

# ANÁLISIS DE FALLA EN EVAPORADORES DE PLACAS DE ALUMINIO DE SISTEMAS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE AUTOMOTRIZ

*Failure analysis of aluminum plate evaporators for air conditioning systems automotive*

Fecha de recibo del artículo: Julio de 2011 - Fecha de aceptación: Septiembre de 2011

Santiago Mendoza Hurtado

Universidad Autónoma del Caribe, Programa de Ingeniería Mecánica. Grupo de Investigación en Materiales, Procesos y Tecnologías de Fabricación - IMTEF. Barranquilla, Colombia. e-mail: santiago120189@hotmail.com

José Carlos Romero

Universidad Autónoma del Caribe, Programa de Ingeniería Mecánica. Grupo de Investigación en Materiales, Procesos y Tecnologías de Fabricación - IMTEF. Barranquilla, Colombia. e-mail: jose60863@hotmail.com

Enrique Niebles Núñez

Universidad Autónoma del Caribe, Programa de Ingeniería Mecánica. Grupo de Investigación en Materiales, Procesos y Tecnologías de Fabricación - IMTEF. Barranquilla, Colombia. e-mail: eniebles@uac.edu.co

## RESUMEN

Se caracterizaron los tipos de fallas a partir del estudio de tres perfiles de evaporadores de placas de aleación de aluminio, puestos fuera de servicio por fugas del refrigerante y obtenidos en talleres de refrigeración automotriz en la ciudad de Barranquilla. Luego se aplicaron las pruebas de la metodología del análisis de falla. Se comprobó que los mecanismos de falla fueron principalmente corrosión con algunas situaciones tendientes a fractura frágil; además, las condiciones ambientales de la ciudad de Barranquilla son factores influyentes en los mecanismos de corrosión.

## Palabras clave

Análisis de falla, evaporador de placas, refrigeración automotriz, espectrometría, MEB, corrosión por celdas de concentración.

## ABSTRACT

Were characterized the failures types starting of a study of three aluminum alloy plate evaporators sections, the evaporators were in disuse because of refrigerant leakages witch were got in Barranquilla automotive cooling workshops. After were applied the testing of failure analysis methodology. Were found the failure mechanisms were mainly corrosion with some situations witch bowed to be fragile fracture; additionally, the Barranquilla environment conditions they are influential factors in the corrosion mechanisms.

## Keywords

Failure analysis, plate evaporator, automotive cooling, spectrometry, SEM, concentration cell corrosion.

## INTRODUCCIÓN

Entrevistas realizadas por el grupo investigador en diferentes talleres de refrigeración automotriz en la ciudad de Barranquilla, han concordado en que los automóviles que llegan para un servicio de revisión en el sistema de aire acondicionado ocasionalmente presentan fallas en el evaporador, por la presencia de fugas relacionadas con la corrosión, generalmente detectadas en las placas que componen el circuito del gas refrigerante, bien sea por factores alternos de tipo mecánico [4], [23], humano, ambiental o por la combinación de los mismos.

Las fuentes entrevistadas afirman que la vida útil promedio del evaporador oscila entre dos a tres años, y es un problema para el desempeño del sistema de aire acondicionado de los automóviles que circulan las calles de la ciudad de Barranquilla [4], [23]. Debido a lo anterior surge la inquietud de saber cuáles son las causas y los factores influyentes en la falla del evaporador de placas de aluminio en el sistema de acondicionamiento de aire automotriz en la ciudad de Barranquilla. Por la limitada disponibilidad de muestras se decide trabajar con tres perfiles de evaporadores de placas de aluminio bajo las condiciones ambientales características de la ciudad de Barranquilla y sin tener en cuenta variables de diseño.

## GENERALIDADES DEL EVAPORADOR DE PLACAS DE ALUMINIO

El evaporador es un intercambiador térmico y parte fundamental del sistema de aire acondicionado automotriz. Se encuentra dentro del automóvil, después del impulsor y antes del radiador de calefacción (Figura 1). La función primordial del evaporador del circuito frigorífico es la de enfriar y deshumidificar el aire puesto en movimiento por el impulsor y enviarlo hacia el recinto del automóvil; para ello, absorbe calor del aire y lo expulsa al medio en donde se encuentra, produciéndose dos fenómenos físicos: a) primero el aire se enfría y el vapor de agua presente en este aire se condensa en las placas del evaporador, y b) el fluido se evapora y se recalienta [39].

El circuito de flujo paralelo de este tipo de evaporador está formado por placas colocadas unas sobre otras como se ilustra en la Figura 2, en forma de cubetas. Entre dichos tubos planos se intercalan las aletas en forma de acordeón. El conjunto se galvaniza en un horno, al vacío o bajo una atmósfera neutral. Esta tecnología es utilizada tradicionalmente por los constructores americanos [39].

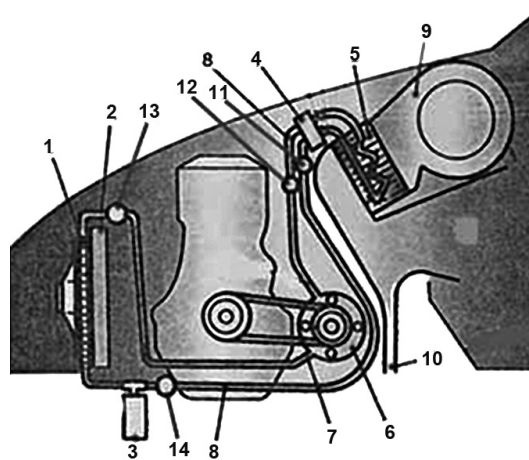
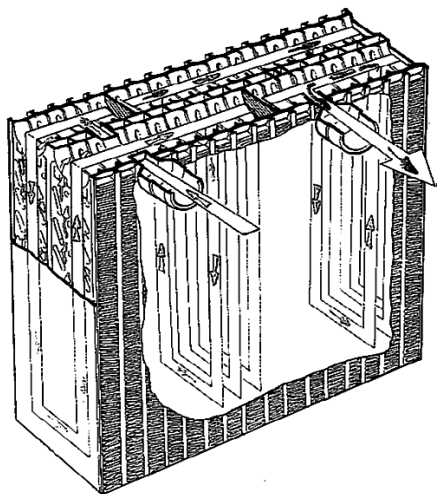


Figura. 1. Situación de los elementos de aire acondicionado en el automóvil

1. Ventilador de refrigeración condensador.
2. Condensador.
3. Depósito secador.
4. Válvula termostática.
5. Evaporador.
6. Compresor.
7. Correa trapezoidal.
8. Tubería de conducción del agente refrigerante.
9. Turbina del ventilador habitáculo.
10. Evacuación de los condensados en el evaporador.
11. Válvula de llenado de circuito de alta presión.
12. Válvula de llenado de circuito de baja presión.
13. Conmutador o presostato triple.
14. Testigo de líquido.



