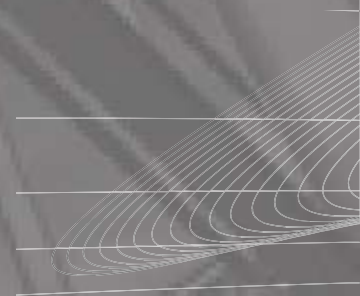


Análisis del fenómeno de la corrosión en aceros de tipo estructural desde el punto de vista de su uso en la industria de la ingeniería civil.

Analysis of the phenomenon of corrosion in structural steels from the point of view of their use in industry of civil engineering.

José Leonardo Sánchez Mondragón

Facultad Ingeniería Civil
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
Correo-e: Leonardo.sanchez@usantoto.edu.co



Resumen

El mineral de hierro es uno de los elementos que más predominan en nuestro planeta sobre la corteza terrestre y el cual al ser transformado mediante una aleación con el carbono forman el material que se conoce comúnmente como el acero. Hay diversas formas de identificar y clasificar este tipo de material dependiendo de su uso, ya sea doméstico, industrial o para construcciones civiles. A pesar de que el acero que más ha tenido uso en la ingeniería civil es el acero al carbono, hoy en día han surgido técnicas de transformación de este material que lo han convertido y han permitido potenciar todas sus propiedades tanto físicas como mecánicas. En esta investigación se hizo un análisis, relacionando a los tres tipos de aceros más comunes y utilizados para la fabricación de estructuras metálicas (acero al carbono, acero inoxidable y acero autoprotector), haciendo referencia principalmente a los dos últimos dado su grado de uso tanto en la industria y el comercio como en la ingeniería civil y haciendo énfasis en el fenómeno de la corrosión. Se determinó como afectan sus velocidades de corrosión, sus propiedades y características, todo esto teniendo en cuenta la información obtenida mediante una revisión bibliográfica sobre procesos experimentales, ensayos y pruebas de laboratorio, adicional a esto complementado con una fase experimental básica y desarrollada de manera propia (metalografía de los metales). Por medio del análisis de la corrosión entre los diferentes tipos de acero mencionados, se observó una notable diferencia entre el efecto que causa esta lesión y los factores que predominan en ella; es de vital importancia tener en cuenta este aspecto ya que define la calidad del material en el momento de ser utilizado como materia prima sobre todo en el campo de la ingeniería en el diseño de estructuras metálicas (especialmente puentes) dado todos los factores ambientales - atmosféricos, sociales y económicos que influyen en su vida útil. La tecnología avanza muy rápido y en el ámbito de la ingeniería civil la forma de diseñar estructuras de acero se hace cada vez de una forma más simplificada, definitivamente el acero es un material que tiene muchas características, entre ellas flexibilidad, bajo costo, fácil instalación que funcionan como ventajas sobre otros materiales existentes como por ejemplo el concreto.

Palabras clave: acero autoprotector, acero inoxidable, corrosión, corrosión atmosférica, hierro, oxidación, patología.

Para citar este artículo: Sanchez-Mondragon, J.L. "Análisis del fenómeno de la corrosión en aceros de tipo estructural desde el punto de vista de su uso en la industria de la ingeniería civil." In *L'Esprit Ingenieux*. Vol. 10-1, pp. 9 a 34.

Abstract

Iron ore is one of the elements that predominate in our planet on the earth's crust and which to be transformed through an alloy with the carbon form the material that we know commonly referred to as the steel. There are numerous ways to identify and classify this type of material depending on its use, whether domestic, industrial or for civil construction. Despite the fact that the steel that has had use in civil engineering is the carbon steel, today have arisen techniques of transformation of this material that have been converted and have made it possible to enhance all of its properties, both physical and mechanical properties. In this research, an analysis was made, relating to the three most common types of steel and used for the manufacture of metal structures (carbon steel, stainless steel and weathering steel), referring mainly to the last two given their degree of usage both in industry and commerce as in civil engineering and an emphasis on the phenomenon of corrosion. It was determined how to affect their corrosion rates, their properties, and characteristics, all this considering the information obtained through a review of the literature on experimental processes, tests, and laboratory tests. Analyzing corrosion between the different types of steel mentioned, there was a noticeable difference between the effect that causes this injury and the factors that predominate in it, it's of vital importance to take account of this aspect as it defines the quality of the material at the moment of being used as raw material especially in the field of engineering in the design of steel structures (especially bridges) given all environmental factors - atmospheric pollutants, social and economic influence your life. Technology is advancing very fast and in the field of civil engineering design of steel structures is becoming a more simplified, definitely steel is a material that has many features, including flexibility, low cost, easy installation that function as advantages over other materials such as concrete.

Key Word — Weathering steel, stainless steel, corrosion, atmospheric corrosion, iron, oxidation, pathology.

Resumo

O minério de ferro é um dos elementos mais predominantes na crosta do nosso planeta e, quando transformado por meio de uma liga com carbono, forma o material comumente conhecido como aço. Existem diferentes formas de identificar e classificar este tipo de material em função da sua utilização, seja doméstico, industrial ou para construções civis. Embora o aço de carbono ter sido o mais utilizado na engenharia civil, hoje em dia surgiram técnicas de transformação deste material que o convertem e permitem que todas as suas propriedades físicas e mecânicas sejam melhoradas. Nesta pesquisa, foi feita a análise, relacionando os três tipos mais comuns de aço utilizados para a fabricação de estruturas metálicas (aço carbono, aço inoxidável e aço de auto-proteção), referindo-se principalmente aos dois últimos dado o seu grau de utilização tanto na indústria e comércio quanto na engenharia civil e fazendo ênfase no fenômeno da corrosão. Foi determinado como as suas taxas de corrosão, propriedades e características são afetadas, tudo isto tendo em conta a informação obtida através de uma revisão bibliográfica dos processos experimentais, testes e ensaios laboratoriais, para além disto complementada por uma fase experimental básica e desenvolvida à sua própria maneira (metalografia). Através da análise da corrosão entre os diferentes tipos de aço mencionados, observou-se uma diferença notável entre o efeito que causa esta lesão e os fatores que nela predominam; é de vital importância levar em conta este aspecto, uma vez que define a qualidade do material no momento da sua utilização como matéria-prima, especialmente no campo da engenharia, no desenho de estruturas metálicas (especialmente pontes), considerando todos os fatores ambientais - atmosféricos, sociais e econômicos que influenciam sua vida útil. A tecnologia avança muito rapidamente e no campo da engenharia civil a forma de desenhar estruturas de aço torna-se cada vez mais simplificada, definitivamente o aço é um material que tem muitas características, entre elas flexibilidade, baixo custo, instalação fácil que funcionam como vantagens sobre outros materiais existentes, tais como o concreto.

Palavras-chave: aço auto-protector, aço inoxidável, corrosão, corrosão atmosférica, ferro, oxidação, patologia

1. INTRODUCCIÓN

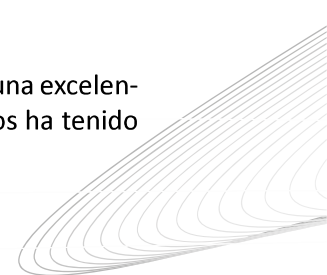
En la antigüedad la economía ibérica se basaba comúnmente en la agricultura y ganadería, sin embargo, debido a la colonización dada por los griegos y declive del imperio romano comenzando el siglo V la tecnología del hierro ya adaptada sufre una considerable evolución [1]. Como lo expresaba T. Wertime en su investigación relacionada con la determinación de las diferentes etapas que conformaron la metalurgia del hierro en Grecia y su posterior extensión en Europa, incidió de forma clave para el desarrollo de su cultura [2]. Para esta época el hierro se explotaba según su necesidad de usarlo. El hierro se forjaba basado solamente en conocimientos empíricos para su tratamiento; por ejemplo, para hacer lanzas se forjaban láminas de acero soldadas en caliente por martilleo. [3]

A medida que avanza el tiempo, se descubren nuevas tecnologías que permiten desarrollar materiales óptimos y competentes para trabajar en condiciones agresivas, dado el caso del láser investigado en las últimas décadas [4], el cual permite moldear el acero y otro tipo de materiales metálicos, permitiendo obtener superficies más resistentes, debido a lesiones como el desgaste, corrosión y oxidación. [5]. Es usual utilizar esta tecnología para el tratamiento del acero inoxidable, ya que estos presentan una alta vulnerabilidad a la oxidación cuando trabajan a altas temperaturas; consiste en aplicar un recubrimiento basado en la mezcla de polvos compuestos de y utilizando láser de , reforzando de esta manera la calidad del metal.

Cuando se habla del deterioro de estructuras metálicas comúnmente se hace referencia a una de sus mayores patologías, señalando la corrosión como la mayor causa de su deterioro prematuro. Es por ello que el uso del acero inoxidable como alternativa de solución y prevención, pero sobre todo utilizado como un refuerzo fortuito en gran variedad de elementos estructurales, ha sido de buena ayuda permitiendo hallar otras formas más económicas de su uso [6]. Poder utilizar el acero inoxidable en función del refuerzo se contempla una acción preventiva, trayendo consigo una expectativa de vida del material por más de 75 años [7] y a temperaturas criogénicas de -196°C , soporta tensiones de 100 hasta 5000 MPa y resiste la corrosión de la atmósfera, los ácidos, los álcalis, las sales, etc. Los aceros se han usado ampliamente para la construcción, los vehículos de transporte, los rieles, la industria química y petroquímica, la maquinaria, el armamento, la vida diaria, etc., figura 1. El acero hace parte de la vida diaria 2 El acero se temple desde hace más de 3500 años y, desde entonces, ha sido fundamental en el devenir de la humanidad y no hay duda de que será el material dominante en el futuro previsible; actualmente se caracteriza por su producción masiva (1300 millones de toneladas anuales).

