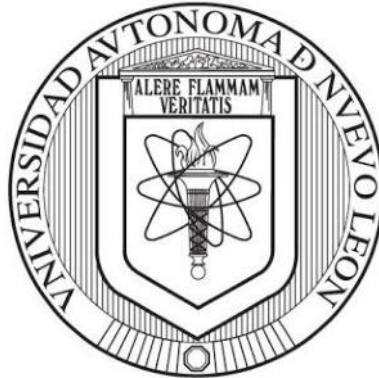


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA PATOLOGÍA Y REHABILITACIÓN DE LA  
CORROSIÓN DEL HORNO 3 DEL PARQUE FUNDIDORA**

**PRESENTADA POR  
MARIA EUGENIA RODRIGUEZ MONREAL**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA  
EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

**ABRIL DEL 2026**



## TÍTULO DE LA TESIS

### **EVALUACIÓN DE LA PATOLOGÍA Y REHABILITACION DE LA CORROSION DEL HORNO 3 DEL PARQUE FUNDIDORA**

Aprobación de la tesis

### **EVALUACIÓN DE LA PATOLOGÍA Y REHABILITACION DE LA CORROSION DEL HORNO 3 DEL PARQUE FUNDIDORA**

---

Dr. Bernardo Tadeo Terán Torres

Nombre y firma del Asesor del Producto Integrador, Evaluador adscrito a la FIC-  
UANL

---

Dr. Lucio Guillermo López Yépez

Nombre y firma del Evaluador 1

---

Dr. Román Hermosillo Mendoza

Nombre y firma del Evaluador 2

---

Dr. José Manuel Mendoza Rangel

Subdirector de Estudios de Postgrado del FIC UANL



## RESUMEN:

Este producto integrador muestra la utilización de un sistema visual para clasificar la corrosión encontrada en la estructura del alto horno 3 del Parque fundidora.

La metodología de clasificación de la gravedad de la corrosión consiste en clasificar de manera visual los elementos que componen la estructura en 5 grados.

Con esto es posible establecer los tipos de intervención requeridos para su rehabilitación como un espacio de uso público, incorporando criterios de seguridad para el nuevo uso y también criterios de sostenibilidad.

Para asegurar la sostenibilidad se explora la utilización de productos epoxídicos que no solo detienen el proceso de degradación por oxidación y corrosión, si no que alargan el periodo de mantenimiento del sistema protector de la estructura.

**TABLA DE CONTENIDOS:**

	Pág.
<b>CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>CAPITULO 2: ANTECEDENTES</b>	
<b>2.1 Patología de los Metales.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Fenómeno de la Corrosión en Hornos de Fundición de Acero.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPITULO 3. Justificación del Tema.....</b>	<b>12</b>
<b>CAPITULO 4 HIPOTESIS.....</b>	<b>13</b>
<b>CAPITULO 5: OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPITULO 6: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPITULO 7:.....</b>	
<b>4.1 Criterios de intervención en la estructura.....</b>	<b>11</b>
<b>4.2 Métodos de Evaluación de Patologías por corrosión en Aceros... </b>	<b>11</b>
<b>4.3 Diagnostico estructural previo a la rehabilitación.....</b>	<b>12</b>
<b>4.4 Adaptación de la estructura.....</b>	<b>13</b>
<b>4.5 Conservación de la estructura.....</b>	<b>13</b>
<b>CAPITULO 5: DESARROLLO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>14</b>



<b>5.1 Clasificación de los daños encontrados en la Estructura.....</b>	<b>14</b>
<b>5.2 Sustitución de los elementos estructurales.....</b>	<b>14</b>
<b>5.3 Aplicación del método de limpieza .....</b>	<b>15</b>
<b>5.4 Aplicación del Método de lavado.....</b>	<b>16</b>
<b>5.5 Aplicación del Método de cardeo.....</b>	<b>16</b>
<b>5.6 Aplicación del revestimiento protector.....</b>	<b>17</b>
<b>5.7 Memoria fotográfica del proceso.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>27</b>
<b>6.1 Conclusiones.....</b>	<b>27</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>30</b>



## CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

### La importancia de la Conservación del Horno 3 en el Parque Fundidora.

El Horno 3 dentro del parque Fundidora, ubicado en el centro industrial de Monterrey, es un gran ejemplo de Rehabilitación Patológica, para reconvertir la vocación del patrimonio histórico en México. Este coloso metálico erigido en 1968, representa un testimonio material de la evolución tecnológica, la modernización productiva y la resiliencia económica de la región.

Su historia se remonta a 1900, cuando Vicente Ferrara, con experiencia técnica adquirida en fundiciones estadounidenses, promovió la instalación de una siderúrgica en Monterrey por su estratégica localización y disponibilidad de materias primas, con la idea de constituir una compañía acerera. Contó con el apoyo de Porfirio Díaz, el Gobernador Bernardo Reyes y empresarios locales, para la creación de la Compañía Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey. Para poder instalarla, se tuvieron que crear todas las condiciones, como la creación la Colonia Acero y el hotel Acero y, para albergar al personal tanto extranjero como local. Durante su época de gloria, la planta alcanzó una producción significativa de acero: el horno 3 contaba con una capacidad anual de 100 mil toneladas de acero, y junto a los demás hornos, logró una producción acumulada de un millón de toneladas, consolidando a la compañía como la siderúrgica más grande de América Latina durante gran parte del siglo XX, para el suministro de insumos estratégicos como rieles, varilla y estructuras metálicas para el desarrollo nacional. Gracias a ello, daba empleo a más de 7 mil trabajadores.. Con un diseño de Arthur G. Mckee & Co. De Cleveland, este Horno,

era automatizado e incorporó controles programados para carga de materias primas, alcanzando a producir entre 1500 y 2000 toneladas de hierro fundido al día. Estos niveles productivos le significaron unirse como el pilar de la producción de acero que abasteció importantes proyectos de infraestructura y construcción, en sus 18 años de operación.

Sin embargo, el conjunto productivo también afrontó los desafíos sociales y económicos que se le presentaron a la industria pesada del país, como los conflictos revolucionarios de 1911, las afectaciones logísticas de la primera Guerra Mundial, la huelga de 1970 y los accidentes industriales tales como el ocurrido en 1971, que cobró la vida a 17 trabajadores. Estos trágicos escenarios marcaron puntos críticos en su historia. Finalmente, factores financieros y administrativos adversos culminaron con la declaración de quiebra en 1986, provocando el cese de operaciones y el abandono progresivo de las instalaciones.

## 2. Antecedentes:

Durante dos décadas, la estructura del Horno 3 permaneció expuesta a la intemperie, manifestando un avanzado proceso de corrosión, pérdida de recubrimientos protectores y degradación de componentes metálicos. Aunado a esto, cuando el horno 3 fue apagado, se encontraba cargado de acero fundido, lo que colaboró en los procesos corrosivos que se encontraron al abrirlo.

Estos daños evidenciaron la necesidad de un enfoque multidisciplinario de conservación que integrara diversos criterios de ingeniería y museografía en la Evaluación de la

Patología de los daños, para la determinación de los procedimientos de rehabilitación, gestión patrimonial, conservación de historia y sostenibilidad.

Tras la expropiación gubernamental de los terrenos en 1988, se transformó en *el Parque Fundidora*, un proyecto de Renovación Urbana, con el objetivo de preservar el patrimonio industrial y a la vez, desarrollar un espacio público de recreación, cultura y educación.

El Horno 3 fue declarado Monumento Artístico Nacional, lo que obligó a considerar criterios estrictos de protección patrimonial durante su intervención, que duró 22 meses de trabajo, desde 2005. Finalmente en 2007, fue inaugurado y abierto al público rehabilitado como un museo interactivo con el tema del acero, como foco central.

### **CAPITULO 3. Justificación del Tema.**

La estructura permaneció expuesta durante casi dos décadas (foto 1) a condiciones ambientales agresivas, propiciando un avanzado proceso de corrosión generalizado, pérdida de recubrimientos protectores, degradación en uniones atornilladas y soldadas, así como afectaciones en elementos secundarios y sistemas de soporte. Un factor adicional de complejidad fue que al momento del apagado del horno, éste permanecía cargado de material metálico a altas temperaturas, generando esfuerzos residuales, acumulación de humedad y

procesos corrosivos internos en el horno y los canales de conducción del material, que solo pudieron evaluarse tras la apertura del horno y la inspección detallada de los componentes.

El diagnóstico inicial evidenció patologías propias de estructuras metálicas industriales sometidas a altas temperaturas, ciclos térmicos extremos y ambientes contaminantes, lo que exigió la aplicación de metodologías especializadas de evaluación de la degradación por corrosión y evaluación estructural para determinar el grado de daño y la capacidad resistente remanente para las nuevas y reducidas solicitaciones de carga.

El reto principal consistió en transformar una estructura concebida para procesos metalúrgicos, en un espacio seguro y funcional para uso público como museo interactivo, sin comprometer su autenticidad histórica como un Alto horno en funcionamiento.

La naturaleza de los materiales de construcción del horno, nos obliga a revisar las patologías propias.

### 3.1 Patología de los Metales.

Cuando los materiales metálicos se deterioran, estos daños son asociados a factores atmosféricos, químicos, físicos y mecánicos. Las Patologías presentes afectan su capacidad resistente y durabilidad, especialmente en estructuras expuestas a ambientes agresivos o a cargas cíclicas.

Estas son las principales:

### Corrosión

La más frecuente en estructuras metálicas. Es presente por el deterioro electroquímico del metal por interacción con el medio ambiente. Los tipos más comunes se clasifican en:

Corrosión uniforme: se presenta una pérdida homogénea de espesor en toda la superficie.

Corrosión localizada tipo picadura: que es un ataque puntual que genera cavidades profundas.

Corrosión galvánica: se presenta cuando dos metales distintos están en contacto en presencia de un electrolito.

Corrosión intergranular: cuando se presenta, afecta los límites de grano del material.

Corrosión bajo tensión ó stress corrosión cracking: es una combinación de esfuerzos mecánicos y ambiente agresivo.

Corrosión atmosférica: que es causada por humedad, sales y contaminantes.

### Fatiga.

Se presenta por la acción repetida de cargas variables o cíclicas, cuando los esfuerzos están por debajo del límite elástico del material. Provoca microfisuras, alcanzando la fractura súbita del elemento. Muy común en puentes metálicos, estructuras industriales, y elementos que son sometidos a vibración.