**Figura. 2. Evaporador de placas**

Tomado de Valeo (2010, Junio). Valeo service

En pocas palabras el evaporador cambia el refrigerante del estado líquido a gas para absorber calor. Actualmente se utiliza el refrigerante R134a porque es menos impactante para la ozonfera que el R12 [19], prestando su servicio en un clima tropical seco a una altitud entre 0 a 142 m, una temperatura ambiente promedio de 27,39°C (81,31°F) y a 80% de humedad relativa, condiciones típicas de la ciudad de Barranquilla; con una presión de 2,83 kgf/cm<sup>2</sup> (40,31 psi) en la línea de baja y de 14,94 kgf/cm<sup>2</sup> (212,48 psi) en la línea de alta [23]. La temperatura ideal de funcionamiento del evaporador es de 0°C aunque generalmente puede oscilar de 0 a 4°C (32 a 39,2 °F) [4].

Para la fabricación de estos equipos actualmente se emplea el aluminio; bien sea latón de aluminio y materiales de aluminio bronceado, debido a las buenas propiedades mecánicas y químicas, tales como dureza y resistencia a la corrosión [16], [33]. Las últimas tendencias en la fabricación de elementos para intercambiadores de calor y componentes de sistemas de aire acondicionado automotriz, han preestablecido que la mayor parte de los materiales sean aleaciones con patrones de Al-Si, para mejorar las características de fundición y de servicio [26]. Son aleaciones pertenecientes a la serie o gru-

po 3000, de gran aplicación por sus excelentes cualidades para la fundición, muy resistentes a la corrosión, y poseen excelentes características para soldarse al arco o con soldadura fuerte; de esta manera permiten ser formadas, dobladas o estampadas con facilidad [35].

Para asegurar la calidad de este producto, los fabricantes realizan una serie de pruebas, tales como: prueba de presión variable, prueba de flujo bajo presión alta, detección de temperaturas por calorímetro, pruebas de vibración y anti-corrosión, y detección de soldadura [19].

## METODOLOGÍA

Para determinar los posibles mecanismos y modos de falla de los evaporadores de placas de aluminio, la metodología se basa en las etapas del análisis de falla. A continuación se sintetizan las fases que se deben seguir para el análisis [6], [38], [40]:

- 1) Inspección visual de los evaporadores del automóvil: se analizarán visualmente los tres evaporadores obtenidos; haciendo uso de las herramientas de análisis visual convencional.
- 2) Extracción de las placas con fuga y pruebas de taller: se recurre a pruebas neumáticas para localizar las placas que tienen fugas y proseguir a su extracción.
- 3) Análisis químico del material de las placas del evaporador: se determinará por medio de un espectrómetro emisor de arco la composición química de los evaporadores [1], [21].
- 4) Análisis macroscópico de las placas con fuga: en la macroscopía se emplea un microscopio óptico convencional y un estereomicroscopio para el análisis macroestructural del elemento.
- 5) Análisis microscópico de las probetas extraídas de las placas con fuga: en la microscopía se emplea un microscopio electrónico de barrido (MEB) para el análisis microestructural del elemento.

- 6) Análisis fractográfico de las probetas extraídas de las placas con fuga: paralelamente al análisis microscópico se realiza el análisis fractográfico, para analizar las posibles fracturas existentes, distinguiendo el tipo (frágil y dúctil) y morfología de la fractura.

## Hipótesis de causa-efecto de la falla en los evaporadores de placas de aluminio

La falla en los evaporadores de placas de aluminio se puede originar a partir de lo señalado en la Figura 3:

- 1) **Diseño:** La posición del evaporador dentro del automóvil puede influir en la accesibilidad para mantenimiento y cambios del equipo. Situado exactamente dentro de la guantera del automóvil; para lo cual se desmonta parte del interior del automóvil, y en ocasiones se hace necesaria la fabricación de adaptaciones para fijarlo en el puesto.
- 2) **Material:** Cualquier variación de los elementos que constituyen la aleación de aluminio especificado en el diseño, puede afectar las propiedades físicas y químicas, como la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión. Por ende, es necesario verificar si el material cumple con las condiciones metalúrgicas de diseño, analizando la composición química y la estructura superficial.
- 3) **Fabricación:** Son los defectos y errores inmersos en el proceso de manufactura del evaporador de placas de aluminio, para dar forma al evaporador por proceso de fundición, extrusión o laminado, embutido y soldadura en horno de las placas, conjuntamente con la estructura y tuberías de suministro y retorno. Es posible que algunos parámetros como dimensiones y geometrías sean alterados produciendo inconsistencias en la estructura superficial del elemento y distorsiones en la conformación del grano. Aparte de las alteraciones de

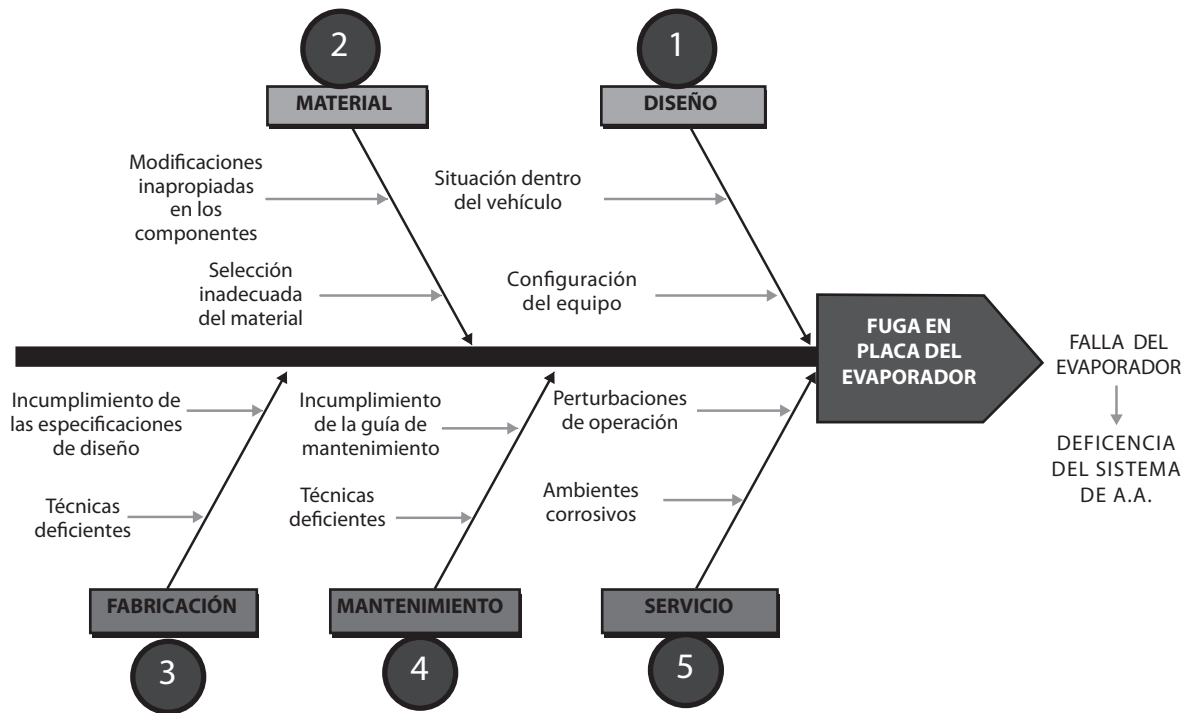
los parámetros de fabricación y mecanizado, se pueden producir discontinuidades y defectos superficiales, como impurezas, poros y microgrietas.

