

# Corrosión en láminas y bobinas de un acero importado

Wilson A. Hormaza R.\*

---

## Resumen

*Este trabajo busca determinar las causas que llevaron al deterioro superficial de un conjunto de láminas y bobinas importadas de acero. Lo anterior implica precisar el tipo de deterioro de los componentes, es decir, si este se presentó durante el transporte marítimo o durante el almacenamiento. Los ensayos realizados fueron: análisis visual, análisis de espectrofotometría de infrarrojo y comparativo de los cristales de Cloruro de Sodio (NaCl), análisis de la morfología de la superficie deteriorada a través de microscopía óptica, análisis químico, metalografía y dureza. Los análisis determinaron la presencia de cristales de NaCl, los cuales, al disociarse, generan iones de Cl<sup>-</sup> (Cloruros) y Na<sup>+</sup> (Sodio), responsables del proceso de corrosión, indicándose, así la presencia de un ambiente marino.*

**Palabras claves:** Análisis de Falla, Corrosión, Medio Marino, Cloruro de Sodio.

## Abstract

This work aims at determining reasons for the superficial deterioration of a set of plates and bobbins made of imported steel. This implies to analyze the type of deterioration of the components, and also whether the event took place on shipping or during storage. Tests performed included: visual analysis, infrared spectrophotometry of sodium chloride (NaCl) crystals, morphology of the deteriorated surface through optical microscopy, chemical analysis, metallography, and hardness. These tests showed that the presence of NaCl was the root cause for the corrosion process, indicating that the failure occurred during shipping.

**Key words:** Failure Analysis, Corrosion, Marine Environment, Sodium Chloride.

Fecha de recepción: 12 de abril de 2007  
Fecha de aceptación: 16 de junio de 2007

---

\* Doctor en Ciencia e Ingeniería de Materiales. Profesor Asistente, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro de Investigación Propiedades Mecánicas y Estructura de Materiales –CIPEM.

Correspondencia: Carrera 1ª Este No. 18A-70, Bogotá – Colombia. [whormaza@uniandes.edu.co](mailto:whormaza@uniandes.edu.co)

## 1. INTRODUCCIÓN

La corrosión puede definirse como el deterioro de un material por la acción química o electroquímica del medio ambiente que lo rodea. Por tanto, la corrosión es un proceso natural, en el que se produce una transformación del elemento metálico a un compuesto más estable, que es un óxido. Se distinguen dos tipos de corrosión, la corrosión seca y la corrosión húmeda. Se denomina corrosión seca, cuando el ataque se produce por reacción química, sin intervención de corriente eléctrica. Por su parte, la corrosión húmeda es de naturaleza electroquímica, es decir, que se caracteriza por el surgimiento de una corriente eléctrica dentro del medio corrosivo. Se estima que los gastos atribuidos a los daños por corrosión representan entre el 3 y el 5 por ciento del Producto Interno Bruto –PIB– de los países industrializados [1]; hablando únicamente del acero, de cada diez toneladas fabricadas por año se pierden dos y media por corrosión. En el caso de Colombia, un estudio realizado a finales de los años noventa mostró que los costos por corrosión representan aproximadamente el 1.21 por ciento del PIB (1 billón de pesos) [2]. Las láminas y bobinas estudiadas en este trabajo, fueron importadas desde Europa Oriental y transportadas en barco; luego fueron almacenadas en puerto durante quince días y durante ese mismo periodo de tiempo se observó un deterioro superficial en dichos materiales. Los ensayos realizados para caracterizar y determinar el deterioro fueron: análisis visual, análisis de espectrofotometría de infrarrojo y comparativo de los cristales de Cloruro de Sodio (NaCl), análisis de la morfología de la superficie deteriorada a través de microscopía óptica, análisis químico, metalografía y dureza.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta etapa del trabajo se describen los procedimientos experimentales utilizados en esta investigación, donde, como ya se ha reiterado, se pretende determinar el tipo de corrosión que afectó las láminas y bobinas importadas. Se recibió un conjunto de láminas corroídas, sobre las cuales se procedió a realizar la serie de ensayos mencionados anteriormente (Figura 1).

### **Inspección visual**

A partir del conjunto de láminas y bobinas recibido, se procedió a realizar una inspección visual detallada a fin de obtener mayor información sobre el estado general de los componentes y del proceso de corrosión en estudio.