Fractura frágil. Sin deformación plástica previa apreciable. Es común en bajas temperaturas, defectos internos, concentraciones de esfuerzos, soldaduras deficientes. Puede ocurrir de manera repentina.

Deformaciones plásticas y de pandeo.

Presente cuando el metal supera su límite elástico, se producen deformaciones que pueden ser permanentes.

Cuando los elementos son esbeltos, como en columnas y perfiles delgados, puede presentarse un pandeo, provocando desestabilidad estructural.

#### Fisuración en soldaduras.

Cuando las uniones soldadas presentan grietas en caliente, grietas en frío, falta de penetración, intrusiones de escoria, estas patologías suelen convertirse en puntos críticos para fallo estructural.

Desgaste y abrasión: Muy frecuente en estructuras industriales, se puede producir por fricción, impacto o movimiento continuo, reduciendo el espesor del material.

Relajación y fluencia, o creep. Presente en metales sometidos a altas temperaturas prolongadas y cargas constantes. Se generan deformaciones progresivas en el tiempo.

### **3.2 Fenómeno de la Corrosión en Hornos de Fundición de Acero.**

Las patologías estructurales en los hornos de fundición del acero, especialmente en altos hornos, se presentan por una combinación de altas temperaturas, ciclos extremos térmicos, grandes cargas gravitacionales, atmosferas químicamente muy agresivas y vibraciones propias de la operación. Las más frecuentes son:

Fatiga Térmica: De las más críticas. Cuando los elementos metálicos sufren variaciones bruscas de temperatura, se produce dilatación y contracción cíclica. Los efectos se presentan como microfisuras que son progresivas, placas y anillos agrietados, soldadura fallada. Es más frecuente en zonas cercanas al crisol, las toberas y en la carcasa externa.

Fluencia ó creep de alta temperatura: Es cuando los elementos que son estructurales han permanecido expuestos a temperaturas muy altas durante largos periodos, por tanto, el acero presenta deformaciones lentas y permanentes por la carga constante, las consecuencias son: pérdida de alineación, deformaciones que son excesivas, reducción de la capacidad resistente.

Corrosión de alta temperatura: A diferencia de la corrosión por atmosfera, en los hornos se presenta Oxidación acelerada, Corrosión sulfatada, ataque químico por gases industriales ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ). Puede provocar pérdida significativa del espesor en la coraza metálica.

Fisura y degradación del revestimiento refractario: Sin ser un elemento metálico, cuando falla, impacta de manera importante en la estructura. Patologías frecuentes: desprendimiento del refractario, fisuras por choque térmico, erosión interna. Cuando el refractario ya no es continuo, el calor se transmite a la carcasa metálica, acelerando los procesos de corrosión y deformación.

Deformaciones estructurales globales: En hornos, se presentan por cargas concentradas del material fundido, o por sobrecargas no previstas, y

asentamientos diferenciales. Se pueden presentar: Ovalización de la sección, desalineación de la vertical, pandeo localizado en columnas.

Falla en uniones y soldaduras: Las uniones son puntos críticos por concentración de esfuerzos, cambios de temperatura bruscos, ó las vibraciones de los equipos auxiliares, observandose grietas longitudinales, desprendimientos y fragilización térmica.

Daño por vibración y cargas dinámicas: En equipos como sopladores, sistemas de carga y de extracción generan vibraciones constantes que pueden provocar:; aflojamiento de pernos, fatiga en conexiones microfisuración acumulada.

Corrosión post-operativa: En hornos fuera de servicio, como en procesos de reconversión industrial, se presenta una corrosión que es acelerada por la humedad interna, procesos electroquímicos de residuos metálicos solidificados, y por el deterioro progresivo debido al abandono y la exposición ambiental.

Enfoque para la rehabilitación estructural: La evaluación patológica de un horno de fundición requiere una Inspección visual especializada, ensayos no destructivos como ultrasonido, de partículas magnéticas, medición de espesores, una modelación estructural para establecer la capacidad resistente, una evaluación del comportamiento térmico residual. La intervención puede incluir: sustitución parcial de las placas, refuerzo con anillos estructurales, rehabilitación de soldaduras, aplicación de sistemas de protección anticorrosiva, consolidación del revestimiento refractario. En contextos de reconversión patrimonial, el reto consiste en *conservar la*

*autenticidad industrial* garantizando simultáneamente seguridad estructural y funcionalidad pública.

## CAPITULO 4 HIPOTESIS Y OBJETIVOS

**4.1 Hipótesis:** El uso de técnicas de inspección visual del estado del deterioro del horno 3, permitirá evaluar la patología y a la vez seleccionar la metodología de intervención para la rehabilitación y adaptación al nuevo uso de la estructura, así mismo el uso del recubrimiento epoxídico, permitirá proteger a la estructura contra los daños atmosféricos que podrían afectar la nueva vida útil de la misma

### 4.2 Objetivos:

- a) **Evaluar de la patología en la estructura del horno, por efectos de corrosión mediante inspección visual**
- b) **Determinar los métodos de intervención y rehabilitación, basado en los resultados de la inspección.**
- c) **Incorporar al estudio realizado, criterios de sostenibilidad en la solución de la rehabilitación**

## CAPITULO 4: METODOLOGIA UTILIZADA

### Marco Teórico (Resumen)

La corrosión del acero estructural constituye uno de los principales mecanismos de deterioro en estructuras metálicas, con implicaciones directas en la seguridad, economía y durabilidad de obras civiles e industriales. Se trata de un fenómeno electroquímico mediante el cual el acero reacciona con el oxígeno y agentes ambientales como agua y cloruros, retomando a un estado termodinámicamente más estable en forma de óxido e hidróxidos de hierro, lo que genera pérdida de sección resistente y degradación de propiedades mecánicas (Maraveas, 202; Rodríguez Días, 2023). Este proceso no solo reduce la capacidad portante, sino que puede modificar la rigidez, la masa efectiva y la respuesta dinámica del sistema estructural frente a cargas ambientales o sísmicas (Di Sarno, Majidian & Karagiannakis, 2021).

La literatura especializada enfatiza que la durabilidad estructural no depende exclusivamente del diseño resistente inicial, sino de una adecuada gestión del deterioro ambiental a lo largo del ciclo de vida (BCA, 2009; Corus Group, 2004; Steel Construction Institute, 2003). En este sentido, el enfoque contemporáneo integra criterios de resistencia, servicio y vida útil, promoviendo la selección adecuada de materiales, sistemas de protección anticorrosiva y estrategias de mantenimiento planificado. Las normas internacionales orientan la clasificación de ambientes según su corrosividad y establecen lineamientos para seleccionar sistemas protectores acordes con la exposición prevista (ISO, 2012; Corus Group, 2004).

Desde el punto de vista electroquímico, la corrosión requiere la coexistencia de un ánodo, un cátodo y un electrolito, generalmente una película de agua con sales

disueltas (Hare, 1994; citado en Secretaría EPN, 2026; Metrohm, 2026). En el ánodo ocurre la oxidación del hierro ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ), que representa la pérdida efectiva de material, mientras que en el cátodo se produce la reducción del oxígeno en presencia de agua ( $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ ) (LibreTexts, 2026; Metrohm, 2026). La reacción global genera productos de corrosión como hidróxido ferroso e hidróxido férrico, que constituyen la herrumbre visible (ILCE, 2026). La presencia simultánea de agua y oxígeno es indispensable en condiciones atmosféricas ordinarias, y pequeñas diferencias de potencial en la superficie metálica pueden originar microceldas galvánicas que aceleran el ataque localizado (Arquitectura en Acero, 2026).

La velocidad de corrosión está influenciada por factores ambientales y constructivos. El tiempo de humectación (TOW), definido como el período durante el cual la superficie permanece cubierta por una película de agua conductora, presenta correlación directa con la pérdida de espesor del acero (ISO, 2012; Morales et al., 2015). Asimismo, la contaminación atmosférica por cloruros y dióxido de azufre incrementa la conductividad del electrolito y favorece la corrosión localizada, especialmente en ambientes marinos e industriales severos (BCA, 2009; ISO, 2012). La temperatura influye en la cinética de reacción y en los ciclos de condensación y secado (Revie & Uhlig, 2008). Finalmente, el diseño geométrico puede favorecer o mitigar la acumulación de humedad, incidiendo directamente en la durabilidad (BCA, 2009).

En estructuras de acero se identifican distintos tipos de corrosión con implicaciones estructurales específicas. La corrosión general produce pérdida uniforme de espesor y puede modelarse mediante tasas promedio (ISO, 2012). La corrosión

galvánica ocurre cuando metales de diferente potencial electroquímico están en contacto eléctrico en presencia de un electrolito (Revie & Uhlig, 2008). La corrosión por hendidura se desarrolla en espacios confinados con diferencias de concentración de oxígeno, mientras que la corrosión por picadura genera cavidades profundas que actúan como concentradores de esfuerzos (BCA, 2009). La corrosión bajo tensión (SCC) resulta de la interacción entre esfuerzos de tracción y ambiente agresivo, pudiendo provocar grietas frágiles de propagación súbita (Corus Group, 2004).

El diseño para durabilidad es una estrategia preventiva clave. Las guías técnicas recomiendan evitar cavidades que retengan humedad, facilitar el drenaje, minimizar contactos bimetálicos o aislarlos adecuadamente y garantizar accesibilidad para inspección y mantenimiento (BCA, 2009; ISO, 2018). Asimismo, el diseño con bordes redondeados mejora la adherencia de los recubrimientos protectores. Este enfoque se alinea con los principios de gestión de ciclo de vida estructural (Revie & Uhlig, 2008).

La preparación superficial constituye un factor determinante en el desempeño de los sistemas protectores. Normas como ISO 8501-1 e ISO 8503 establecen grados de limpieza y perfiles de rugosidad requeridos antes de la aplicación de recubrimientos (ISO, 2007; ISO, 2012). El chorro abrasivo grado Sa 2½ es comúnmente especificado en ambientes de corrosividad media a alta (ISO, 2018). Asimismo, deben controlarse contaminantes como sales solubles (ISO 8502-9) y verificarse condiciones ambientales adecuadas durante la aplicación, incluyendo temperatura del acero, humedad relativa y diferencia respecto al punto de rocío (BCA, 2009; ISO, 2018). Una preparación deficiente puede generar ampollamiento,

corrosión bajo película y desprendimiento prematuro (Corus Group, 2004; Revie & Uhlig, 2008).