- 4) **Servicio:** En el servicio intervienen factores ambientales y de operación como temperatura y presión, según las condiciones ambientales típicas de la ciudad de Barranquilla, la salinidad y contaminantes externos a los que está sometido. Pueden afectar la vida útil del equipo por la aparición de incrustación y depósitos por la presencia de impurezas. Además los terrenos irregulares y el mal estado de las carreteras de la ciudad de Barranquilla pueden originar vibraciones que posiblemente inicien un desgaste mecánico moderado [22], [28].
- 5) **Mantenimiento:** El escaso o deficiente mantenimiento preventivo sumado a la acción de los factores de las condiciones ambientales típicas de la ciudad de Barranquilla, pueden exponer aún más al evaporador de placas y hacerlo mucho más propenso a la falla.

## Evaluación de las causas hipotéticas de la falla en los evaporadores de placas de aluminio

Para poner en marcha el curso de acción y pruebas de laboratorio, primero es necesario saber las presiones de operación del refrigerante R134a en el sistema de aire acondicionado tanto en línea de baja como en la línea de alta. Según la carta de temperatura-presión del refrigerante R134a y a la temperatura ambiente de la ciudad de Barranquilla, es decir, a 27,4°C (81,31°F) se obtiene que las presiones en línea de baja y de alta son de 40,31 y 212,48 Psi, respectivamente; esta presión es la que se usará en la prueba neumática para determinar el lugar de las fugas.

Debido a que cualquier cambio ocurrido durante el análisis puede influir en la interpretación de los datos, es necesario preservar el estado de la superficie de las muestras de los evaporadores en el momento de poner en marcha el curso de acción, para no alterar las muestras [7]-[9]. El pro-



**Figura 3. Esquema causa-efecto (Diagrama de Ishikawa) de la falla del evaporador por la fuga en la placa**

cedimiento de análisis de falla conveniente para esta investigación es el siguiente [6],[38],[40]:

**1. Recolección de muestras, recopilación de datos y examen preliminar.**

En los tres evaporadores obtenidos de diferentes talleres de refrigeración automotriz de la ciudad de Barranquilla (Figura 4) se logra apreciar la presencia de depósitos de suciedad del ambiente y manchas blancas que son indicios de corrosión.

**2. Primera prueba de taller y obtención de placas para análisis.**

Con soldadura de plata se selló la salida del refrigerante del evaporador, por la entrada se suministró aire a 200 Psi y se sumergió en agua para determinar qué placas poseían fugas.

Se procedió a extraer las placas donde se notó presencia de fuga para inspeccionarla visualmente (Figuras 5, 6 y 7).

**3. Segunda prueba de taller.**

Se procedió a sellar con soldadura sintética las placas para poder someterlas a la segunda prueba neumática, sometiéndolas nuevamente a aire a presión de 200 Psi; en esta se determinó el lugar exacto donde se encontraba la fuga en cada placa (Figuras 8, 9 y 10).

**1) Análisis químico.**

Resultado obtenido del espectrómetro emisor de arco que nos muestra los porcentajes de cada uno de los aleantes en la Tabla 1; esta prueba se realizó sobre una probeta obtenida de la fundición de placas del evaporador aledañas a las placas con fugas. Para demostrar la veracidad de los resultados se realizó nuevamente la prueba (Tabla 2) pero en secciones de las placas que poseían fugas y que fueron tratadas por proceso de lijado y machucado con el

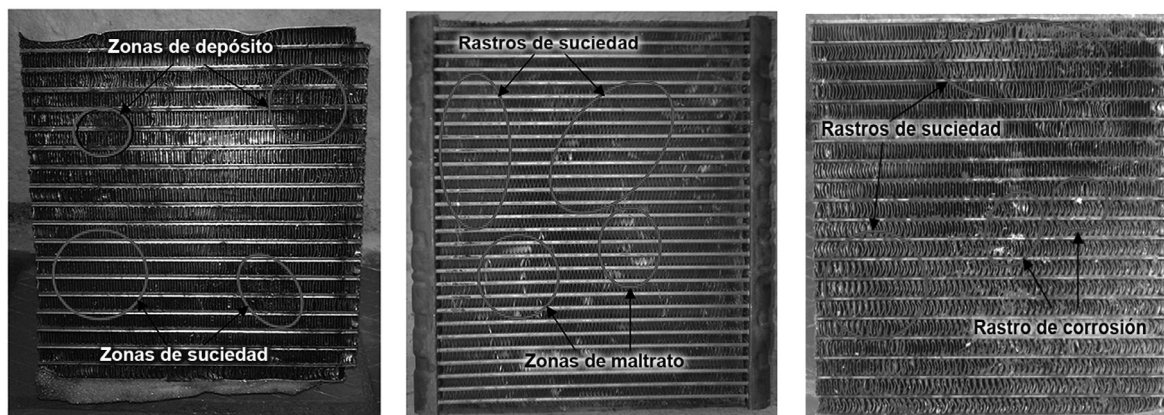


Figura 4. A) Evaporador 1: Mazda Allegro, B) Evaporador 2: Hyundai Atos, C) Evaporador 3: Mazda Allegro