El problema del deterioro de las estructuras basadas en concreto se encuentra principalmente en lugares fríos o templados donde la concentración de sales es muy elevada; es por esto que se plantea el uso del acero inoxidable como el reemplazo del acero al carbono donde se determinara la resistencia a la corrosión de este acero, mediante ensayos simulando un medio salino [8]. Hay autores que se han dedicado al análisis de este material en profundidad [9] y en los ensayos que han obtenido, las velocidades de corrosión registradas para las barras de acero al carbón resultaron elevadas, en cambio las velocidades de las barras de acero inoxidable se mantuvieron, de esta manera el acero inoxidable ofrece mayor pasividad y resistencia a la corrosión.

Existe otro tipo de aceros llamados auto protectores, los cuales permiten obtener una excelente calidad al soldarse y trabajarse en frío y en caliente. Aunque este tipo de aceros ha tenido



gran valor y aceptación para construcciones de tipo civil, se ha explorado muy poco en la viabilidad de incorporar todas sus propiedades anticorrosivas con las de otros metales como el cinc, el cual influye extendiendo su vida útil [10].

La característica principal que tienen los aceros autoprotectores es la capacidad de formación de una capa de herrumbre adherente que se encarga de la protección del acero contra la corrosión. En los primeros estudios que se hacían respecto al tema se veía que la corrosión de tipo atmosférica relacionaba una herrumbre con las mismas características para los aceros al carbono y autoprotectores; [11] también las evaluaciones hechas sobre su comportamiento, presentaban en sus primeras etapas de análisis de corrosión, cambios importantes, por ello hoy en día se acude al uso de técnicas generales como electroquímicas, microscópicas y espectroscópicas, con el fin de demostrar que hay una diferencia específica en la morfología y constitución de la herrumbre que se forma de acuerdo al ambiente de exposición y el tipo de acero [12].

El acero también ha tenido una relevancia importante en la industria automovilística ya que la fabricación de aceros de alta resistencia permite desarrollar de manera óptima necesidades eficientes como limitar el gasto de energía y la contaminación ambiental por la combustión del carbono [13].

El acero revestido o galvanizado es un tipo de aleación procesada, que al pasar por un tratamiento en especial queda recubierto de zinc, mediante varias capas que ayudan a evitar al máximo la oxidación; sin embargo, en ambientes de climas tropicales húmedos es vulnerable en un 70% lo que requiere que sea recubierto por una capa de pintura especialmente fabricada que prolongue aún más su durabilidad, incrementando a un 95% un mejor comportamiento frente a la corrosión [14] mediante ensayos climáticos acelerados efectuados en cámaras climáticas y ensayos naturales en la estación marino-costera de

Cojímar, en donde quedaron en evidencia los problemas que suelen presentar los aceros galvanizados al ser expuestos con y sin recubrimiento, en un ambiente tropical húmedo, así como la importancia de la adherencia para su eficaz comportamiento, bien sea con fines decorativos o para impartir una protección adicional. Los resultados reflejan que 95% del acero galvanizado estudiado en el presente trabajo presenta una buena resistencia a la corrosión y 71% de los aceros galvanizados con recubrimientos aplicados y de ellos, 100% de los aceros galvanizados pintados no cumplen las expectativas para las que fueron concebidos desde el punto de vista mecánico y corrosivo. Por tanto, se evidencia que es vital para la eficiencia y rentabilidad de la industria metal-mecánica expuesta al clima tropical húmedo, lograr elementos de acero galvanizado pintado con las debidas preparaciones para la superficie y la aplicación del recubrimiento, constituyendo estos puntos la clave que incide en el logro de las propiedades que precisa este producto para garantizar su efectividad y un mejor comportamiento a la corrosión que el acero galvanizado sin pintar, prolongando así su durabilidad. The corrosion behavior of coated and uncoated galvanized steel products is determined by exposing them to accelerated and natural climatic test. Accelerated tests were carried out in climatic chambers and natural atmospheric test in a marinecoastal station (Cojímar).

Hay factores especiales que se tienen en cuenta en la elaboración de aceros de tipo estructural y corresponden principalmente a su comportamiento cuando se encuentran en la fase elastoplástica llamada también de endurecimiento por deformación. Algunas normas sudafricanas y neozelandesas sugieren una teoría aplicada para describir este comportamiento solo en aceros inoxidables [15].

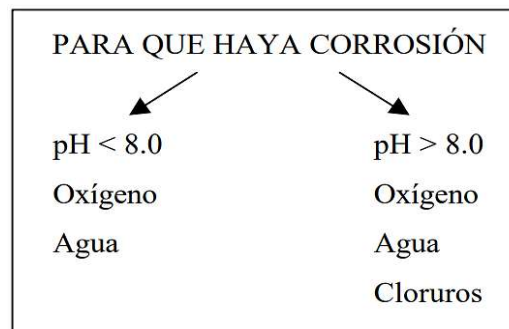
Este artículo tiene como objetivo central, realizar un análisis especialmente entre los aceros desarrollados en las últimas décadas (al carbón e inoxidable) y los actuales (autoprotector), mediante una revisión bibliográfica.

fica, basado en el estudio que han hecho los diferentes autores sobre el tema, enfatizando sobre su uso en estructuras y obras civiles y teniendo en cuenta la patología más relevante que afecta este material como es la corrosión. El resultado de esta comparación permitirá en el campo de la ingeniería civil ofrecer a las construcciones civiles tener una noción más clara sobre el tipo o clase de acero para escoger en el momento de ser utilizado teniendo en cuenta su fabricación, propiedades y beneficio-costos.

2. LA CORROSIÓN

El fenómeno de la corrosión ocurre como un proceso gradual de deterioro de materiales exclusivamente metálicos (metales puros y/o aleaciones de estos) que experimentan reacciones químicas y electroquímicas. Dado que los materiales metálicos son obtenidos mediante el procesamiento del mineral de hierro constituido en su estado natural; estos tienden a volver a ese mismo estado. Cuando un material metálico se daña y comienza un proceso de deterioro secuencial por su interacción con el ambiente que lo rodea se habla precisamente del fenómeno de la corrosión. Esta patología que sufren las diferentes estructuras metálicas está ligada a muchos factores ambientales que la aceleran o retrasan según el caso. La corrosión deriva del término latín *corro dere* que significa daño gradual; prácticamente se refiere a la destrucción parcial o total del material expuesto que pasa por un proceso de interacción electroquímica (reducción oxidación). Particularmente la corrosión es también un estado en el cual los metales tienden de volver a su estado natural; sin embargo, es necesario mencionar que cuando no hay presencia de oxígeno y tampoco humedad es imposible que ocurra la corrosión, además se necesita una cantidad crítica para que se efectúe con una velocidad uniforme. La corrosión trae consigo un proceso llamado pasivación que consiste en la formación de una capa de óxido superficial en el metal expuesto y que a su vez lo ayuda para su protección de agentes externos que puedan incrementar este problema; los aceros autoprotectores son un referente positivo de este tipo de corrosión. En la Figura 1 se aprecian algunos de los factores que influyen para que se dé la corrosión.

Figura 1. Parámetros que facilitan la corrosión. Fuente: [18].



Entre los procesos de clasificación de la corrosión existen dos tipos importantes que tienen que ver con el medio y la morfología en que se desarrolla.

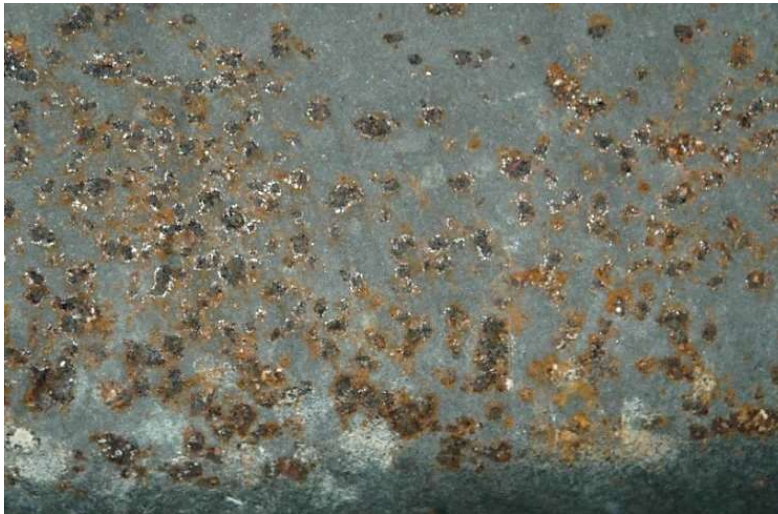
2.1 2.1 Clasificación de la corrosión según el medio.

- Corrosión química: este tipo de corrosión hace alusión a todos los casos donde el metal en cuestión interactúa en un medio no iónico, la oxidación a altas temperaturas es un

ejemplo claro. La capa de óxido que se forma sobre el metal especialmente en aleaciones hierro – carbono es débil y puede ser retirada con mucha facilidad. [19]

- Corrosión electroquímica: en este tipo de corrosión si existe la intervención de iones metálicos y por lo cual involucra el transporte de electricidad por medio de un electrolito; es de tipo (oxido – reducción). Aquí se pueden evidenciar corrosiones de tipo soluciones salinas (agua de mar), corrosión en los suelos y la típica corrosión atmosférica. [20]
- Un medio no iónico, la oxidación a altas temperaturas es un ejemplo claro. La capa de óxido que se forma sobre el metal especialmente en aleaciones hierro – carbono es débil y puede ser retirada con mucha facilidad. [19]
- Corrosión electroquímica: en este tipo de corrosión si existe la intervención de iones metálicos y por lo cual involucra el transporte de electricidad por medio de un electrolito; es de tipo (oxido – reducción). Aquí se pueden evidenciar corrosiones de tipo soluciones salinas (agua de mar), corrosión en los suelos y la típica corrosión atmosférica. [20]

Figura 2. Ejemplo de corrosión por picadura en una lámina de acero.



