

**CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO  
INOXIDABLE AISI 430 MODIFICADO**

**JOHANA PAOLA LOZANO ANAYA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2018**

**CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO  
INOXIDABLE AISI 430 MODIFICADO**

**JOHANA PAOLA LOZANO ANAYA**

**Proyecto de grado para optar el título de Ingeniera Metalúrgica**

**Directora**

**Ana Emilse Coy Echeverría**

**Dra. en Ciencia y Tecnología de materiales**

**Codirectora**

**AUGUSTA CERCEAU ISSAC NETA**

**Dra. en Ingeniería de Materiales y Metalurgia**

**Universidad Federal de Minas Gerais**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente a Dios, a toda mi familia y amigos. En especial a mi madre Ana Rubiela y a mis hermanas Catalina y Gabriela, por su amor, apoyo y motivación constante.

A mi directora, la Dra. Ana Emilse Coy por su orientación, dedicación y sobre todo confianza en el desarrollo de este proyecto.

A la profesora Augusta Cerceau Issac por su confianza y así mismo a los colegas Metalúrgicos en la Universidad Federal de Minas Gerais por su orientación y apoyo.

A los laboratorios de Microscopia y Difracción de rayos X de la Universidad Industrial de Santander por el apoyo y aporte en la ejecución del proyecto.

A todo el personal del laboratorio de electroquímica y en especial al profesor Ángel Manuel Meléndez por su colaboración y apoyo en el desarrollo de los ensayos electroquímicos.

A los técnicos de los laboratorios de metalografía y tratamientos térmicos, Juan Domingo Carreo y Sergio Andrés González Calderón, por su importante colaboración y amable disposición.

Así también, a todas las personas que de una u otra manera fueron un gran apoyo

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. ESTADO DEL ARTE	15
1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	15
1.2 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS	16
1.3 INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ESTABILIZADORES	19
1.4 EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIZACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS	22
2. OBJETIVOS	24
2.1 OBJETIVO GENERAL	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3. METODOLOGÍA	25
3.1 CARACTERIZACIÓN COMPOSICIONAL DE ACEROS INOXIDABLES AISI 430 MODIFICADOS	25
3.2 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LOS ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS	25
3.3 ENSAYOS DE REACTIVACIÓN ELECTROQUÍMICA DE BARRIDO DOBLE (DL-EPR)	26
4. RESULTADOS	28
4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL	28
4.2 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LOS ACEROS	29
4.2.1 Acero inoxidable AISI 430 referencia	29
4.2.2 Acero inoxidable AISI 430 A.	30
4.2.3 Acero inoxidable AISI 430 F	31
4.2.4 Acero inoxidable AISI 430 H	33

4.3 ENSAYOS DE REACTIVACIÓN ELECTROQUÍMICA (DL-EPR)	37
5. CONCLUSIONES	40
6. RECOMENDACIONES	41
BIBLIOGRAFÍA	42
ANEXOS	45

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del acero inoxidable AISI 430, norma ASTM A27619	
Tabla 2. Composición química elemental en porcentaje en peso de los aceros inoxidables AISI 430 referencia, A, F y H, respectivamente. ....	28
Tabla 3. Valores DRX de los aceros estudiados, en distancia interplanar y ángulo de difracción, de las reflexiones correspondientes a la ferrita, y los valores estándar de las tablas para la solución sólida Fe-Cr y hierro alfa.....	36

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama binario Fe-Cr, zona de estabilidad de ferrita (DEMO,1977).....	18
Figura 2. Estabilidad de la austenita, Influencia de a) carbono, b) nitrógeno.....	20
Figura 3. Temperaturas de solubilización de diferentes precipitados para el acero inoxidable 430 con 18% Cr .....	21
Figura 4. Curva DL-EPR para um material sensibilizado .....	23
Figura 5. Micrografías del acero inoxidable de referencia AISI 430 obtenidas por MEB a diferentes aumentos a) BSE 2000X y b) SE 20000X. ....	29
Figura 6. Análisis EDS de precipitados. ....	30
Figura 7. Micrografías del acero inoxidable AISI 430A obtenidas por MEB-BSE a diferentes aumentos a) 2000X y b) 20000X.....	30
Figura 8. Análisis EDS de los precipitados presentes en el acero AISI 430A. ....	31
Figura 9. Micrografías del acero inoxidable AISI 430F obtenidas por MEB-BSED a diferentes aumentos a) BSE 2000X y b) SE 20000X. ....	32
Figura 10. Análisis EDS de los precipitados presentes en el acero AISI 430F. ....	32
Figura 11. Micrografías del acero inoxidable AISI 430H obtenidas por MEB-BSED a diferentes aumentos a) BSE 2000X y b) SE 20000X. ....	33
Figura 12. Análisis EDS de los precipitados presentes en el acero AISI 430H.....	34
Figura 13. Difractogramas de los aceros inoxidables AISI 430 A, F y H. ....	35
Figura 14. Curvas de polarización potenciodinámica obtenidas mediante el ensayo DL-EPR de los aceros inoxidables ferríticos en estado de recepción. ....	37

Figura 15. Difractograma acero Inoxidable AISI 430 A .....	45
Figura 16. Difractoama acero Inoxidable AISI 430 F .....	46
Figura 17. Difractograma acero Inoxidable AISI 430 H .....	47
Figura 18. Curvas DL-EPR de los aceros inoxidable ferríticos con tratamiento térmico a 1200°C por 15 minutos.....	48
Figura 19. Valores $I_r/I_a$ para los aceros en estado de recepción y tratados térmicamente a 1200°C por 15 min. ....	49

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Difractogramas.....	45
ANEXO B. Figuras complementarias de aceros tratados térmicamente, en ensayos de reactivación potenciodinamica de ciclo doble .....	48

## RESUMEN

**TITULO:** CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO INOXIDABLE AISI 430 MODIFICADO\*

**AUTOR:** JOHANA PAOLA LOZANO ANAYA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS, COMPOSICIÓN QUÍMICA, MICROESTRUCTURA, SENSIBILIZACIÓN.

**DESCRIPCIÓN:** Como parte del estudio de materiales metálicos y del interés en la optimización de los mismos, 3 tipos de aceros inoxidable ferríticos AISI 430, suministrados por la industria Aperam Inox America do Soul S.A de Brasil fueron estudiados microestructuralmente a partir sus características composicionales. Para lo cual fueron empleados: ensayos de espectrometría de emisión óptica por chispa, microscopia electrónica de barrido (SEM) con electrones retrodispersados y secundarios (BSE y SE), análisis de energías dispersivas de rayos X (EDX) y Difracción de rayos X (DRX). Adicionalmente, en búsqueda de establecer un punto de partida en el estudio de optimización en la corrosión de estos aceros, relacionando las características microestructurales de cada material con su sensibilización (empobrecimiento en cromo) fueron realizados ensayos de reactivación potenciodinámica de ciclo doble (DL-EPR) con los cuales se obtuvieron valores del grado de sensibilización (DOS) para las condiciones de entrega y tratamiento térmico a 1200° C por 15 minutos. A partir de esto y teniendo en cuenta que los materiales identificados como A, F y H presentaron composiciones diferentes con las que se destacaron los contenidos de carbono, niobio y titanio; se relacionaron el contenido y la morfología de los precipitados, con el comportamiento de sensibilización de cada uno. Donde el material 430F para los casos estudiados presento los menores grados de sensibilización como consecuencia de su composición en la que se destaca el contenido de niobio.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales. Directora: Ana Emilse Coy Echeverría, Doctora

## ABSTRACT

**TITLE:** MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF STEEL STAINLESS AISI 430 MODIFIED\*

**AUTRHOR:** JOHANA PAOLA LOZANO ANAYA\*\*

**KEYWORDS:** FERRITICS STAINLESS STEEL, CHEMICAL COMPOSITION, MICROSTRUCTURE, SENSITIZATION.

**DESCRIPTION:** As part of the study of the physical materials and the interest in the optimization of them, 3 types of ferritic stainless steels AISI 430, supplied by the industry Aperam Inox America do Soul SA of Brazil were studied microestucturally from their compositional characteristics. What they were used for: optical spark emission spectrometry tests, scanning electron microscopy (SEM) with backscattered and secondary electrons (BSE and SE), dispersive energy X-ray analysis (EDX) and X-ray diffraction ( DRX)) Additionally, in the search for a starting point in the study of optimization in the corrosion of these steels, relating the microstructural characteristics of each material with its sensitization (depletion in chromium), tests were carried out to reactivate the clinical potency of double cycle (DL-EPR) with sensitization grades (DOS) for delivery conditions and heat treatment at 1200 ° C for 15 minutes. From this and taking into account that the materials identified as A, F and H have different compositions with those that stand out in the contents of carbon, niobium and titanium; it is related to the content and morphology of the precipitates, with the sensitization behavior of each one. Where the material 430F for the cases studied has the lowest degrees of awareness as a consequence of its composition in which the content of niobium is highlighted.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and materials science. Director: Ana Emilse Coy Echeverria, Doctor

## INTRODUCCIÓN

El estudio, control y optimización de los aceros inoxidable se ha convertido en una necesidad industrial; representada principalmente en la preocupación referente al alto impacto de la corrosión en el mundo (Costo global de US \$2,5 trillones)<sup>1</sup>. En la actualidad, el estudio y la aplicación de los aceros inoxidable ferríticos se ha intensificado ya que estos presentan buena ductilidad, con buenas características de formabilidad, buena resistencia a la corrosión bajo tensión en ambientes clorurados y básicos. Y el hecho de que estos aceros no contengan níquel, o que su contenido es en muy bajo porcentaje, los hace más económicos en comparación con los aceros inoxidable austeníticos, representando de esta forma una alternativa atractiva de uso<sup>2</sup>. Sin embargo, estos aceros son más susceptibles de sufrir corrosión intergranular que los aceros austeníticos, dado que la solubilidad de carbono es menor en la matriz ferrítica. Es conocido que uno de los métodos para disminuir esa susceptibilidad, es disminuir el porcentaje de carbono y adicionar elementos estabilizadores de ferrita.