**Figura 1:** Láminas entregadas para estudio.

### **Composición química**

Con el fin de conocer la composición química del material de las láminas corroídas, se realizó un análisis químico cuantitativo por espectroscopia de emisión de chispa con un equipo ARL 3520 OES.

### **Dureza**

Para la medición de la dureza Rockwell B de las láminas, se realizó un desbaste con una lija 600 mesh. Para limpieza y adecuación de la superficie y con ayuda de un durómetro WILSON ROCKWELL 600, fueron tomadas ocho (8) mediciones por indentación en cada una de las superficies de las respectivas láminas.

### **Caracterización micro estructural**

A fin de caracterizar la microestructura del material de las láminas, se extrajeron muestras representativas de las mismas. Además, se prepararon probetas metalográficas de forma convencional para revelar la microestructura de acuerdo con la norma ASTM E3; para este fin se utilizó un microscopio metalográfico Leitz Metallux II.

### **Análisis comparativo de los cristales de Cloruro de Sodio (NaCl)**

Este análisis comparativo busca determinar similitudes entre las muestras de interés y un patrón conocido, utilizándose para ello un microscopio NIKON M 35 S.

## Análisis de espectrofotometría de infrarrojo

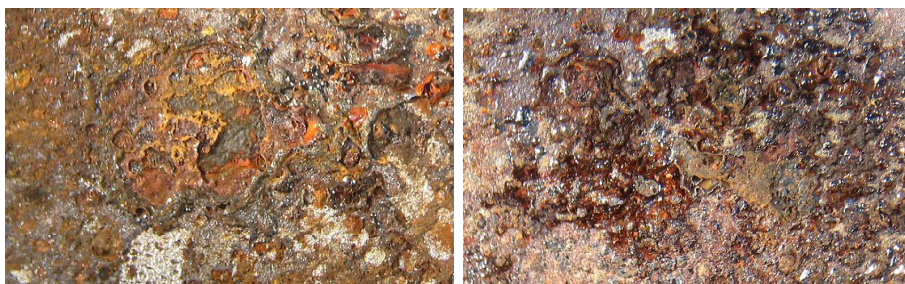
Utilizándose la espectrofotometría de infrarrojo, se busca determinar la presencia de NaCl. El análisis se caracteriza por la absorción o transmisión de la radiación infrarroja en la muestra, en función de la frecuencia o longitud de onda de la radiación infrarroja incidente. Esta radiación comprende el rango entre  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $400\text{ cm}^{-1}$ . El equipo utilizado para este análisis es el Termo Electrón Corporation Nicolet 390 FTIR.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1. Análisis visual

Al realizar una inspección visual de las láminas, se observó una coloración característica (tonos rojizos, marrones y amarillos), lo que resulta una indicativo de estados muy avanzados de corrosión [2,3].

También se observa un deterioro superficial del material, sugiriendo el contacto con un medio altamente agresivo [2,4], (Figura 2).



**Figura 2:** Ampliación de las superficies de las láminas deterioradas.

Evaluando el deterioro ocasionado por la corrosión sobre el material, se puede clasificar, según su morfología, como un tipo de corrosión localizada [5].

#### 3.2. Composición química

El análisis de composición química por espectroscopia de chispa reveló los porcentajes que se consignan en la Tabla 1.

De acuerdo con la especificación entregada por el cliente y con los resultados obtenidos del análisis de composición química, la muestra analizada se encuentra fuera de especificación.

**Tabla 1**

Composición química de los componentes en estudio (% en masa)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Sn	Ti	Pb	Al
Proveedor	0.06	0.01	0.3	0.009	0.022	0.02	-	0.03	0.05	-	-	-	-
Lámina deteriorada	0.38	0.85-	0.12	0.007	0.013	0.01	0.01	0.01	0.013	0.01	0.001	0.01	0.028

### 3.3. Dureza

Los valores medios de dureza obtenidos en las superficies de las láminas son presentados en la Tabla 2.