En cuanto a los sistemas de protección, los más empleados incluyen sistemas de pintura multicapa, galvanizado por inmersión en caliente, proyección térmica, aceros patinables y aceros inoxidables. Los sistemas de pintura combinan protección catódica inicial mediante imprimaciones ricas en zinc con barreras epóxicas y acabados resistentes a radiación UV (ISO, 2018). El galvanizado proporciona protección por barrera y sacrificio del zinc (ISO, 2022). La proyección térmica es útil en estructuras de gran tamaño o rehabilitaciones localizadas (BCA, 2009). Los aceros patinables, como ASTM A588, forman una pátina estable en ambientes adecuados (ASTM, 2021), mientras que los inoxidables (AISI 304 y AISI 316) generan una película pasiva de óxido de cromo que confiere alta resistencia a la corrosión (Revie & Uhlig, 2008).

La especificación técnica del tratamiento protector es un documento contractual esencial que debe definir preparación superficial, tipo de recubrimiento, número de capas, espesores mínimos (ISO 19840), condiciones de aplicación e inspección (ISO 4624). La claridad y referencia normativa evitan ambigüedades y fallas prematuras (Corus Group, 2004; BCA, 2009).

El control de calidad incluye verificación ambiental, medición de espesores y clasificación del deterioro mediante normas como ISO 4628-3 (grado de oxidación), ISO 4628-2 (ampollamiento) e ISO 4628-4/5 (agrietamiento y desprendimiento). La frecuencia de inspección depende de la categoría ambiental definida en ISO 9223 (ISO, 2012). La documentación sistemática permite monitorear la evolución del deterioro y sustentar decisiones técnicas.

Finalmente, el mantenimiento y la rehabilitación deben basarse en un diagnóstico integral que incluya medición de espesores remanentes, identificación del tipo de corrosión y verificación de capacidad estructural residual conforme a normativa de diseño (EN 1993-1-1; ISO 15686-1). Las estrategias varían desde mantenimiento preventivo hasta refuerzo o sustitución de elementos comprometidos (BCA, 2009; Corus Group, 2004). La intervención temprana reduce significativamente los costos del ciclo de vida y preserva la seguridad estructural.

En síntesis, la gestión integral de la corrosión del acero estructural requiere la articulación de fundamentos electroquímicos, diseño preventivo, especificación técnica rigurosa, control de calidad e intervención oportuna, bajo un enfoque de ciclo de vida que garantice durabilidad, seguridad y optimización de recursos.

#### 4.1 Criterios de intervención de la estructura, conservación y adaptación

Los principios de conservación para la intervención del horno 3 considerados:

- Mínima intervención estructural para preservar el máximo del volumen original.
- Trato de la estructura como un bien patrimonial.
- Reversibilidad de las intervenciones, aplicando técnicas que permitieran deshacer los tratamientos sin daño irreversible.
- Control estricto para no alterar la configuración espacial original y mantener la visión industrial del inmueble.

#### 4.2 Métodos de Evaluación de Patologías por corrosión en Aceros.

El método de evaluación de los daños por corrosión en la estructura elegido es un sistema especializado de inspección visual, de acuerdo a la norma ASTM D610 para elementos de acero, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 1

Tabla 2. Sistema de clasificación de corrosión modificado basado en la norma ASTM D610 para elementos de acero [31].

Grado	Indicadores visuales	Área de óxido	Descripción
Grado 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recubrimiento intacto</li> <li>Sin óxido ni descascarillado</li> <li>Superficie lisa</li> </ul>	$\leq 0,01$ %	Sin impacto estructural; solo supervisión preventiva.
Grado 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Óxido ligero/manchas</li> <li>Decoloración del revestimiento</li> <li>Sin picaduras ni deformación de la superficie</li> </ul>	0,03-0,1	Deterioro estético: preocupación mínima.
Grado 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deterioro local del recubrimiento</li> <li>Pitting visible y pequeñas escamas</li> <li>Adelgazamiento de la sección en fase inicial</li> </ul>	0,3-1	Inicio de la pérdida de material; supervisar semestralmente.
Grado 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Descamación generalizada</li> <li>Pérdida parcial de la sección</li> <li>Óxido alrededor de soldaduras/juntas</li> </ul>	3-10 %	El riesgo estructural se encuentra en los elementos portantes.
Grado 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erosión profunda de la superficie</li> <li>Copos grandes, acero expuesto</li> <li>Recubrimiento totalmente eliminado</li> </ul>	>33 %	Se requiere mantenimiento urgente; posible riesgo de fallo.

#### 4.3 Diagnóstico estructural previo a la rehabilitación de la estructura del Horno.

Para determinar el grado de deterioro del Acero del Horno y sus canales se observaron y clasificaron los daños por corrosión: profundidad de las picaduras u hoyos, la cobertura de óxido, la decoloración del recubrimiento y el desconchado local.

Derivado de ésta inspección visual de la corrosión, se encontraron los siguientes grados de daño: Grado 2: Deterioro estético foto #; Grado 3: pérdida inicial de material; grado 4: Pérdida parcial de la sección, descamación generalizada y óxido alrededor de soldaduras y juntas; Grado 5: erosión profunda de la superficie, recubrimiento totalmente eliminado.

Investigaciones han demostrado (1) que la formación y el crecimiento de picaduras de corrosión afectan significativamente las condiciones de tensión locales y contribuyen a la aparición temprana de grietas dúctiles, especialmente cuando las picaduras adyacentes interactúan o se profundizan con el tiempo, debido a los efectos de corrosión. También se ha demostrado que el deterioro por corrosión influye directamente en la capacidad de carga y el costo por mantenimiento se incrementa.

**4.4 Adaptación de la estructura:** para la redirección de la vocación del edificio, se siguió la norma técnica vigente en México, la cual regula la adaptación, diseño y contempla los aspectos de seguridad de los espacios públicos. Se trata de la **NOM-001-SEDATU-2021**, para los espacios públicos en los asentamientos humanos. En dicha norma se regulan los requisitos de seguridad, accesibilidad, resiliencia y diseño para la creación de espacios públicos dignos y seguros.

**4.5 Conservación posterior de la estructura:** Siendo que la corrosión se produce por una reacción del metal (oxidación electroquímica) con el medio ambiente (2) y suele producir óxido, la función principal de los recubrimientos para protección es formar una barrera entre el metal y su entorno, de acuerdo a *Construcción Sostenible, guía sobre protección contra la corrosión de estructuras de Acero*, se siguieron los siguientes pasos: 1. Preparación de la superficie, mediante cardeo, siguiendo la norma *Steel Structures Painting Council (SSPC) SP1, SP2, SP3 y SP6*, 2. lavado a chorro de grasas y polvo (ISO 8504), ya que es necesario eliminar dichos contaminantes de la superficie. 3. Se miden los espesores de los perfiles estructurales, siguiendo la norma BS 7079, 4. Aplicación del protector.

Para la elección del Protector adecuado, primero se clasificó el entorno atmosférico del Horno 3, de acuerdo a la siguiente tabla 2 (3):

**Tabla 2: Categorías de corrosividad atmosférica y ejemplos de entornos típicos (ISO 12944, parte 2)**

Categoría de corrosividad y riesgo	Pérdida de masa por unidad de superficie/pérdida de espesor (véase la nota 1)		Ejemplos de entornos típicos en un clima templado (solo a título informativo)
	Acero con bajo contenido en carbono Pérdida de espesor $\mu\text{m}$	Exterior	Interior
C1 Muy baja	$\leq 1,3$	--	Edificios con calefacción y atmósferas limpias. Por ejemplo, oficinas, tiendas, escuelas, hoteles
C2 Bajo	$> 1,3 - 25$	Atmósferas con bajo nivel de contaminación. Principalmente zonas rurales	Edificios sin calefacción donde puede producirse condensación, por ejemplo, depósitos, pabellones deportivos
C3 Medio	$> 25 - 60$	Atmósferas urbanas e industriales, contaminación moderada por dióxido de azufre. Zonas costeras con baja salinidad	Salas de producción con alta humedad y cierta contaminación atmosférica, por ejemplo, plantas de procesamiento de alimentos, lavanderías, fábricas de cerveza, lecherías
C4 Alto	$> 50 - 80$	Zonas industriales con alta humedad y salinidad moderada	Plantas químicas, piscinas, zonas costeras, astilleros y varaderos
C5-I Muy alta (industrial)	$> 80 - 200$	Zonas industriales con alta humedad y atmósfera agresiva	Edificios o zonas con condensación casi permanente y alta contaminación
C5-M Muy alta (marina)	$> 80 - 200$	Zonas costeras y marítimas con alta salinidad	Edificios o zonas con condensación casi permanente y alta contaminación

La tabla se ha extraído de la página 1308 de *The Steel Designers' Manual*, 6.ª edición. Autorización concedida por *The Steel Construction Institute* y *Blackwell Publishing*.