En este sentido, empresas productoras de estos aceros como la Industria Brasileira Aperam Inox America do Sul S.A se ha interesado en producir estos nuevos aceros inoxidable ferríticos con mejores prestaciones frente al fenómeno de corrosión intergranular con el objeto de ampliar el campo de aplicación de los mismos. Este trabajo de grado hace parte de un macroproyecto realizado por la Universidad Federal de Minas Gerais, en el que se estudia la influencia de elementos alentos estabilizadores de carburos en las características microestructurales del acero inoxidable ferrítico AISI 430.

---

<sup>1</sup> KOCH, *et al.* International measures of prevention, Application, and economics of corrosion technologies study. Texas: NACE IINTERNATIONAL,2016. p.3.

<sup>2</sup> CUNAT, Pierre. Manual de aceros inoxidable de Euro Inox. Euro Inox, serie de materiales y sus aplicaciones volumen 1.p.2.

## 1. ESTADO DEL ARTE

### 1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El mundo está basado en cambios dinámicos, así mismo el hombre, la ingeniería y los materiales. Las aleaciones de hierro surgen en el siglo XIX<sup>3</sup>, donde la ingeniería de materiales y el aporte de múltiples científicos dieron lugar a un proceso evolutivo de los metales a base de hierro, por medio de estudios realizados en estos y de la observación de propiedades superiores en aleaciones obtenidas mediante la adición de elementos en la aleación en relación con el hierro puro. Los aceros surgen como una integración Hierro-Carbono, con contenidos significativos de elementos de aleación; donde la calidad del acero, así como las propiedades físicas, químicas y las características microestructurales de los mismos, son dependientes: de las combinaciones de elementos en proporciones químicas adecuadas, de los procesos de fabricación y de los tratamientos realizados en los mismos.

La fácil corrosión de los aceros por acciones atmosféricas fue un determinante para la modificación de los mismos. La necesidad de materiales con resistencia a ambientes más agresivos fomentó el desenvolvimiento de los aceros inoxidable, que surgen íntimamente con la historia del cromo, los estudios realizados por el químico francés VAUQUELIN<sup>4</sup> y las observaciones inoxidable del hierro aleado con cromo por BERTHIER<sup>5</sup>, que demostraron la influencia del contenido de cromo en la resistencia de los aceros a los ácidos. Solo a principios del siglo XX, GUILLET y PORTEVIN<sup>6</sup> dieron a conocer las condiciones del comportamiento relativo de los aceros bajo la adición de elementos tales como el cromo y níquel, que le confieren al material resistencia a la corrosión. En 1911 se dio a conocer por el alemán

---

<sup>3</sup> SCOTT, David; EGGERT, Gerhard. Iron and Steel in art, 2009

<sup>4</sup> CUNAT, Pierre. Manual de aceros inoxidable de Euro Inox. Euro Inox, serie de materiales y sus aplicaciones volumen 1.p.3

<sup>5</sup> *Ibíd.*, p.3

<sup>6</sup> *Ibíd.*, p.3

MONNARTZ la propiedad de pasivación en los aceros inoxidable cuando estos presentan contenidos superiores al 12% de cromo. La pasivación es la propiedad debida a la formación de una fina capa protectora de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), invisible y estable formada por la reacción con el oxígeno, responsable de la resistencia a la corrosión en los aceros inoxidable y que proporciona para los mismos alta calidad<sup>7</sup>.

Teniendo en cuenta que los materiales y la ingeniería se encuentran sometidos a cambios acelerados, así mismo el avance en la investigación y la adaptabilidad en los inoxidable dio lugar al uso de estos en diferentes aplicaciones. Desde 1912 hasta la actualidad, el acero inoxidable ha sido sometido a cambios y a desarrollos continuos en búsqueda de enriquecimiento en sus propiedades y garantías. Hoy en día las normas internacionales de la American Iron and Steel Institute (AISI) presentan una clasificación general de la amplia gama de los aceros inoxidable existentes. Estos son clasificados en cinco familias; cuatro de estas se basan en la estructura cristalina de la aleación; ferríticos, martensíticos, austeníticos y dúplex; la quinta familia, las aleaciones endurecidas por precipitación, están basadas en el tipo de tratamiento usado en la estructura cristalina.

## **1.2 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS**

Los aceros inoxidable ferríticos, son soluciones sólidas de hierro-cromo con estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC); se caracterizan por tener una estructura ferrítica en todo su intervalo de temperaturas, no presentan transformación a austenita en el calentamiento, ni en martensita durante el enfriamiento. Estos materiales surgen en respuesta a la preocupación referente al

---

<sup>7</sup> SERNA GIRALDO, Carlos Augusto. Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidable ferrítico UNS S430000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensibilização. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. P.26.

elevado costo del níquel (entre el 25 y 30% del producto final en los austeníticos, que representaban el 80% de la producción mundial en 1997)<sup>8</sup>, con los cuales, bajo la adición de otros elementos de aleación como titanio, molibdeno, aluminio, niobio, entre otros, lograron reducir eficientemente el contenido de níquel y en efecto bajo las proporciones adecuadas conseguir destacables propiedades, próximas a los aceros inoxidable austeníticos.

El cromo es el elemento más significativo en la familia ferrítica, es un elemento alfégeno, por tal razón, los altos contenidos del mismo, mayores al 13% ayudan a que la ferrita se encuentre como una estructura estable en todo el intervalo de temperaturas. En consecuencia de la limitada zona austenítica, estos aceros no sufren endurecimiento con la temperatura pero si lo pueden ser por trabajo en frío<sup>9</sup>.

Los aceros inoxidable ferríticos industrialmente se presentan con contenidos de cromo entre 10,5% y 30% y se han clasificado a partir de esto en 3 grupos. En el grupo 1, se presentan las aleaciones con contenido de cromo entre el 10,5 y 13%, además de bajo contenido de carbono, inferior a 0,03%, y elementos como aluminio y titanio adicionados en la fusión que favorecen la estructura ferrítica. Los del grupo 2 presentan contenidos de cromo del 16 al 18 %, estos comprenden el acero estudiado, AISI 430. Los del grupo 3, denotados como aceros inoxidable super ferríticos, presentan contenidos de cromo superiores al 20%.

A partir del diagrama binario Fe-Cr presentado en la Figura 1, se puede observar que: 1) Para contenidos entre 12 y 13% de cromo, el material en temperaturas entre 900 y 1200 °C se encuentra en una zona bifásica ( $\alpha + \gamma$ ), que bajo condiciones de rápido enfriamiento presentará para el material pérdida de ductilidad y tenacidad como resultado de la transformación de austenita a martensita. 2) Las aleaciones

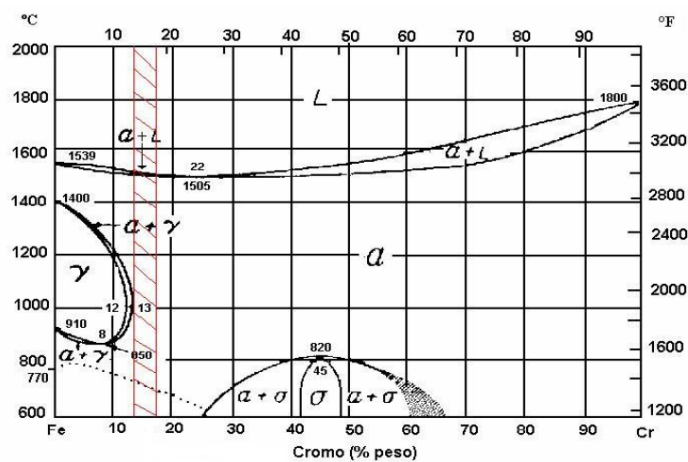
---

<sup>8</sup> CUNAT, Pierre. Manual de aceros inoxidable de Euro Inox. Euro Inox, serie de materiales y sus aplicaciones volumen 1.p.4

<sup>9</sup> SERNA GIRALDO, Carlos Augusto. Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidable ferrítico UNS S430000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensibilização. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. P.28.

con contenidos de cromo superiores a 13% en temperaturas entre 850-1400°C solidifican en forma de ferrita y permanecen de esta forma hasta temperatura ambiente para enfriamientos rápidos y bajos contenidos de carbono. La solidificación de aleaciones desde temperaturas inferiores a 800°C en función del contenido de cromo (mayores al 25%) puede llevar a la susceptibilidad a la precipitación de la fase sigma  $\sigma$ .

**Figura 1.** Diagrama binario Fe-Cr, zona de estabilidad de ferrita (DEMO,1977)<sup>10</sup>



El acero AISI 430 presenta contenidos de cromo entre el 16 y 18%; su microestructura luego de la solidificación está compuesta básicamente por ferrita y carburos. En esta aleación la formación de la fase sigma se presenta raramente, requiere calentamiento prolongado bajo temperaturas entre 550 y 850°C y por lo tanto suele darse en casos que presentan gran inercia térmica. La composición química normalizada para esta aleación se presenta en la Tabla siguiente.

<sup>10</sup> FARIA, Ricardo Augusto. Efeito dos elementos Ti e Nb no comportamento em fadiga de aços inoxidáveis ferríticos utilizados no sistema de exaustão de veículos automotores. Ouro Preto: Rede Temática em engenharia de materiais, 2006. P.9.

**Tabla 1.** Composición química del acero inoxidable AISI 430, norma ASTM A276<sup>11</sup>

	<b>%C</b>	<b>%Si</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P</b>	<b>%S</b>	<b>%Cr</b>	<b>Otros</b>
<b>AISI 430</b>	0,12	1,0	1,0	0,04	0,03	16-18	-

### 1.3 INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ESTABILIZADORES

La presencia de elementos gammágenos, como nitrógeno y carbono, expanden el campo de existencia de la austenita, como se puede observar en la Figura 2. Dependiendo del balance entre los elementos alfégenos y gammágenos, en el material, para contenidos de cromo mayores a 13% se puede presentar estructura bifásica austenita-ferrita.