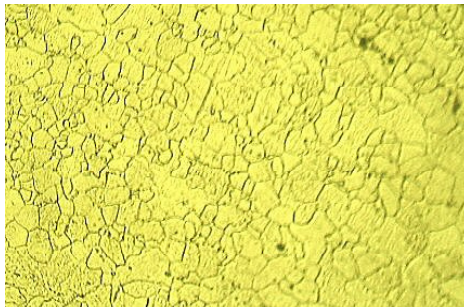
**Tabla 2**

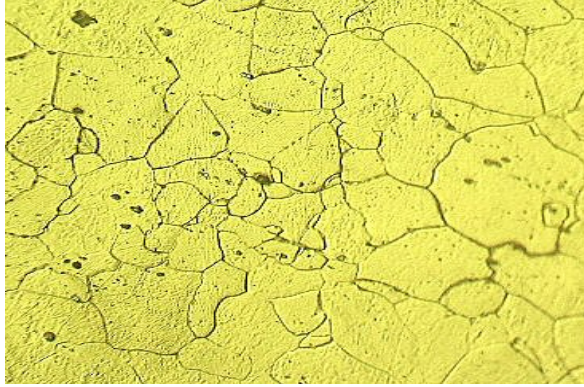
Resultado del ensayo de dureza de las láminas

	Dureza HRB (100 Kgf)
Lámina deteriorada	70±1

### 3.4. Análisis metalográfico

Para el análisis metalográfico de las láminas, se procedió a realizar un corte transversal. Las microfografías del material visto en la dirección axial de dichas láminas muestran una microestructura predominantemente ferrítica, con tamaño de grano no uniforme. Esto se puede observar en las Figuras 3 a 4. También se observa la presencia de inclusiones no metálicas y sitios, sobre la microestructura, donde se revela un daño mas localizado por corrosión.

**Figura 3:** Micrografía de las láminas deterioradas a 200X.

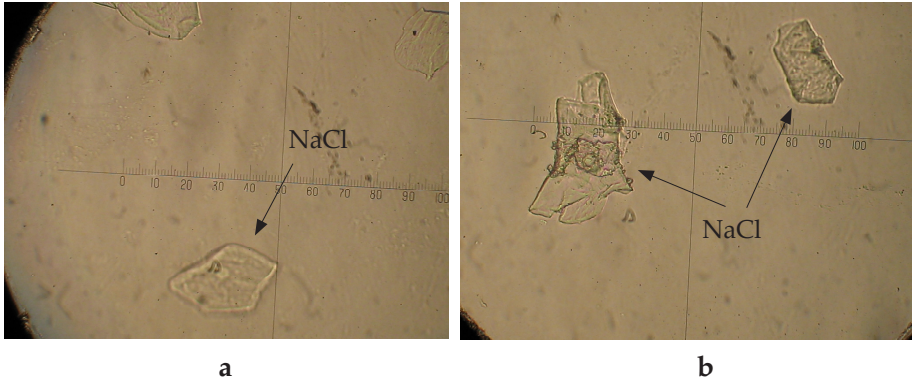


**Figura 4:** Micrografía de las láminas deterioradas a 500X.

### 3.5. Análisis comparativo de los cristales de Cloruro de Sodio (NaCl)

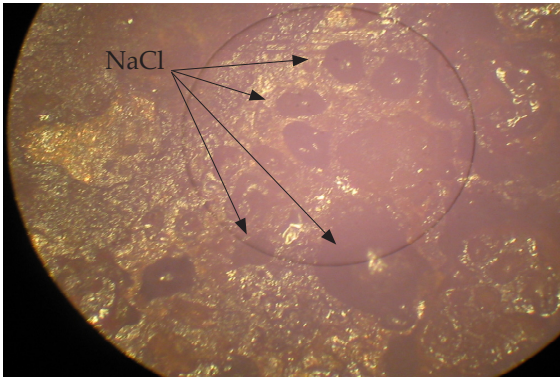
Por medio de microscopía óptica se busca reconocer los cristales del NaCl, principio activo del medio marino. Una vez reconocida la estructura se practicó un comparativo con las muestras entregadas para análisis.

En la Figura 5, se observan los cristales de NaCl puros, que se utilizaron para comparación con las herrumbres obtenidas de las láminas deterioradas.