1. Los valores de pérdida de espesor corresponden al primer año de exposición. Las pérdidas pueden reducirse en los años siguientes.
2. Los valores de pérdida utilizados para las categorías de corrosividad son idénticos a los indicados en la norma ISO 9223.
3. En las zonas costeras cálidas y húmedas, las pérdidas de espesor pueden superar los límites de las categorías C5-M. Por lo tanto, se deben tomar precauciones especiales al seleccionar los sistemas de pintura protectora para las estructuras en dichas zonas.  
1  $\mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$

## CAPITULO 5: DESARROLLO DEL PROBLEMA

### Rehabilitación y procesos de restauración:

*Evaluación de la estructura del Horno 3 (Foto # 1, 2, 3)*

1. Primero se llevó a cabo una limpieza inicial, que incluyó el retiro de las cenizas acumuladas y el material de fundición residual del horno y de las canales de conducción. (Fotos 4, 5, 6, 7 y 8)
2. Posteriormente, derivado de la inspección visual especializada, y de la consecuente clasificación de daños de cada miembro estructural, corrosión grado 2, Degradación cosmética: solo se limpió y protegió. Para el grado 3 se limpió, cardeó y protegió. Para el grado 4 y 5 se sustituyen o repusieron los elementos estructurales (fotos 9 a la 20)
3. La preparación de las superficies : primero se hizo una limpieza mecánica a base de cardeo, para retirar partículas sueltas de óxido sin eliminar la pátina original (protegiendo valores históricos). Este procedimiento fue escogido frente a técnicas más agresivas como sand-blasting, que podría eliminar los rastros históricos de pintura y patina, dificultando la interpretación visual del proceso industrial original. Se anexa a continuación las especificaciones seguidas por el contratista:

*La preparación de la superficie deberá efectuarse de acuerdo a normas de Steel Structures Painting council (SSPC) SP1, SP2, SP3 y SP6. Así mismo la preparación de superficie y la aplicación de pintura están sujetos a la inspección del contratista:*

- *Verificar el espesor de la película seca de acuerdo a la recomendación del fabricante*
- *Visualmente inspeccionar la superficie pintada para el detectar pintura en exceso*

- *Verificar pintura insuficiente y otros defectos que permiten la penetración de humedad.*
  - *El Contratista corregirá cualquier trabajo que no este de acuerdo normas especificadas o la aprobación de propietario, el gasto será a cargo del Contratista*
  - *El contratista elaborará reportes de espesores de pintura en las diferentes áreas aplicadas y será corroborada por el Supervisor del Museo del Acero.*
4. Aplicación de soluciones fosfatizantes por aspersion para neutralizar la corrosión y estabilizar el metal base. (Foto 24)
  5. Lavado a presión para retiro de las grasas y polvos sueltos y medición de espesores residuales para verificar la integridad al finalizar el tratamiento.
  6. Aplicación del barniz protector, de acuerdo a la tabla 2, se ha seleccionado la categoría de corrosividad C5-I, pues se trata de una zona industrial con atmósfera agresiva. Se ha pensado en especificar de forma correcta el barniz protector cuidando la durabilidad de la protección contra la corrosión y la durabilidad del color y brillo, para limitar el impacto medioambiental y que sea compatible con la vida útil de la estructura (Fotos 25 y 26)

### *Refuerzo y rehabilitación de elementos*

Se diseñaron refuerzos puntuales para los daños clasificados como 4 y 5.

- Canales, vigas y columnas con pérdida de sección crítica, mediante chapas de refuerzo atornilladas y soldadas según la tabla de ASTM D610 Modificado (Fotos 10, 11 y 12)
- reforzamiento de plataformas y pasajes, garantizando resistencia ante cargas vivas esperadas por el uso público. (Foto 9)
- Implementación de normas de seguridad, conforme a códigos mexicanos aplicables. Estas definiciones integran criterios de diseño para edificaciones adaptadas al uso público:

Escaleras, pasarelas y barandales, diseñados bajo normas vigentes de accesibilidad e ingeniería civil moderna.

Sistemas de evacuación y rutas seguras, con señalización y acceso controlado para público general.

Elevadores inclinados y ascendentes, reutilizando los trazos originales de transporte interno, adaptados con diseño estructural y mecánico modernos. (Foto 21)

Estas intervenciones fortalecieron la estructura original sin alterar significativamente su configuración general, integrando criterios de resistencia, rigidez, funcionalidad y protección contra riesgos estructurales (fotos 27 a 33)

### **Integración arquitectónica y paisajística**

#### *Diseño arquitectónico*

El proyecto fue dirigido por Grimshaw Architects, quienes combinaron elementos industriales con soluciones contemporáneas:

- Se introdujeron 9 000 m<sup>2</sup> de nuevas áreas expositivas integradas con la envolvente original del horno.
- Instalaciones como Galería de Historia, Galería del Acero, el Show del Horno, la Sala de Tecnología y otros espacios educativos fueron integradas con criterios de flujo vertical y horizontal eficiente.
- Se respetó la altura original del alto horno (aproximadamente 70 m), manteniendo su presencia icónica en el paisaje urbano de Monterrey. (fotos 34, 35 y 36)

### *Paisaje urbano y sostenibilidad*

El proyecto incluyó estrategias de paisaje y sostenibilidad:

- Aprovechamiento de materiales recuperados dentro del sitio para plazas y terrazas.
- Sistemas de captación y reutilización de aguas pluviales integrados a jardines y cuerpos de agua, reinterpretando los canales industriales originales.
- Cubiertas verdes de gran extensión para reducir carga térmica y mejorar aislamiento.

## MARCO TEÓRICO

### 1. Introducción General

La **corrosión del acero estructural** representa uno de los principales desafíos técnicos, económicos y de seguridad en la ingeniería civil e industrial. La corrosión es un fenómeno de deterioro electroquímico en el que el acero reacciona con el oxígeno y agentes ambientales (como agua o cloruros), lo que resulta en la pérdida de material y la degradación de las propiedades mecánicas de los elementos estructurales (Maraveas, 2020; Rodríguez Díaz, 2023). Esta afectación puede comprometer la **integridad y la vida útil de las estructuras** si no se toman medidas de protección y diseño adecuadas.

La literatura técnica establece que la **durabilidad estructural** depende no solo del diseño resistente, sino también de la **gestión adecuada del deterioro ambiental**. Esto incluye la selección de materiales, recubrimientos de protección y prácticas de mantenimiento durante el ciclo de vida de la estructura (BCA, 2009; Corus Group, 2004; Steel Construction Institute, 2003). La corrosión puede manifestarse de formas variadas —como corrosión uniforme, localizada o por picaduras—, cada una con implicaciones particulares para el comportamiento mecánico y el desempeño estructural (Perneta, Correia & Salta, 2015).

Además, el fenómeno de corrosión no solo reduce la sección efectiva del acero, sino que también puede alterar las características dinámicas de un sistema estructural, como la rigidez, la masa efectiva y la capacidad de respuesta ante cargas ambientales o sísmicas (Di Sarno, Majidian & Karagiannakis, 2021). Por ejemplo, estudios han demostrado que la pérdida de material debido a corrosión puede aumentar las deformaciones y reducir las demandas resistentes frente a cargas dinámicas si no se toman medidas preventivas durante el diseño o mantenimiento (Di Sarno et al., 2021).

## Importancia de la Durabilidad y el Ciclo de Vida

El enfoque contemporáneo en ingeniería estructural integra criterios de resistencia, servicio y ciclo de vida, reconociendo que la **falta de protección adecuada puede reducir significativamente la vida útil proyectada** de las estructuras de acero. La planificación de la durabilidad implica no solo especificar protecciones anticorrosivas (como recubrimientos o galvanizado), sino también diseñar de forma que se minimicen zonas de acumulación de humedad o cloruros y se facilite el mantenimiento periódico (BCA, 2009; Corus Group, 2004). Las normas y guías internacionales orientan a los ingenieros a considerar la corrosividad del ambiente y a aplicar los sistemas de protección adecuados según la exposición esperada de la estructura (Corus Group, 2004).

## 2. Fundamentos del Proceso de Corrosión

La **corrosión del acero** es un fenómeno **electroquímico** mediante el cual el metal se deteriora al reaccionar con su entorno, retornando a una condición de menor energía similar a la de sus minerales originales (Hare, 1994; citado en Secretaría EPN, 2026). Este proceso implica la coexistencia de un **ánodo**, un **cátodo** y un **electrolito** —generalmente una película de agua que contiene sales disueltas— que permite la conducción de iones (Corus Group, 2004; Secretaría EPN, 2026; Metrohm, 2026). El agua con oxígeno disuelto facilita las reacciones electroquímicas al actuar como medio donde se disocian iones que completan el circuito de corrosión (LibreTexts, 2026; Metrohm, 2026).

En el **ánodo** ocurre la **oxidación del hierro**: los átomos metálicos pierden electrones y se convierten en iones ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ). Esta semirreacción representa la

pérdida real de metal y la liberación de electrones al circuito (Corus Group, 2004; Metrohm, 2026).

En el **cátodo**, los electrones liberados por el ánodo son consumidos por una reacción de **reducción**, comúnmente la reducción del oxígeno en presencia de agua para formar iones hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) (Metrohm, 2026; LibreTexts, 2026). Un esquema simplificado de las semirreacciones es el siguiente:

- Oxidación anódica:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$
- Reducción catódica (ejemplo común):  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

Estas reacciones electroquímicas parciales en conjunto constituyen el mecanismo de corrosión (Metrohm, 2026; Universidad Autónoma de Nuevo León, 2026).

La **reacción global** de corrosión del acero en presencia de agua y oxígeno produce compuestos de **óxidos e hidróxidos de hierro** (herrumbre), que son más estables termodinámicamente que el hierro metálico (ILCE, 2026; LibreTexts, 2026). Inicialmente se forma hidróxido ferroso ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), que posteriormente se oxida a hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) y otros óxidos de hierro que constituyen la herrumbre visible (ILCE, 2026; LibreTexts, 2026).

La **presencia simultánea de oxígeno y agua** es generalmente indispensable para que se produzca el proceso corrosivo en condiciones ambientales comunes, ya que ambos elementos facilitan las semirreacciones anódicas y catódicas (Corus Group, 2004; AI-FutureSchool, 2026). Sin uno de estos componentes —por ejemplo, en ausencia de oxígeno— el proceso se reduce considerablemente o puede requerir mecanismos alternativos (ILCE, 2026).

Con el tiempo, los productos de corrosión pueden modificar la distribución de **potenciales eléctricos** sobre la superficie del metal, generando zonas activas

adicionales y favoreciendo que el proceso continúe de manera generalizada o localizada (ILCE, 2026; Arquitectura en Acero, 2026). Por ejemplo, pequeñas diferencias de potencial entre distintas áreas de la superficie metálica pueden dar lugar a microcélulas galvánicas que aceleran la corrosión localizada (Arquitectura en Acero, 2026).

### 3. Factores que Influyen en la Velocidad de Corrosión

La velocidad de corrosión del acero estructural no depende únicamente de la naturaleza del material, sino de múltiples factores ambientales y constructivos que determinan la intensidad y progresión del proceso electroquímico. Normativas y guías internacionales establecen clasificaciones ambientales según su agresividad corrosiva, considerando parámetros como humedad, contaminación y temperatura (Building and Construction Authority [BCA], 2009; ISO, 2012).