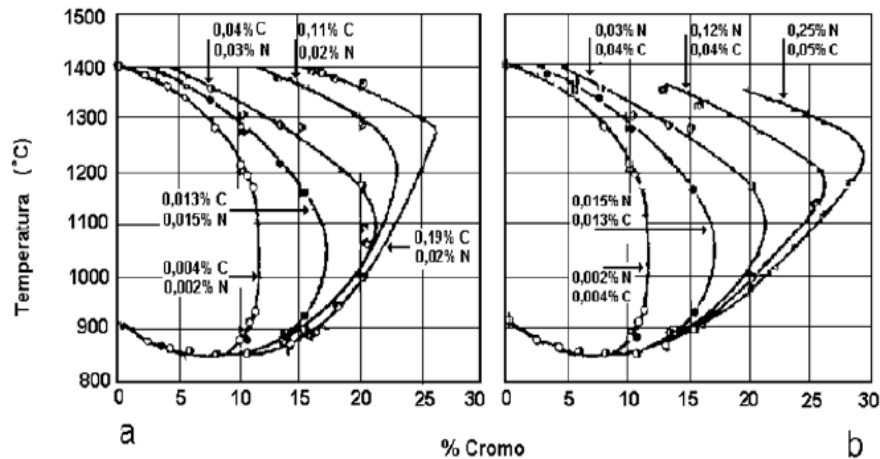
Adicional al desplazamiento del campo de estabilidad de la austenita; es necesario considerar la cantidad máxima de elementos intersticiales que la ferrita admite. El límite de solubilidad de estos elemento en la ferrita es menor al 0,00015% en peso a 20°C (HONEYCOMBE, 1982)<sup>12</sup>, en consecuencia, al ser mucho menor que el porcentaje que se presenta en los aceros comerciales, el carbono y el nitrógeno, se presentan en la estructura en forma de carburos de hierro y de cromo,  $(Cr,Fe)_7C_3$ ,  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  o nitruros de cromo  $Cr_2N$ . Es así, que el contenido de estos elementos debe ser lo más bajo posible para disminuir el empobrecimiento de cromo, que da lugar a el fenómeno conocido como sensibilización.

---

<sup>11</sup> ASTM International. ASTM A276 Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes.

<sup>12</sup> SERNA GIRALDO, Carlos Augusto. Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico UNS S430000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensibilização. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. P.28.

**Figura 2.** Estabilidad de la austenita, Influencia de a) carbono, b) nitrógeno<sup>13</sup>



Para tratar estos problemas, en función de los contenidos de carbono y nitrógeno, son adicionados elementos estabilizadores, como titanio, niobio y vanadio, estos elementos alógenos son estabilizantes de la ferrita, contribuyen a la formación de precipitados más estables (TiN y NbC) y sustituyen parcial o totalmente la formación de carburos de cromo. Como resultado de su menor solubilidad, la disolución de estos precipitados se da en la matriz ferrítica en temperaturas superiores a 1200°C, como puede observarse en la Figura 3.

En consecuencia, al limitarse la disolución de C y N (presentes como carburos, nitruros o carbonitruros de elementos estabilizadores) en la ferrita a altas temperaturas, los contenidos de estabilizadores contribuyen a reducir el efecto de los elementos intersticiales sobre el campo de la austenita, limitando su formación.

Para conseguir una estabilización realmente eficiente, los contenidos de estos elementos deben cumplir los siguientes parámetros:<sup>14</sup>

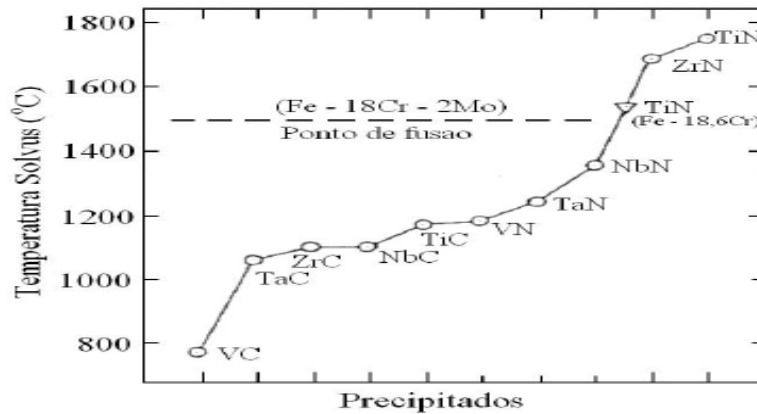
- $\%Ti > 0,15 + 4 (\%C + \%N)$

<sup>13</sup> FARIA, Ricardo Augusto. Efeito dos elementos Ti e Nb no comportamento em fadiga de aços inoxidáveis ferríticos utilizados no sistema de exaustão de veículos automotores. Ouro Preto: Rede Temática em engenharia de materiais, 2006. P.34.

<sup>14</sup> CUNAT, Pierre. Manual de aceros inoxidables de Euro Inox. Euro Inox, serie de materiales y sus aplicaciones volumen 1.p.6

- $\%Nb > 0,2 + 5 (\%C + \%N)$
- $\%V > 0,2 + 4 (\%C + \%N)$
- Estabilización:  $\%Ti + 4/7 (\%Nb) > 0,15 + 4(\%C + \%N)$

**Figura 3.** Temperaturas de solubilización de diferentes precipitados para el acero inoxidable 430 con 18% Cr<sup>15</sup>



El titanio es el estabilizante comúnmente utilizado, permite la formación de precipitados como TiN y TiC<sup>16</sup>; como puede observarse en la figura 3, tienen una elevada temperatura de disolución, llegando hasta temperaturas de fusión como es el caso del TiN. Sus precipitados son de gran tamaño y porcentajes de titanio mayores a los requeridos producen endurecimiento por solución sólida que da lugar a disminución en la ductilidad y aumento en la temperatura de transición dúctil-frágil. El niobio forma carburos y nitruros menos estables, pero que son suficientes para prevenir la sensibilización de los mismos. El niobio en exceso tiene la ventaja de reprimir el crecimiento de grano que se da a elevadas temperaturas y largos tiempos

<sup>15</sup> FARIA, Ricardo Augusto. Efeito dos elementos Ti e Nb no comportamento em fadiga de aços inoxidáveis ferríticos utilizados no sistema de exaustão de veículos automotores. Ouro Preto: Rede Temática em engenharia de materiais, 2006. P.12.

<sup>16</sup> Ibít., P.13

de tratamiento térmico<sup>17</sup>; generalmente es adicionado en mayores proporciones a las necesarias.

#### **1.4 EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIZACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS**

Mediante el desenvolvimiento de técnicas electroquímicas se ha logrado estudiar los aceros bajo condiciones simuladas. Los ensayos de reactivación potenciodinámica (EPR) fueron propuestos por Cihal<sup>18</sup> con la finalidad de evaluar de forma no destructiva el grado de sensibilización de los aceros inoxidable austeníticos. La norma ASTM G108<sup>19</sup> estandarizó esta práctica para los aceros inoxidable austeníticos y con el paso de los años mediante la modificación de los parámetros establecidos fue estudiado para otros aceros inoxidable.

El método de reactivación de tipo barrido doble fue normalizado bajo la norma Japonesa G 0580-1986; esta técnica se da mediante la polarización anódica del material desde el potencial de corrosión hasta un potencial donde se encuentre pasivo el material y la polarización inversa hasta nuevamente el potencial de corrosión. La densidad de corriente anódica presenta dos picos cuando el material se encuentra sensibilizado, uno de activación y otro de reactivación. La relación de estos valores permite la cuantificación del grado de sensibilización del material. Los dos picos de corriente obtenidos, activación ( $I_a$ ) y reactivación ( $I_r$ ) permiten la

---

<sup>17</sup> *Ibíd.*, p.14.

<sup>18</sup> SERNA GIRALDO, Carlos Augusto. Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico UNS S430000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensibilização. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. P.62.

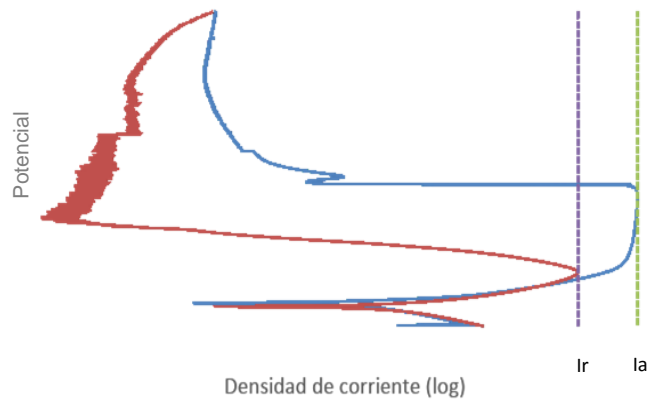
<sup>19</sup> ASTM International. ASTM G108-94 Standard Test Method for Electrochemical Reactivation (EPR) for Detecting Sensitization of AISI Type 304 and 304L Stainless Steels, 2015

obtención de la medida del grado de sensibilización DOS mediante la siguiente relación:

$$\text{DOS} = \frac{I_r}{I_a}$$

Donde,  $I_r$ : máxima corriente de reactivación e  $I_a$ : máxima corriente de activación

**Figura 4.** Curva DL-EPR para um material sensibilizado



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la influencia de la variación de elementos de aleación en las características microestructurales de aceros AISI 430.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la composición química elemental de los aceros evaluados y relacionarla con los valores nominales establecidos en la norma ASTM A276.
- Determinar las características microestructurales de los aceros evaluados.
- Relacionar la variación de composición química con las características microestructurales de los aceros.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN COMPOSICIONAL DE ACEROS INOXIDABLES AISI 430 MODIFICADOS

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizaron láminas de tres tipos de aceros inoxidables ferríticos AISI 430A, 430F y 430H, suministrados por la empresa *Aperam Inox America do Sul S.A* de Brasil. Como base de comparación se utilizó el acero comercial AISI 430 suministrado por la Compañía general de aceros de la ciudad de Bucaramanga.

La composición química de los aceros fue determinada mediante espectrometría de emisión óptica de chispa, empleando el espectrómetro Bruker QM/V/L de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores nominales establecidos en la norma ASTM A276.

#### 3.2 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LOS ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

Para la caracterización microestructural de los aceros se tomaron muestras con un área superficial aproximada de 1,5 cm<sup>2</sup>, las cuales fueron encapsuladas en resina epóxica para su facilitar su manipulación. La preparación metalográfica se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM E3<sup>20</sup>. Para ello, las muestras fueron desbastadas con papel de carburo de silicio desde la granulometría 120 hasta 2000 y posteriormente pulidas con pasta de diamante de 3 y 1 µm hasta obtener una superficie especular. Con el fin de revelar la microestructura, las muestras fueron atacadas siguiendo la norma ASTM E407<sup>21</sup> con el reactivo de Vilella (5 mL HCl, 1g

---

<sup>20</sup> ASTM International. ASTM E3-01. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 2007.

