



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ESTUDIOS DE CORROSIÓN DE LOS HIERROS NODULARES  
ALEADOS DE CR (1.5, 2.0, Y 2.5%) CON TRATAMIENTO  
ISOTÉRMICO MEDIANTE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA**

**LIZBETH MARTÍNEZ GARCÍA**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX**

**2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: CARLOS RODRIGUEZ RIVERA**           \_\_\_\_\_

**VOCAL:**                   **Profesor: AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO**           \_\_\_\_\_

**SECRETARIO:**           **Profesor: PAOLA RONCAGLIOLO BARRERA**           \_\_\_\_\_

**1er. SUPLENTE:**       **Profesor: JOSE FERNANDO FLORES ALVAREZ**           \_\_\_\_\_

**2° SUPLENTE:**           **Profesor: JOSE ALEJANDRO GARCIA HINOJOSA**           \_\_\_\_\_

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO D, LABORATORIO 211, UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO, CIUDAD UNIVERSITARIA**

**ASESOR DEL TEMA:**

**M. en C. CARLOS RODRIGUEZ RIVERA**           \_\_\_\_\_

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

**Dr. JOSE ALEJANDRO GARCIA HINOJOSA**           \_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE (S):**

**MARTINEZ GARCIA LIZBETH**           \_\_\_\_\_

# Índice

.....	1
Resumen .....	i
Hipótesis .....	ii
Objetivos.....	ii
Capítulo 1 Marco teórico .....	1
1.1 Hierros colados .....	2
1.2 Clasificación de los Hierros colados .....	2
1.3 Hierros nodulares .....	3
1.3.1 Efecto de los elementos aleantes en el hierro nodular .....	7
1.4 Tratamientos térmicos en el hierro nodular .....	8
1.4.1 Austempering .....	9
1.5 Hierros ADI (Austempered Ductil Iron) .....	10
1.6 Concepto de corrosión .....	14
1.6.1 Tipos de corrosión .....	15
1.7 Métodos para determinar la velocidad de corrosión.....	17
1.7.1 Potencial corrosión (Ecorr) .....	18
1.7.2 Extrapolación de Tafel .....	19
Capítulo 2 Desarrollo experimental .....	20
2.1 Preparación de piezas .....	21
2.2 Tratamiento térmico .....	22
2.3 Preparación de probetas.....	23
2.4 Técnicas electroquímicas .....	23
2.5 Análisis metalográfico .....	25
Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados .....	26
3.1 Análisis metalográfico .....	27
3.1.1 Análisis metalográfico de los hierros nodulares sin tratamiento térmico. ....	27

3.1.2 Análisis metalográfico de los hierros nodulares con tratamiento isotérmico. ....	28
3.2 Potencial de corrosión vs tiempo (Ecorr vs. t) .....	30
3.3 Curvas de polarización .....	32
3.3.1 Curvas de polarización sin tratamiento térmico .....	33
3.3.2 Curvas de polarización con tratamiento térmico .....	35
3.4 Resultados de velocidad de corrosión .....	36
3.5 Mecanismo de reacción presente durante el proceso de corrosión. .....	38
 Capítulo 4. Conclusiones.....	 40
 Bibliografía .....	 42
 Anexos.....	 45
Apendice.....	45
Tablas de resultados por triplicado de pruebas realizadas.....	45
Índice de figuras.....	48
Índice de tablas .....	49
Índice de ecuaciones .....	50

## Resumen

La mayor parte del contenido de carbono en el hierro nodular, tiene forma esferoidal. Para producir la estructura nodular, el hierro fundido que sale del horno se adiciona con cantidades pequeñas de materiales metálicos como Mg, Ce, o ambos. Esta microestructura mejora las propiedades deseables como alta ductilidad, resistencia mecánica, maquinabilidad, buena fluidez para la colada, adecuada dureza y tenacidad.

Este tipo de fundición se caracteriza porque en ella el grafito aparece en forma de esferas minúsculas, esto da a lugar que aumente la resistencia a la tracción y tenacidad comparada con la fundición gris ordinaria. La fundición nodular normalmente se obtiene directamente de colada sin necesidad de someterlo a tratamiento térmico posterior, aunque estas propiedades pueden ser mejoradas con el uso de tratamientos térmicos

El llevar los hieros nodulares a hierros nodulares austemperizados o ADI (Austempered Ductil Iron) por medio de tratamientos isotérmicos mejora las propiedades mecánicas.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento ante la corrosión de hierros nodulares aleados al cromo (1.5, 2 y 2.5%) así como el efecto con tratamientos isotérmicos, esto mediante técnicas electroquímicas como Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) vs Temperatura (T) y curvas de polarización.