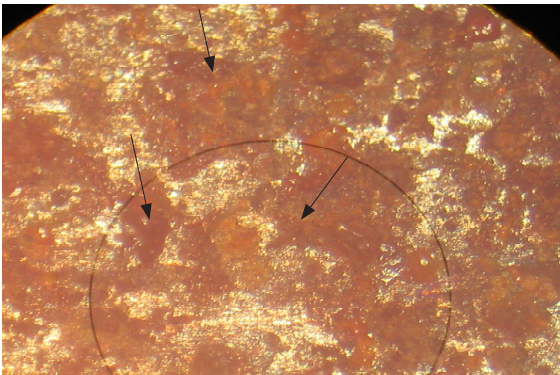


**Figura 5:** Morfología del NaCl puro (a) y (b). Las estructuras se observaron en el microscopio NIKON a 40X.

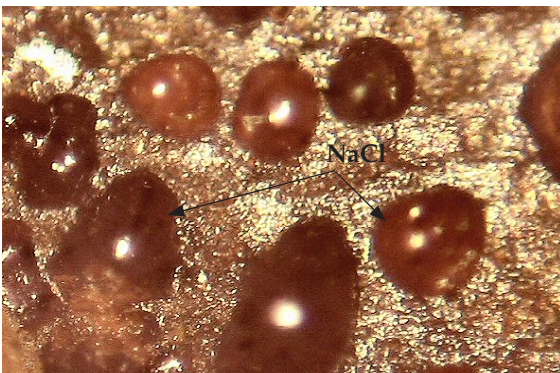
Sobre las láminas en estudio, se determinó la presencia de cristales de NaCl (regiones de color café, Figuras 6 a 9). También se observaron regiones de color rojizo, las cuales son un indicativo de corrosión localizada [2,6].



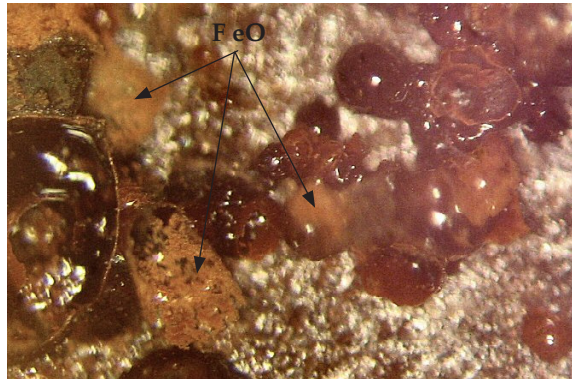
**Figura 6:** Superficie original, donde se observan los cristales de NaCl (morfologías oscuras) a 40X



**Figura 7:** Se observa un ataque de corrosión localizada (superficies más rojas) y las regiones indicadas por las flechas muestran los cristales de NaCl a 40X

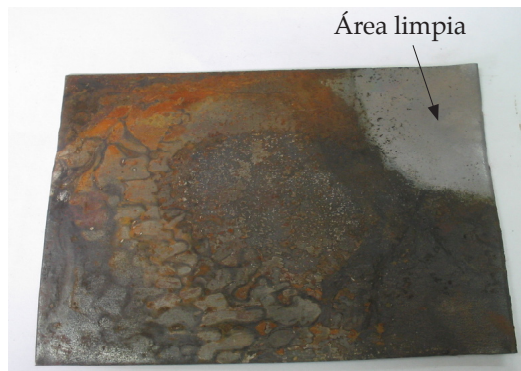


**Figura 8:** Se observa mayor cantidad de cristales de NaCl (regiones de color café) en comparación con las regiones corroídas



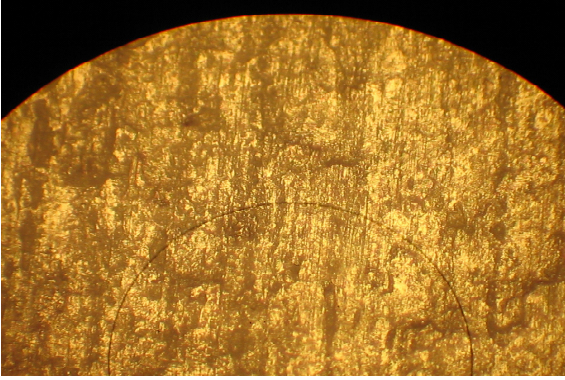
**Figura 9:** Ataque localizado por óxido de hierro (FeO) de color rojizo y en la zona inferior a la micrografía se observan trazas de NaCl.

Para complementar los análisis anteriores, se realizó un comparativo superficial antes y después de la remoción de las herrumbres, el cual se llevó a cabo, de manera específica, sobre la muestra que presentaba mayor deterioro superficial (Figura 10). Sobre esta muestra se efectuó, también, una limpieza con ácido clorhídrico (HCl) al 19%, con el fin de visualizar la superficie sin corrosión [6,7], (Figura 11 a 12).