#### 3.1 Tiempo de Humectación

El **tiempo de humectación (Time of Wetness, TOW)** se define como el período durante el cual la superficie metálica permanece cubierta por una película de electrolito (agua), condición necesaria para que ocurran las reacciones electroquímicas de corrosión (ISO, 2012). Según la norma ISO 9223, el TOW se considera cuando la humedad relativa supera aproximadamente el 80 % y la temperatura es superior a 0 °C.

Ambientes interiores secos presentan tasas de corrosión insignificantes debido a la baja disponibilidad de humedad, mientras que zonas exteriores con **condensación frecuente**, lluvias recurrentes o niebla salina incrementan significativamente el riesgo corrosivo (Corus Group, 2004; ISO, 2012). Estudios han demostrado que

existe una correlación directa entre mayor tiempo de humectación y mayor pérdida de espesor del acero a lo largo del tiempo (Morales et al., 2015).

### 3.2 Contaminación Atmosférica

La presencia de **contaminantes atmosféricos**, como cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), incrementa la conductividad del electrolito superficial, acelerando las reacciones anódicas y catódicas (BCA, 2009; ISO, 2012). Los **cloruros**, característicos de ambientes marinos, favorecen la ruptura de capas protectoras y promueven corrosión localizada (pitting), mientras que los **sulfatos** derivados de emisiones industriales pueden generar medios más ácidos que intensifican la degradación (Morales et al., 2015).

Los estándares internacionales clasifican los ambientes en categorías de corrosividad (C1 a CX) según la agresividad atmosférica, siendo los ambientes marinos e industriales pesados considerados altamente corrosivos (ISO, 2012). Por ejemplo, zonas costeras con alta deposición salina presentan tasas de pérdida de espesor significativamente mayores que ambientes rurales (BCA, 2009).

### 3.3 Temperatura

La **temperatura** influye directamente en la cinética de las reacciones electroquímicas, ya que un incremento térmico generalmente aumenta la velocidad de reacción según principios termodinámicos y cinéticos (Revie & Uhlig, 2008). Además, temperaturas elevadas pueden intensificar los **ciclos de condensación y secado**, generando variaciones frecuentes en el tiempo de humectación, lo cual favorece la formación y ruptura de productos de corrosión (Corus Group, 2004).

En climas cálidos y húmedos, la combinación de alta temperatura y humedad relativa produce condiciones especialmente agresivas para el acero estructural (ISO, 2012).

### 3.4 Diseño y Geometría

El **diseño estructural y los detalles constructivos** influyen considerablemente en la durabilidad frente a la corrosión. Elementos que permiten la acumulación de agua, suciedad o sales generan **microambientes corrosivos** que prolongan el tiempo de humectación y favorecen la corrosión localizada (BCA, 2009).

Las recomendaciones técnicas enfatizan la importancia de:

- Diseñar superficies inclinadas que faciliten el drenaje.
- Evitar cavidades cerradas o uniones que retengan humedad.
- Garantizar ventilación adecuada en elementos huecos.
- Permitir accesibilidad para inspección y mantenimiento.

Las guías de diseño para durabilidad estructural destacan que una concepción geométrica adecuada puede reducir significativamente los costos de mantenimiento y extender la vida útil del sistema estructural (BCA, 2009; ISO, 2012).

## 4. Tipos de Corrosión en Estructuras de Acero

La clasificación de los tipos de corrosión es fundamental para establecer **estrategias de prevención y control específicas**, ya que cada mecanismo presenta características, causas y consecuencias estructurales distintas (Revie & Uhlig, 2008; BCA, 2009). En estructuras de acero expuestas a ambientes

atmosféricos, marinos o industriales, los mecanismos más comunes incluyen los siguientes:

#### 4.1 Corrosión General (Uniforme)

La **corrosión general** se caracteriza por una pérdida relativamente uniforme de espesor en toda la superficie expuesta del acero. Es el tipo más común en ambientes atmosféricos y, aunque puede ser predecible, reduce progresivamente la sección resistente del elemento estructural (Corus Group, 2004; Revie & Uhlig, 2008).

Este tipo de corrosión suele modelarse mediante tasas promedio de pérdida de espesor ( $\mu\text{m/año}$ ), lo que permite estimar la vida útil remanente si se conoce la categoría de corrosividad ambiental según ISO 9223 (ISO, 2012).

#### 4.2 Corrosión Galvánica

La **corrosión galvánica** ocurre cuando dos metales con diferente potencial electroquímico están en contacto eléctrico en presencia de un electrolito. El metal más activo (ánodo) se corroe preferentemente, mientras que el más noble (cátodo) queda protegido (Corus Group, 2004; Revie & Uhlig, 2008).

La severidad del ataque depende de:

- La diferencia de potencial entre los metales.
- La relación de áreas ánodo/cátodo.
- La conductividad del electrolito.

En estructuras de acero, este fenómeno puede presentarse cuando se combinan elementos de acero al carbono con acero inoxidable, aluminio o cobre sin un aislamiento adecuado (BCA, 2009).

#### 4.3 Corrosión por Hendidura (Crevice Corrosion)

La **corrosión por hendidura** se desarrolla en espacios confinados donde el acceso de oxígeno es limitado, como uniones atornilladas, solapes, juntas o zonas bajo empaques. La diferencia de concentración de oxígeno entre el interior de la hendidura y el exterior genera una celda de concentración que acelera la corrosión dentro del espacio confinado (Corus Group, 2004; Revie & Uhlig, 2008).

Este tipo de ataque es particularmente peligroso porque puede pasar inadvertido hasta que se produce una pérdida significativa de sección. El diseño que evita cavidades cerradas y facilita el drenaje es clave para su prevención (BCA, 2009).

#### 4.4 Corrosión por Picadura (Pitting Corrosion)

La **corrosión por picadura** es un ataque altamente localizado que genera cavidades profundas en puntos específicos de la superficie metálica. Aunque la pérdida total de masa puede ser pequeña, la penetración localizada puede comprometer gravemente la integridad estructural (BCA, 2009; Revie & Uhlig, 2008).

Es frecuente en ambientes con presencia de **iones cloruro**, como zonas marinas o donde se emplean sales de deshielo. Las picaduras pueden actuar como concentradores de esfuerzos y desencadenar fallas prematuras, especialmente bajo cargas cíclicas (ISO, 2012).

#### 4.5 Corrosión Bajo Tensión (Stress Corrosion Cracking, SCC)

La **corrosión bajo tensión (SCC)** es el resultado de la interacción simultánea entre:

- Esfuerzos de tracción (aplicados o residuales).
- Un ambiente químicamente agresivo.

Este fenómeno puede generar grietas frágiles que se propagan sin deformación plástica significativa, lo que representa un riesgo estructural elevado (Corus Group, 2004; Revie & Uhlig, 2008).

En aceros estructurales, la SCC puede presentarse en ambientes industriales específicos o en presencia de ciertos agentes químicos. Su prevención requiere control del ambiente, reducción de esfuerzos residuales y adecuada selección de materiales (BCA, 2009).

## 5. Principios de Diseño para Minimizar la Corrosión

El **diseño estructural** es un factor determinante en la durabilidad de las estructuras de acero, ya que puede favorecer o mitigar la exposición prolongada a agentes corrosivos. Diversas guías técnicas establecen que una concepción adecuada desde la etapa de proyecto reduce significativamente los costos de mantenimiento y prolonga la vida útil del sistema estructural (Building and Construction Authority [BCA], 2009; ISO, 2018).

Uno de los principios fundamentales es **evitar cavidades, solapes innecesarios y zonas que retengan humedad o contaminantes**, ya que estos espacios pueden generar microambientes agresivos con bajo contenido de oxígeno que favorecen la corrosión localizada (BCA, 2009; Revie & Uhlig, 2008). Asimismo, se recomienda proporcionar **pendientes y sistemas de drenaje adecuados**, de modo que el agua no permanezca acumulada sobre superficies horizontales.

### 5.1 Control de Contactos Bimetálicos

El diseño debe minimizar o aislar los **contactos entre metales distintos** para prevenir la corrosión galvánica. Cuando no sea posible evitar la unión de materiales con diferente potencial electroquímico, se recomienda:

- Interponer materiales aislantes.
- Aplicar recubrimientos protectores en el metal más noble o en ambos.
- Diseñar relaciones de área favorables (ánodo mayor que cátodo).

Estas recomendaciones se encuentran alineadas con los criterios de prevención indicados en ISO 12944, que establece lineamientos para protección mediante sistemas de pintura en estructuras de acero (ISO, 2018).

### 5.2 Geometría y Preparación Superficial

El diseño con **bordes redondeados** y transiciones suaves mejora la adherencia y el desempeño de los recubrimientos protectores. Las aristas vivas dificultan la aplicación uniforme de pintura o galvanizado, generando espesores reducidos en puntos críticos donde puede iniciarse la corrosión (BCA, 2009; ISO, 2018).

Además, las normas técnicas recomiendan radios mínimos en bordes y una adecuada preparación superficial (por ejemplo, limpieza por chorro abrasivo) para garantizar la durabilidad del sistema de protección (ISO, 2018).

### 5.3 Accesibilidad para Inspección y Mantenimiento

Un principio esencial del diseño para durabilidad es asegurar la **accesibilidad para inspección, limpieza y mantenimiento periódico**. Elementos inaccesibles

dificultan la detección temprana de deterioro y pueden permitir que la corrosión avance sin control (BCA, 2009).

El enfoque moderno de ingeniería estructural integra el concepto de **diseño basado en ciclo de vida**, en el que se consideran desde la etapa de proyecto los costos futuros de mantenimiento y rehabilitación (Revie & Uhlig, 2008). La planificación adecuada del mantenimiento puede extender significativamente la vida útil proyectada y mantener la seguridad estructural.

## 6. Preparación de Superficies

La **preparación superficial** es uno de los factores más críticos para garantizar el desempeño y la durabilidad de los sistemas de recubrimiento anticorrosivo en estructuras de acero. Diversos estudios demuestran que una proporción significativa de las fallas prematuras en recubrimientos se debe a una preparación inadecuada de la superficie (Corus Group, 2004; Revie & Uhlig, 2008).

Los estándares internacionales establecen **grados específicos de limpieza y perfiles de rugosidad** que deben alcanzarse antes de la aplicación de pinturas protectoras. Por ejemplo, la norma ISO 8501-1 clasifica la preparación superficial mediante inspección visual (grados Sa, St), mientras que ISO 8503 define métodos para evaluar el perfil de rugosidad generado por chorro abrasivo (ISO, 2007; ISO, 2012). Estas especificaciones son fundamentales para asegurar la correcta adherencia mecánica del recubrimiento.