Fuente: tomado de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cml/6-Oxidacion.pdf>

- Corrosión bajo tensión: en particular este tipo de patología ocurre porque actúan varias circunstancias entre las cuales se tiene: tensiones internas sobre el material, un medio atmosférico agresivo y los esfuerzos de tracción. Implica una rotura generada por los aspectos anteriores que se extiende mediante grietas y que dado su nivel avanzado trascienden por toda la sección del metal afectado. [23]
- Corrosión intergranular: caracterizada por inducir la disolución del metal de acuerdo con las zonas más próximas de los límites o borde del grano de aleaciones como el Níquel (Ni), Cromo (Cr), Zinc (Zn), Cobre (Cu) y Aluminio (Al). Si la corrosión progresa, los granos pierden significativamente su cohesión entre sí y por ende la aleación se desintegra. [24]

En general la patología de la corrosión afecta de forma diferente a todos los metales y sus aleaciones, de acuerdo con esto se analizaron 3 tipos de metales; los cuales son los más usados en la ingeniería tanto para obras de construcción como en la parte comercial y doméstica.

3. ACERO AL CARBONO

3.1 ESTRUCTURA Y UTILIZACIÓN

El acero es un material de tipo aleación, es decir una combinación o mezcla de hierro (Fe) y carbono (C), donde el porcentaje de carbono puede alternar entre valores del 0,05% hasta el 2% y no debe sobrepasar este último. El carbono le da especialmente propiedades de dureza y elasticidad [25]. El hierro como un mineral natural presenta estructuras cristalinas las cuales poseen características que pueden describirse en el momento de su solidificación cuando es expuesto a temperaturas y de acuerdo con esto durante su enfriamiento lento. Cuando el metal de hierro se solidifica empezando desde su estado fundido al estado sólido hay una transformación desde el punto de vista de sus átomos, los cuales, se ordenan de una forma diferente para cada caso. Esta disposición se denomina precisamente sólido cristalino.

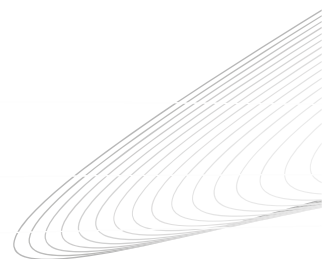
Dado lo anterior el hierro – carbono presenta diferentes fases en su estructura que desarrollan a su vez otras de tipo más avanzado y como se explicará más adelante dependiendo del tipo de acero tratado en función de su estado de corrosión [26].

En el campo de la ingeniería se utiliza el diagrama de aleaciones, una herramienta muy útil que da a conocer las estructuras de las distintas aleaciones como una herramienta de apoyo para poder entender y predecir el comportamiento del material.

El siguiente diagrama de fases del hierro, presenta el análisis y la base para identificar las fases y los microconstituyentes estructurales específicamente del hierro – carbono. El estudio de esta base permite identificar las características y naturaleza de las fases

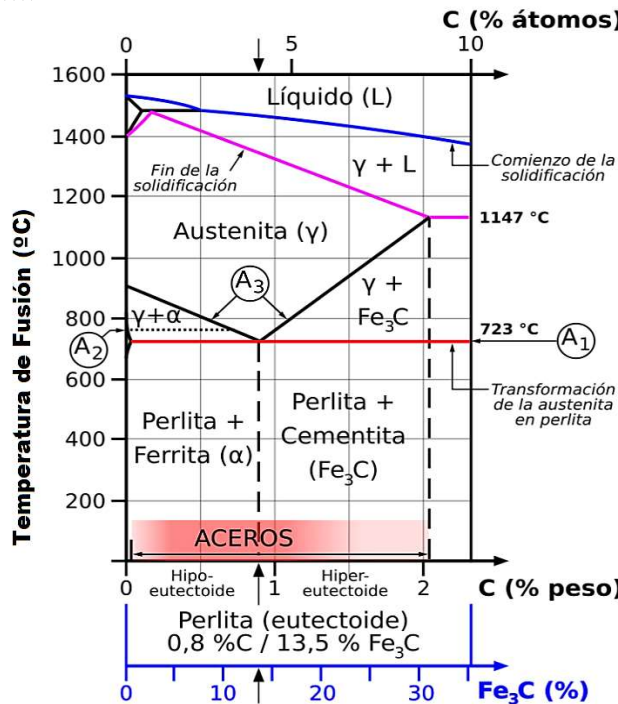
para predecir y apoyar las propiedades que confieren el tipo de aleación o material, es una síntesis de como ocurren las diferentes etapas de cambio de una fase a otra y las cuales se describen a continuación, entre las más importantes se encuentran:

- Fase Austenítica: esta fase se constituye por ser muy densa y en la cual el acero presenta baja temperatura de fusión, excelente soldabilidad y buena tenacidad. La cantidad de carbono disuelto presente está entre el 0% y 1,76% con una temperatura máxima de 1130 °C [27].
- Fase Ferrítica: conocida como ferrita alfa α , su máxima solubilidad se presenta a los 723 °C con un 0,025% y su principal propiedad es el magnetismo. En temperatura ambiente solamente disuelve el carbono un 0,008% y se denomina Ferrita delta δ , además es muy blanda [28].
- Fase cementita: su rango está entre 0,025% hasta 6,67% de carbono y aparece cuando el grado de solubilidad de la fase ferrita α es excedida por debajo de 723 °C. Entre sus propiedades mecánicas se destacan su dureza y fragilidad incrementando la resistencia en algunos aceros [29].
- Fase ledeburita: es principalmente constituyente en las fundiciones, presente en aleaciones Fe C con porcentaje de carbono mayor al 2%, es decir un 1,76% de contenido de carbono. Es la mezcla entre las fases austenita y cementita [30].
- Fase Perlita: dada su etapa de enfriamiento muy lento se forma a 723 °C y contiene solo 0,89% de carbono, su morfología la hace ver de tipo laminar o placa y su nombre es debido a que al observarla por medio del microscopio



muestra una apariencia de perla. Sus propiedades más representativas para el acero son la dureza y resistencia [31].

Figura 3. Diagrama de fases del hierro – carbono (equilibrio metaestable).



Fuente: [26].

Entre las diferentes formas de utilizar el acero al carbono se encuentran las estructuras metálicas que en la mayoría de los casos son el soporte principal de las construcciones. Es un material muy versátil y cotidiano que siempre encuentra nuevas formas de uso mediante el desarrollo de innumerables productos que logran reforzar y potencializar todas sus propiedades ya sea en sus acabados, combinaciones o aleaciones y recubrimientos.

4. ACEROS INOXIDABLES

4.1 USOS Y APLICACIONES

Es común potencializar determinadas propiedades del acero, incorporando a su aleación otro tipo de metales como el Cr (Cromo), el Ni (Níquel) y el Mn (Manganeso). El oxígeno del aire o del agua atacan significativamente, incrementando de forma agresiva lesiones patológicas al hierro, dañándolo formando óxido ferroso; de acuerdo a esto se desarrolló la técnica de añadirle una proporción de Cromo, la cual evita la oxidación del acero, y así de esta manera se crea lo que se conoce como acero inoxidable. [32].

Hay varios tipos de aceros inoxidable, y el más utilizado es el de característica austenítico, con un 65% de uso común; a continuación, se describen los más relevantes.

Acero Inoxidable Austenítico: lo conforman las aleaciones de hierro, níquel, cromo y carbono con un contenido inferior del 0,10% de C. Los aceros más conocidos de este grupo son el 18/18 y el 18/10 que a su vez reciben el nombre de 1.4304 y el 1.4301 [33].

Figura 3. Ejemplo estructura acero inoxidable, barandas y pasamanos.



Fuente: Autor

- El acero 18/18 recibe este nombre porque en su contenido prevalece un 18% de níquel y un 18% de cromo. Se uso se centra en accesorios para terminales de transporte, baños, remaches de estructuras, equipo hospitalario, aviones etc.
- El acero 18/10 al igual que el anterior contiene un 18% de cromo, pero un poco menos de porcentaje de níquel - 10%. Su uso es más frecuente para fabricar utensilios de cocina y baterías relacionadas con: cazuelas, ollas, tapas, cubiertos, etc.
- Acero Inoxidable Ferrítico: Su composición es una aleación de hierro, cromo y carbono, con un contenido muy mínimo de carbono de 0,10%. También contiene cromo entre el 16% y el 18%. Su contenido de níquel es muy bajo.
- Acero Inoxidable Martensítico: es una aleación compuesta por hierro, carbono y cromo, con un contenido de 0.10% de carbono, contiene cromo entre el 12 al 14 %.
- Acero Inoxidable Dúplex: este tipo de acero está construido por dos fases: ferrita y austenita; compuesto por hierro, cromo y níquel. Este acero inoxidable presenta niveles muy altos de cromo que varían entre el 18% y el 38%, y níquel en cantidades moderadas entre el 4.5% y el 8%. Es muy característico porque consigue una protección mayor a la resistencia mecánica y a la corrosión en comparación a los demás. [34].