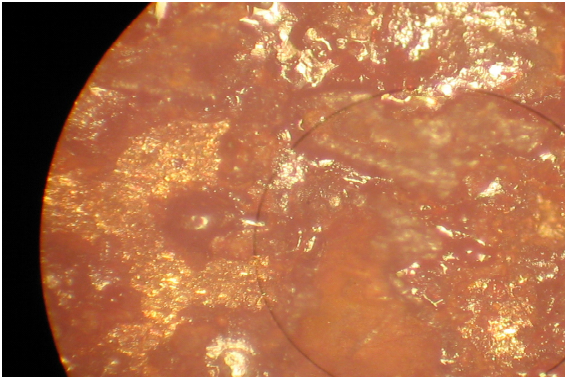


**Figura 10:** Lámina de análisis en la cual se realizó la limpieza con HCL.





**Figura 11:** Región limpia de corrosión, libre de cristales de NaCl y de FeO.



**Figura 12:** Muestra, sin limpieza, presentando corrosión localizada en estado avanzado

### 3.6. Análisis de espectrofotometría de infrarrojo

El objetivo de este análisis consistió en revelar la presencia de Cloruro de Sodio en las herrumbres del material. Las láminas fueron raspadas para obtener una muestra de las herrumbres y realizar, así, el espectro [2,8], (Figura 13).

A continuación, se observa el espectro de transmitancia obtenido del Cloruro de Sodio y de las herrumbres de la lámina en estudio (Figura 14).

La región de interés en este espectro se encuentra en el intervalo de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $3500\text{ cm}^{-1}$ , ya que en esta zona se determinan los picos característicos del NaCl [8]. Es por esto que, a continuación, se presenta una ampliación de esta región (Figura 15).

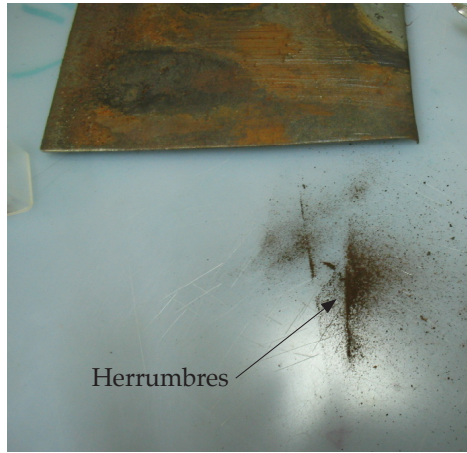


Figura 13: Herrumbres obtenidos después del raspado.

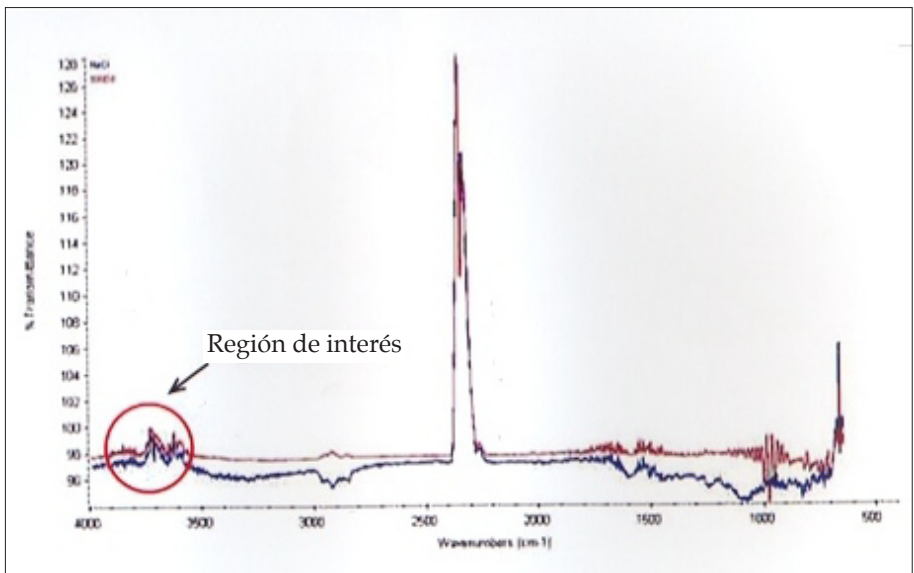


Figura 14: Espectros de NaCl puro (azul) y herrumbres presentes en el raspado (rojo)

*Nota de la editorial:* No obstante la presentación irregular de las figuras 14, 15, 16 y 17, el autor aprobó su publicación.