### 6.1 Métodos de Preparación

Los métodos de preparación superficial incluyen:

- **Limpieza manual o mecánica (St2, St3):** mediante cepillos, raspadores o herramientas eléctricas, recomendada para mantenimientos localizados.
- **Chorro abrasivo (Sa1, Sa2, Sa2½, Sa3):** considerado el método más efectivo para remover óxido, cascarilla de laminación y contaminantes, además de generar el perfil de anclaje requerido (BCA, 2009; ISO, 2007).

El grado Sa 2½ (chorro abrasivo casi al metal blanco) es comúnmente especificado en estructuras expuestas a ambientes de corrosividad media a alta (ISO, 2018).

## 6.2 Control de Contaminantes y Condiciones Ambientales

Además de la limpieza visible, es indispensable medir la presencia de **sales solubles**, particularmente cloruros, ya que estos pueden permanecer en la superficie incluso después del chorreado y generar corrosión bajo película (ISO, 2018). La norma ISO 8502-9 establece procedimientos para determinar la concentración de sales solubles en superficies preparadas.

También deben verificarse las **condiciones ambientales** durante la aplicación del recubrimiento, tales como:

- Temperatura del acero.
- Humedad relativa.
- Punto de rocío.

Se recomienda que la temperatura de la superficie esté al menos 3 °C por encima del punto de rocío para evitar condensación, la cual puede comprometer la adherencia del sistema protector (BCA, 2009; ISO, 2018).

## 6.3 Consecuencias de una Preparación Deficiente

Una preparación superficial deficiente puede provocar:

- Baja adherencia del recubrimiento.
- Formación de ampollamiento (blistering).
- Corrosión bajo película.
- Desprendimiento prematuro.

Estas fallas reducen drásticamente la vida útil proyectada del sistema protector y aumentan los costos de mantenimiento correctivo (Corus Group, 2004; Revie & Uhlig, 2008). Por ello, la inspección y verificación del perfil de rugosidad, limpieza y condiciones ambientales forman parte esencial del aseguramiento de calidad en proyectos de protección anticorrosiva.

## 7. Sistemas de Protección

La selección del sistema de protección contra la corrosión depende de la **categoría de corrosividad ambiental**, la vida útil de diseño requerida, las condiciones de mantenimiento y el costo del ciclo de vida. Las normas internacionales establecen criterios para seleccionar sistemas adecuados según la agresividad del entorno (BCA, 2009; ISO, 2018).

### 7.1 Sistemas de Pintura

Los **sistemas de pintura multicapa** constituyen uno de los métodos más utilizados para la protección del acero estructural. Generalmente incluyen:

- **Imprimaciones ricas en zinc** (protección catódica inicial).
- **Capas intermedias epóxicas** (barrera anticorrosiva).

- **Acabados poliuretánicos** resistentes a radiación UV y agentes atmosféricos.

Las imprimaciones con alto contenido de zinc proporcionan protección galvánica al actuar como ánodo de sacrificio en caso de daño del recubrimiento (BCA, 2009; Revie & Uhlig, 2008).

La norma ISO 12944 clasifica los ambientes (C1–CX) y define sistemas de pintura recomendados según la durabilidad esperada (baja, media, alta o muy alta) (ISO, 2018). La correcta selección del espesor total de película seca (DFT) es determinante para alcanzar la vida útil proyectada.

## 7.2 Galvanizado por Inmersión en Caliente

El **galvanizado por inmersión en caliente** consiste en sumergir el acero previamente preparado en zinc fundido (~450 °C), generando capas intermetálicas de hierro-zinc metalúrgicamente adheridas al sustrato (Corus Group, 2004; Revie & Uhlig, 2008).

Este sistema proporciona:

- **Protección por barrera**, al aislar el acero del ambiente.
- **Protección catódica**, ya que el zinc actúa como ánodo de sacrificio en caso de discontinuidades del recubrimiento.

El desempeño del galvanizado depende del espesor del recubrimiento, regulado por normas como ISO 1461, que establece requisitos mínimos de espesor según el tipo y espesor del acero (ISO, 2022).

En ambientes rurales o urbanos moderados, el galvanizado puede proporcionar varias décadas de protección sin mantenimiento significativo.

### 7.3 Proyección Térmica

La **proyección térmica** (metalización) consiste en pulverizar zinc o aluminio fundido sobre la superficie del acero mediante procesos de arco eléctrico o llama. El recubrimiento resultante es mecánicamente adherido y generalmente requiere un **sellador posterior** para reducir la porosidad y mejorar la durabilidad (BCA, 2009; ISO, 2018).

Este sistema es especialmente útil para:

- Estructuras de gran tamaño que no pueden galvanizarse por inmersión.
- Reparaciones localizadas en estructuras existentes.

La combinación de proyección térmica con sistemas de pintura (sistema dúplex) puede aumentar considerablemente la vida útil del sistema protector.

### 7.4 Aceros Patinables

Los **aceros patinables** (también llamados aceros resistentes a la corrosión atmosférica) contienen elementos aleantes como cobre, cromo y níquel que favorecen la formación de una **pátina compacta y adherente** que reduce la tasa de corrosión con el tiempo (Corus Group, 2004; ASTM, 2021).

Un ejemplo ampliamente utilizado es el acero tipo ASTM A588, empleado en puentes y estructuras expuestas. Sin embargo, su desempeño es adecuado únicamente en ambientes con ciclos alternados de humedad y secado; en ambientes permanentemente húmedos o con alta concentración de cloruros, la pátina puede no estabilizarse adecuadamente (Revie & Uhlig, 2008).

### 7.5 Aceros Inoxidables

Los **aceros inoxidables** contienen al menos 10.5–11 % de cromo, lo que permite la formación espontánea de una **película pasiva de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )** que protege al material frente a la corrosión (Revie & Uhlig, 2008).

Los grados más utilizados en construcción incluyen:

- AISI 304: adecuado para ambientes urbanos y rurales.
- AISI 316: contiene molibdeno, ofreciendo mayor resistencia a la corrosión por cloruros, ideal para ambientes marinos o industriales.

Aunque su costo inicial es mayor que el del acero al carbono protegido, el acero inoxidable puede resultar competitivo en términos de **costo de ciclo de vida**, especialmente en ambientes altamente agresivos (ISO, 2018).

## 8. Especificación Técnica del Tratamiento Protector

La **especificación técnica del sistema de protección anticorrosiva** constituye un documento contractual fundamental que define los requisitos mínimos de desempeño, control de calidad e inspección para garantizar la durabilidad proyectada de la estructura. Una especificación incompleta o ambigua puede derivar en fallas prematuras, sobrecostos y controversias contractuales (Corus Group, 2004; Building and Construction Authority [BCA], 2009).

De acuerdo con normas internacionales, la especificación debe desarrollarse de manera estructurada y coherente, alineada con la categoría de corrosividad ambiental establecida, por ejemplo, según ISO 12944 (ISO, 2018).

### 8.1 Contenido Mínimo de la Especificación

Una especificación técnica adecuada debe incluir, como mínimo:

### Método de Preparación Superficial

Debe indicarse el grado de limpieza requerido (por ejemplo, Sa 2½ o Sa 3) conforme a ISO 8501-1 (ISO, 2007). Asimismo, se debe definir el perfil de rugosidad requerido según ISO 8503, incluyendo rangos aceptables de anclaje para asegurar la correcta adherencia del recubrimiento.

También deben establecerse límites máximos de sales solubles en superficie conforme a ISO 8502-9.

### Tipo de Recubrimiento

Se debe especificar:

- Tipo de imprimación (ej. rica en zinc, epóxica).
- Tipo de capa intermedia.
- Tipo de acabado (ej. poliuretano, polisiloxano).
- Compatibilidad entre capas.

La selección debe justificarse conforme a la categoría ambiental (C1–CX) y vida útil esperada (baja, media, alta o muy alta) según ISO 12944 (ISO, 2018).

### Número de Capas y Espesores Mínimos

Debe indicarse el **espesor mínimo de película seca (DFT)** por capa y el espesor total del sistema. El control de espesores debe realizarse conforme a normas internacionales de medición, como ISO 19840, que establece criterios de aceptación y tolerancias.

### Condiciones de Aplicación

La especificación debe definir:

- Rango de temperatura ambiente y del sustrato.
- Humedad relativa máxima permitida.
- Diferencia mínima entre temperatura del acero y punto de rocío (usualmente  $\geq 3$  °C).

Estas condiciones son críticas para evitar defectos como ampollamiento, falta de adherencia o curado incompleto (BCA, 2009; ISO, 2018).

### **Procedimientos de Inspección y Aseguramiento de Calidad**

Debe incluir:

- Inspección visual de limpieza.
- Medición de perfil de rugosidad.
- Verificación de sales solubles.
- Medición de espesores secos.
- Pruebas de adherencia si se requieren.

La norma ISO 4624 establece métodos para evaluar la resistencia a la adherencia del recubrimiento (ISO, 2016).

### **8.2 Claridad Contractual y Redacción Técnica**

La redacción de la especificación debe ser:

- **Clara** (sin ambigüedades técnicas).
- **Secuencial** (orden lógico de ejecución).
- **Medible** (criterios cuantificables de aceptación).

- **Verificable** (procedimientos de inspección definidos).

Las ambigüedades contractuales pueden generar discrepancias entre contratista, inspector y propietario, afectando la calidad final del sistema protector (Corus Group, 2004). Por ello, las mejores prácticas recomiendan referenciar explícitamente normas técnicas vigentes y evitar descripciones genéricas como “limpieza adecuada” o “espesor suficiente”.

## 9. Inspección y Control de Calidad

El **control de calidad** en sistemas de protección anticorrosiva es un componente esencial para garantizar que la estructura cumpla con la vida útil proyectada y los criterios de desempeño establecidos en la especificación técnica. La inspección debe realizarse de manera sistemática durante todas las etapas: preparación superficial, aplicación del recubrimiento y evaluación en servicio (Building and Construction Authority [BCA], 2009; ISO, 2018).

### 9.1 Verificación de Condiciones Ambientales

Antes y durante la aplicación del sistema protector, se deben verificar:

- Temperatura ambiente.
- Temperatura del sustrato.
- Humedad relativa.
- Punto de rocío.