La evaluación de la velocidad de corrosión se realizará en solución de NaCl al 3% por la técnica de extrapolación de Tafel.

Los ensayos electroquímicos se realizaron por triplicado sobre las muestras tratadas isotérmicamente. Para realizar las pruebas se debe esperar una hora para alcanzar el estado estacionario en el potencial de corrosión. Las velocidades de corrosión se obtendrán a través de la extrapolación de Tafel. Adicionalmente se realizarán curvas de polarización para analizar el mecanismo, tipo de control y la fuente de dicho control.

Con base en los resultados de los tratamientos isotérmicos se espera establecer el efecto de la adición de cromo respecto a la resistencia a la corrosión.

## **Hipótesis**

La adición de Cr en los hierros nodulares como base para fabricar hierros ADI, mejora la resistencia a la corrosión.

## **Objetivos**

Determinar la velocidad de corrosión de los hierros nodulares aleados con tres niveles de Cr: 1.5, 2.0 y 2.5% en medio salino mediante la técnica de Extrapolación de Tafel.

Determinar la velocidad de corrosión de los hierros ADI con tres niveles de Cr: 1.5, 2.0 y 2.5% en medio salino mediante la técnica de Extrapolación de Tafel.

Determinar la concentración óptima de Cr que aumente la resistencia a la corrosión.

# **Capítulo 1 Marco teórico**



## 1.1 Hierros colados

Un hierro colado es una aleación ferrosa con un contenido de carbón mayor al 2%; las aleaciones ferrosas contienen Hierro, Carbono, Silicio, Magnesio, Fosforo y Azufre como elementos aleantes principales. Dependiendo de la composición, rapidez de enfriamiento y el tratamiento del metal líquido, el hierro colado puede solidificar de acuerdo con el sistema metaestable Fe-Fe<sub>3</sub>C o el sistema estable Fe-G.

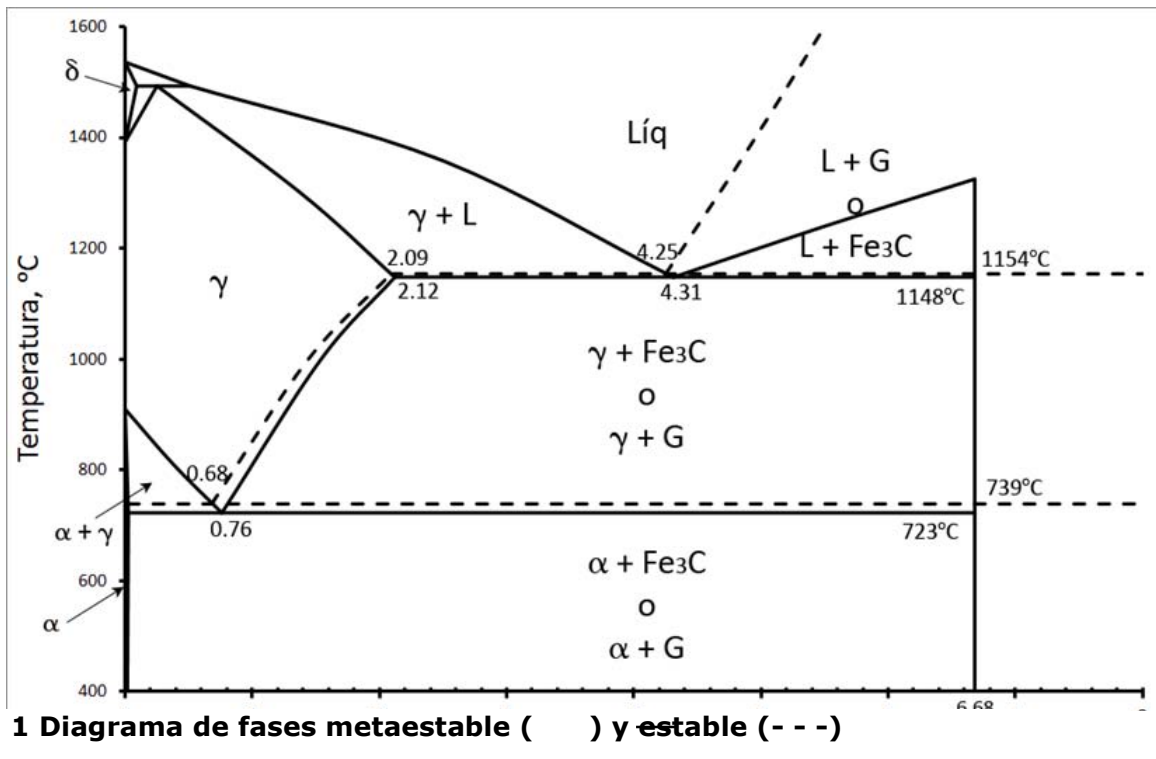


Figura 1 Diagrama de fases metaestable ( ) y estable ( - - - )