<sup>21</sup> ASTM International. ASTM A407 Standard practice for microetching Metals and alloys, 2015. p.13.

ácido pícrico y 100 mL etanol 95%), mediante inmersión por un tiempo de 12 segundos.

Una vez preparadas las muestras, se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) empleando para ello el microscopio electrónico Quanta 650 FEG, ubicado en el Parque Tecnológico de Guatiguará y que se encuentra equipado con detectores para el análisis de energías dispersivas de rayos X (EDX) y la obtención de imágenes por electrones secundarios (SE) y retrodispersados (BSE).

Por otro lado, se realizaron análisis de difracción de rayos X (DRX) usando el difractómetro Philips-PANalytical PW 1710, con radiación Cu  $\alpha$  de incidencia normal y rango de medición entre  $10^\circ$  y  $120^\circ$ .

Finalmente, con los resultados obtenidos se estableció la relación existente entre las variaciones composicionales y los rasgos microestructurales de los aceros inoxidables ferríticos estudiados.

Por otro lado, como estudio complementario a la caracterización microestructural de los aceros, se realizó la caracterización electroquímica de los mismos, que se describe a continuación, con el fin de observar la influencia de la variación de composición química en el grado de sensibilización del material.

### **3.3 ENSAYOS DE REACTIVACIÓN ELECTROQUÍMICA DE BARRIDO DOBLE (DL-EPR)**

Se realizaron estudios de susceptibilidad a la corrosión, mediante la técnica de reactivación de barrido doble (DL-EPR) que fue realizada con uso del Potenciostato/Galvanostato Metrohm Autolab PGSTAT302N integrado con software Nova 1.11 presente en el laboratorio de electroquímica de la Universidad Industrial de Santander. Se empleó un sistema de tres electrodos en una disolución de 0,5 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + 0,01 M KSCN a  $30 \pm 1^\circ\text{C}$ , donde el electrodo de referencia fue de Ag/AgCl y el electrodo auxiliar fue de grafito. La cara expuesta de cada electrodo de trabajo

fue desbastada con papel de carburo de silicio 220, 280, 400 y 1500 y pulida con pasta de diamante de 3 y 1  $\mu\text{m}$ .

Inicialmente, se expuso la muestra durante dos minutos a la disolución para estabilizar el potencial de corrosión y se polarizó anódicamente a una velocidad de 1,67 mV/s hasta alcanzar la zona pasiva, donde se estableció como potencial de retorno un valor medio de este rango de potenciales.

Determinado el potencial de retorno (650 mV vs Ag/AgCl) y siguiendo los parámetros indicados anteriormente, fue estabilizado e inmediatamente polarizado anódicamente desde 0,1 V por debajo del potencial de corrosión hasta el potencial de retorno (activación) e invertido hasta el potencial de corrosión (reactivación).

Este ensayo fue realizado para cada acero en estado de recepción y con tratamiento térmico. El tratamiento fue realizado a 1200°C durante 15 minutos y templado en agua, con la finalidad de conocer la influencia de estas condiciones de tratamiento sobre la susceptibilidad a la corrosión de este acero.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL

En la Tabla 2 se presentan los valores composicionales de los aceros inoxidables ferríticos objeto de estudio comparados con los valores establecidos por la norma ASTM A276 “*Standard specification for stainless steel bars and shapes*”.

**Tabla 2.** Composición química elemental en porcentaje en peso de los aceros inoxidables AISI 430 referencia, A, F y H, respectivamente.

AISI	%Cr	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Nb	%Ti	%V	%Fe
430	16,74	0,035	0,356	0,374	0,023	0,006	0,0071	0,0042	0,072	Balance
430A	16,53	0,043	0,380	0,218	0,021	0,005	0,0047	0,0024	0,040	Balance.
430F	17,64	<b>0,019</b>	0,376	0,207	0,022	0,005	<b>0,441</b>	0,0033	0,041	Balance
430H	16,51	<b>0,009</b>	0,517	0,179	0,028	0,005	0,011	<b>0,108</b>	0,033	Balance
430	16-18	0,120	1,00	1,00	0,040	0,030	-	-	-	Balance
<b>Norma</b>										

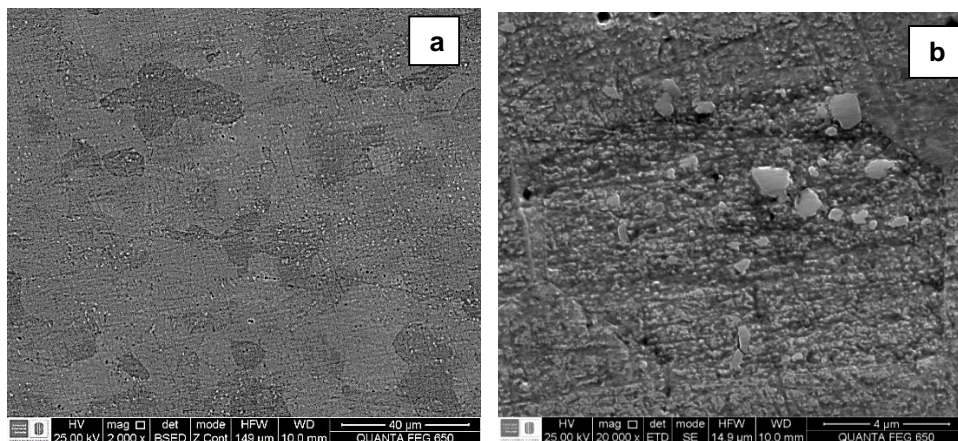
Como se observa a partir de la composición química obtenida, se verifica a partir de los contenidos de cromo (entre 16 y 18 %) que los materiales recibidos corresponden a aceros inoxidables de la familia ferrítica 430. En términos generales los valores de composición se encuentran dentro de los rangos establecidos por la norma y se observa además la presencia de otros elementos de aleación en su composición. Para los aceros 430 y 430A se observa similitud en su composición. Es de resaltar los bajos porcentajes de elementos tales como el carbono que para el caso de los aceros 430F y 430H, los cuales tienen menos de la mitad comparados con el acero de referencia y el 430A. Es importante observar que el acero 430F tiene un valor superior de niobio y el 430H contiene mayor porcentaje de titanio.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LOS ACEROS

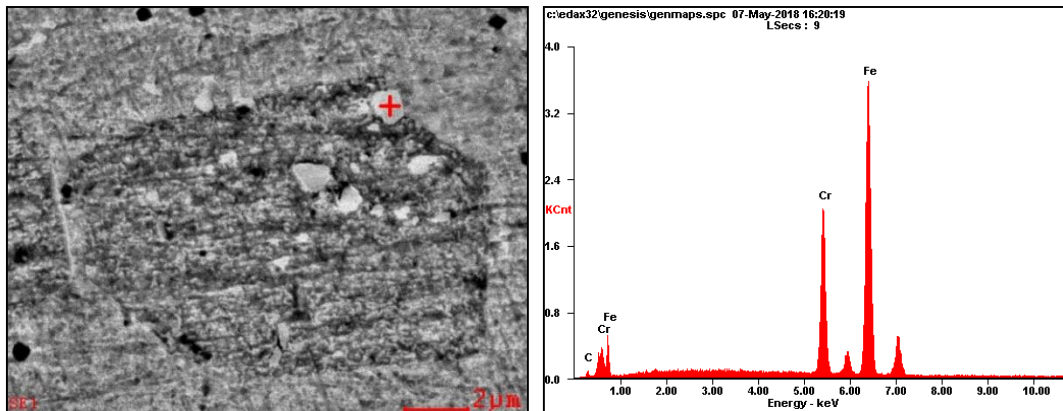
Mediante el uso del microscopio electrónico de barrido (MEB) y el análisis EDS realizado en las muestras fue posible obtener las características de distribución y morfología de los precipitados en estado de entrega y así mismo los detalles composicionales de cada uno de estos.

**4.2.1 Acero inoxidable AISI 430 referencia.** La Figura 5 muestra las micrografías correspondientes al acero inoxidable AISI 430 de referencia, obtenidas por MEB, mediante electrones retrodispersados y secundarios. Se puede observar una microestructura constituida por una matriz ferrítica  $\alpha$ , con la presencia de pequeños precipitados globulares de diferente tamaño, de hasta  $1,5 \mu\text{m}$ , distribuidos uniformemente en la matriz y en los límites de grano. A partir de análisis EDS realizado (Figura 6), se observa que los precipitados están constituidos por Fe y Cr, lo que señala que se tratan de los carburos de cromo y hierro típicos de este acero

**Figura 5.** Micrografías del acero inoxidable de referencia AISI 430 obtenidas por MEB a diferentes aumentos a) BSE 2000X y b) SE 20000X.