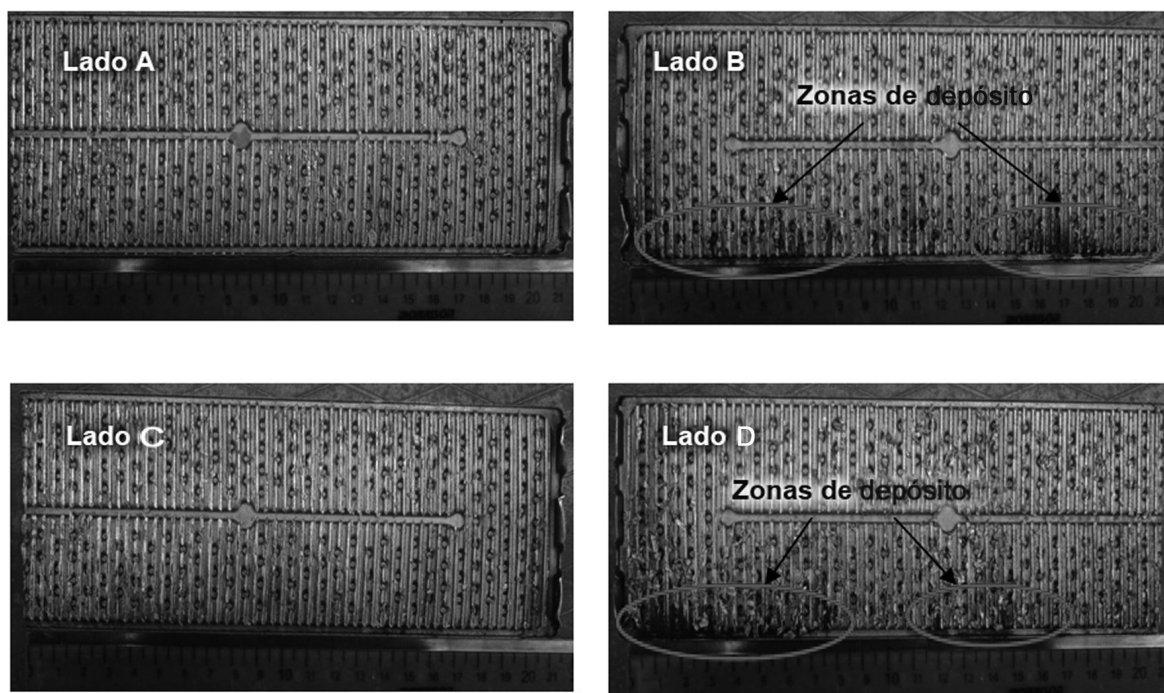


Figura 5. Se observa en cada placa zonas oscuras que indican presencia de depósito. Placa 1-2 (A y B), placa 1-3 (B y C).

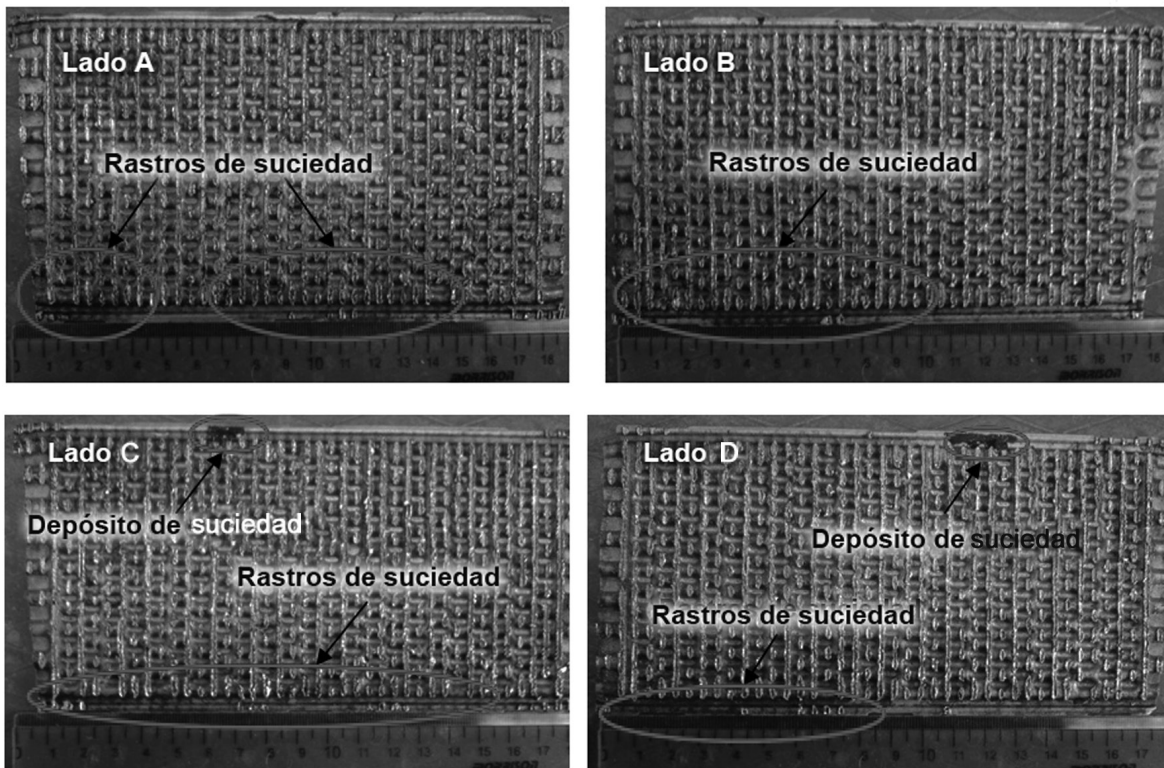


Figura 6. Se observa en cada placa zonas oscuras que es presencia de depósito.  
Placa 2-1 (A y B), placa 2-2 (B y C).

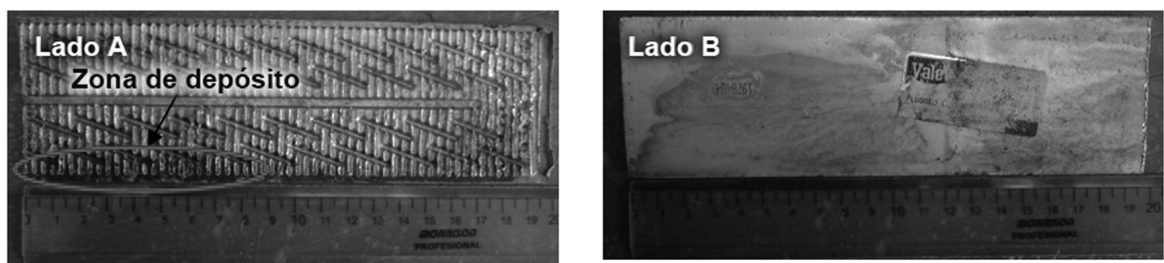


Figura 7. Se observa en cada placa zonas oscuras, que corresponden a presencia de depósito.  
Placa 3-21.

fin de obtener una superficie apta para realizar la prueba..

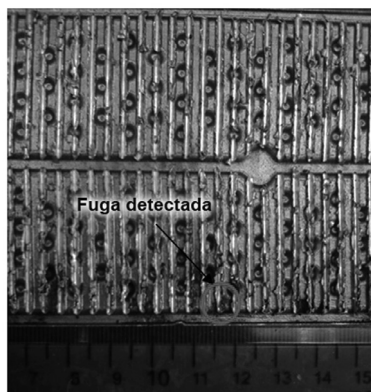
2) Análisis macroscópico.