La norma ISO 8502-4 establece lineamientos para evitar condensación sobre la superficie. Se recomienda que la temperatura del acero esté al menos 3 °C por encima del punto de rocío (ISO, 2018).

## 9.2 Medición de Espesores de Película Seca

El control del **espesor de película seca (DFT)** debe realizarse conforme a ISO 19840, que establece criterios estadísticos de aceptación para superficies rugosas (ISO, 2012).

El incumplimiento de espesores mínimos puede reducir significativamente la durabilidad del sistema, mientras que excesos pueden generar defectos de curado o agrietamiento.

## 9.3 Evaluación del Grado de Deterioro del Recubrimiento

Para la inspección en servicio, existen **tablas normalizadas** que permiten clasificar visualmente el grado de deterioro del sistema protector. Estas tablas proporcionan criterios cuantitativos que reducen la subjetividad en la evaluación.

### a) Grado de Oxidación

La norma ISO 4628-3 clasifica el **grado de oxidación (Ri)** en una escala de 0 a 5 según el porcentaje de superficie afectada:

**Tabla 9.1. Clasificación del grado de oxidación superficial**

Grado (Ri)	Porcentaje aproximado de superficie oxidada	Descripción técnica
Ri0	0 %	Sin presencia visible de corrosión
Ri1	≤ 0.05 %	Puntos aislados apenas perceptibles

Grado (Ri)	Porcentaje aproximado de superficie oxidada	Descripción técnica
Ri2	$\leq 0.5 \%$	Pequeñas áreas dispersas
Ri3	$\leq 1 \%$	Corrosión visible distribuida
Ri4	$\leq 8 \%$	Áreas extensas de oxidación
Ri5	$> 8 \%$	Corrosión severa generalizada

(Fuente: ISO 4628-3, 2016)

La clasificación Ri permite estandarizar la evaluación visual del deterioro del recubrimiento. Su aplicación es fundamental para:

1. Determinar si el daño es superficial o progresivo.
2. Definir el momento adecuado de intervención.
3. Comparar inspecciones periódicas.
4. Sustentar decisiones contractuales y técnicas.

Por ejemplo:

- Un grado **Ri1 o Ri2** suele indicar necesidad de mantenimiento preventivo.
- Un grado **Ri3** puede requerir reparación localizada.
- Grados **Ri4 o Ri5** generalmente implican intervención correctiva mayor o evaluación estructural detallada.

Esta metodología proporciona objetividad en el diagnóstico y reduce la subjetividad del inspector.

### b) Ampollamiento (Blistering)

La norma ISO 4628-2 evalúa el **grado y tamaño de ampollamiento**, considerando:

- Densidad (cantidad de ampollas).
- Tamaño (clasificación S1 a S5).

La combinación de ambos parámetros permite definir el nivel de severidad.

### c) Desprendimiento y Agrietamiento

Las normas ISO 4628-4 y ISO 4628-5 establecen criterios visuales para evaluar:

- Grado de agrietamiento (densidad y tamaño).
- Grado de descascaramiento o desprendimiento del recubrimiento.

Estas tablas incluyen fotografías de referencia comparativa para mejorar la uniformidad en la inspección.

## 9.4 Clasificación del Ambiente y Programación de Inspecciones

La frecuencia de inspección en servicio debe establecerse según la categoría de corrosividad ambiental definida en ISO 9223 (ISO, 2012).

Por ejemplo:

- Ambientes C2–C3 (baja a media corrosividad): inspecciones cada 2–5 años.
- Ambientes C4–C5 (alta corrosividad): inspecciones cada 1–2 años.
- Ambientes marinos severos (CX): inspecciones anuales recomendadas.

Las estructuras en zonas marinas presentan mayor deposición de cloruros y requieren monitoreo periódico programado (BCA, 2009).

### 9.5 Documentación y Trazabilidad

El control de calidad debe incluir:

- Reportes fotográficos.
- Registros de clasificación de deterioro según ISO 4628.
- Historial de espesores medidos.
- Registro de reparaciones y mantenimiento.

La documentación sistemática permite evaluar la evolución del deterioro y planificar intervenciones antes de que se comprometa la capacidad estructural.

## 10. Mantenimiento y Reparación

El mantenimiento de estructuras de acero expuestas a ambientes corrosivos constituye una etapa fundamental dentro del enfoque de **gestión del ciclo de vida estructural**. Una vez detectado el deterioro mediante inspección técnica, deben adoptarse estrategias proporcionales al nivel de daño observado, considerando tanto el estado del recubrimiento como la posible afectación de la sección resistente.

La literatura especializada establece que la intervención puede clasificarse en:

1. mantenimiento del sistema protector,

2. reparación estructural localizada,
3. refuerzo estructural, o
4. sustitución parcial o total del elemento comprometido (Building and Construction Authority [BCA], 2009; Corus Group, 2004).

### 10.1 Diagnóstico Técnico Previo a la Intervención

Antes de definir cualquier estrategia de reparación, es indispensable realizar una evaluación técnica integral que incluya:

- Medición de espesores remanentes mediante ultrasonido.
- Identificación del tipo de corrosión (general, por picadura, galvánica, etc.).
- Determinación de profundidad de picaduras.
- Evaluación del estado de conexiones y soldaduras.
- Análisis estructural para verificar capacidad residual.

El análisis debe contrastar la sección efectiva remanente con los requisitos normativos de diseño estructural establecidos en EN 1993-1-1 o la normativa aplicable en la jurisdicción correspondiente.

La planificación de intervenciones debe alinearse con los principios de gestión de vida útil definidos en ISO 15686-1, los cuales establecen que las decisiones de mantenimiento deben optimizar desempeño, seguridad y costo total del activo.

### 10.2 Reaplicación del Sistema Protector

Cuando el deterioro se limita al recubrimiento y no existe pérdida significativa de sección, la intervención consiste en restaurar la protección anticorrosiva.

El procedimiento general incluye:

1. Eliminación de productos de corrosión y pintura deteriorada.
2. Preparación superficial conforme a ISO 8501-1 (por ejemplo, grado Sa 2½).
3. Control ambiental (temperatura, humedad relativa, punto de rocío).
4. Aplicación de imprimante y sistema multicapa compatible.

La selección del nuevo sistema debe corresponder a la categoría de corrosividad ambiental definida en ISO 12944.

Cuando la intervención es oportuna, puede restablecer completamente la vida útil proyectada del sistema protector (BCA, 2009).

### 10.3 Reparación con Pérdida Parcial de Sección

Si se detecta reducción medible de espesor, la decisión dependerá de:

- Porcentaje de pérdida de sección.
- Tipo de elemento (viga, columna, arriostramiento).
- Nivel de sollicitación estructural.
- Redundancia del sistema.

Corus Group (2004) señala que la corrosión generalizada produce reducción uniforme, mientras que la corrosión por picadura puede generar concentraciones de esfuerzo críticas aun con pérdidas porcentuales relativamente pequeñas.

Las técnicas de reparación incluyen:

- Soldadura de placas de refuerzo.
- Colocación de camisas metálicas.
- Adición de perfiles suplementarios.
- Refuerzo mediante atornillado estructural.

El diseño del refuerzo debe verificar:

- Estado límite último (resistencia).
- Estado límite de servicio (deformaciones).
- Posibles concentraciones de esfuerzos.

#### 10.4 Sustitución de Elementos

Cuando la pérdida de sección excede valores admisibles o compromete la estabilidad global, se recomienda la sustitución total del componente.

En términos generales:

- Pérdidas superiores al 20–25 % en elementos primarios suelen requerir análisis detallado.
- Picaduras profundas que reducen significativamente la sección efectiva pueden justificar reemplazo aun con menor pérdida promedio.
- Elementos sometidos a fatiga presentan mayor sensibilidad al daño corrosivo.

La sustitución debe planificarse considerando seguridad durante desmontaje, continuidad estructural temporal y compatibilidad con el sistema existente.

### 10.5 Estrategias de Mantenimiento Según Nivel de Deterioro

Nivel de deterioro	Condición típica	Estrategia recomendada
Leve	Degradación superficial del recubrimiento	Limpieza y repintado localizado
Moderado	Corrosión visible con pérdida <15 %	Reparación puntual + refuerzo ligero
Severo	Pérdida 15–25 % o picaduras profundas	Evaluación estructural detallada + refuerzo
Crítico	Pérdida >25 % o compromiso de estabilidad	Sustitución del elemento

Esta clasificación permite optimizar recursos y evitar intervenciones excesivas o tardías.

### 10.6 Consideraciones Económicas y de Gestión

El mantenimiento oportuno reduce significativamente el costo total del ciclo de vida. Estudios técnicos indican que intervenir en etapas tempranas puede disminuir costos hasta en un 60–70 % en comparación con rehabilitaciones mayores (BCA, 2009).

El enfoque moderno privilegia:

- Inspecciones programadas.

- Registro histórico de intervenciones.
- Modelos predictivos de deterioro.
- Presupuestación basada en riesgo.

### 10.7 Rehabilitación Integral

En estructuras antiguas o altamente expuestas (ambientes marinos o industriales severos), puede requerirse:

- Remoción total del sistema protector existente.
- Chorro abrasivo hasta metal casi blanco.
- Aplicación de sistemas de alta durabilidad ( $\geq 15$ –25 años).
- Incorporación de protección catódica complementaria.

La decisión debe basarse en análisis técnico-económico que considere vida útil remanente y costos de sustitución total de la estructura.

### Conclusión Técnica

El mantenimiento y reparación de estructuras de acero no debe abordarse como una acción correctiva aislada, sino como parte de un sistema de gestión integral del activo. La evaluación debe distinguir claramente entre deterioro del recubrimiento y pérdida real de capacidad estructural. La intervención temprana, técnicamente fundamentada y alineada con estándares internacionales, permite prolongar la vida útil, reducir riesgos y optimizar costos globales (BCA, 2009; Corus Group, 2004).

## Referencias (Listado Unificado)

AI-FutureSchool. (2026). *Comprendiendo la corrosión electroquímica en metales*.

Arquitectura en Acero. (2026). *Microceldas galvánicas y corrosión localizada*.