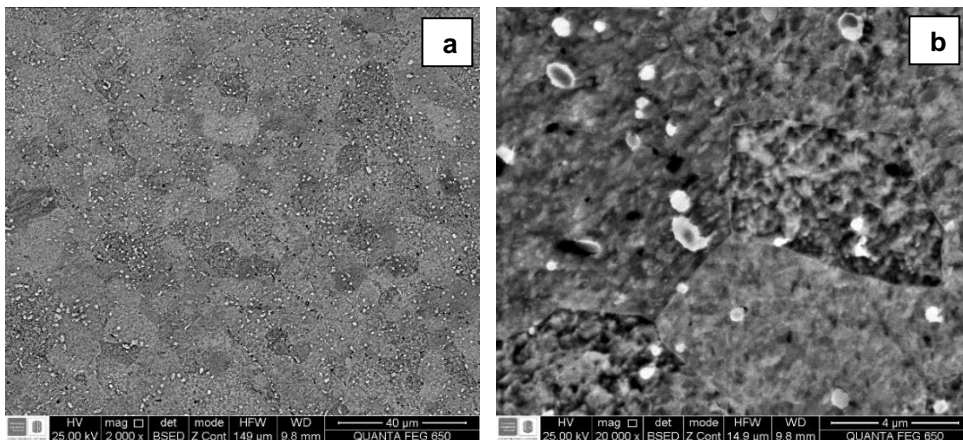


**Figura 6.** Análisis EDS de precipitados.

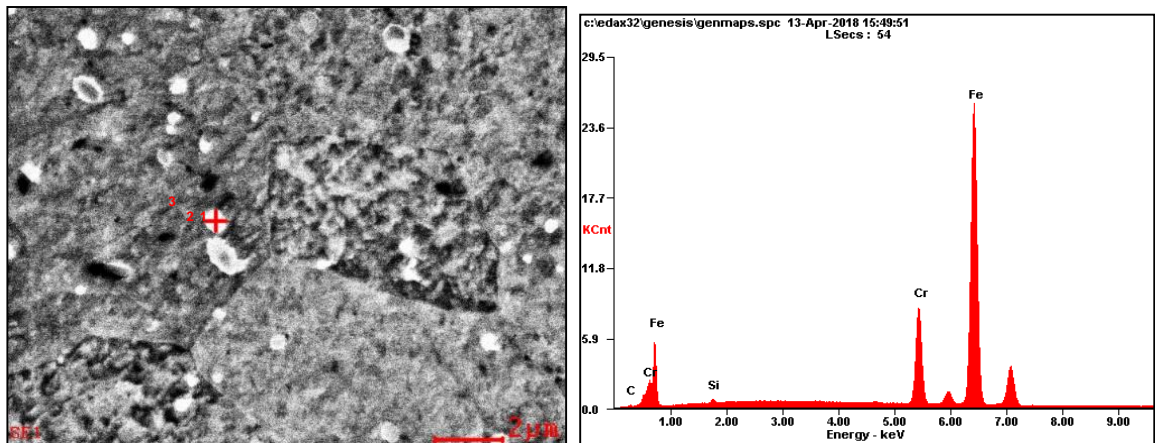


**4.2.2 Acero inoxidable AISI 430 A.** Al igual que el acero AISI 430 de referencia, la microestructura del acero AISI 430A (Figura 7) está constituida por una matriz ferrítica y la presencia de carburos de cromo y hierro, como lo evidencia el análisis EDS de la Figura 8. Sin embargo, en este caso los carburos se encuentran en mayor proporción comparados con el acero de referencia.

**Figura 7.** Micrografías del acero inoxidable AISI 430A obtenidas por MEB-BSE a diferentes aumentos a) 2000X y b) 20000X.



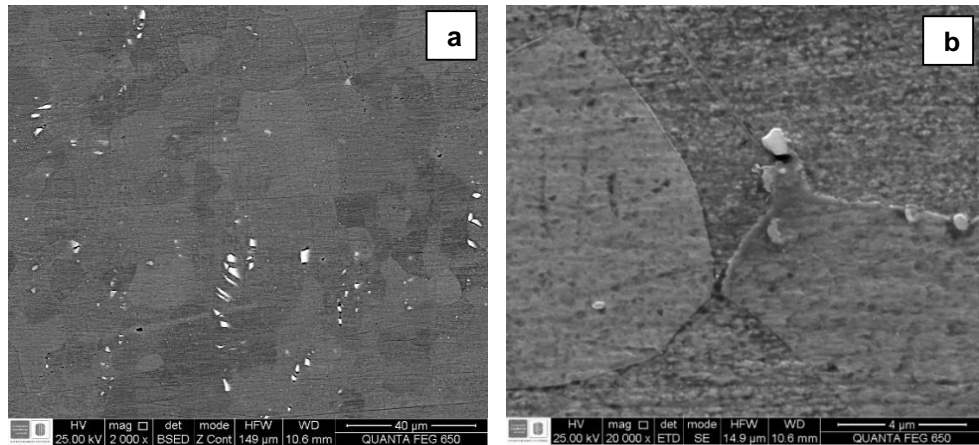
**Figura 8.** Análisis EDS de los precipitados presentes en el acero AISI 430A.



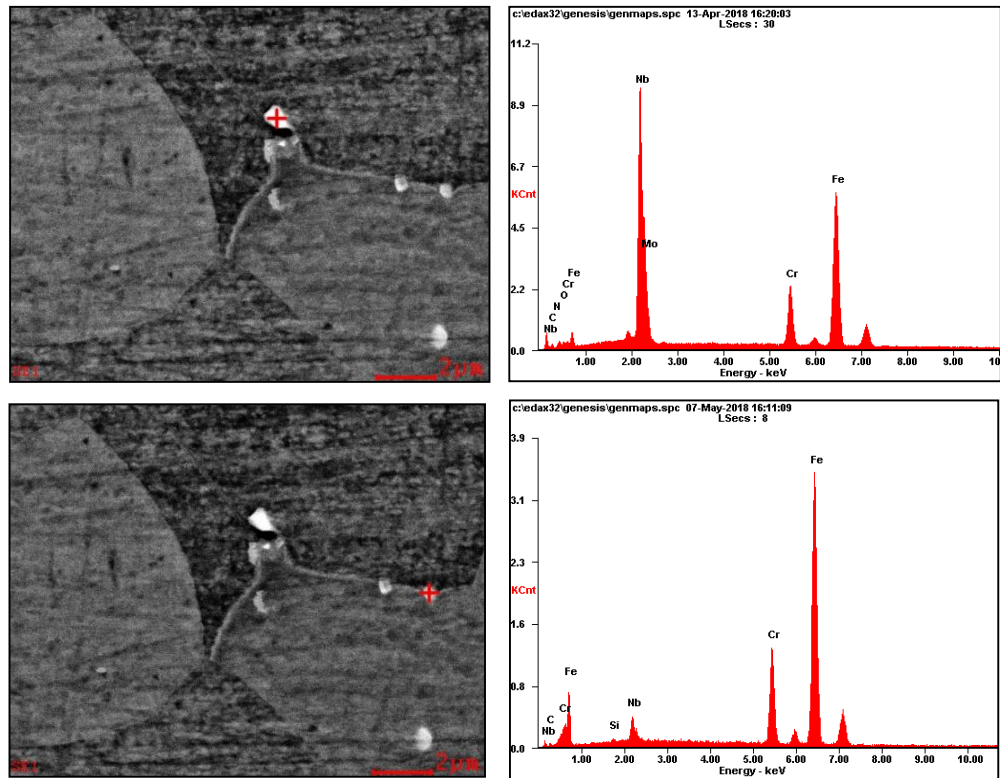
Así mismo se realizaron análisis del porcentaje de cromo en el precipitado, de la zona próxima al precipitado y de la matriz, zonas denotadas como 1, 2 y 3. Los resultados mostraron que el porcentaje en peso de cromo del precipitado fue del orden de 20 %Cr, en la zona próxima del 15%Cr y en la matriz del 16%Cr, evidenciando una ligera disminución de este elemento en la zona adyacente al precipitado.

**4.2.3 Acero inoxidable AISI 430 F.** En la Figura 9 se presentan las micrografías del acero inoxidable AISI 430 F obtenidas mediante MEB-BSE y SE. En estas se puede observar una matriz compuesta por granos de ferrita; sin embargo, a diferencia de los aceros descritos anteriormente, se observa la presencia de otro tipo de precipitados de mayor tamaño (4 μm), de forma poligonal, cuya distribución en la matriz no es tan homogénea y formando en ciertas zonas una especie de clusters. El análisis EDS (Figura 10) señaló que este tipo de precipitados están constituidos mayoritariamente por Nb. También se observó la presencia de carburos de Fe-Cr de tamaño pequeño, aproximadamente 0,7 μm, en una mínima cantidad si se compara con el acero de AISI 430A.

**Figura 9.** Micrográficas del acero inoxidable AISI 430F obtenidas por MEB-BSED a diferentes aumentos a) BSE 2000X y b) SE 20000X.