## 1.2 Clasificación de los Hierros colados

Los tipos básicos de hierros colados son clasificados respecto a la forma en que se encuentra o precipita el carbono en la microestructura:

- Hierro blanco: esencialmente libre de grafito, el carbono está presente como carburo de hierro (Fe<sub>3</sub>C), el cual es duro y quebradizo. Presenta una superficie de fractura de color blanco.
- Hierro gris: contienen hojuelas de grafito. Presenta una superficie de fractura de color gris.

- Hierro dúctil: también llamado hierro nodular o de grafito esferoidal. Su nombre se debe a que como material obtenido de colada presenta una apreciable ductilidad en comparación con los demás hierros colados.
- Hierro maleable: contiene nódulos compactos de hojuelas de grafito, a **estas hojuelas también se les conoce como "carbón revenido" porque se obtienen de un extenso tratamiento térmico aplicado a un hierro blanco de composición adecuada.** [1]

### **1.3 Hierros nodulares**

Los hierros nodulares presentan una estructura de colada con partículas de grafito en forma esferoidal, esta forma le permite al material ser dúctil y resistente a choques. La forma de las hojuelas de grafito se cambia en nódulos gracias a pequeñas adiciones de magnesio y/o cerio al metal fundido antes del vaciado. [2]

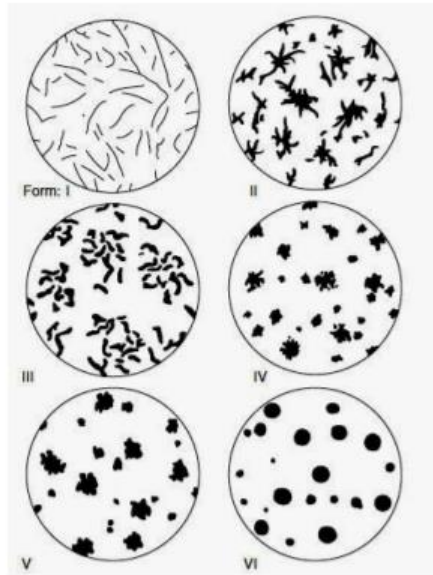
Para obtener el hierro nodular es necesario realizar una nodularización y posteriormente un tratamiento de inoculación.

La inoculación en el hierro nodular tiene como objetivo la precipitación homogénea del carbono, producir una mayor densidad de nódulos, así como inhibir el blanqueo.

Al igual que una fundición gris, este material tiene la ventaja de poseer excelente fluidez, de este modo es posible obtener piezas de reducidos espesores. [3]

Algunas aplicaciones típicas del hierro nodular son:

- Cigüeñales, pistones, y cabeza de cilindros para automóviles y motores diésel
- En acerías, rodillos de trabajo, puertas para horno, rodetes de mesa y cojinetes.
- Llaves para tuercas, palancas, manivelas, marcos de sujeción y chucks.
- Troqueles diversos para dar forma al acero, aluminio, bronce, latón y titanio. [4]



**Figura 2 formas de grafito tipo A [5]**

El tratamiento de nodularización consiste añadir al baño metálico elementos esferoidizantes, en cantidades pequeñas y entre los principales se encuentra el magnesio, cerio y calcio, pero industrialmente solo el Magnesio y Calcio son tomados en cuenta, y estos elementos son acompañados por otros que sirven como portadores conformando la aleación deseada. [6]

Durante la nodulización se agrega magnesio, por lo general en forma diluida como una ferroaleación de FeSiMg. Finalmente, es esencial una inoculación, para causar una nucleación heterogénea. [7]

En la actualidad existe una gran cantidad de tratamientos para producir hierro nodular todos ellos basados en aleaciones de magnesio. Para la formación de nódulos el porcentaje mínimo necesario de magnesio es del 0.01% con adiciones de cerio y otras tierras raras, o de 0.02% cuando se usa magnesio puro. Para piezas de espesores más gruesos se requiere mayores cantidades de magnesio residual. Los tratamientos de nodularización más comunes son:

Cuchara abierta. Es el método más sencillo y utilizado, donde la aleación de magnesio, se coloca en el fondo de la cuchara de tratamiento vacía, vertiendo el metal sobre ella.

