

## ANALISIS DE FALLA DE MOFLE DE ACERO INOXIDABLE FERRITICO 409

M.A. Neri <sup>(1)</sup>, C. Carreño <sup>(1)</sup> y A. Martínez-Villafañe <sup>(1)</sup>

(1) Departamento de Física de Materiales, Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C., Chihuahua, México.

E-mail: miguel.neri@cimav.edu.mx

### RESUMEN

*En este trabajo se determinaron las causas del agrietamiento localizado sobre la superficie de la carcasa, de un mofle fabricado con acero inoxidable ferrítico del tipo 409, al momento de ser deformada en el proceso de estampado. La grieta se localizó en la zona de mayor deformación de la lámina, como se aprecia en la Fotografía N° 1. El material fallado se caracterizó mediante el análisis químico de la lámina, el análisis estereoscópico y metalográfico del acero en la zona cercana a la grieta, y el análisis de microscopía electrónica de barrido en la zona agrietada. Se determinó que la composición química del acero estaba dentro del rango de las especificaciones de un acero inoxidable del tipo 409, se observó una deformación plástica en el material antes de su fractura, por lo que el tipo de fractura fue dúctil. Por medio de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido se detectó un defecto interno en el material analizado, conocido como "laminación interna", el cuál actuó como concentrador de esfuerzos al momento de deformar la lámina mediante el proceso de estampado, ocasionando la fractura del material. Mediante la técnica de EDX se analizó la superficie interna de la grieta para detectar los elementos presentes en la misma, los cuales corresponden a inclusiones no metálica principalmente óxidos de magnesio, aluminio, calcio, titanio, cromo y hierro, o a escoria atrapada en el interior de la lamina durante el proceso de aceración.*

### Tópico 2: Materiales Metálicos

**Palabras clave:** Fractura, Acero inoxidable 409, Laminación interna, Inclusiones.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidables ferríticos fueron introducidos por Allegheny Ludlum en 1961 para dar una resistencia a la oxidación y a la corrosión mejorada, en sistemas de escape automotrices en comparación con el acero al carbono. La aleación fue designada MF-1, indicando su uso en mofles automotrices. Debido a la facilidad de fabricación de la aleación, combinada con su resistencia a la corrosión y economía, sus aplicaciones se han expandido ampliamente. Desde su introducción el acero 409 ha sido utilizado ampliamente en sistemas de escape automotrices para manifolds, tubos de escape, convertidores catalíticos, mofles, colas de tubos de escape, y otros componentes. El desempeño del acero inoxidable ferrítico 409 en la mayoría de sus aplicaciones ha sido excelente. Sin embargo algunas aplicaciones industriales han provocado corrosión intergranular de las zonas afectadas por el calor. Este acero contiene cantidades cuidadosamente balanceadas de Titanio y Columbio, las cuales le dan resistencia a la sensitización y a la corrosión intergranular, la cual puede ocurrir en las zonas afectadas por el calor en soldaduras o en el metal base seguida de otras exposiciones a altas temperaturas. Esta aleación es dúctil en la condición de recocido, y puede deformarse fácilmente utilizando las prácticas más comunes para ello. Algunos fabricantes afirman que su formabilidad es similar a la de los aceros de bajo carbono [1-3]. En el presente trabajo se realizó el análisis de falla de un mofle fabricado con lamina de acero inoxidable ferrítico 409, el cual presentó grietas durante su proceso de fabricación, para determinar la causa por la cual se presentó el agrietamiento.