Con la ayuda del microscopio óptico y estereomicroscopio se pudo apreciar mejor la zona de fuga, pudiéndose observar muchas zonas con pérdida de material, la mayoría se encontraban debajo de depósi-

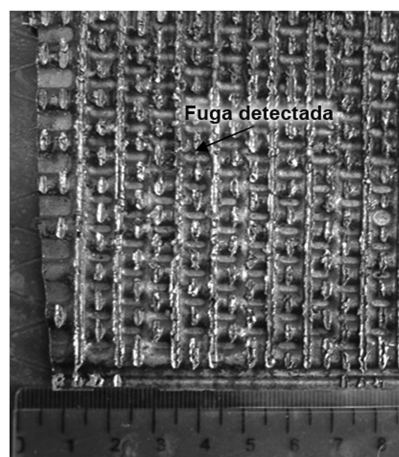
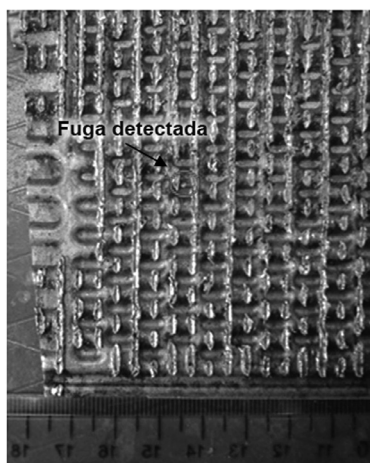
tos que cubrían las superficies de las placas (Figuras 11, 12 y 13) [6]-[29].

3) Obtención de probetas, análisis microscópico y fractográfico.

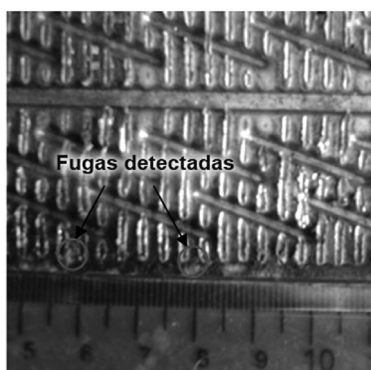
Teniendo en cuenta la conformación de las placas de los evaporadores se extraerán las probetas por medio de las herramientas y cuidados,



**Figura 8. Placa 1-2.** [Nota: en las placas del evaporador 1 las fugas se localizaron en el borde de la placa debajo de las zonas de depósitos evidenciadas en la Figura 5 (A y B)].



**Figura 9. A) Placa 2-1, B) Placa 2-2** (Nota: a diferencia de las placas de los evaporadores 1 y 3, en las placas del evaporador 2 se encontraban las fugas en una zona central de la placa, sin indicios de suciedad o depósito acumulado como se evidencia en la Figura 6).



**Figura 10. Placa 3-21** (Nota: en las placas del evaporador 3 las fugas se localizaron en el borde de la placa debajo de las zonas de depósitos evidenciadas en la Figura 7).



**Tabla 1. Resultados de la composición química de los elementos detectados en el análisis espectrométrico de las muestras fundidas**

Serie	ID	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Ti (%)	Cr (%)	Pb (%)	Sn (%)	Li (%)	B (%)	Ca (%)	Na (%)	Ni (%)
N.A.	1 Fundida	95,821	2,796	0,334	0,235	0,703	0,078	0,012	0,012	0,003	0,0	0,001	0,0	0,001	0,0	0,0	0,005
N.A.	2 Fundida	95,276	3,598	0,273	0,145	0,258	0,410	0,007	0,02	0,006	0,001	0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,004
3009	3 Fundida	96,773	1,419	0,199	0,529	1,007	0,0	0,011	0,053	0,001	0,001	0,001	0,0	0,0	0,001	0,0	0,004

**Tabla 2. Resultados de la composición química de los elementos detectados en el análisis espectrométrico de las muestras machucadas y lijadas**

ID	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Ti (%)	Cr (%)	Pb (%)	Sn (%)	Li (%)	B (%)	Ca (%)	Na (%)	Ni (%)
1 Machucada	95,6	2,741	0,59	0,134	0,79	0,099	0,005	0,016	0,006	0,0	0,001	0,0	0,001	0,01	0,002	0,006
2 Machucada	94,769	3,775	0,332	0,138	0,261	0,653	0,014	0,026	0,005	0,004	0,002	0,0	0,0	0,009	0,005	0,006
3 Lijada	97,788	0,414	0,622	0,07	1,049	0,002	0,011	0,017	0,002	0,0	0,0	0,0	0,002	0,018	0,002	0,003

de acuerdo con las normas; se debe tener en cuenta que al ser planeares se tomarán en las secciones paralelas a la superficie del proceso de laminado donde están localizadas las fugas [8].

El análisis microscópico y fractográfico se realizó en un microscopio electrónico de barrido, se extrajo una pequeña probeta de 4 cm<sup>2</sup> y 2 x 4 cm puesto que es el tamaño máximo que acepta el microscopio para poder realizar la prueba. Lo que se observó en cada una de las probetas extraídas se aprecia en las Figuras 14 a 18.

Fractográficamente, en la probeta 3-21-1 se encontraron muchas irregularidades superficiales (Figura 17 A) y efectos de corrosión en la superficie del material, cercanas a la zona de fuga, se resaltan dos zonas propensas a fuga (Figuras 17 B y 17 C) [6].

## RESULTADOS

Se pudo identificar los tipos de fallas para determinar la causa raíz en los tres evaporadores de placas de aluminio. Según el análisis químico, las aleaciones de los evaporadores 1 y 2 no están estandarizadas, y para el evaporador 3 se detectó la serie 3000. Los diagnósticos fueron los siguientes:

La causa raíz de la falla en la fuga del evaporador 1 (Mazda Allegro) fue corrosión debajo de

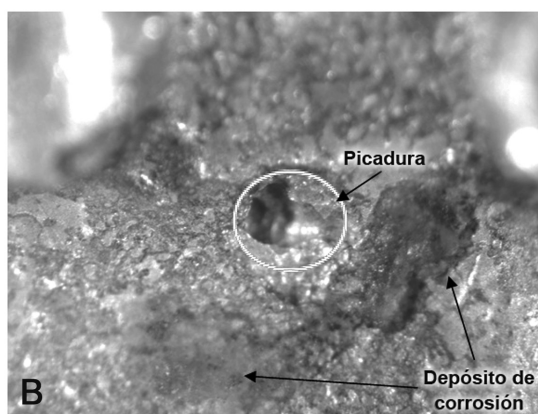
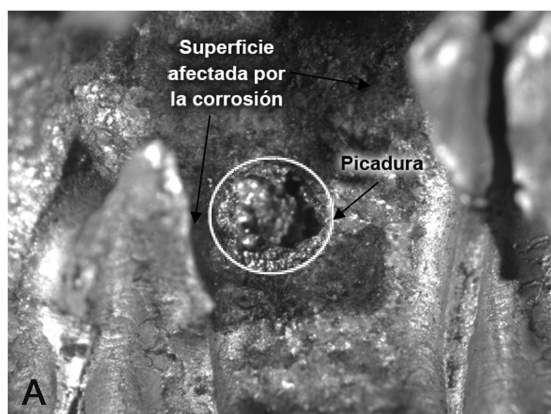
depósitos. Se determinó que a partir de la condensación producida por la operación del evaporador se acumula en el depósito, generando la humedad necesaria para que se presente este tipo de falla (Figuras 5A, 5B, 8, 11 y 14). El origen de estos depósitos se encuentra en el ambiente transitado por el automóvil (polvo, arena, barro, etc.). La acumulación de estos depósitos se asocia a la falta o insuficiencia de mantenimientos preventivos de limpieza.