Cuchara abierta (Sándwich). Se coloca la aleación de magnesio en la misma cuchara como el método anterior, solo que se protege colocando unos trozos de metal sobre ella para retrasar la reacción y reducir la temperatura del metal

mejorando la recuperación del magnesio. Se puede utilizar Fe-Si para alternar el proceso de inoculación.

Métodos de cuchara cerrada. Este método evita la admisión de oxígeno en la cuchara además de que permite una reducción de humo y destellos luminosos, mejora en la recuperación del magnesio, menor pérdida de temperatura y mayor regularidad en el magnesio final.

Método de inmersión. En este procedimiento se sumerge una campana de grafito o revestida con refractario conteniendo la aleación de magnesio en su interior. La campana se mantiene casi en el fondo de la cuchara provocando una reacción violenta. Su eficiencia es similar a la del método sándwich, pero es más común para tratar grandes cantidades de metal.

Procesos INMOLD. O proceso instantáneo, en este método se coloca la aleación de Fe-Si-Mg en una cámara de reacción situada en los canales de entrada del metal en el molde, se requiere un control de la velocidad de llenado. [7]

Los grados o clases de hierros nodulares y las características de la microestructura que presentan se muestran en los tres primeros números de la especificación, que se refieren al valor aproximado de resistencia a la tensión, resistencia a la cedencia y porcentaje de elongación, respectivamente. [8]

**Tabla 1 Clases de hierros nodulares. [9]**

<b>Clase</b>	<b>Microestructura</b>	<b>Tratamiento térmico</b>	<b>Estructura controlada por:</b>
<b>60-40-18</b>	Completamente ferrita	Recocido	Tratamiento térmico
<b>65-45-12</b>	Ferrita + pequeños porcentajes de perlita	Ninguno	Composición química
<b>80-55-06</b>	Ferrita + grandes porcentajes de perlita	Ninguno	Composición química
<b>100-70-03</b>	Completamente perlita	Normalizado	Tratamiento térmico
<b>120-90-02</b>	Martensita revenida	Temple y revenido	Tratamiento térmico

**Tabla 2 Composición química de los hierros nodulares. [9]**

Clase	Composición, %						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
<b>60-40-18</b>	3.50-	2.20-	0.30	0.50	0.015	0.06	---
	3.90	3.00	Max.	Max.	Max.	Max.	
<b>65-45-12</b>	3.50-	2.50-	0.40	0.05	0.015	0.10	---
	3.90	2.80	Max.	Max.	Max.	Max.	
<b>80-55-06</b>	3.50-	2.20-	0.20-	0.05	0.015	0.10	0.20-
	3.90	2.70	0.50	Max.	Max.	Max.	0.40
<b>100-70-03</b>	3.50-	2.20-	0.60	0.05	0.015	0.10	0.20-
	3.80	2.70	Max.	Max.	Max.	Max.	0.50
<b>120-90-02</b>	3.50-	2.20-	0.60	0.05	0.015	0.10	0.20-
	3.80	2.70	Max.	Max.	Max.	Max.	0.50

**Tabla 3 Clasificación de la fundición nodular teniendo en cuenta sus características mecánicas de acuerdo con la norma ASTM A536. [10]**

Clase	R. Tensión		R. Cedencia		Elongación (%)	Dureza (HB)
	MPa	ksi	MPa	ksi		
<b>60-40-18</b>	414	60	276	40	18	167
<b>65-45-12</b>	448	65	310	45	12	167
<b>80-55-06</b>	552	80	379	55	6	192
<b>100-70-03</b>	689	100	483	70	3	---
<b>120-90-02</b>	827	120	621	90	2	331

### 1.3.1 Efecto de los elementos aleantes en el hierro nodular

Carbono: genera mayor fluidez del metal líquido y mejora las características de contracción. Un exceso de carbono, en suspensión, reduce la fluidez. El volumen del grafito es tres veces el volumen del hierro; cuando el hierro nodular solidifica, el carbón en solución precipita como grafito y causa una expansión, la cual puede compensar la contracción del hierro por la transformación de líquido a sólido.

Silicio: es un potente grafitizante. Dentro de los límites normales de composición, incrementando la cantidad de silicio se promueven estructuras que tienen mayores cantidades de ferrita. Incrementando la cantidad de ferrita se reduce la resistencia a la cedencia y a la tensión, pero se incrementa el porcentaje de elongación y la resistencia al impacto.

Manganeso: está entre los elementos aleantes comúnmente usados para mejorar las propiedades mecánicas del hierro nodular, el manganeso actúa como un estabilizador de perlita e incrementa la resistencia, pero reduce la ductilidad y maquinabilidad. También potencializa la segregación en los límites de grano y debe ser controlado para fabricar un ADI (Austempered Ductile Iron).