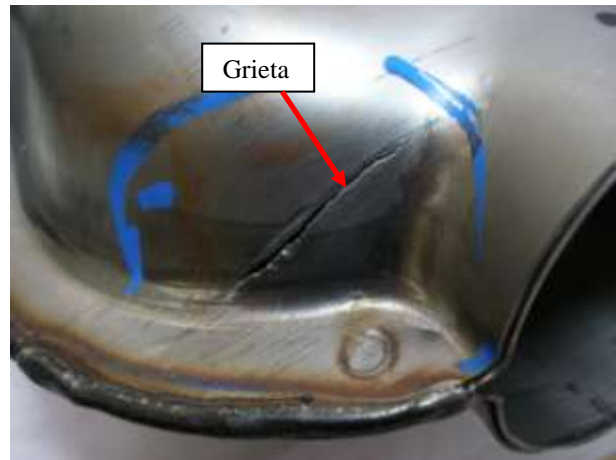
## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### Identificación de la zona de las grietas

Se tomaron fotografías para ubicar el lugar donde se localizo la grieta en la lámina de acero inoxidable de la carcaza del mofle. En la Fotografía N° 1 se muestra el mofle visto de frente, indicando la ubicación de las grietas sobre la lámina. En la Fotografía N° 2 se observa una grieta en la zona enmarcada de color azul la cual se propaga en dirección paralela a la dirección de las rayas de laminación.



Fotografía N° 1.- Ubicación de la grieta, vista de frente.



Fotografía N° 2.- Acercamiento de la grieta.

### Estereoscopia

Por medio de un estereoscopio marca Olympus se tomaron fotografías de la zona de la grieta, para observar los detalles de la misma. En la Fotografía N° 3 se muestra la grieta con algunos pliegues en el acero, lo cual indica que el material se deforma plásticamente antes de la fractura.



Fotografía N° 3.- Grieta con pliegues y laminación.



Fotografía N° 4.- Punta de la grieta con laminación.

### Caracterización metalúrgica

La caracterización metalúrgica del material comprende los siguientes análisis:

Análisis químico del material, análisis metalográfico, análisis por microscopía electrónica de barrido y EDX, resistencia a la tensión, y dureza.

### **Análisis químico del material**

Por medio de un espectrómetro de emisión de plasma (ICP) marca Thermo Jarrel Ash, modelo Iris Dúo, se determinó la composición química del acero inoxidable del mofle, y se comparó con la composición química nominal de un acero inoxidable 409.

### **Análisis metalográfico**

Se tomaron fotografías de la zona de la grieta en el área de la sección transversal de la lámina, para detectar posibles defectos internos en el material. La muestra se cortó transversalmente y se montó en baquelita por medio de una prensa montadora marca LECO, y se preparó la muestra para su observación metalográfica, utilizando lijas de los grados 220, 320, 400, 600 y 1200, y se le dio un pulido final a espejo utilizando un paño de pulido final de terciopelo. Para la toma de las fotografías se utilizó un microscopio óptico de platina invertida marca Olympus.

### **Microscopía electrónica de barrido y EDX**

Por medio de microscopía electrónica de barrido se analizaron las grietas grande y chica, con el objeto de apreciar con mayor detalle las características de la superficie de fractura. Para ello se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo 5800LV equipado con un detector de Energía dispersiva de rayos X, marca EDAX. Mediante esta técnica se analizaron las muestras a mayores aumentos para observar con mayor detalle las características de las inclusiones no metálicas, las características de las grietas presentes en el material, y las características de la superficie de fractura.

### **Resistencia a la tensión y dureza**

Se tomó una tira de acero del cuerpo del mofle, en una dirección paralela a la dirección de laminación, para obtener una probeta de tensión de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM E-8. Se determinó el límite elástico, la resistencia máxima a la tensión, el porcentaje de deformación a la ruptura, y la dureza en escala Rockwell "B".

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Estereoscopia**

En las fotografías tomadas con el estereoscopio se pueden apreciar zonas oscuras en el fondo de las grietas, sobre todo en la grieta chica. Estas zonas oscuras corresponden a laminaciones internas que se encontraban dentro de la lámina de acero inoxidable, y que al ser deformada plásticamente la lámina, se formaron grietas que se propagaron en la dirección longitudinal, pero que al propagarse en una dirección transversal alcanzaron el plano de la "laminación" y ahí se detuvieron.