La causa raíz de la falla en las dos fugas detectadas del evaporador 2 (Hyundai Atos) fue agrietamiento por corrosión y esfuerzo (SCC). Se determinó que a partir de los esfuerzos residuales, resultantes de los procesos de fabricación, en especial del laminado, y en conjunto con el ambiente corrosivo se originó una corrosión localizada evidenciada como picadura (Figuras 6, 9, 12, 15 y 16). El automóvil en funcionamiento es un generador de frecuentes vibraciones que sumadas a las perturbaciones del mismo sistema de aire acondicionado en operación, aumentan los esfuerzos residuales.

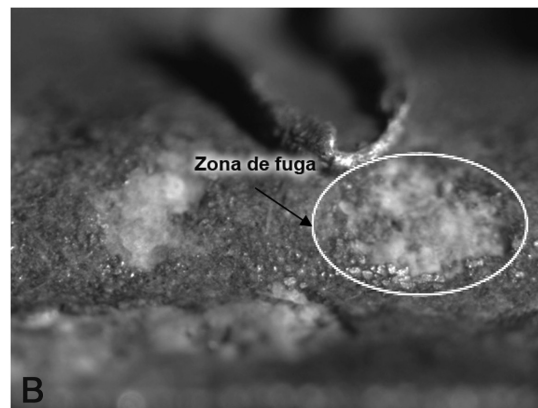
La causa raíz de la falla en las dos zonas de fugas presentes en el evaporador 3 (Mazda Allegro) fue la combinación de corrosión debajo de depósitos y de agrietamiento por corrosión y esfuerzo (SCC). Se determinó que la condensación producida por la operación del evaporador se mezcla y se acumula en el depósito, generando



**Figura 11. Placa 1-2, aumento a 2X** (Se evidencia la fuga en una zona de pérdida de material que se encontraba cubierta por depósito, este depósito cubría gran parte del borde de esta placa).



**Figura 12. A) Placa 2-1, aumento a 2,5X. B) Placa 2-2, aumento a 4X** (En ambas placas la fuga se muestra como una picadura rodeada por una zona oscura de rastro de depósito de corrosión, la coloración oscura en A y en B es muy característica de la corrosión en hendiduras). (Nota: en el evaporador 2 las fugas que se localizaron en el centro de las placas 2-1 y 2-2 no presentan sucios o depósitos como se deja ver la Figura 9, pero sí presentan una superficie corroída y depósitos corrosivos, respectivamente, que no se detectaron a simple vista).



**Figura 13. A) Placa 3-21-1, primera zona de fuga aumento a 2,5X. B) Placa 3-22-2, segunda zona de fuga aumento a 3,2X** (Se evidencia una corrosión generalizada en todo el borde de la placa el cual en su mayoría estaba cubierto por depósito de suciedad, las zonas de color claro es presencia de corrosión).

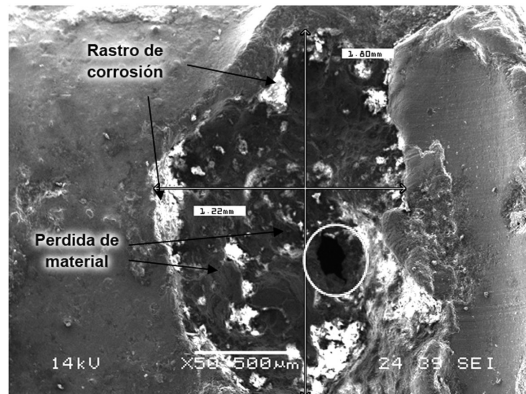


Figura 14. Probeta 1-2, aumento a 50X. Manchas blancas se evidencia que es un claro signo de corrosión y la fuga en el círculo



Figura 15. Probeta 2-1, aumento a 50X (Al estar la fuga paralela a la placa no se pudo observar en el SEM la fuga, debido a que el SEM solo permite observar perpendicular a la placa e inclinarla hasta cierto ángulo, ángulo que no fue lo suficientemente grande para este caso. Se nota una pérdida de material y manchas blancas que es presencia de corrosión en la zona de fuga).