Níquel: frecuentemente usado para incrementar la resistencia, ya que promueve la formación de perlita fina y para incrementar la templabilidad.

Cobre: promueve la formación de perlita para una alta resistencia con buena tenacidad y maquinabilidad.

Molibdeno: es usado para aumentar la templabilidad en secciones gruesas en la producción de un ADI. La cantidad agregada debe ser controlada debido a la tendencia a segregar en los límites de grano formando carburos. <sup>[9]</sup>

Cromo: tiene una tendencia de segregación más fuerte que Mn y es propenso a formar carburo intercelular  $Cr_3C$ , disminuyendo así propiedades de carga y aumentando la tendencia a porosidad. <sup>[11]</sup>

## 1.4 Tratamientos térmicos en el hierro nodular

Los tratamientos térmicos más importantes y sus propósitos son:

- **Relevado de tensiones:** El relevado de esfuerzos es un proceso que tiene por objetivo liberar los esfuerzos residuales generados por procesos de manufactura tales como maquinados profundos forja o soldadura. El tratamiento se realiza a una temperatura entre 600-700°C y se enfría al aire. Se puede realizar en hornos de sales, atmósfera y vacío.
- **Recocido:** para mejorar la ductilidad y tenacidad, también para remover carburos eutécticos. De acuerdo a las propiedades exigidas del material se emplean diferentes procedimientos de recocido, generalmente se aplica el siguiente procedimiento, Calentamiento a una temperatura entre 550° y 650°C, mantenimiento de la temperatura entre 30 y 120 minutos de acuerdo al espesor de la pieza de trabajo, refrigeramiento lento y uniforme en ceniza caliente o en el horno.
- **Normalizado:** para mejorar la resistencia con algo de ductilidad. Consiste en un calentamiento ligeramente superior a la temperatura crítica seguido de un enfriamiento a temperatura ambiente.
- **Temple y revenido:** para incrementar la dureza o para mejorar la resistencia, el revenido permite eliminar las tensiones generadas por el temple. El tratamiento de temple consiste en enfriar de manera controlada piezas calentadas a temperaturas de entre 750 °C y 1.300 °C. Dependiendo del material base, la temperatura y tiempo de calentamiento, y severidad del enfriamiento se puede conseguir una amplia gama de durezas.

Posterior al temple se realiza un tratamiento de revenido a temperaturas de entre 200° y 300 °C con la finalidad de optimizar la tenacidad y reducir la fragilidad de las piezas.

- **Austemperizado:** para producir una microestructura de alta resistencia, con algo de ductilidad y buena resistencia al desgaste.
- **Endurecimiento superficial:** para producir una superficie local de elevada dureza y resistente al desgaste El endurecimiento superficial se puede conseguir, fundamentalmente, mediante dos procedimientos: modificando la composición química de la superficie mediante la difusión de algún elemento químico (carbono, nitrógeno, azufre, etc.) en cuyo caso se le conoce como

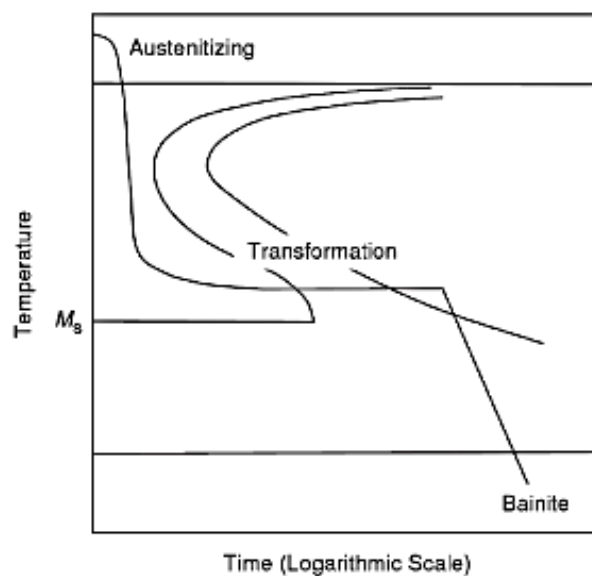
tratamiento termoquímico o modificando sólo la microestructura de la superficie por tratamiento térmico, conociéndose entonces como tratamiento superficial.<sup>[12]</sup>

### 1.4.1 Austempering

El austempering es otro tratamiento de endurecimiento diseñado para reducir las distorsiones y fisuras en aceros de alto carbono. El objetivo del austempering, sin embargo, es formar bainita más que martensita. El acero es austenizado, templado en sales fundidas y mantenido a temperatura por encima de  $M_s$ , permitiendo entonces la transformación a bainita a esa temperatura.

