress (IRC) (2002), *IRC: SP:60-2002: An Approach Document for Assessment of Remaining Life of Concrete Bridges*. Indian Road Congress Special Publication. New Delhi.
- Indian Road Congress (IRC) (2004), *IRC SP 61-2004: An Approach Document on Whole Life Costing for Bridges in India*. Indian Road Congress Special Publication. New Delhi.
- Indian Road Congress (IRC) (1993), *IRC: SP:40-1993: Guidelines on Techniques for strengthening and Rehabilitation of Bridges*. Indian Road Congress Special Publication. New Delhi.
- Indian Road Congress (IRC) (2010), *IRC: SP:37-2010: Guidelines Evaluation of Load Carrying Capacity of Bridges*. Indian Road Congress Special Publication. New Delhi.
- MPCP (2019), *Maharashtra State Pollution Control Board (MPCP)*, URL: <http://www.mpcb.gov.in/node>
- Maharashtra Pollution Control Board (2015), *Comprehensive Study on Polluted River Stretch of Ulhas River – Downstream of Mohane, Kalyan*, MPCB Kalyan.
- Karve, S. R. Shah, V. I. (1998), *Structural Design Databook Steel Structures*, Structures Publications.
- NZ Transport Agency (2001), *Bridge Inspection and Maintenance Manual*. URL: <https://www.nzta.govt.nz/resources/bridge-inspection-maintenance-manual/>