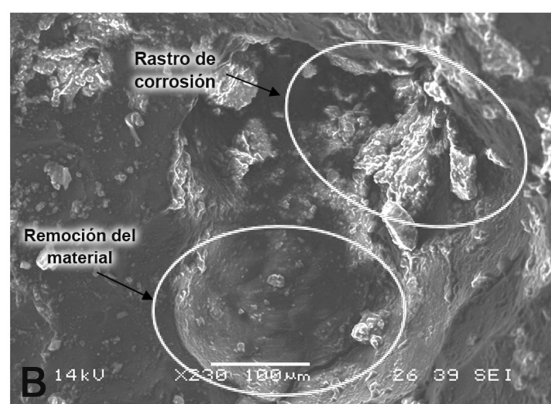
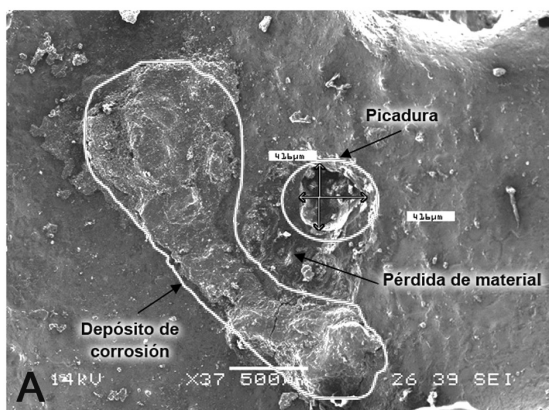
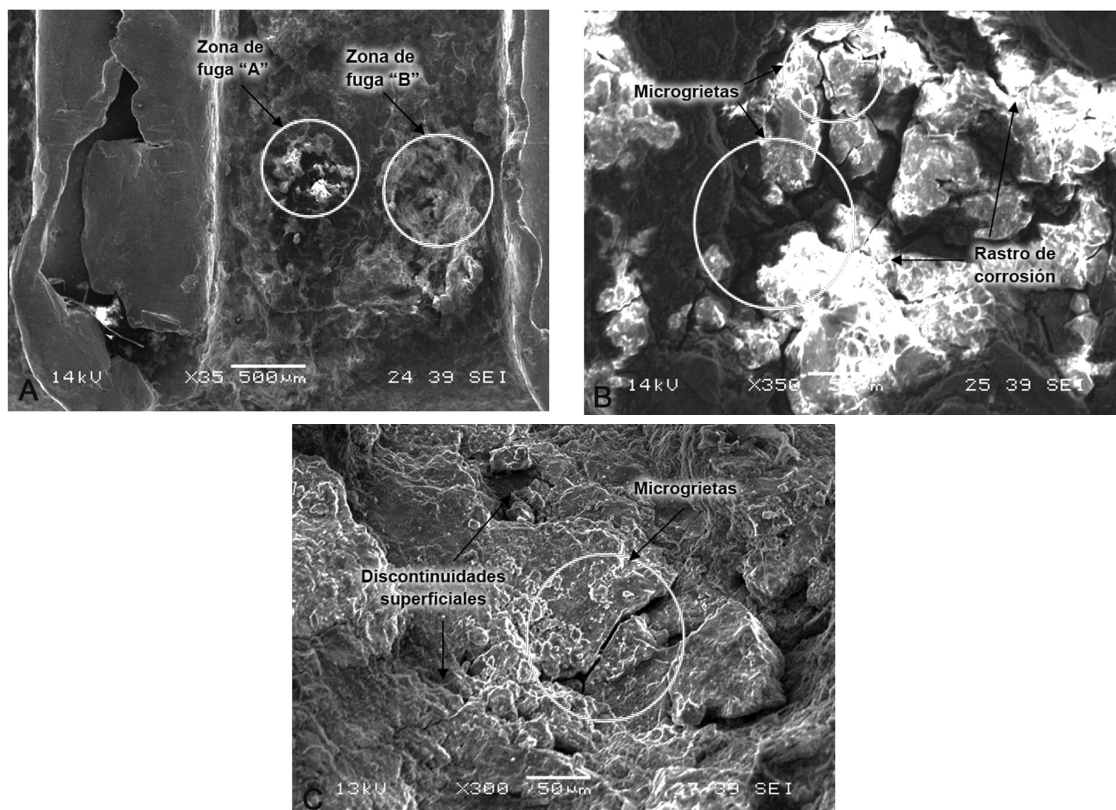
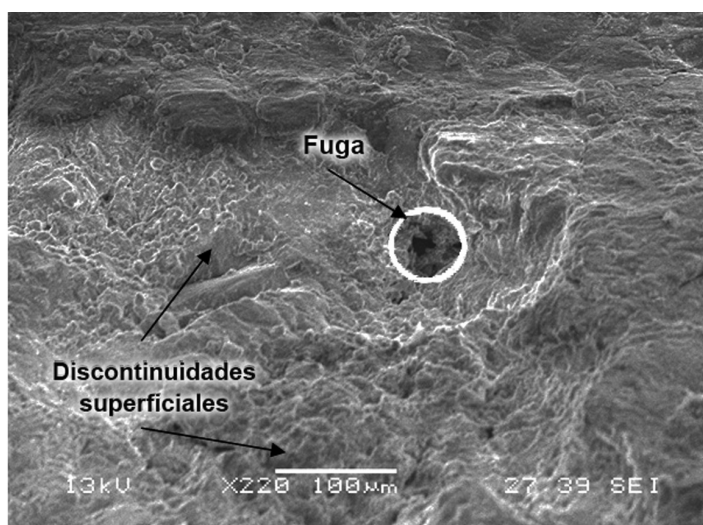


Figura 16. A) Probeta 2-2, aumento 37X (Se nota una pérdida de material en la que se encuentra la picadura). B) Probeta 2-2, vista a 230X de la picadura. (Se ven manchas blancas, signo claro de corrosión y un agrietamiento en la pared de la picadura. En estas dos imágenes tampoco se puede observar toda la magnitud de la perforación del material (fuga) debido a que presenta la misma situación de la probeta anterior 2-1).



**Figura 17. A) Probeta 3-21-1, aumento 35X** (Se nota una superficie muy irregular ocasionada por la corrosión, no se pudo encontrar la perforación que origina la fuga, pero se pudo aislar dos posibles zonas de fuga). **B) Probeta 3-21-1, zona de fuga A vista a 350X.** (Se evidencian microgrietas y coloración blanca indicio de corrosión). **C) Probeta 3-21-1, zona de fuga B vista a 350X.** (Se logra apreciar la discontinuidad de la superficie ocasionada por la corrosión y la formación de microgrietas).



**Figura 18. Probeta 3-21-2, aumento a 220X** (Una superficie muy irregular se logra apreciar en una depresión producto de la pérdida de material y la fuga dentro de ella).

la humedad necesaria para que se presente la corrosión debajo de depósito (Figuras 7, 10, 13, 17 y 18). El origen de los depósitos es el mismo que en el caso del evaporador 1. Por otra parte, el origen de los esfuerzos residuales es el mismo que en el caso del evaporador 2, y pueden aumentar al integrarse con las vibraciones del automóvil y con las perturbaciones del sistema de aire acondicionado. Dando como resultado una superficie quebradiza debajo del depósito, con microgrietas que a su vez originan una corrosión en hendiduras y actúan como concentradores de esfuerzos.

Se determinó que en estos evaporadores los mecanismos y modos de fallas fueron principalmente corrosión (general y localizada) con algunas situaciones tendientes a fractura frágil en metal dúctil. Y también se determinó que los tipos de fallas fueron: corrosión en hendiduras, corrosión debajo de depósitos y agrietamiento por corrosión y esfuerzo (SCC).

## CONCLUSIONES

Durante el proceso de investigación se evidenció la escasa literatura en relación con el análisis de falla en los evaporadores de placas de aluminio. Sin embargo, con la confección del estado del arte y la técnica, se pudo clasificar la información de los mecanismos, modos y tipos de fallas en intercambiadores de calor.

Con la ayuda del estado del arte y criterios profesionales, se estableció la metodología de investigación y el procedimiento experimental, aplicados al análisis de falla para determinar los mecanismos y modos de fallas en los tres evaporadores de placas de aluminio en los automóviles de marcas: a) Mazda Allegro (2 unidades), b) Hyundai Atos (1 unidad). Se concluye que los mecanismos de falla fueron principalmente corrosión (general y localizada) con algunas situaciones tendientes a fractura frágil en metal dúctil.

Se afirma que la corrosión por celdas de concentración es inherente a los mecanismos y mo-

dos de fallas presentes en los tres evaporadores de placas de aluminio. Además el ambiente tropical de la ciudad de Barranquilla y las condiciones climáticas en general (temperatura, presión, altitud, humedad relativa, etc.), son propicios para inducir los mecanismos de corrosión anteriores. Se concluye que los tipos de fallas fueron: corrosión en hendiduras, corrosión debajo de depósitos y agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo (SCC).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- La Fundación Universidad del Norte, por el desarrollo del análisis con Microscopía Electrónica de Barrido - SEM.
- Aluminio Reynolds Santo Domingo S. A., por el desarrollo del análisis químico con Espectrometría de Arco.
- Refrilitoral Casasbuenas Cortés & Cia. S.A.S., por la preparación de las pruebas de taller.
- Jairo A. Girón Rojas, Ingeniero Mecánico y gerente de Calaires Ltda., por el suministro de evaporadores para estudio.
- A José Víctor Álvarez V., Ingeniero Mecánico y gerente de Mundo Aires Ltda., por el suministro de evaporadores para estudio.