El acero inoxidable es un material con una historia muy reciente apenas unas cuantas décadas de desarrollo, su uso empezó a tener auge hasta los años veinte. En 1821 se experimenta y se crea la forma de alear acero y cromo, sin embargo, a partir de 1904 es el año vital donde se descubre que el cromo ayuda a evitar la corrosión cuando se usa como un componente adicional. En este mismo período, el francés León Guillet se inventa el acero inoxidable bajo en carbono; una década más adelante aparece por primera vez el acero inoxidable austenítico. El químico alemán Eduard Maurer y la sociedad Krupp patentaron la fabricación de acero

inoxidable de clase 18/8, el cual tiene un alto contenido de cromo (18 %). En 1913, el metalúrgico inglés Harry Brearley inventa el acero inoxidable martensítico, especial para cubertería [35].

Las técnicas para la elaboración y composición de este material también se relacionan con la ocurrencia de las dos guerras mundiales. La elaboración de acero inoxidable en el continente europeo se desarrolla en los años 1930 y surgen numerosas patentes. El pulido electrolítico, es un ejemplo clave y fue inventado en 1929 por el ingeniero francés P. Jacquet. Entre 1939 y 1947, hubo un registro considerable de patentes en Estados Unidos [36]. Cuando terminó la Segunda Guerra Mundial, la técnica de laminación en frío se desarrolló de una forma refinada y gracias a ello se logró un mejor acabado determinado por el proceso Sendzimir desarrollado en 1947 [37].

Las dos construcciones más importantes de la época que posicionaron el acero inoxidable de manera arquitectónica fueron el Edificio Chrysleren 1930 y el emblemático Empire State Building en 1931, ambos edificios fueron construidos en Nueva York - Estados Unidos. Se necesitaron al menos de 5500 m² de acero inoxidable para construir el Edificio Chrysleren donde se incluyó la aguja de la torre, la parte de la corona, las puertas y el vestíbulo de entrada, cabe destacar en este entonces era el edificio más alto del mundo [38].

La utilización del acero inoxidable tiene mucha importancia en los años treinta y se puede evidenciar su estilo en los famosos vagones restaurante americanos, vestíbulos de hoteles y edificios. El rascacielos Lever House ubicado en Chicago fue en 1952, una de las primeras construcciones emblemáticas en usar acero inoxidable en los muros y diseño de fachadas acristaladas [39]. Cuando finalizan la década de 1950, el manejo del acero inoxidable se extiende a las cubiertas y cerramientos exteriores, además de otras estructuras teniendo en cuenta el progreso

alcanzado sobre la laminación; por ello continúa su desarrollo y aplicación en los años ochenta, destacándose los materiales utilizados en la arquitectura de alta tecnología. Por mencionar un ejemplo destacado, la Biblioteca Nacional de Francia en 1995 diseñada por el arquitecto Dominique Perrault utilizó una técnica innovadora relacionada con la malla de acero inoxidable a una gran escala. Actualmente, han seguido surgiendo nuevas aplicaciones del acero inoxidable en sectores muy diversos y exclusivos para otros aceros o materiales, como son las estructuras de edificios residenciales, piscinas e incluso revestimientos de edificios industriales [40].

La utilización del acero inoxidable en estructuras ha tenido mucho auge en las últimas décadas porque su aceptación costo-beneficio en el tiempo es muy positiva, ofreciendo una significativa protección al factor de corrosión, resistencia al fuego y una estabilidad a la fluencia mayor que la ofrecida por otros tipos de aceros estructurales de uso muy común en la industria. De todas formas, a pesar del paulatino crecimiento en su uso, aún existe en mínimo grado un desconocimiento de todas sus aplicaciones, ya que, los códigos de diseño del acero y sus referencias determinan principalmente su atención en el acero estructural, además en comparación con el acero autoprotector cada vez su competencia es muy mínima [41].

4.2 VELOCIDADES DE CORROSIÓN

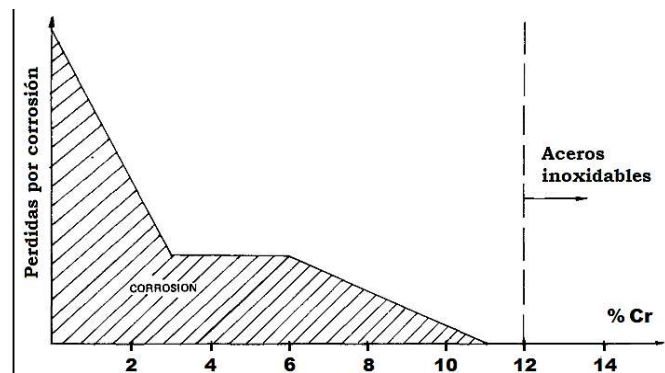
A continuación, se presentan algunos apartados de análisis de las velocidades de corrosión y su influencia en el acero inoxidable en los cuales los autores consultados demuestran que la corrosión en comparación a otros tipos de acero, por parte del acero inoxidable es menos fuerte a este tipo de ataque.

Una de las propiedades más significativas que tiene este acero hace referencia a la ayuda que provee el cromo para la resistencia a la corrosión; adicional a esto las investigaciones desarrolladas a lo largo del tiempo han permitido estipular que se debe tomar

como mínimo contenido el 12 % de cromo para tener un material estable y resistente. [42] Sin embargo, algunas desventajas que presenta se relacionan con la producción de algunos tipos de este acero y su alto costo; en particular el acero inoxidable austenítico el cual requiere del elemento níquel como un agente austenizador (austenización), es decir que permite el desarrollo de la fase austenita en dichos aceros. La fase austenita tiene que ver con el control que se lleva en el tamaño de las partículas de grano austenítico y que son de relevante importancia en los tratamientos de endurecimiento del acero. [43]

A continuación, en la Figura 4 se describe gráficamente como las pérdidas por corrosión aumentan en el acero inoxidable a medida que pierde peso y más aún si su contenido de cromo es bajo. La corrosión de forma localizada es un factor ampliamente decisivo en la velocidad como se propaga este fenómeno, afecta por igual a todos los metales y sus respectivas aleaciones.

Figura 4. Pérdidas en peso del acero inoxidable en función del contenido de cromo.



Fuente: [42]

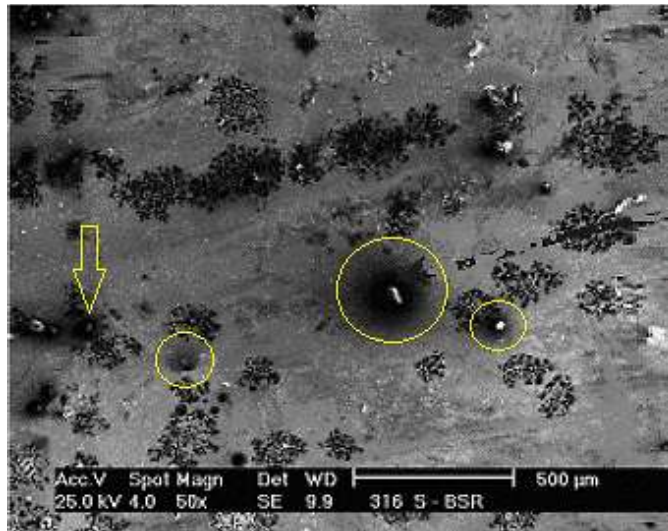
La corrosión de forma localizada es un factor ampliamente decisivo en la velocidad como se propaga este fenómeno, afecta por igual a todos los metales y sus respectivas aleaciones. Existen varios tipos de corrosión entre ellos se destaca la corrosión por picadura, [44] que es quizá por la cual fallan la mayoría de los materiales usados en la ingeniería, por supuesto desde el punto de vista físico de las estructuras. A partir de ella se pueden desarrollar otros tipos de corrosión recordando los antes mencionados como, por ejemplo: la corrosión generalizada (se evidencia por su uniformidad en toda la superficie), la corrosión por esquicios (ocurre en zonas donde no hay presencia de oxígeno), y la corrosión bajo tensión e intergranular que es un poco más profunda. [45]

El siguiente caso de estudio propone un análisis detallado cuando el acero inoxidable se oxida porque no cuenta con esa capa de recubrimiento aislante protectora y que por supuesto debe aplicársele para incrementar su durabilidad y resistencia a muchos factores que desatan esta reacción.

La velocidad de corrosión en los aceros inoxidables es determinante de otros factores y procesos que la acentúan mucho más como son la disolución, pasivación y difusión entre los más importantes; para ello se utilizan técnicas como la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica que permite separar estos procesos que ocurren en la interfase acero inoxidable – electrolito. Por otro lado, es posible verificar el avance de este fenómeno por medio de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), la cual es indispensable para analizar de forma más detallada y precisa esta patología del acero. [45]

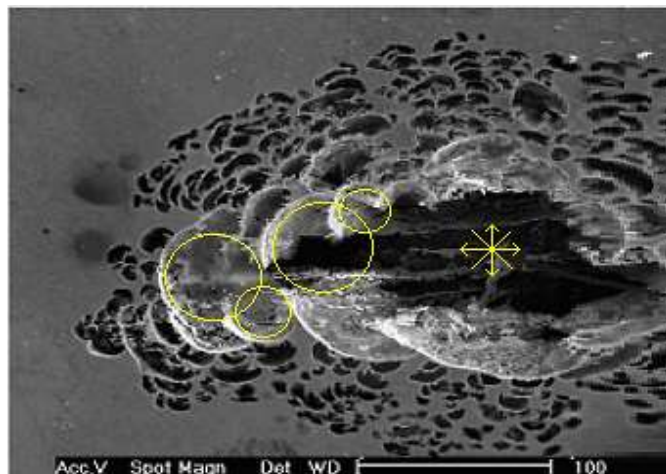
En la Figura 5. se puede evidenciar el tipo de corrosión por picadura, la cual, se puede describir con una forma esférica que ataca el material de forma uniforme y que se extienden por toda la superficie del mismo, y al no tener una capa protectora su velocidad de propagación es considerable.