El revenido no es necesario. Como se muestra, la temperatura en el centro y en la superficie de una pieza de austempering son las mismas a la temperatura de mantenimiento y la ausencia de gradientes térmicos en la transformación posterior a bainita minimiza la generación de tensiones durante el austempering.

La ventaja principal del austempering, a parte de la reducción de distorsión o fisuración de piezas de acero de alto carbono, es que la tenacidad aumenta en gran medida en relación con una martensita revenida con el mismo nivel de dureza.<sup>[10]</sup>



**Figura 3 Diagrama esquemático del ciclo de tratamiento térmico del austempering para un acero de medio carbono.**<sup>[13]</sup>



Un ciclo de austempering típico incluiría el calentamiento a una temperatura dentro del intervalo de austenización (790 a 910 °C); Posteriormente un enfriamiento rápido en un baño de sal mantenido a una temperatura adecuada, usualmente en el intervalo de 260 a 400 °C.

Para el austempering, el metal debe pasar de la temperatura de austenización a la temperatura del baño de austempering lo suficientemente rápido para que no se produzca ninguna transformación de austenita durante el enfriamiento, y luego mantenerse a la temperatura del baño el tiempo suficientemente para asegurar la transformación completa de austenita a bainita. [14]

## **1.5 Hierros ADI (Austempered Ductil Iron)**

ADI, es un hierro nodular fundido, aleado o no, tratado térmicamente, cuya matriz contiene ferrita acircular y austenita de alto carbono, donde tales microconstituyentes en conjunto, son llamados ausferrita. [15]

Los hierros dúctiles austemperados han experimentado notables avances en aplicaciones de alcance industrial, transformándose en una alternativa de ingeniería altamente competitiva, debido a su excelente combinación de propiedades mecánicas y costos de fabricación.

Los Grados ADI poseen propiedades mecánicas significativamente superiores a las de los grados estándar de las fundiciones esferoridales, debiéndose destacar la resistencia mecánica, la tenacidad, la ductilidad y la resistencia al desgaste. Dependiendo de las condiciones del tratamiento térmico, se pueden alcanzar Grados ADI con propiedades mecánicas perfectamente comparables a las de los aceros forjados o fundidos de baja aleación.

El austemperizado se logra por calentamiento de la pieza colada a una temperatura dentro de la fase de austenita, mantenida a esta temperatura por el tiempo requerido para saturar la austenita con carbono, seguido de un enfriamiento a una temperatura por arriba de Ms con una rapidez suficiente para evitar la formación de perlita u otro tipo de estructuras, entonces es mantenida a la temperatura de austemperizado por el tiempo necesario para producir la estructura optima de ferrita acicular y austenita enriquecida en carbono. [12]

Los Grados ADI se obtienen por tratamiento térmico, mediante el cual se consigue la transformación isotérmica de la austenita. Consta de dos etapas perfectamente diferenciadas:

**Austenización:** Es imprescindible alcanzar el estado austenítico y, por ello, debe recurrirse a temperaturas de calentamiento variables entre 850°C – 925°C, debiéndose garantizar el estado austenítico en todas y cada una de las partes del componente fundido.

**Transformación Isotérmica:** La clave del mantenimiento isotérmico se encuentra en garantizar la reacción bainítica a temperatura constante, recurriéndose a rangos de temperatura comprendidos entre los 250°C – 450°C. De este modo, se desarrollan estructuras formadas por cantidades variables de ferrita acicular y austenita retenida. La temperatura de mantenimiento isotérmico y el tiempo de permanencia determinan la relación ferrita-austenita y, consecuentemente, el conjunto de las propiedades mecánicas del material.

Las propiedades mecánicas del ADI pueden variar con la temperatura de austemperizado. A bajas temperaturas de transformación (260°C) se produce una estructura fina con alta resistencia mecánica y resistencia al desgaste. A altas temperaturas de transformación (370°C) resulta una estructura gruesa que exhibe alta resistencia a la fatiga y buena ductilidad.

**Tabla 4 ASTM A 897-90/A 897M-90 para los grados ADI. [16]**

Grado	Resistencia tensión (MPa)	Resistencia cedencia (MPa)	Elongación (%)	Energía impacto (J)	Dureza (BHN)
1	850	550	10	100	269-321
2	1050	700	7	80	302-363
3	1200	850	4	60	341-444
4	1400	1100	1	35	388-477
5	1600	1300	N/A	N/A	444-555

Los materiales ADI son fundiciones base hierro, en las que se destaca la presencia de grafito en su micro-estructura. Dicha presencia hace que la densidad de estas fundiciones sea un 10% inferior a la de los aceros.