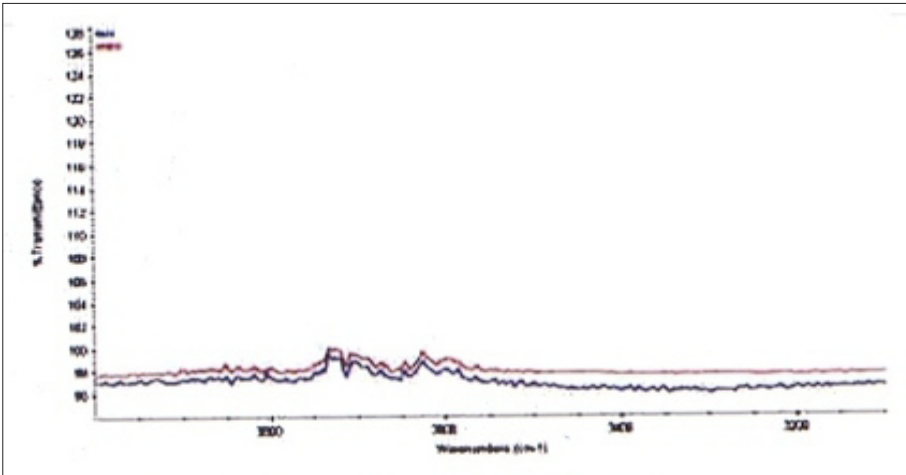


Figura 15: Ampliación de la región de estudio.

Tomando los espectros de las Figuras 16 y 17, se determinaron los picos relevantes, los cuales son utilizados para la identificación de las herrumbres presentes en las láminas corroídas.