Figura 5. Micrografía Acero Inoxidable atacado por Corrosión por Picadura mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB). Fuente: Figueroa de Gil, Y., Camero, S. (2008)



Si se observa la Figura 6, se nota la misma corrosión por picadura, sin embargo, es muy diferente a la anterior ya que, esta es de tipo concéntrica porque su mayor daño se ubica en el centro del material como lo indican las flechas amarillas; esto quiere decir que cada círculo formado (resaltado en amarillo) depende del anterior denotando su avance.

Figura 6. Micrografía Acero Inoxidable atacado por Corrosión por Picadura (MEB), tipo concéntrica.



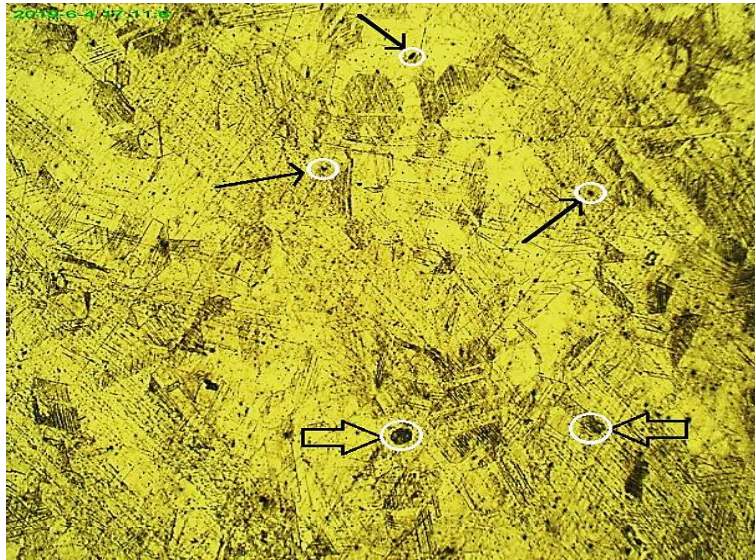
Fuente: Figueroa de Gil, Y., Camero, S. (2008)

En el siguiente caso en particular se puede analizar la sección transversal tomada de una varilla lisa de acero inoxidable, la cual fue caracterizada para identificar las fases presentes en el acero y su posible avance de corrosión. Este trabajo fue desarrollado en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia U.P.T.C. de la ciudad de Tunja.

Como se comentaba anteriormente las micrografías efectuadas a los aceros permiten ver de una forma más exhaustiva algunos detalles del funcionamiento del material a escala micrométrica; en las siguientes micrografías realizadas a 100X y 500X de la sección transversal del acero en cuestión se pueden evaluar diferentes aspectos importantes como el tipo de corrosión y el tipo de fase correspondiente.

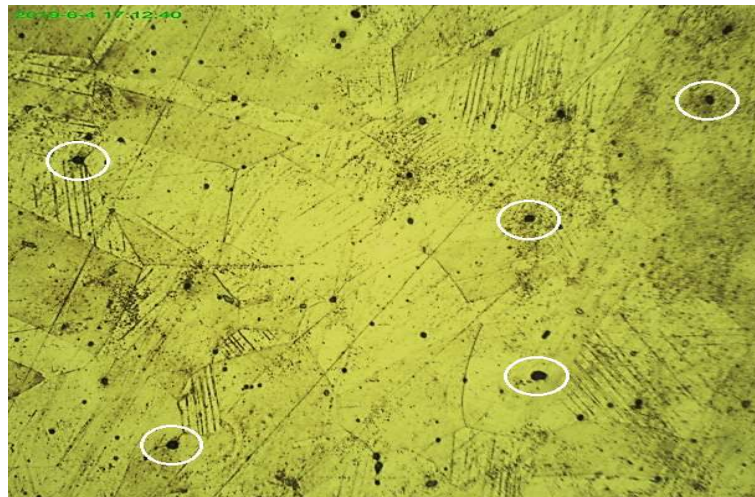
Las siguientes micrografías demuestran un tipo de corrosión por picadura muy leve (aquellos puntos negros de tamaño relativamente similar demarcados con círculo blanco), también se observan diferentes tipos de rayas sin embargo estas fueron causadas por el desprendimiento del material de las lijas utilizadas para pulir el acero y darle una forma más dinámica para su análisis.

Figura 7. Micrografía de un acero inoxidable, sección transversal a 100X.



Fuente: [46]

Figura 8. Micrografía de un acero inoxidable, sección transversal a 500X.



Fuente: [46]

Durante las últimas décadas, los aceros autoprotectores o HSL se han establecido como los materiales estructurales más importantes para la construcción de obras civiles, porque su baja velocidad de corrosión influye positivamente cuando están expuestos a atmósferas industriales y urbanas. Las propiedades anticorrosivas de este tipo de aceros HSL simplemente nacen de su estructura relacionada con las capas de herrumbres formadas sobre la superficie del material, cuando se poseen ciertas condiciones favorables. [50]

También denominados aceros patinables, sus propiedades y características se han venido estudiando desde los años 30, su gran uso en el último siglo ha marcado la diferencia en cuanto a calidad y duración se refiere tanto en sus aplicaciones en esculturas, placas, viaductos, vagones para trenes, puentes en general y adornos arquitectónicos. [49]

Este tipo de aceros también se denominan suaves, quizá por su bajo contenido de carbono el cual es inferior al 0,2 % en peso, su composición tiene metales principales como Cu, Cr, P y Ni que funcionan como elementos aleantes y que no sobrepasan un porcentaje superior al 3-5% en peso.

Figura 10. Ejemplo de estructura en acero autoprotector (Puente de la Represa del Sisga, Cundinamarca, Colombia) la capa color marrón que se aprecia en la estructura es la herrumbre formada por el proceso de oxidación del metal.



Fuente: Jhon Eduardo Quevedo.

Respecto a los ambientes donde se usan los aceros patinables están los de tipo rural y urbano y un poco más rudos los industriales y marinos. En estos últimos se debe hacer especial énfasis ya que hay que establecer un nivel crítico específico de SO_2 y de salinidad, pues estos ambientes son más agresivos y necesariamente hay que mantener al máximo las propiedades que provee la herrumbre que los protege y de esta manera alargar mucho más su vida útil. [51]

El acero patinable se rige por normas por supuesto para definir su calidad y durabilidad; por ejemplo, para Estados Unidos las normas correspondientes son las ASTM A-242, continuando con la A-588 (posterior desarrollo) y A-606 (para chapas delgadas). La composición de este

tipo de acero patinable certifica, sumado con su mejor resistencia a la corrosión anteriormente comentada, una excelente resistencia mecánica, óptima tenacidad, ductilidad, y buena soldabilidad. Hoy en día se utilizan aceros patinables del tipo A 572 y A 588 (de tipo estructural) porque sus propiedades con respecto a la compresión y tensión son las más convenientes. Es un acero de baja aleación al vanadio y niobio; económicamente es más factible dada su contenido de cantidades menores de los costosos elementos de aleación, aunque recibe un tratamiento térmico la cual le ofrece una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono.

5.2 LA HERRUMBRE Y LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

La herrumbre suele ser una capa protectora que se forma únicamente sobre esta clase de aceros, dada la exposición atmosférica y que se vuelve progresiva dando al material un recubrimiento adherente y concentrado que suprime la corrosión, evitando el deterioro de la estructura como tal. Esta protección es 4 a 5 veces mayor que la de un acero inoxidable. El color y la velocidad con la que se forma ésta capa especial se debe más que todo a la cantidad de los elementos presentes en la aleación y también por la contaminación del ambiente; además influyen los ciclos de humedad/secado que consisten cuando la superficie del metal es humedecida por la lluvia y luego secada por el sol y el viento [52]. El color definitivo y su apariencia también puede determinarse por el tipo de atmósfera pues en la parte rural el desarrollo del óxido será de una forma más lenta y por ende su color más claro; en cambio en atmósferas o ambientes industriales el proceso de oxidación se hará más rápido y tomando un tono más oscuro. [53]. Esta mayor resistencia de la que se habla también tiene influencia en la manera como se procesa el metal para la posterior obtención de las diferentes formas o presentaciones, ya que la presencia de los aleantes promueven

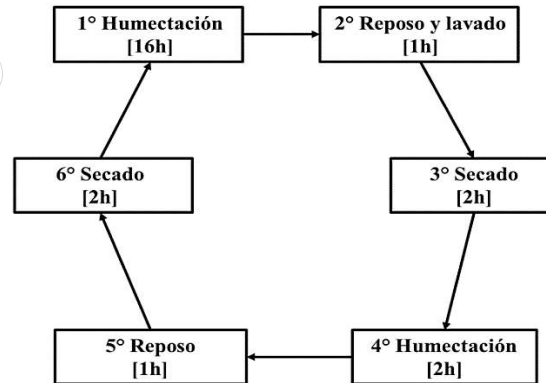
que el costo de los aceros autoprotectores sea más elevado que los aceros estructurales no aleados. Sin embargo, para innumerables aplicaciones, los costos iniciales de fabricación de estructuras con acero autoprotector son relativamente menores que con el acero al carbono y, obviamente con los que requieren de mantenimiento, es decir los aceros inoxidables [54].

Un aspecto relativo en este acero es la pátina (forma de nombrar a la capa protectora); para que esta pueda desarrollarse hay ciertos factores que se deben tener en cuenta para que no impidan su proceso; el diseño es uno de ellos debido a que si la estructura tiene intersticios o cavidades las cuales puedan retener agua, esto es muy nocivo para el material porque da pie para que la corrosión progrese de manera negativa impidiendo que el acero pueda formar la capa requerida. En el caso específico que entre en contacto con otros materiales metálicos, se debe tener especial cuidado en el efecto galvánico [55], este efecto es el método más particular y empleado en la protección de las estructuras y construcciones civiles hechas de acero al carbono para frenar la corrosión por parte de la atmósfera.