A esas diferencias de peso es necesario añadir la elevada resistencia susceptible de alcanzarse mediante el adecuado tratamiento de temple isotérmico.

El conjunto de Grados ADI ofrece una relación resistencia/peso excelente, que permite abordar estrategias de diseño de componentes muy competitivas. A medida que esta relación aumenta, es posible diseñar productos más compactos y ligeros, de modo que no sólo se reduce el peso del componente, sino que se consiguen distintas mejoras.

Reducción de emisiones y consumo, mediante el empleo de componentes de ADI como sustitutos de piezas más pesadas.

Minimización de inercias y mejora de cadenas cinemáticas, gracias a la utilización de grados ADI en lugar de materiales de mayor peso.

De forma complementaria, su aplicación en componentes de contacto ofrece grandes ventajas gracias al efecto lubricante del grafito, favoreciendo la reducción de los coeficientes de fricción. Este fenómeno lubricante se muestra especialmente beneficioso en sistemas de rodadura de tipo ferroviario.

La resistencia al desgaste de los componentes ADI puede modularse en función de las condiciones de servicio de cada aplicación, ajustando el binomio estructural bainita/austenita.

A las consideraciones indicadas, es necesario añadir aquellas que se relacionan con la transformación austenita → martensita, ya que la fricción mecánica favorece dicha evolución estructural, modificándose el comportamiento frente a las sollicitaciones de desgaste.

**Tabla 5 Aplicaciones de los hierros ADI [17]**

<b>Nombre de la pieza</b>	<b>Material remplazado</b>	<b>Ventajas</b>
<b>Engranés axiales (transmisión)</b>	Acero forjado	Mayor producción Menores costos Mejor maquinabilidad Reducción de peso
<b>Engranés de tiempo de motor diesel</b>	Acero 1022 forjado	Reducción del 30% en costos
<b>Cigüeñal</b>	Acero forjado	Menor costo Mayor resistencia a la fatiga Mayor durabilidad Reducción de peso
<b>Disco de embrague</b>	Acero Aluminio	Menor costo Menor peso Mejor resistencia al desgaste
<b>Engranés de caja de transmisión</b>	Acero forjado	Menor costo de operación Operación silenciosa Reducción de peso
<b>Calibrador del disco de frenado</b>	Acero	Menor peso
<b>Caja de transmisión para acoplar el árbol de levas</b>	Acero	Mayor resistencia al desgaste Mejor maquinabilidad

## **1.6 Concepto de corrosión**

Puede definirse como corrosión a la reacción química o electroquímica de un metal o aleación con el medio que lo rodea y que provoca un deterioro en dicho material. <sup>[18]</sup>

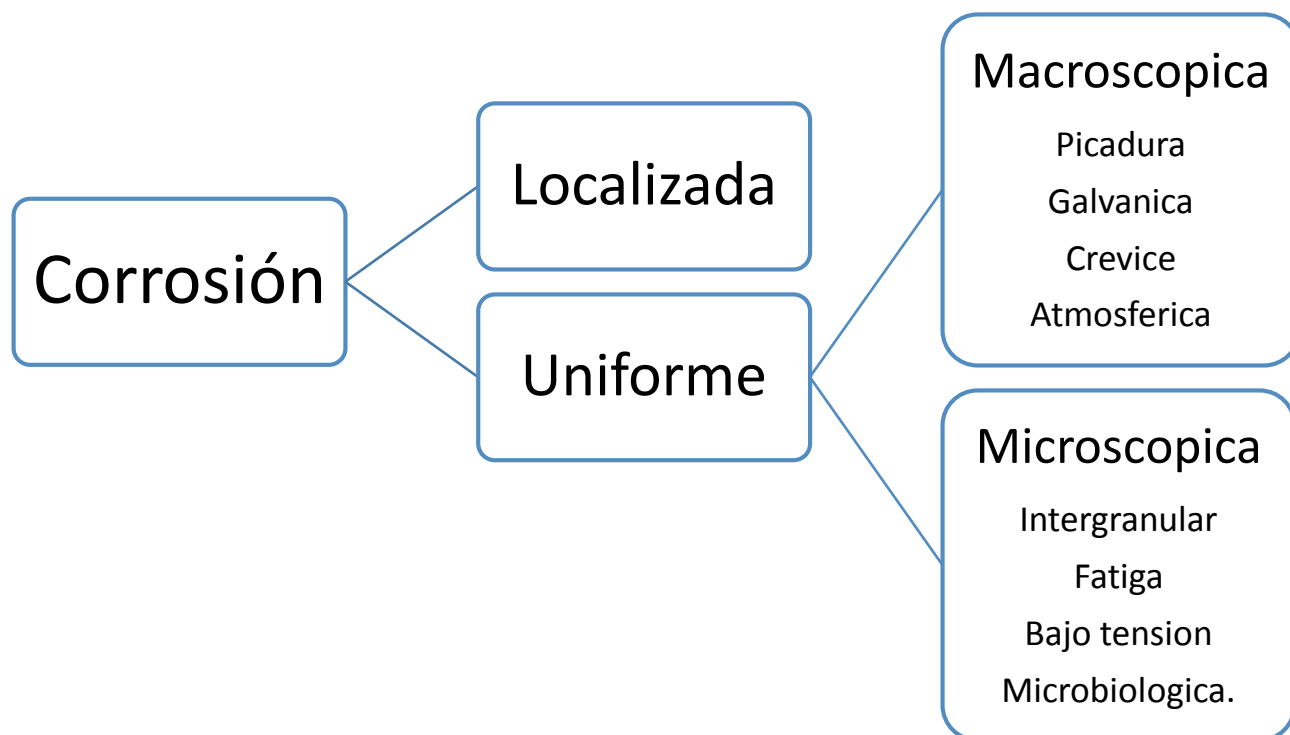
La reacción que se produce depende de la naturaleza química del entorno. La corrosión puede estar acompañada de una pérdida de material, lo que hace necesario tomar ciertas medidas de protección.