## REFERENCIAS

- [1] ACIEM. *Manejo de la Orden de Trabajo para Optimizar la Gestión de Mantenimiento – Proceso de la OT*. Bogotá D. C.: ACIEM. 2000.
- [2] Aire Sur. (2010, Junio). [En línea] Disponible: [http://www.airesurcr.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=49&Itemid=53](http://www.airesurcr.com/index.php?option=com_content&view=article&id=49&Itemid=53)
- [3] AIS, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-98), Título F - Estructuras Metálicas. Bogotá D. C.: AIS. 1999.
- [4] J. V. Álvarez V., Entrevista sobre las fallas en eva-

- poradores de placas de aluminio del sistema de A. A. automotriz. (J. Romero, Entrevistador). 2011, Abril.
- [5] R. Arrabal, F. Viejo, A. Pardo y M. Merino. "Avances tecnológicos en la lucha contra la corrosión de materiales compuestos de aluminio". En: *Revista de metalurgia*, 2007, pp. 28 – 35.
- [6] ASM HANDBOOK, Failure Analysis and Prevention. ASM International. 2002.
- [7] ASM, Standard Guide for Handling Specimens Prior to Surface Analysis. ASTM International, 2002, pp. 1 – 5.
- [8] ASM, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International, 2007, pp. 1 – 12.
- [9] ASM, Standard Guide for Specimen Preparation and Mounting in Surface Analysis. ASTM International, 2002, pp. 1 – 9.
- [10] AV Automotriz. (2010, Junio). AV Automotriz Mecánica General. [En línea]. Disponible: <http://www.boletin-grafico.com/SITIOS/av%20automotriz/tIPS/C%C3%B3mo%20funciona%20el%20aire%20acondicionado%20de%20tu%20auto.htm>
- [11] S. H. Avner. *Introducción a la metalurgia física*. Ciudad de México: McGraw-Hill/Interamericana de México. 1988.
- [12] T. Baile Puig. *Estudio de la conformación de componentes aluminio-silicio en estado semisólido*. Barcelona: UPC, 2005.
- [13] L. Bilurbina Alter y J. I. Iribarren Laco. *Diseño de Equipos e Instalaciones*. Barcelona: Ediciones UPC. 2002.
- [14] L. Bilurbina Alter, F. L. Mestres y J. I. Iribarren Laco. *Corrosión y protección*. Barcelona: Ediciones UPC. 2003.
- [15] F. Birol, y Y. Birol. *Corrosion Failure Analysis of Architectural Aluminum Alloys*. Materials Performance, 2010, pp. 50 - 54.
- [16] G. S. Brady, H. R. Clauser y J. A. Vaccari. *Materials Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [17] P. Carter, T. J. Carter y A. Viljoen. *Failure analysis and life prediction of a large, complex plate fin heat exchanger*. Engineering Failure Analysis, 1996, pp. 29 - 43.
- [18] K. Deen, M. Virk, C. Haque, R. Ahmad y I. Khan. *Failure investigation of heat exchanger plates due to pitting corrosion*. Engineering Failure Analysis, 2010, pp. 886 - 893.
- [19] Delang S. A. (2010, Junio). *Manufacturación de autopartes Delang S. A.* [En línea]. Disponible: <http://www.china-delang.es/pdf/Evaporador%20para%20autom%C3%B3viles.pdf>
- [20] R. Ebara. *Corrosion fatigue phenomena learned from failure analysis*. Engineering Failure Analysis, 2006, pp. 516-525.
- [21] F. A. Champion. *Ensayos de corrosión*. Bilbao: Chapman and Hall. 1964.
- [22] J. M. Gere. *Mecánica de materiales*. División Iberoamericana: International Thomson Editores. 2006.
- [23] J. A. Girón Rojas. Entrevista sobre las fallas en evaporadores de placas de aluminio del sistema de A. A. automotriz. (S. A. Mendoza Hurtado, Entrevistador). 2011, Febrero.
- [24] L. A. Godoy. (2010, Abril). Civil infraestructura, research center (UPRM). [En línea]. Disponible: <http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/1%20Introduccion/Fallas%20estructurales.pdf>
- [25] F. C. Gómez de León Hijes y D. J. Alcatraz Lorente. *Manual básico de corrosión para ingenieros*. Murcia: Universidad de Murcia. 2004.
- [26] J. González, E. Escudero, V. S. López y M. Morcillo. *Durabilidad del aluminio desnudo y anodizado en atmósferas de muy diferentes corrosividades*. Revista de metalurgia, 2010, pp. 259-269.
- [27] A. Gray, R. K. Bolingbroke y J. M. Evans. Patente No. 2169820. España. 2002.
- [28] H. Hernández Albañil y E. Espejo Mora. *Mecánica de fracturas y análisis de falla*. Bogotá D. C. UN. 2002.
- [29] H. M. Herro y R. D. Port. *Guía NALCO para el análisis de fallas en los sistemas de enfriamiento por*

- agua*. Ciudad de México: McGraw-Hill/Interamericana de México. 1995.
- [30] W. Hufnagel. *Manual del aluminio*. Barcelona: Reverté, S. A. 1992.
- [31] P. McIntyre y D. Mills. *Conference reports: Eurocorr 2001*. British Corrosion Journal, 2001, pp. 242 - 251.
- [32] M. Melander y R. Woods. *Corrosion Study of Brazed Aluminum Radiators Retrieved from Cars After Field Service*. Corrosion, pp. 1 - 14.
- [33] W. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. Wittebroot, P. De Smet, A. Haszler y otros. *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry*. Materials Science and Engineering, 2000, pp. 37 - 49.
- [34] N. Pazos Peinado. *Tecnología de los metales y procesos de manufactura*. UCAB. 2006.
- [35] Sena Virtual Distrito Capital. *Metalurgia Básica, Propiedades de los metales*. Bogotá D. C.: SENA. 2005.
- [36] W. F. Smith. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Barcelona: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U. 1998.
- [37] Todo mecánica (2007, Agosto). [En línea]. Disponible: <http://www.todomecanica.com/curso-aire-acondicionado.html>
- [38] G. Tovar S. *Análisis de falla de componentes de ingeniería*. Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico (CITEC), 1999, pp. 75 - 83.
- [39] Valeo (2010, Junio). Valeo service. [En línea]. Disponible: <http://www.scribd.com/doc/1008572/EL-EVAPORADOR>
- [40] J. Wulpi. *Understanding how components fail*. Ohio: ASM International. 1988.