El acero pasa por un proceso de galvanización de tipo inmersión. Aquí el acero es sumergido en zinc fundido, gracias a ello ocurre una reacción química en cadena que logra la formación de enlaces permanentes entre los del acero y el de zinc, quedando capas externas únicamente de zinc. Pese al gran desarrollo y aplicación que han tenido los aceros autoprotectores, se ha explorado muy poco las posibilidades de combinar sus propiedades anticorrosivas con las bondades del zinc [56].

Al analizar las velocidades de corrosión de los aceros patinables o autoprotectores se encontró que varios autores coinciden en la

Figura 12. Sistema cíclico de humectación y secado.



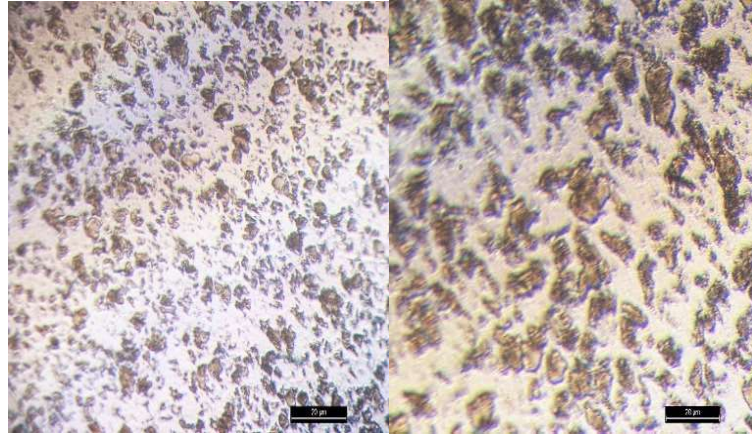
Fuente: tomado de [57].

Comparado con el acero inoxidable la influencia de aleaciones de Cromo en la resistencia a la corrosión atmosférica (ACR) para aceros autoprotectores es muy similar y como valor agregado se puede decir que tienen mucho en común en lo que respecta a la velocidad con que se corroen. Según el análisis planteado por [61] dado esto la ACR de aceros autoprotectores se ha estado evaluando en los últimos años mediante la determinación de ensayos de laboratorio que miden la tasa de corrosión tras inmersión húmedo/seco durante 72 horas, y como resultado han podido determinar que la presencia de cromo mejora la ACR de aceros autoprotectores.

Las fases del acero para este material autoprotector también tienen un gran significado porque de aquí deriva su fuerza y resistencia. Según [62] el desarrollo de este ensayo de laboratorio permitió identificar los microconstituyentes presentes dando a conocer básicamente perlita distribuida en una matriz de ferrita; todas las propiedades de este acero dependen precisamente de esta distribución y adicionalmente de las condiciones de enfriamiento. Se tomaron micrografías a 100X y 1000X a una probeta de cada uno de los aceros A574 y A588 utilizados y a los cuales, se les realizó un tratamiento previo que consistió en un pulido con lijas número 80, 180, 280, 400, 600, 1000, 2000; durante este proceso del lijado se fueron girando las muestras a 90° para que desaparecieran los rayones y llevarlos a un grado mínimo. Luego se pasó a un pulido con paño para lograr un brillo tipo espejo, esto para someter las probetas con una solución de agua regia, es decir una mezcla química de ácido clorhídrico *HCL* y ácido nítrico *HNO₃* en una proporción de 3:1 al 5% de concentrado durante 5 segundos; finalmente se secaron las muestras con un secador para cabello.

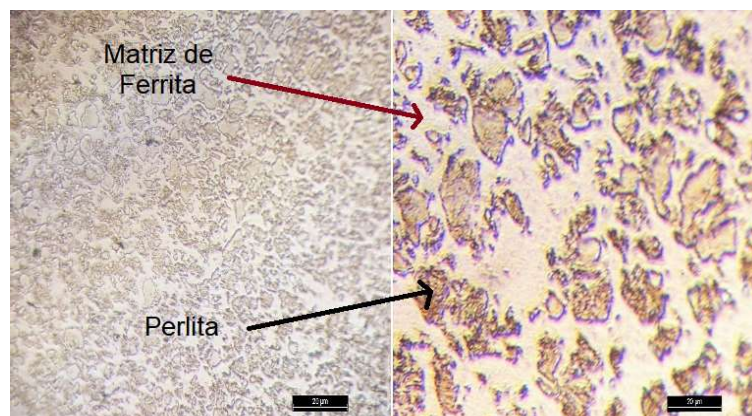
En ambas micrografías se puede observar a una matriz detallada de ferrita (color blanco) con formaciones granulares de perlita lo cual hace referencia a aceros dúctiles y maleables y respecto a la norma ASTM E112 el tamaño de grano corresponde a N° 8.

Figura 13. Lado izquierdo Micrografía Acero Autoprotector A572 a 100X; lado derecho Micrografía Acero Autoprotector A572 a 1000X.



Fuente: tomado de [62].

Figura 14. Lado izquierdo Micrografía Acero Autoprotector A588 a 100X; lado derecho Micrografía Acero Autoprotector A588 a 1000X.



Fuente: tomado de [62].

Una ventaja relativa de los aceros autoprotectores es su elevada resistencia mecánica, que, sumada a su apropiada soldabilidad y manera de trabajarlo tanto en caliente como en frío, superan a los aceros inoxidable en un 60% de calidad, lo cual admite adquirir piezas metálicas de resistencia similar, con un espesor menor y un peso bastante bajo; consiguiendo un impacto positivo por el menor gasto de energía y materiales para su fabricación y desplazamiento [63] [64].

Los aceros autoprotectores suelen corroerse por los ambientes atmosféricos de la misma manera que ocurre con los aceros al carbono en su etapa inicial; no obstante, esta corrosión va disminuyendo de forma considerable por su grado y tiempo de exposición. Todas las propiedades protectoras de la capa de herrumbre que se forma sobre la superficie de estos aceros no está sujeta solamente de la composición química del metal, sino por todas las condiciones atmosféricas y procesos derivados de ésta como los períodos de secado y humectación, el pH, la composición del agua lluvia y sus contaminantes [65].

Así mismo los aceros autoprotectores tienen desventajas con respecto a los aceros inoxidables e inclusive a los de acero al carbono; como por ejemplo cuando son expuestos en ambientes marinos e industriales, donde la agresividad de la atmósfera circundante es muy hostil. En este tipo de atmósferas los aceros autoprotectores son muy vulnerables e incapaces de poder desarrollar una capa de pátina o de herrumbre protector [66].

En la actualidad se siguen buscando alternativas que mejoren el acero autoprotector sobre todo bajo ambientes como marinos e industriales los cuales proveen mayor agresividad para este material [67]. Los países asiáticos están en permanente investigación; por ejemplo, en Japón indagan la influencia que tiene el Níquel sobre el acero autoprotector a escalas mayores de puentes bajo superficies marinas. China y Taiwán también son fuertes en materia de investigación con respecto del contenido de Cromo en el acero autoprotector también en ambientes marinos [68].

Lo anterior hace referencia a que investigadores como Jouen han determinado en especial para aceros aleados en ambientes atmosféricos húmedos; que el metal de níquel Ni forma en la superficie del material un capa muy fina protectora de óxido e hidróxidos; pero que de forma contraria para atmósferas muy contaminadas (ambientes industriales) el comportamiento del níquel empeora de manera muy negativa [69] [70].

6. DISCUSIÓN

Comparando las velocidades de corrosión entre los aceros analizados; el acero inoxidable obtiene una velocidad constante y acelerada en su proceso de corrosión, mientras que, para el acero autoprotector, esta velocidad obtiene una variación de acuerdo al tiempo y dependiendo únicamente de factores ambientales y cambios de temperatura, teniendo en cuenta que a medida que progresa este estado disminuye la velocidad de incidencia.

Los aceros patinables o autoprotectores son viables en ambientes marinos siempre y cuando pasen por el proceso alternado de humedad y secado, el cual les permite generar su propia capa de herrumbre, solo así desarrollarían su capacidad de inmunidad para tal situación.

Es interesante ver cómo los diferentes tipos de acero se corroen de la misma manera, sin embargo, dependiendo de sus propiedades y características particulares algunos utilizan esta patología como mecanismo de protección convirtiéndolo en un material más durable y resistente. El planteamiento que hacen los autores de acuerdo a las velocidades de corrosión permite identificar factores que relacionan y a su vez permiten diferenciar las características que poseen los diferentes aceros, ya sean de alta resistencia o baja aleación, algunos con ventajas significativas de acuerdo a sus propiedades mecánicas siendo comparados con aceros ordinarios.

Las capas que se forman como escudo protector del acero patinable le dan una ventaja máxima con respecto al acero inoxidable pues a medida que se van creando y transformando su velocidad de corrosión disminuye desarrollando de manera típica una alta resistencia a la corrosión, convirtiendo esta debilidad en una fortaleza. El acero inoxidable forma películas de óxido en su superficie que le dan una apariencia porosa y desgastada que pueden ser retiradas y no afectará considerablemente el material, aunque en su estado más avanzado de corrosión logra presentar grietas facilitando la penetración de oxígeno y agua, generalizando este estado y por ende permitiendo la distribución uniforme hasta lograr la destrucción parcial y total según la estructura atacada.

Los autores hacen uso de técnicas experimentales como la Metalografía, Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), las cuales son favorables porque ayudan a entender de una forma más amplia las características microestructurales relacionadas con las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los

metales como materia prima de los aceros; todo desde el punto de vista del fenómeno de la corrosión y su afectación dado el caso. De esta manera es posible identificar muchas complicaciones en el momento de utilizarlos.

7. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el análisis de la revisión bibliográfica se puede observar que, al hacer la comparación de las ventajas y desventajas entre los aceros estructurales estudiados, dadas sus velocidades de corrosión, el mejor tipo de material para utilizar en las nuevas construcciones y estructuras metálicas es sin duda el acero autopatinable; ya que este es más amigable con los medios atmosféricos agresivos y por lo tanto es menos susceptible a reacciones y factores negativos de corrosión.

El acero inoxidable es muy utilizado donde la higiene es de gran importancia, como en la industria de la medicina, la farmacéutica, el hotelaría, la lechería y en el suministro de agua potable. Por lo tanto, existen diferentes factores que lo convierten en la primera opción para este tipo de industrias, y el requisito más importante o común es que el metal utilizado para fabricar equipos no reaccione con lo que almacena o con lo que cocina dentro. Por ejemplo, es importante en un restaurante o café que los alimentos no reaccionen al contacto con el objeto donde se cocinan.

Un punto a favor del acero autoprotector es que no necesita mantenimiento con respecto al inoxidable que requiere al menos de una mínima limpieza y según el criterio a utilizar también de pintura, capas de aleación o recubrimiento; ya que, a diferencia del primero, este genera su propia capa protectora.

El mantenimiento rutinario de estructuras hechas en acero inoxidable quita tiempo y dinero por eso esta alternativa de acero autoprotector los convierte en una excelente solución cuando se construyen estructuras en lugares poco accesibles como puentes

muy grandes, torres eléctricas y edificios en general, inclusive en ambientes marinos donde la agresividad salina es muy fuerte. Por otro lado, respecto a las propiedades de durabilidad de estos tipos de acero, siempre mantienen una calidad alta de durabilidad y soldabilidad mayores a otros aceros.

En las construcciones civiles también se debe tener en cuenta el aspecto beneficio-coste sin afectar la calidad de los materiales y es por ello que a pesar del costo del acero autoprotector es mayor con respecto a aceros no aleados, es mucho menor en comparación con aceros inoxidables recubiertos o pintados.

Es necesario seguir investigando sobre este tipo de materiales para que constructores y proyectistas tengan una acertada valoración en el momento de escogerlos para el diseño de sus obras y construcciones y puedan aprovechar todas las ventajas que estos ofrecen, independientemente de sus clases y tipos.

8. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el material proporcionado por la Escuela de Ingeniería Metalúrgica – Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia U.P.T.C. de la ciudad de Tunja.

9. GLOSARIO

Acero Patinable: en inglés Weathering Steels, son aceros de baja aleación a los que se les añaden elementos aleantes, en general en cantidades inferiores al 1%. Estos aceros, además de poseer mayor resistencia mecánica que los aceros al carbono, tienen normalmente mayor resistencia a la corrosión, hasta cuatro o cinco veces. Su resistencia a la corrosión atmosférica depende de la protección dada al metal por una capa de óxido o pátina, que se forma con el tiempo. Fuente: <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/materiales/aceros-patinables-resistentes-la-corrosion>.

Alotrópico: es una propiedad que poseen determinados elementos químicos de presentarse bajo estructuras moleculares diferentes como el oxígeno, que puede presentarse como oxígeno atmosférico (O₂) y como ozono (O₃), o con características físicas distintas, como el fósforo, que se presenta como fósforo rojo y fósforo blanco (P₄), o el carbono, que lo hace como grafito, diamante y fullereno. Para que a un elemento se le pueda denominar como alotropo, sus diferentes estructuras moleculares deben presentarse en el mismo estado físico. Fuente: <https://www.ecured.cu/Alotrop%C3%ADa>

Austenización: es el proceso en el cual se da la partición final del elemento aleado entre la matriz austenítica, (la cual se transforma en martensita) y el carbono retenido. Esta partición compone la química, las fracciones de volumen y la dispersión del carburo retenido. Estos carburos no solo contribuyen a la resistencia del uso del material, sino que controlan el tamaño del grano austenítico. Fuente: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/suarez_g_ma/capitulo4.pdf

Capas de aleación: el recubrimiento de galvanización por inmersión en caliente consiste de una serie de las capas de aleación de hierro y de zinc y una capa de zinc. Las capas de aleación mejoran las resistencias a la abrasión, aumenta la resistencia a la corrosión y permite que se aplique un recubrimiento grueso. Fuente: [https://www.idu.gov.co/web/content/7423/guia_galvanizado_24nov14+\(1\).pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7423/guia_galvanizado_24nov14+(1).pdf)

Concéntrico: se utiliza en el ámbito de la geometría para calificar a una figura que dispone del mismo centro que otra. la noción también se usa respecto a dos cuerpos. Fuente: <https://definicion.de/concentrico/>

Difusión: mecanismo por el cual la materia es transportada por la materia, particularmente en los metales y aleaciones se considera el hecho de que la mayor parte de las

reacciones en estado sólido llevan consigo movimientos atómicos. Fuente: <http://www.angelfire.com/md2/mambuscay/Art4.htm>

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica: por sus siglas en inglés EIS, es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal de corrosión) y determinando la respuesta correspondiente. Fuente: <http://depa.fquim.unam.mx/lab-corr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>

Pasividad: es la propiedad más importante de los aceros inoxidable ya que es la responsable de la formación de una película pasiva sobre los materiales, la cual les proporciona la adecuada resistencia a la corrosión. Así pues, la cualidad de inoxidable de los aceros se debe, principalmente a la formación de dicha película protectora sobre la base del material desnudo.

Fuente: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27647/TESIS_Versi%C3%B3n3.pdf?sequence=1

Pátina: capa fina de óxido de color pardo o verdoso que se forma en el bronce y en otros metales a causa de la humedad. Fuente: [https://www.idu.gov.co/web/content/7423/guia_galvanizado_24nov14+\(1\).pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7423/guia_galvanizado_24nov14+(1).pdf)

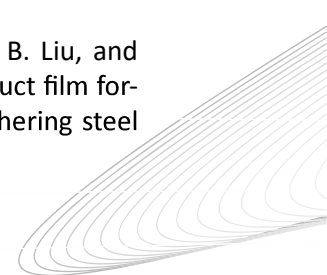
10. REFERENCIAS

- [1] Concha; Alejandro, "Historia del Acero," *ArchDaily Colombia*, 2010.
- [2] T. A. Wertime, "The beginnings of metallurgy: A new look," *Science (80-.)*, 1973.
- [3] J. Simon, J. Tartera, M. Marsal, and J. Auladell i Marquès, "De los íberos al imperio romano. Evolución tecnológica del hierro," *Rev. Metal.*, 2005.

- [4] A. Guadalupe, "Tratamiento térmico del acero," *Universidad Nacional de Ingeniería*, 2014. .
- [5] G. P. Rodríguez, M. Checa, and J. J. De Damborenea, "Corrosion behaviour of high-power laser coatings | Evaluación del comportamiento frente a la corrosión de recubrimientos procesados con láser de alta potencia," *Rev. Metal.*, 2005.
- [6] J. A. P. González, "Losas de concreto reforzadas con acero inoxidable de desecho," *Rev. Ing. Constr.*, 2008.
- [7] A. Valencia, "Los aceros avanzados-Advanced Steels," *Rev. Colomb. Mater.*, 2012.
- [8] Gema Blanco Rodriguez, "Corrosión de nuevos tipos de armadurs de acero inoxidable para estructuras de hormigón armado," 2009.
- [9] M. Sádaba, G. Martínez, and M. Sánchez, "Uso del Acero Inoxidable como Material de Refuerzo en Estructuras de Concreto Armado," *Port. Electrochim. Acta J. Port. Electrochem. Soc.*, 2005.
- [10] W. Aperador, C. Amaya, and J. Butista, "Evaluación de la Resistencia a la Corrosión Erosión de Recubrimientos Multicapas de TiN/AlTiN," *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, 2012.
- [11] B. Jaramillo, J. A. Calderón, and J. Guillermo, "Evaluación electroquímica de aceros autoprotectores en condiciones simuladas de laboratorio Electrochemical assessment of weathering steels under simulated laboratory conditions," pp. 200–210, 2006.
- [12] U. T. De Pereira, "Evaluación Y Caracterización De La Herrumbre De Aceros Autoprotectores (Patinables) Obtenida En Diferentes Ensayos," vol. XIII, no. June, pp. 531–536, 2007.
- [13] J. Galán, L. Samek, P. Verleysen, K. Verbeken, and Y. Houbaert, "Aceros avanzados de alta resistencia en la industria automovilística," *Adv. high strength steels Automot. Ind.*, 2012.
- [14] S.-C. Xenia Isbel, V.-L. René Valentino, C.-P. Francisco Eduardo, and M. Rigoberto, "Resistencia al clima tropical de aceros galvanizados con y sin recubrimiento," *Ing. Investig. y Technol.*, 2014.
- [15] B. Hortigón, J. M. Gallardo, E. J. Nieto-García, and J. A. López, "Elasto-plastic hardening models adjustment to ferritic, austenitic and austenoferritic Rebar," *Rev. Metal.*, 2017.
- [16] R. W. Lycett and A. N. Hughes, "Corrosion," in *Metal and Ceramic Biomaterials: Volume II Strength and Surface*, 2018.
- [17] R. Loto, "Electrochemical analysis of the corrosion inhibition properties of L-leucine and trypsin complex admixture on high carbon steel in 1 M H₂SO₄ solution," *Rev. Colomb. Química*, 2018.
- [18] J. R. Galvele, "Tafel's law in pitting corrosion and crevice corrosion susceptibility," *Corros. Sci.*, 2005.
- [19] Q. C. Salinas, "Conceptos básicos de la corrosión," *Ingenio Libre*, 2010.
- [20] M. T. Cortés and P. Ortiz, "Corrosión," *Apunt. científicos uniandinos*, 2004.
- [21] Borja Acosta Piñero, "Procesos de Pintura en los Buques Mercantes," *Univ. la laguna*, vol. 1, p. 108, 2016.
- [22] L. Garita Arce, L. Rivolta Carvallo, and M. Vega León, "EVALUACIÓN DE LA

CORROSIÓN POR PICADURA EN ALEACIONES DE ALUMINIO,” *Rev. Ing.*, 2013.