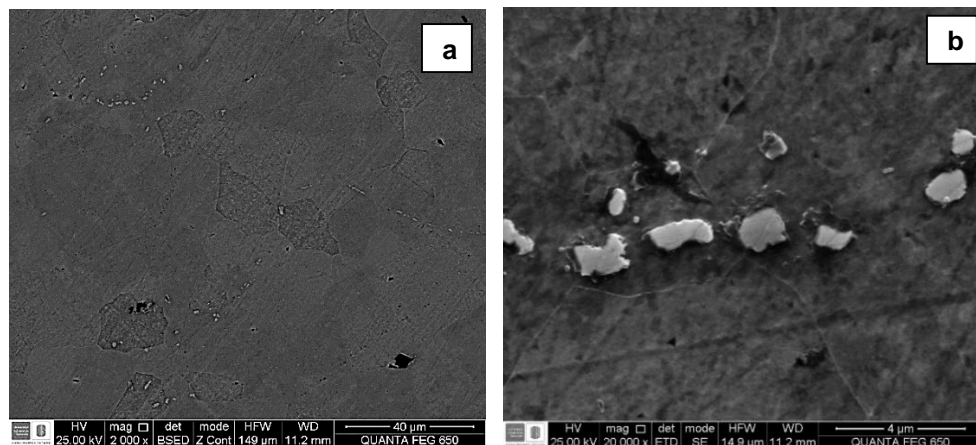


**Figura 10.** Análisis EDS de los precipitados presentes en el acero AISI 430F.

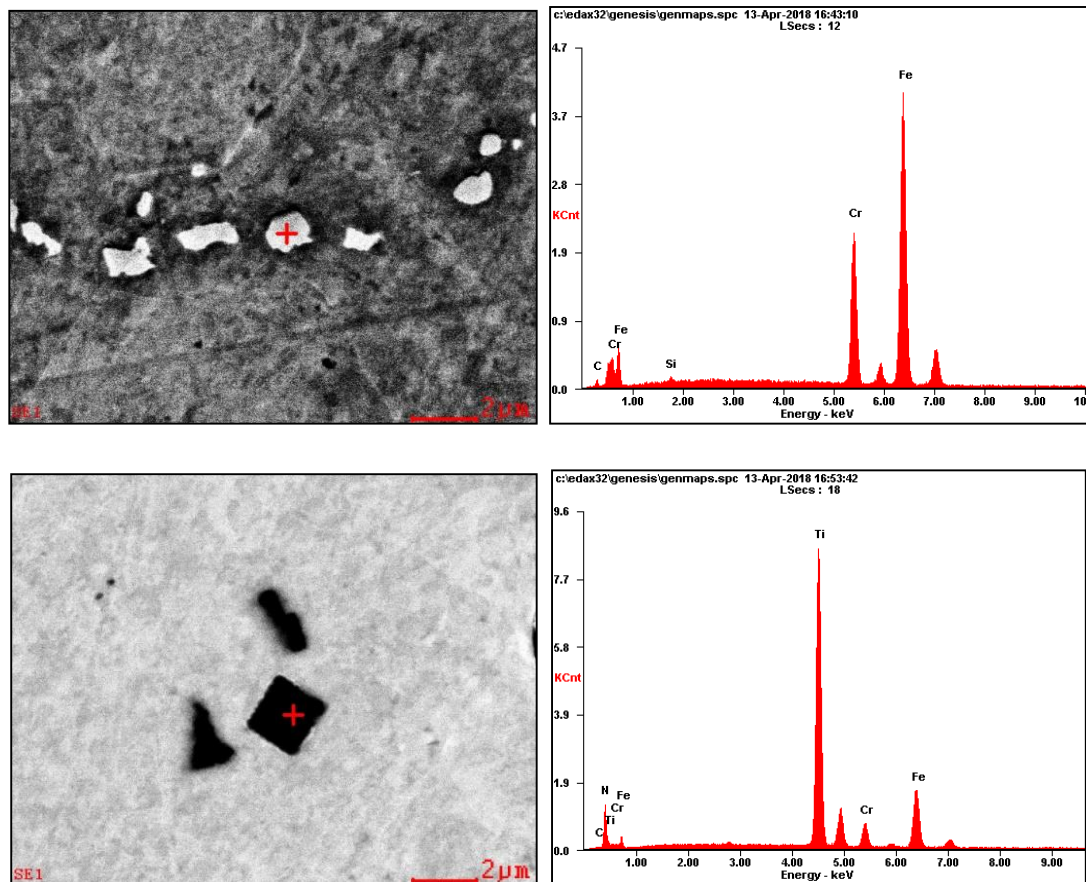


**4.2.4 Acero inoxidable AISI 430 H.** La caracterización microestructural realizada mediante MEB-BSE de este último acero, AISI 430H (Figura 11), reveló que la matriz ferrítica contenía el menor contenido de precipitados en comparación con los demás aceros estudiados. Además, se encontraron diferentes tipos de precipitados; los de color claro que corresponden a carburos de cromo y hierro que se ubican en la matriz y los límites de grano; y los de color oscuro de diferente morfología (Figura 12), de los cuales los precipitados cúbicos que contienen elevados contenidos de Ti corresponden a los nitruros de titanio con estequiometría TiN, y los precipitados de forma un poco irregular, también con contenidos en Ti y que podrían corresponder con carbonitruros de este elemento Ti (C,N).

**Figura 11.** Micrografías del acero inoxidable AISI 430H obtenidas por MEB-BSED a diferentes aumentos a) BSE 2000X y b) SE 20000X.



**Figura 12.** Análisis EDS de los precipitados presentes en el acero AISI 430H.

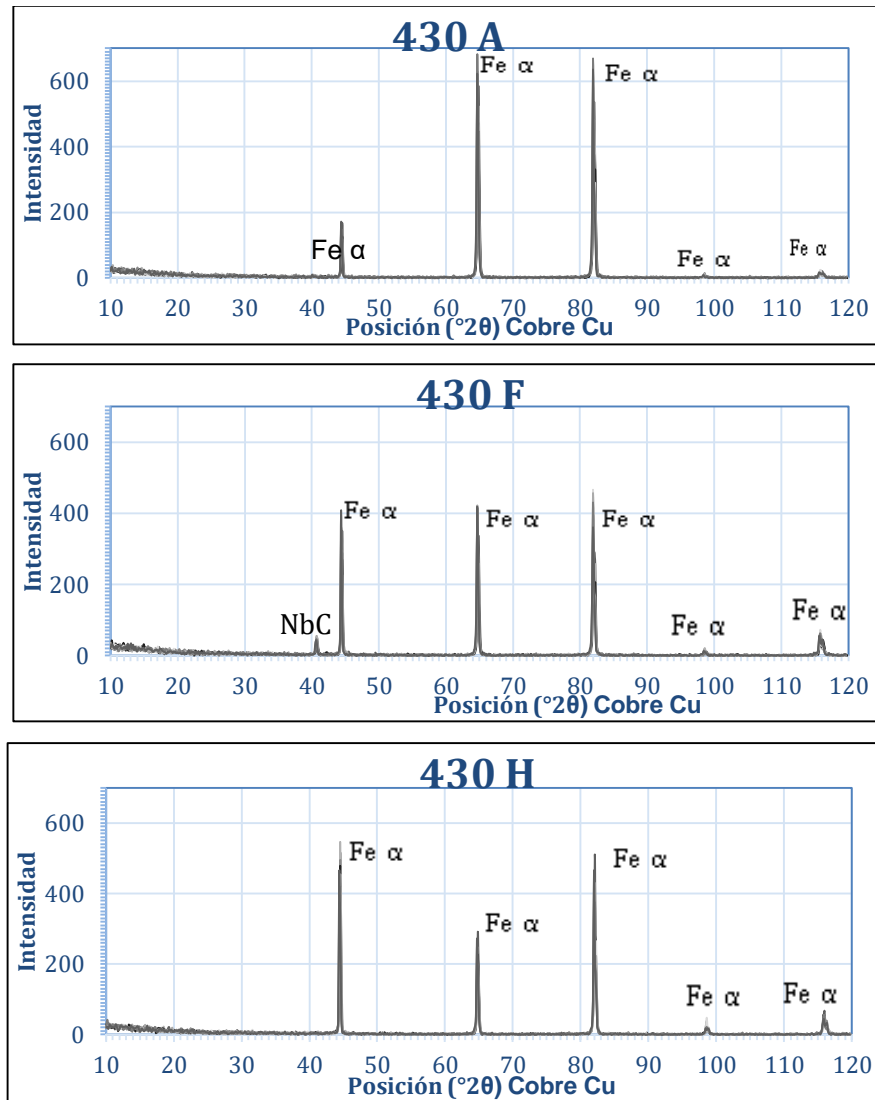


En relación con los análisis realizados mediante difracción de rayos X (DRX), con el fin de identificar las fases cristalinas de los aceros y la determinación de su estequiometría, la Figura 13 muestra los difractogramas obtenidos de los aceros inoxidables AISI 430 en estudio, A, F y H.

Al realizar el análisis de las reflexiones o máximos de difracción mostrados, se identifica para todos los aceros la ferrita correspondiente a la solución sólida sustitucional de Cr en Fe. Los valores de las distancias interplanares y ángulos de difracción de los aceros estudiados y los valores estándar para el hierro alfa y la solución sólida Fe-Cr se recogen en la Tabla 3. Se puede apreciar, como era de esperar, que los valores se ajusten más a la solución sólida con la relación estequiométrica  $Cr_{0,2}Fe_{0,8}$  que a la fase de hierro alfa, dado que la presencia de

cromo en la matriz de hierro cambia el parámetro de red de la celda, debido a la diferencia en sus radios atómicos. De esta forma se evidencia la presencia de esta fase como la fase mayoritaria.

**Figura 13.** Difractogramas de los aceros inoxidables AISI 430 A, F y H.



**Tabla 3.** Valores DRX de los aceros estudiados, en distancia interplanar y ángulo de difracción, de las reflexiones correspondientes a la ferrita, y los valores estándar de las tablas para la solución sólida Fe-Cr y hierro alfa.

Parámetros	AISI 430 A	AISI 430 F	AISI 430 H	Cr <sub>0,2</sub> Fe <sub>0,8</sub> a: 2,8664 Å	Fe α a: 2,819Å
d <sub>hkl</sub> (Å)	2,03431	2,03459	2,03206	<b>2,0268</b>	1,9933
2θ	44,37	44,37	44,53	<b>44,67</b>	45,46
d <sub>hkl</sub> (Å)	1,43360	1,43670	1,43640	<b>1,4332</b>	1,4095
2θ	64,68	64,68	64,84	<b>65,02</b>	66,25
d <sub>hkl</sub> (Å)	1,17270	1,17292	1,17224	<b>1,1702</b>	1,1509
2θ	81,94	81,94	82,10	<b>82,33</b>	84,02
d <sub>hkl</sub> (Å)	1,01558	1,01575	1,01534	<b>1,0134</b>	0,9967
0,92274	98,57	98,57	98,57	<b>98,94</b>	101,22
d <sub>hkl</sub> (Å)	0,90852	0,90842	0,90811	<b>0,9064</b>	0,8914
2θ	116,32	115,94	116,00	<b>116,15</b>	119,55

Además de las reflexiones mostradas anteriormente, los aceros presentaron otras reflexiones que no tienen una alta intensidad como la fase ferrita y que son difíciles de observar en el diagrama, pero que estuvieron presentes en el análisis (Anexo A). Para el caso del acero 430A se tuvieron reflexiones en los ángulos 37,65; 40,05 y 44,69 que corresponden con carburos del tipo M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, mientras que para el acero 430F se identificaron dos reflexiones en los ángulos 40,46 y 40,85 que corresponde a los carburos de niobio NbC. El acero 430H no mostró evidencia de otras reflexiones.

Los resultados de DRX están en concordancia con los obtenidos mediante MEB, Sin embargo, las fases que se encuentran en baja cantidad, como los precipitados del acero 430H, no logran evidenciarse en este tipo de análisis.