### **Análisis químico**

De acuerdo a las especificaciones proporcionadas el material utilizado es un acero inoxidable ferrítico del tipo 409, cuya composición química nominal y los resultados obtenidos en la muestra de rebaba extraída de la pieza, se muestran en la Tabla N° 1.

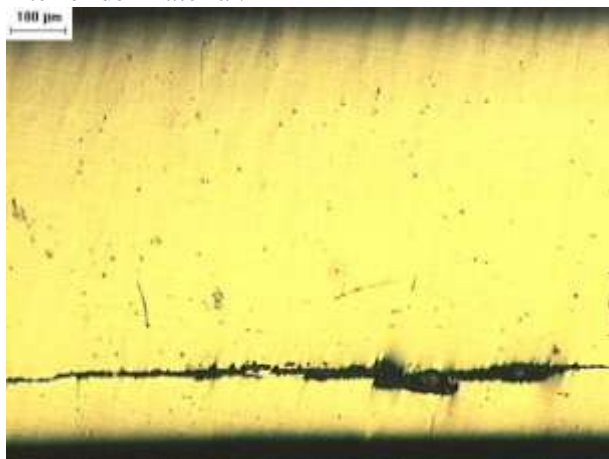
De los elementos analizados el carbono y el cromo están ligeramente por arriba del valor máximo permitido, todos los demás elementos están dentro del rango especificado.

**Tabla N° 1.- Composición química nominal, y de la muestra analizada.**

Elementos	Composición nominal acero inoxidable 409	Composición de la muestra analizada
%C	0.020 máx.	<b>0.055</b>
%Mn	0.70 máx.	0.225
%P	0.040 máx.	0.017
%S	0.020 máx.	0.009
%Si	0.70 máx.	0.257
%Cr	10.50-11.75	<b>13.043</b>
%Ni	0.50 máx.	0.105
%Mo	0.50 máx.	N.D.
%N	0.030 máx.	N.D.
%Al	0.070 máx.	0.004
%Ti	0.15 - 0.40 máx.	0.20

### **Análisis metalográfico**

En el corte transversal de la lámina en zonas adyacentes a las grietas, se puede apreciar perfectamente la existencia de una “laminación” de tamaño grande en el interior de la lámina de acero inoxidable. (Ver fotografías N° 5 y 6). Este defecto interno es perjudicial para la formabilidad de la lámina y para sus propiedades mecánicas, ya que a través de estos defectos las grietas se propagan con mayor facilidad en comparación con el resto del material. Al existir este defecto las grietas presentadas se propagaron a lo largo de la “laminación” presente en el interior del material.



Fotografía N° 5.- Laminación en el interior del acero.



Fotografía N° 6.- Laminación con inclusiones.

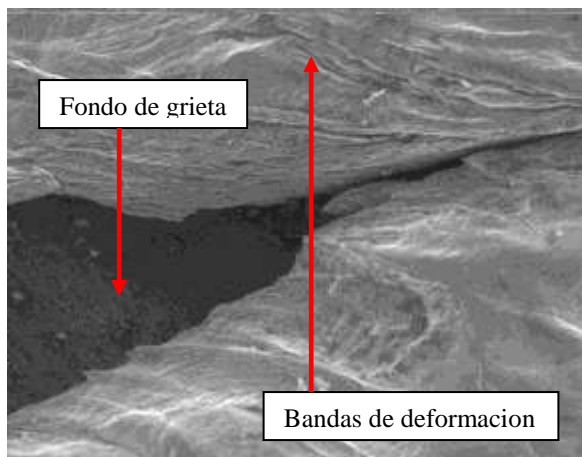
### **Microscopia electrónica de barrido y EDX**

Por medio de microscopia electrónica de barrido pudimos observar la profundidad de las grietas, las cuales al llegar al plano de la “laminación” detuvieron su propagación. Esto nos indica que la laminación ya se encontraba en el interior de la lámina, y que al propagarse la grieta avanzó hasta alcanzar el plano de la laminación. Este tipo de defectos internos en las láminas son perjudiciales ya que disminuyen la resistencia mecánica, y la formabilidad de la lámina. En la Fotografía N° 7 se muestra la punta superior de la grieta, se aprecia una zona oscura en la parte interior de la grieta, la cual corresponde a una laminación interna. En la Fotografía N° 8 se muestra el fondo de la grieta donde se localizan las inclusiones analizadas por EDX. También se aprecian bandas de deformación en el material agrietado.