- [23] C. A. López C., “ANÁLISIS DE FALLA POR CORROSIÓN BAJO TENSIÓN EN LA TUBERÍA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR. (Spanish),” *Stress Corros. Fail. Anal. PIPE A HEAT Exch.*, 2013.
- [24] S. P. Knight, M. Salagaras, and A. R. Trueman, “The study of intergranular corrosion in aircraft aluminium alloys using X-ray tomography,” *Corros. Sci.*, 2011.
- [25] T.E.S.S.D. Associati, “Acero Inoxidable,” *¿Qué es el acero Inox.*, 2012.
- [26] G. José Nunes, *Metalografía*. 2018.
- [27] I. S, F. J, and G. J. M., “Estudio del crecimiento de grano de la fase austenítica en un acero HSLA de bajo contenido en carbono,” *Revista de Metalurgia*, 2008.
- [28] A. C. F. M. Costa, K. M. S. Viana, E. Miola, S. G. Antonio, C. O. Paiva Santos, and R. H. G. A. Kiminami, “Análise estrutural e morfológica de ferrita NiFe₂O₄ dopada com cromo,” *Rev. Eletrônica Mater. e Process.*, 2011.
- [29] Rev Metal, “Procesos Metalúrgicos De Aceros Microaleados De Alta Resistencia 450 Emz Tipo li En La Zona Afectada ... Metallurgical Transformations of High Strength Low Alloys Steels 450 Emz Type li in the Heat Affected ...,” vol. 42, no. 4, pp. 256–269, 2006.
- [30] P. Larrañaga and J. Sertucha, “Estudio térmico y estructural del proceso de solidificación de fundiciones de hierro con grafito laminar,” *Rev. Metal.*, vol. 46, no. 4, pp. 370–380, 2010.
- [31] J. Oliva, *Universidad Complutense de Madrid (ES)*. 2003.
- [32] F. L. Alférez, J. J. Olaya, and J. H. Bautista, “Synthesis and corrosion resistance evaluation of coatings of SiO₂-TiO₂-ZrO₂-BiO₂ on 316L stainless produced by sol-gel,” *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, vol. 57, no. 5, pp. 195–206, 2018.
- [33] S. A. L. Alanis, “CARACTERIZACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES Y ESTUDIO DE SU RESISTENCIA MECÁNICA Y CONFORMABILIDAD,” 2011.
- [34] J. Capus, “100 years of stainless steel,” *Metal Powder Report*. 2013.
- [35] A. Moffit, “Tomo 3: La industria del hierro y el acero,” in *ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO*, 2012.
- [36] A. Moffit, “Hierro y Acero,” in *Enciclopedia De Salud Y Seguridad En El Trabajo*, 2012.
- [37] F. Bagley, “Estructura y Propiedades - Aluminio y sus aleaciones,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 2015.
- [38] R. Sacks and R. Partouche, “Empire State Building Project: Archetype of ‘Mass Construction,’” *J. Constr. Eng. Manag.*, 2010.
- [39] E. State and B. Goes, “The Empire State Building Goes Green,” *Building*, 2009.
- [40] A. Valencia Giraldo, “Los aceros avanzados,” *Rev. Colomb. Mater.*, 2011.
- [41] A. Ayestarán, C. Graciano, and O. A. González-Estrada, “Resistencia de vigas esbeltas de acero inoxidable bajo cargas concentradas mediante análisis por elementos finitos,” *Rev. UIS Ing.*, 2017.
- [42] Á. F. Mora, “Corrosión intergranular en aceros inoxidables,” *Ing. e Investig. n{úm. 2 (1982); 20-24 Ing. e Investig. n{úm. 2 (1982); 20-24 2248-8723 0120-5609*, 2011.

- [43] A. C. Pereira, F. S. de Assis, and A. dos S. Paula, "CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA FASE AUSTENITA DO AÇO INOXIDÁVEL 304L E DA LIGA NiTi RICA EM Ni UTILIZANDO A TÉCNICA DE ULTRAMICRODUREZA INSTRUMENTADA," 2017.
- [44] C. Rodríguez and M. V. Biezma, "Detección de la corrosión por picadura en aceros inoxidable empleando ultrasonidos," *Rev. Metal.*, 2014.
- [45] J. L. Polo Sanz, C. L. Torres, E. Cano, and J. M. Bastidas, "Estudio de impedancia de la corrosión del acero inoxidable AISI 316L en las regiones pasiva y de picadura," *Rev. Metal.*, vol. 35, no. 6, pp. 368–378, 2010.
- [46] D. S. F. B. Y. E. J. B. A. D. N. R. N. S. Q. PUENTES, "Caracterización de un acero inoxidable obtenido de una barra lisa." Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia U.P.T.C, Tunja, Colombia, 2019.
- [47] J. Smith, William & Hashemi, "CAPÍTULO 1: Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales," in *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 2006.
- [48] Jie Zhang, "Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais," *Acta Mater.*, 1998.
- [49] M. Morcillo, I. Díaz, B. Chico, H. Cano, and D. de la Fuente, "Weathering steels: From empirical development to scientific design. A review," *Corrosion Science*. 2014.
- [50] I. Díaz *et al.*, "Five-year atmospheric corrosion of Cu, Cr and Ni weathering steels in a wide range of environments," *Corros. Sci.*, vol. 141, no. July, pp. 146–157, 2018.
- [51] K. Jauregui-coto, L. Veleza, G. I. Bolio-lópez, and D. A. López-sauri, "Primeras etapas de corrosión de metales en agua de mar artificial II. Acero inoxidable AISI 304," *Rev. Cienc. y Tecnol.*, vol. 9, no. 4, pp. 9–17, 2013.
- [52] M. Suarez and K. Sinqi, "Oxidación Y Corrosión," *Quim. Org.*, 2001.
- [53] B. Chico, D. De La Fuente, J. M. Vega, and M. Morcillo, "Corrosivity maps of Spain for zinc in rural atmospheres," *Mapas España Corros. del zinc en atmósferas Rural.*, 2010.
- [54] N. Hyvert, "Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton," *Univ. Toulouse*, 2009.
- [55] K. Kreislova and H. Geiplova, "Evaluation of corrosion protection of steel bridges," in *Procedia Engineering*, 2012.
- [56] A. Raman, S. Nasrazadani, and L. Sharma, "Morphology of rust phases formed on weathering steels in various laboratory corrosion tests," *Metallography*, 1989.
- [57] A. Artigas, "Comportamiento a la corrosión atmosférica marina de aceros autopatinales con estructura ferrítico perlítica y ferrítico martensítica," *Rev. Mater.*, 2015.
- [58] D. G. Cañon, "Estructura cristalina," *Ing. los Porc. Fabr.*, 2015.
- [59] F. Bolivar, A. Morales, and C. Arroyave, "Simulation of a long term atmospheric corrosion process on plain and weathering steels," *Rev. Metal.*, no. SPEC.VOLUME, pp. 265–269, 2003.
- [60] W. Wu, X. Cheng, H. Hou, B. Liu, and X. Li, "Insight into the product film formed on Ni-advanced weathering steel
- 

- in a tropical marine atmosphere," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 436, pp. 80–89, 2018.
- [61] Y. Qian, C. Ma, D. Niu, J. Xu, and M. Li, "Influence of alloyed chromium on the atmospheric corrosion resistance of weathering steels," *Corros. Sci.*, 2013.
- [62] J. J. MEDINA, J. M. MESA, and I. M. DUEÑAS, "Caracterización de Aceros Autoprotectores A588 y A574." Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia U.P.T.C, 2016.
- [63] Z. Wang, J. Liu, L. Wu, R. Han, and Y. Sun, "Study of the corrosion behavior of weathering steels in atmospheric environments," *Corros. Sci.*, 2013.
- [64] D. Mizuno, S. Suzuki, S. Fujita, and N. Hara, "Corrosion monitoring and materials selection for automotive environments by using Atmospheric Corrosion Monitor (ACM) sensor," *Corros. Sci.*, 2014.
- [65] H. E. Townsend, "Effects of alloying elements on the corrosion of steel in industrial atmospheres," *Corrosion*, 2001.
- [66] M. A. Uusitalo, P. M. J. Vuoristo, and T. A. Mäntylä, "High temperature corrosion of coatings and boiler steels below chlorine-containing salt deposits," *Corros. Sci.*, 2004.
- [67] C. A. Vázquez Rodríguez, "Estudio de corrosión atmosférica para aceros galvanizados y pintados en condiciones marítimas, industriales y urbanas," in *Memorias del Congreso de la Sociedad Mexicana e Electroquímica*, 2016.
- [68] B. Chico, D. De La Fuente, J. M. Vega, and M. Morcillo, "Mapas de España de corrosividad del zinc en atmósferas rurales," *Rev. Metal.*, 2010.
- [69] T. Prosek, D. Thierry, C. Taxén, and J. Maixner, "Effect of cations on corrosion of zinc and carbon steel covered with chloride deposits under atmospheric conditions," *Corros. Sci.*, 2007.
- [70] E. Anzola, "Influencia del estado superficial del acero en la corrosión del acero de refuerzo del hormigón expuesto en ambientes marinos," *Eff. steel Surf. Cond. Reinf. steel Corros. Concr. Expo. to Mar. Environ.*, 2005.