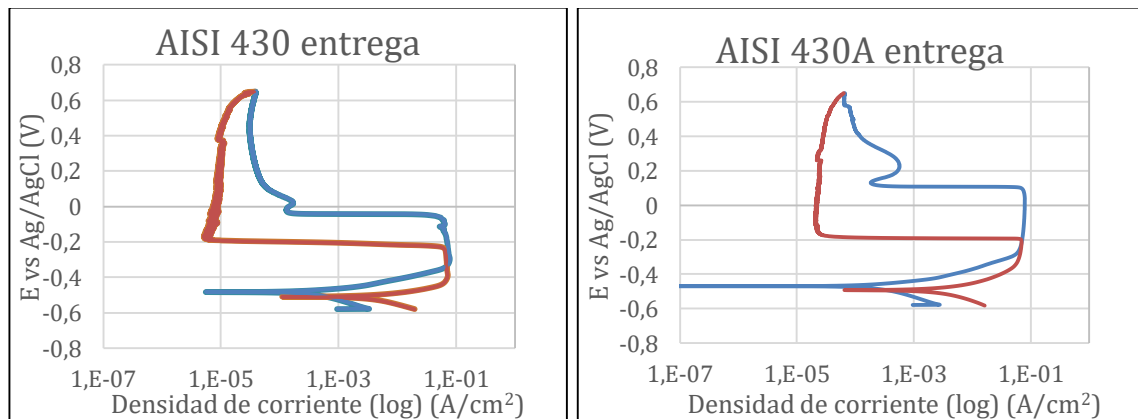
Con base en los valores composicionales de cada material y teniendo en cuenta las características de los precipitados obtenidos, se observa la influencia específicamente de elementos como carbono, titanio y niobio en los mismos rasgos

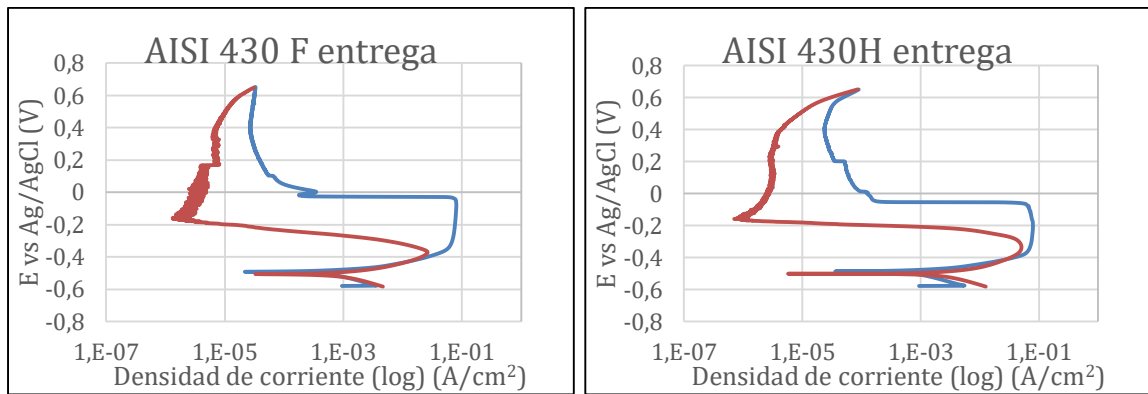
microestructurales de cada material. Como fue indicado, el material 430 y 430A presentan precipitados ricos en Cr, los cuales son disminuidos notoriamente mediante la sustitución con Nb y Ti, en los aceros F y H. En las micrografías obtenidas es posible observar las diferencias morfológicas de este tipo de precipitados; mayor tamaño y morfología desigual en el 430 F y romboidal en el 430 H, con respecto a los ricos en Cr que se presentan globulares y de pequeño tamaño del orden de 1  $\mu\text{m}$ . La notoria diferencia en el contenido de carbono se representa microestructuralmente en la cantidad de precipitados en cada muestra; donde el material A presenta la mayor cantidad de precipitados en consecuencia de su mayor porcentaje de carbono en relación con los otros materiales.

#### 4.3 ENSAYOS DE REACTIVACIÓN ELECTROQUÍMICA (DL-EPR)

Las curvas obtenidas mediante los ensayos DL-EPR para los aceros inoxidables AISI 430 (Referencia, A, F y H) en estado de recepción se muestran en la Figura 14. En estas se puede comprar la susceptibilidad a la corrosión de cada uno de estos aceros, relacionando la corriente máxima de reactivación (en la curva roja) y la corriente máxima de activación (en la curva azul).

**Figura 14.** Curvas de polarización potenciodinámica obtenidas mediante el ensayo DL-EPR de los aceros inoxidables ferríticos en estado de recepción.





Se observa que en las condiciones estudiadas, los aceros presentan un intervalo de pasividad que en general, se inicia a los -0,05 V y llega hasta +0,63 V. La curva de retorno desde este potencial muestra un aumento de la densidad de corriente (reactivación) para todos los aceros, lo cual indicaría que estos se encuentran sensibilizados y que los aceros han sufrido ataque localizado en las zonas empobrecidas en cromo. Si se comparan los aceros estudiados, se puede observar que el acero que presentó mayor reactivación fue el acero AISI 430A y el que presentó menor reactivación fue el acero 430F.

Los valores obtenidos del análisis de las curvas de polarización de los aceros en estado de recepción (condiciones de fabricación) se encuentran representadas en la Figura 19 (Anexo B). Se muestran también los valores de los grados de sensibilización para los aceros con tratamiento térmico a 1200° por 15 minutos; con la finalidad de observar y comparar el efecto de los precipitados inherentes de la fabricación en los grados de sensibilidad. Las curvas de polarización para estos aceros se encuentran en el anexo B (Figura 18). En primer lugar, se observa las diferencias considerables de los grados de sensibilización para los aceros estudiados. Se observa que los aceros AISI 430 H y AISI 430F mostraron los menores valores de sensibilización,  $I_r/I_a$  de 0,65 y 0,35 respectivamente, asociados a la menor presencia de carburos de cromo en su microestructura y la presencia de otro tipo de precipitados.

Por otro lado, se puede observar también que los tratados térmicamente a 1200°C presentan un menor grado de sensibilización, lo que se podría estar relacionado con la disolución de los carburos de cromo, que se da a temperaturas superiores a 950°C en condiciones de rápido enfriamiento. Este cambio fue más significativo en el caso del acero AISI 430 de referencia, lo que podría estar asociado con la mayor disolución de los carburos atendiendo al menor porcentaje en carbono comparado con el acero 430A.

## 5. CONCLUSIONES

Los estudios realizados en los aceros inoxidables AISI 430 modificados y sus respectivos resultados dan lugar a las siguientes conclusiones:

- Por medio del análisis composicional fue posible corroborar que los aceros objeto de estudio correspondían con los inoxidables ferríticos del tipo 430 según la composición nominal establecida por la norma y además se identificaron que los aceros 430F y 430H habían sido modificados con los elementos estabilizadores Nb y Ti, respectivamente.
- Los resultados obtenidos mediante MEB-EDS y DRX determinaron que todos los aceros estuvieron constituidos por una matriz ferrítica, con presencia de carburos de cromo del tipo  $M_{23}C_6$ , cuya cantidad fue considerablemente menor en los aceros estabilizados F y H; característica que pudo ser debida, por un lado a los bajos porcentajes en carbono y por otro a la acción de los elementos estabilizantes Nb y Ti que favorecieron la formación de carburos de niobio en el acero F, y nitruros y carbonitruros de titanio en el acero H.
- Los resultados electroquímicos permitieron determinar que los aceros con presencia de elementos estabilizantes y menor porcentaje de carbono presentan un menor grado de sensibilización.

## **6. RECOMENDACIONES**

- Realizar un análisis más detallado relacionado con el efecto de los elementos estabilizadores en la resistencia a la corrosión intergranular, bajo la aplicación de diferentes temperaturas y tiempos de tratamiento térmico.
- Realizar ensayos de reactivación potenciodinamica trabajando con soluciones menos agresivas.

## BIBLIOGRAFÍA

ALMEIDA, Leandro. Microestrutura e textura dos aços inoxidáveis ferríticos ASTM 439 e ASTM 430 estabilizado ao nióbio: influência nas propriedades mecânicas e de estampagem. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2016

ASKELAND, Donald y PHULE, Pradeep, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, cuarta Ed., Thompson Learning, 2005.

ASTM International. ASTM A276 Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes

ASTM International. ASTM A407 Standard practice for microetching Metals and alloys, 2015.

ASTM International. ASTM E3-01. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 2007.

ASTM International. ASTM G108-94 Standard Test Method for Electrochemical Reactivation (EPR) for Detecting Sensitization of AISI Type 304 and 304L Stainless Steels, 2015

CASTRO, Geovane. Estudo da oxidação a quente no aço inoxidável ferrítico ABNT 430. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2005

CUNAT, Pierre. Manual de aceros inoxidables de Euro Inox. Euro Inox, serie de materiales y sus aplicaciones volumen 1

FARIA, Ricardo Augusto. Efeito dos elementos Ti e Nb no comportamento em fadiga de aços inoxidáveis ferríticos utilizados no sistema de exaustão de veículos automotores. Ouro Preto: Rede Temática em engenharia de materiais, 2006.

FRAGA PINTO, Daniel. Comportamento em corrosão sob tensão de um aço inoxidável ferrítico AISI 444 soldado com Aço Inoxidável Austenítico AISI 316LSi, em meios contendo cloretos. Ouro Preto: Rede Temática em engenharia de materiais, 2006. p.16.

HUANG, Xun-zeng; WANG, Dan; YANG, Yi-tao. Effect of Precipitation on Intergranular Corrosion Resistance of 430 Ferritic Stainless Steel. China: School of Materials Science and Engineering, Shanghai University

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 1486, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Colombia, 2008

KOCH, *et al.* International measures of prevention, Application, and economics of corrosion technologies study. Texas: NACE INTERNATIONAL.p.3.

LAUFGANG, Sergio. Aceros inoxidables, Termo Soldex S.A.

PEREIRA PARDINI, Andréa. Estuda da oxidação em alta temperatura dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 430A e AISI 430E em ar. Ouro Preto: Rede Temática em engenharia de materiais, 2008. P.7-9

SERNA GIRALDO, Carlos Augusto. Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico UNS S430000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensitização. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006

SOUZA, V, *et al.* Estudo da influência da microestrutura na suscetibilidade à sensitização do aço inoxidável AISI 430 por polarização eletroquímica de reativação Cíclica (PERC). *Rev. Virtual Quim.*, 2013.