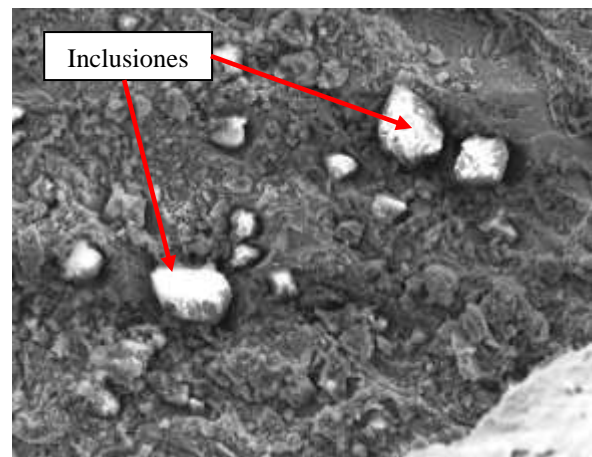
Por medio de EDX se pudieron determinar los elementos presentes en las zonas oscuras localizadas en el fondo de las grietas chicas, es decir en el plano de la “laminación”. (Ver tabla N° 2). Las inclusiones estaban formadas de aluminio, magnesio, oxígeno y titanio principalmente, lo cual indica que eran inclusiones de óxido de aluminio (alúmina), óxido de magnesio y óxido de titanio.

**Tabla 2.- Elementos detectados en el interior de la grieta.**

Elemento	Zona analizada (Fondo de la grieta)	Zona analizada (Inclusiones redondas)
%C	12.20	12.16
%O	<b>20.17</b>	<b>39.24</b>
%Na	0.22	0.26
%Mg	<b>4.50</b>	<b>9.95</b>
%Al	<b>7.91</b>	<b>19.64</b>
%Si	0.39	--
%P	0.23	--
%S	0.0	--
%Ca	1.59	0.24
%Ti	<b>13.04</b>	<b>15.94</b>
%Cr	<b>5.53</b>	0.48
%Fe	<b>34.20</b>	2.08



Fotografía N° 7.- Punta superior de la grieta.



Fotografía N° 8.- Inclusiones en fondo de la grieta.

### Resistencia a la tensión y dureza

En cuanto a las propiedades mecánicas de límite elástico, resistencia a la tensión, % de deformación a la fractura, y dureza Rockwell “B”, los valores obtenidos de la muestra de lámina están ligeramente por arriba del valor especificado para un acero 409, como lo muestran los resultados contenidos en la Tabla N° 3.

**Tabla N° 3.- Valores de resistencia a la tensión nominal y los obtenidos de la muestra ensayada.**

Muestra	Límite elástico (PSI)	Resistencia máxima (PSI)	% de deformación a la fractura.	Dureza RB
Valor nominal Grado 2 [1]	42,000	55,000	32	74
Muestra 1	65,111	67,246	21.58	82.15 Prom.

#### **4. CONCLUSIONES**

- La causa de la falla fue la existencia de laminaciones internas en la lámina de acero inoxidable, como lo demuestran los análisis realizados en la metalografía (Ver Fotografías N° 5 y 6).
- Estas laminaciones son causadas por inclusiones no metálicas, escoria u otro material no metálico que quedo atrapado en el interior de la lámina, durante el proceso de fabricación de la misma (aceración).

#### **REFERENCIAS**

1. AK Steel, 409 Stainless Steel, Product Data Bulletin, p. 3
2. C.P. Dillon, Corrosion Resistance of Stainless Steel, Marcel Dekker Inc., (1995).
3. ASM Handbook Vol. 1 Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, (1990).