ASTM International. (2021). *ASTM A588/A588M – Standard specification for high-strength low-alloy structural steel with atmospheric corrosion resistance*. West Conshohocken, PA: ASTM.

Building and Construction Authority. (2009). *Guide on corrosion protection for structural steelwork*. Singapore: BCA.

Corus Group. (2004a). *The prevention of corrosion on structural steelwork*. Corus Construction & Industrial.

Corus Group. (2004b). *The corrosion of steel and how to prevent it*. United Kingdom: Corus.

Di Sarno, L., Majidian, A., & Karagiannakis, G. (2021). The effect of atmospheric corrosion on steel structures: A state-of-the-art and case-study. *Buildings*, 11(12), 571. <https://doi.org/10.3390/buildings11120571>

European Committee for Standardization. (2005). *EN 1993-1-1: Eurocode 3 — Design of steel structures*. Brussels: CEN.

ILCE. (2026). *Corrosión inducida por contaminación del agua*. Biblioteca Digital del ILCE.

International Organization for Standardization. (1998). *ISO 8502-9: Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Tests for the assessment of surface cleanliness — Part 9: Field method for the conductometric determination of water-soluble salts*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2007). *ISO 8501-1: Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Visual assessment of surface cleanliness*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2011). *ISO 15686-1: Buildings and constructed assets — Service life planning*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2012a). *ISO 8503: Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2012b). *ISO 19840: Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Measurement of, and acceptance criteria for, the thickness of dry films on rough surfaces*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2012c). *ISO 9223: Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2016a). *ISO 4624: Paints and varnishes — Pull-off test for adhesion*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2016b). *ISO 4628-2: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Part 2: Assessment of degree of blistering*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2016c). *ISO 4628-3: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Part 3: Assessment of degree of rusting*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2016d). *ISO 4628-4: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Part 4: Assessment of degree of cracking*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2016e). *ISO 4628-5: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Part 5: Assessment of degree of flaking*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2017). *ISO 8502-4: Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Guidance on the estimation of the probability of condensation prior to paint application*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 12944: Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2022). *ISO 1461: Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles — Specifications and test methods*. Geneva: ISO.

LibreTexts Español. (2026). *Corrosión, hierro y manganeso*.

Maraveas, C. (2020). Durability issues and corrosion of structural materials and systems in farm environment. *Applied Sciences*, 10(3), 990. <https://doi.org/10.3390/app10030990>

Metrohm Argentina S.A. (2026). *Fundamentos de la investigación sobre la corrosión electroquímica (White paper)*.

Morales, J., Díaz, I., Cano, H., & Chico, B. (2015). Atmospheric corrosion in marine and industrial environments: Influence of environmental parameters. *Materials and Corrosion*, 66(9), 1–10.

Perneta, H., Correia, M. J., & Salta, M. (2015). *Corrosion protection of steel structures*.

Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Rodríguez Díaz, G. J. (2023). *Corrosión en concreto armado y acero*. Universidad Nacional de Ingeniería (Perú).

Secretaría EPN. (2026). *Corrosión del acero: fundamentos y características*. Biblioteca Digital EPN.

Universidad Autónoma de Nuevo León. (2026). *Generalidades y fundamentos de la corrosión*.

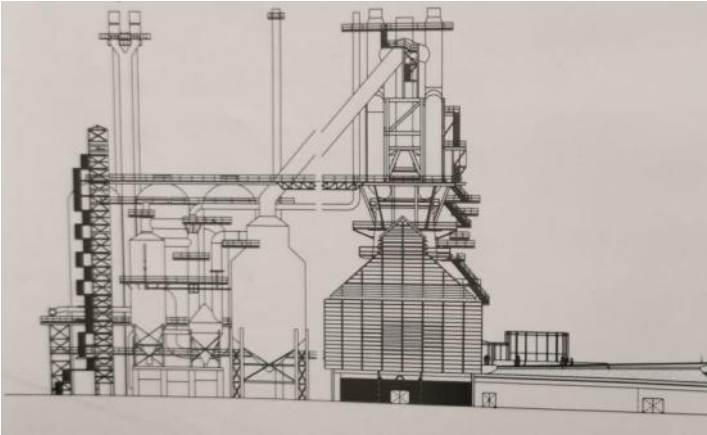
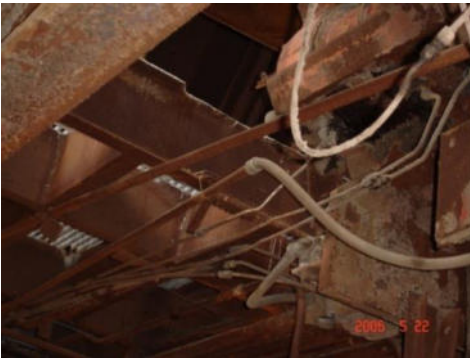


Foto # 1- Plano Elevación lateral del Horno 3  
Estado Inicial del Horno  
Horno

Foto 2 y 3  
Foto # 4-Limpieza Inicial del  
Horno



Fotos 5, 6, 7 y 8- limpieza de canales





Fotos 9, 10, 11 y 12- tipos de daños por corrosión encontrados en la estructura



Fotos 9, 10, 11 y 12- Reposición de estructura



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL





Fotos 13, 14, 15, 16 --- Refuerzo y sustitución de estructura



Fotos 17, 18, 19 y 20 Sustitución de estructura



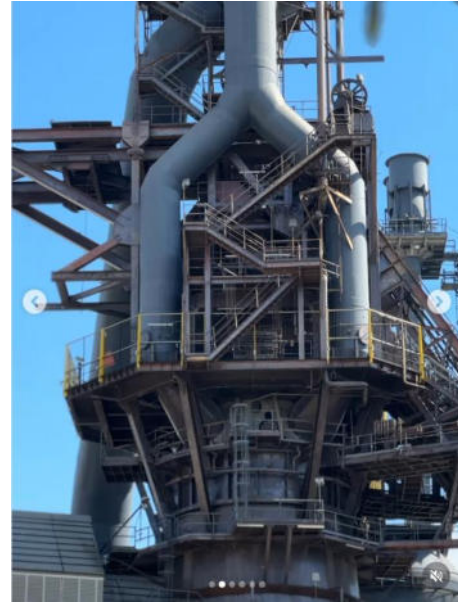
Fotos 21, 22 y 23 incorporación de Sistemas de seguridad para uso publico



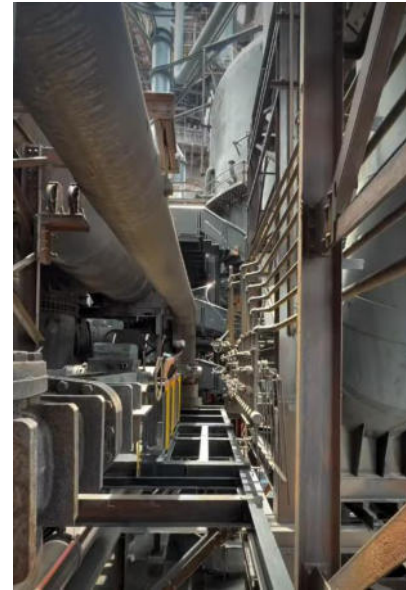


Fotos 24, 25 y 26 -preparación de la superficie y pintura





Fotos 27, 28 y 29 Resultado de aplicación de recubrimiento



Fotos 30,31, 32 y 33 Conservación de aspecto industrial é histórico

## **CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:**

### **Conclusiones**

La intervención del Horno 3 del parque fundidora constituye un caso exitoso de diagnóstico, estabilización y reconveccion funcional de una estructura industrial severamente deteriorada por agentes físicos, químicos y ambientales acumulados durante décadas de operación y abandono. Las patologías identificadas, (principalmente corrosión generalizada y localizada en elementos metálicos estructurales, con la consecuente pérdida de sección resistente, corrosión por alta temperatura, así como desprendimientos del material refractario en zonas críticas), evidenciaron la necesidad de un estudio integral que combinara inspección visual especializada, evaluación no destructiva y análisis estructural visual.

Desde el punto de vista de conservación patrimonial, la rehabilitación no solo implicó la restitución de la capacidad mecánica de los elementos dañados, sino la adaptación a las nuevas solicitaciones de carga derivadas del uso público, tales como la incorporación de recorridos seguros, refuerzos localizados y sistemas de protección anticorrosiva incorporando criterios de conservación industrial, respetando la autenticidad de uso histórico.

Así mismo, la transformación del alto horno en el Museo del Acero Horno 3, consolidó un modelo exitoso de reconveccion educativa y revitalización urbana.

## Recomendaciones

Se recomienda implementar un programa permanente de monitoreo estructural que incluya inspecciones periódicas: medición de espesores estructurales control de la corrosión y evaluación de recubrimientos protectores, con el fin de anticipar procesos patológicos recurrentes. Es indispensable mantener un plan de mantenimiento preventivo de acuerdo a las especificaciones del fabricante de los protectores.

Asimismo, se sugiere documentar sistemáticamente todas las intervenciones futuras, generando un historial técnico que sirva como base para para investigaciones académicas y toma de decisiones. Finalmente se recomienda promover estudios interdisciplinarios que integren ingeniería, conservación patrimonial y gestión cultural, fortaleciendo la formación de especialistas capaces de intervenir estructuras industriales con enfoque sostenible.

Actualmente el Horno 3, no solo constituye un icono del patrimonio industrial Regiomontano, sino también un modelo de resiliencia histórica, social y cultural. Su conservación simboliza la transición de un espacio de producción a uno de memoria social, donde la Ingeniería aplicada a la preservación material permite resignificar la historia del Desarrollo económico- social de un país y su impacto en la identidad urbana de Monterrey.



Foto 34 Aspecto inicial del conjunto Horno 3

Fotos 35 y 36 Aspecto final exterior del Horno después de la conservación

## REFERENCIAS

- 1 Seçer, M.; Saylan, A.A. Evaluación de estrategias de gestión de la corrosión para puentes de vigas de acero basadas en la capacidad de carga máxima y el coste directo de la vida útil . *Struct. Infrastruct. Eng.* **2025**, *21*, 675-694. [[CrossRef](#)]
- 2 Construcción Sostenible, Guia sobre la protección contra corrosión de estructuras de acero BCA Dr. John Keung
- 3 página 1308 de The Steel Designers' Manual, 6.<sup>a</sup> edición. Autorización concedida por The Steel Construction Institute y Blackwell Publishing.