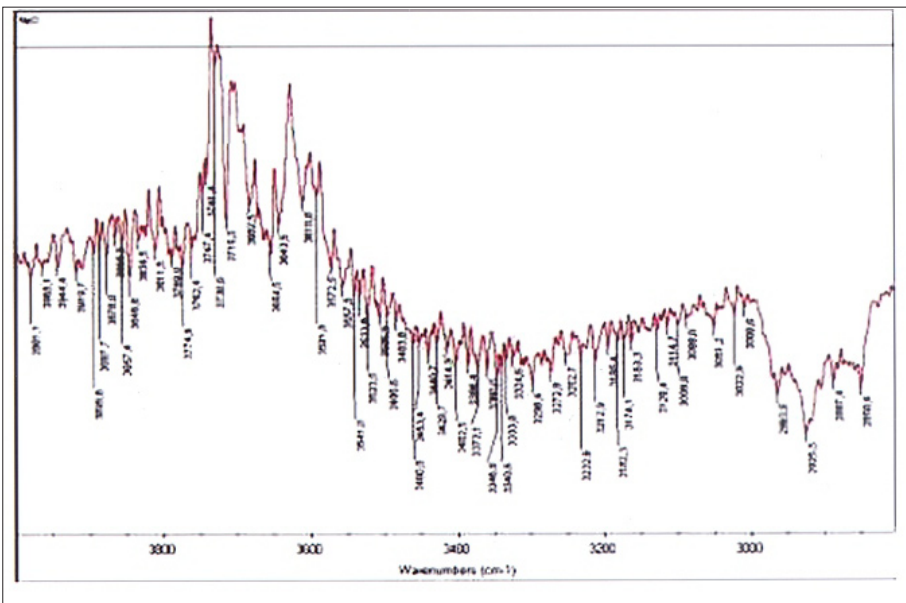


Figura 16: Picos relevantes del NaCl puro

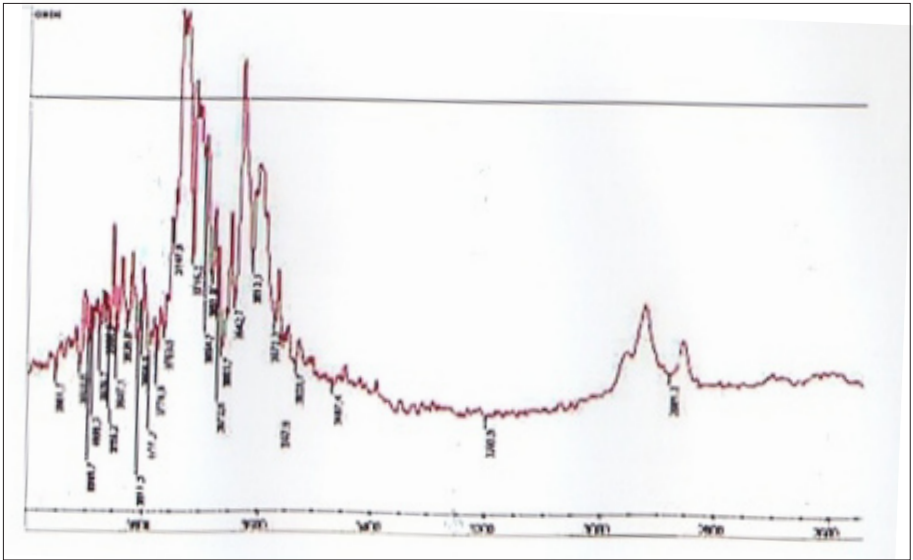


Figura 17: Picos relevantes de las herrumbres.

Analizando los picos característicos del NaCl y las Herrumbres de cada espectro (Figuras 16 y 17), se encontró una similitud en la región de  $3774.9 \text{ cm}^{-1}$ , zona que corresponde al Cloruro de Sodio [8] y a una herrumbre denominada Laurencita, obtenidas en atmósferas marinas [2,4].

Después de observar y analizar el comparativo de las estructuras, se determinó la presencia de Cloruro de Sodio (NaCl). Esto es reconfirmado con los resultados obtenidos de la espectrofotometría de infrarrojo, que indican claramente la presencia de NaCl.

Por lo anterior, se entiende que el ataque corrosivo fue inducido por iones contenidos en una sal propia de medios marinos, como lo es el (NaCl); además, se observa un color rojizo, lo cual indica una corrosión avanzada [1,2,4].

El NaCl se disocia en iones  $\text{Na}^+$  (anión) y  $\text{Cl}^-$  (catión), el cloro se comporta como cátodo por tener carga negativa. Esta característica lo hace sensible a ceder electrones. Al entrar en contacto con la lámina de estructura predominantemente ferrítica, la cual posee un ion de hierro,  $\text{Fe}^+$  (anión), y cuya reacción está representada por la pérdida de dos electrones ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^-$ ), el Cl suplir la necesidad de electrones del Fe, completando así la ley del octete y provocando una diferencia de potencial (migración de electrones

del cátodo al ánodo y viceversa). Esta diferencia de potencial genera una corriente, cuyo resultado es la corrosión y, una vez estabilizada la reacción de corrosión, se inicia la formación de herrumbres [2].

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de los ensayos y los resultados obtenidos, y su posterior análisis se puede concluir que:

- El material examinado de las láminas no satisface las especificaciones entregadas por el proveedor.
- La presencia de inclusiones contribuye al deterioro, ya que estas disminuyen la resistencia a la corrosión.
- Después de observar y analizar el comparativo de las estructuras, se determinó la presencia de Cloruro de Sodio (NaCl).
- Las muestras estudiadas en este trabajo presentan un proceso de corrosión electroquímica, desarrollado por la presencia de electrolitos (agua del mar), el cual se manifiesta por la presencia del Cloruro de Sodio (NaCl), principio activo de la sal marina.

#### Referencias

- [1] D. DURING, *Corrosion Atlas: Collection of Illustrated Case Histories*. New York: Elsevier, 1997.
  - [2] J. ZULUAGA, *Determinación de las Condiciones de Corrosión Atmosférica por Análisis de Herrumbres*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1995.
  - [3] G. VILA, *Corrosión Electroquímica: Mecanismos y métodos de Control*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1989.
  - [4] T. SPIRO, W. STIGLIANI, *Química Medioambiental*, 2ª Edición, Pearson Prentice Hall, 2004
  - [5] H. KATAYAMA, K. NODA, H. MASUDA, *Corrosion Simulation of Carbon Steels in Atmospheric Environment*. Corrosion Science. Vol. 47, p. 2599-2606, 2005.
  - [6] J. SHACKELFORD, *Introducción a la ciencia de Materiales para Ingenieros*, 6ª Edición, Pearson Prentice Hall, 2005.
  - [7] PERRY, *Manual del Ingeniero Químico*, Sexta Edición, Volumen VI, M<sup>c</sup>Graw Hill, 2000.
  - [8] C. POUCHERT, *The Aldrich Library of FTIR Spectra Edition I*, Volumen 1, 1985.
- Fuente:** Diana Carolina Pinilla Cruz, Química Industrial, dpinilla@uniandes.edu.co