# ANEXOS

## ANEXO A. DIFRACTOGRAMAS

Figura 15. Difractograma acero Inoxidable AISI 430 A

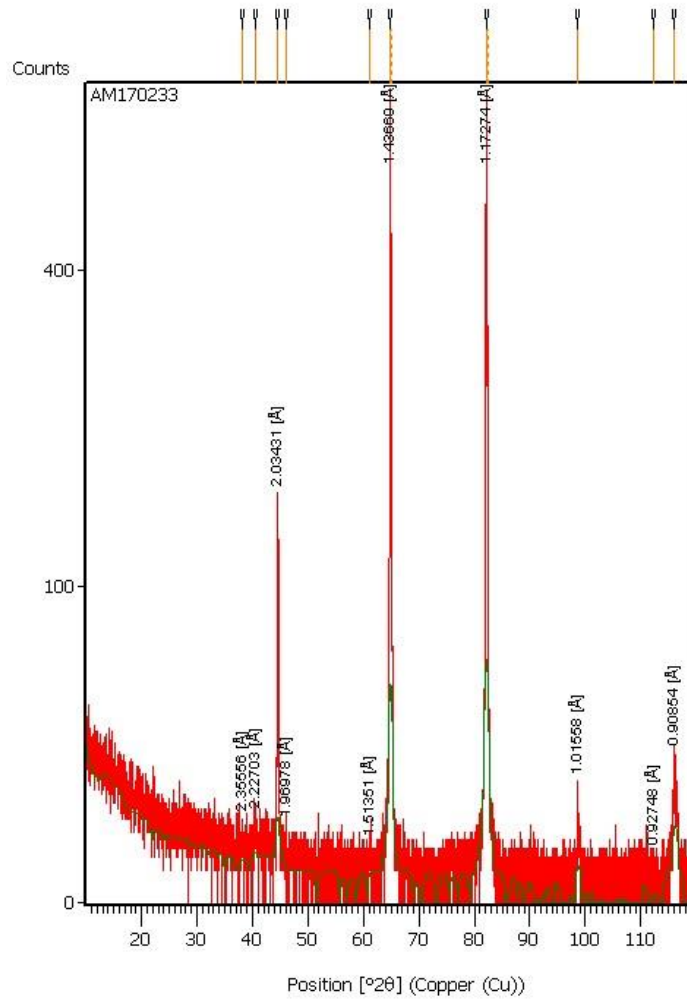


Figura 16. Difractograma acero Inoxidable AISI 430 F

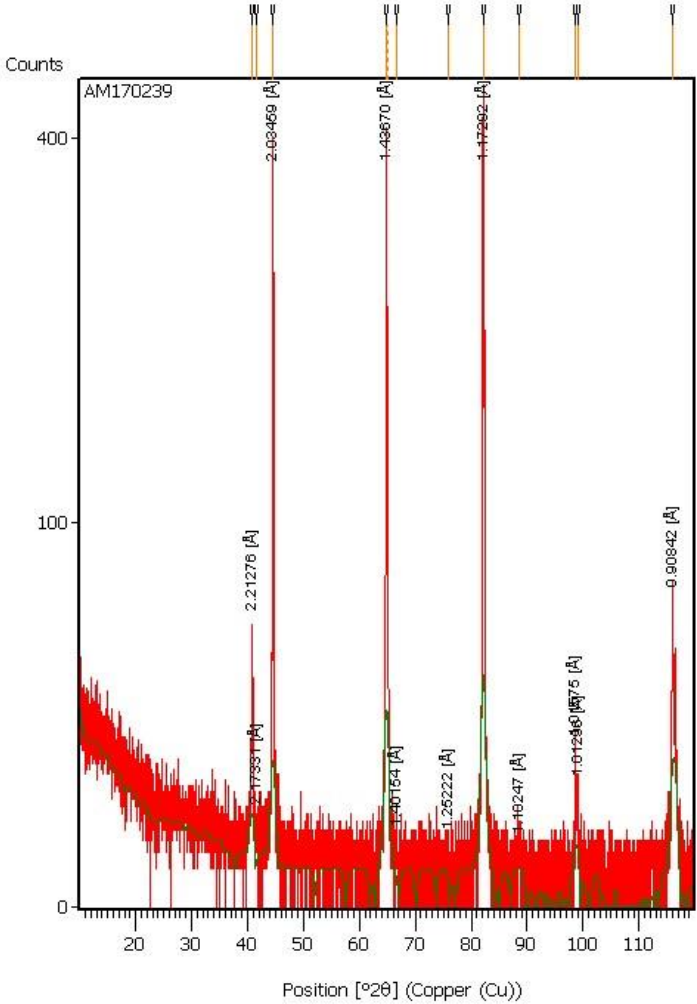
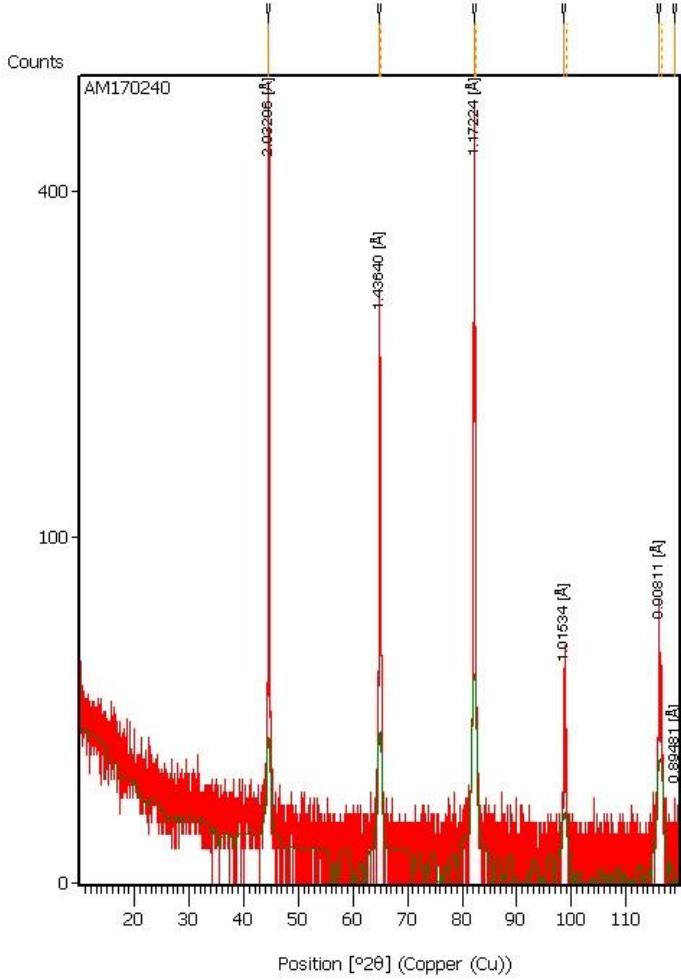
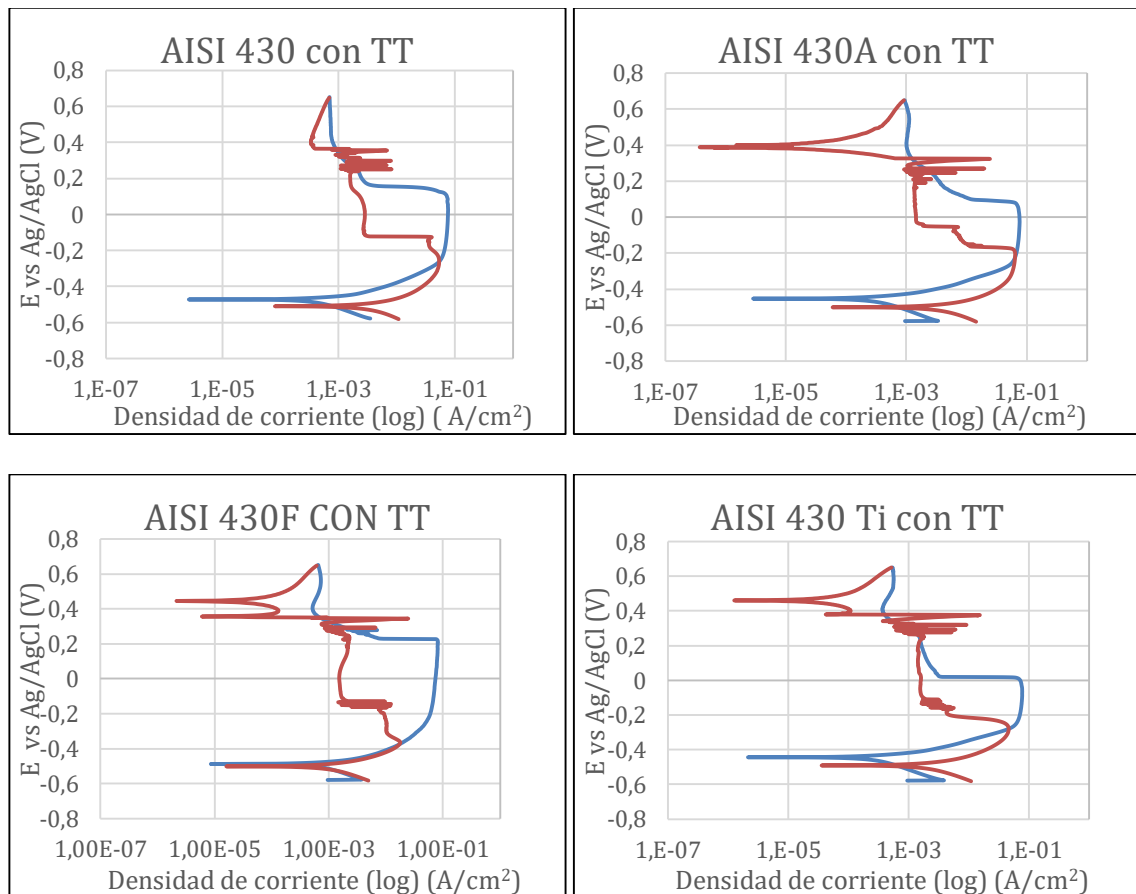


Figura 17. Difractograma acero Inoxidable AISI 430 H



**ANEXO B. FIGURAS COMPLEMENTARIAS DE ACEROS TRATADOS TÉRMICAMENTE, EN ENSAYOS DE REACTIVACIÓN POTENCIODINÁMICA DE CICLO DOBLE**

**Figura 18.** Curvas DL-EPR de los aceros inoxidables ferríticos con tratamiento térmico a 1200°C por 15 minutos.



**Figura 19.** Valores  $I_r/I_a$  para los aceros en estado de recepción y tratados térmicamente a 1200°C por 15 min.