En los elementos metálicos el proceso de corrosión es generalmente electroquímico.

En términos económicos se estima que el 5% del producto interno bruto de un país industrializado se gasta directa o indirectamente en prevenir y corregir problemas relacionados con la corrosión metálica. <sup>[19]</sup>

### 1.6.1 Tipos de corrosión

Es posible clasificar los procesos de corrosión recurriendo a distintos criterios como se muestra en la figura 3. Por la naturaleza de la sustancia corrosiva, el mecanismo de corrosión, la morfología de ataque (uniforme, localizado, etc.); por el medio que se produce (corrosión por ácidos, atmosférica, etc.); por las condiciones físicas que la motivan (por cavitación, etc). [18]



**Figura 4 Clasificación de la corrosión**

Uniforme: La corrosión de deterioro uniforme se caracteriza por una reacción química o electroquímica que actúa uniformemente sobre toda la superficie del metal expuesto a la corrosión. Sobre una base cuantitativa, el deterioro uniforme representa la mayor destrucción de los metales, especialmente de los aceros.

Localizada: Este tipo de corrosión es en donde la pérdida de metal ocurre en áreas discretas o localizadas.

Picadura: La picadura es una forma de ataque corrosivo localizado que produce pequeños agujeros en un metal. Este tipo de corrosión es muy destructivo para las estructuras de ingeniería si provoca perforación del metal. Sin embargo, si no existe perforación, a veces se acepta una mínima picada en los equipos de ingeniería. Frecuentemente la picadura es difícil de detectar debido a que los pequeños agujeros pueden ser tapados por los productos de la corrosión.

Atmosférica: Se produce por la reacción del metal con los elementos presentes en la atmósfera como oxígeno, el agua, sal y elementos contaminantes atmosféricos. En la corrosión atmosférica se pueden identificar diferentes ambientes con características particulares de contaminación: ambiente industrial, ambiente marino, o rural.

Microbiológica: Es aquella corrosión en la cual organismos biológicos son la causa única de la falla o actúan como aceleradores del proceso corrosivo localizado. Se produce generalmente en medios acuosos en donde los metales están sumergidos o flotantes. [20]

Electroquímica: La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar. La corrosión más frecuente siempre es de naturaleza electroquímica y resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud de zonas anódicas y catódicas; el electrolito es, en caso de no estar sumergido o enterrado el metal, el agua condensada de la atmósfera, para lo que la humedad relativa deberá ser del 70%.

El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica revela la existencia de infinitos cátodos, mientras que en los ánodos se va disolviendo el metal. A simple vista es imposible distinguir entre una zona anódica y una catódica, dada la naturaleza microscópica de las mismas (micropilas galvánicas). Al cambiar continuamente de posición las zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve totalmente. [21]

Si la concentración de los reactivos y de los productos es uniforme en el electrolito, la ecuación de Butler-Volmer toma la forma:

$$j = j_0 \exp\left(\frac{\eta_a}{\beta_a}\right) - j_0 \exp\left(\frac{\eta_c}{\beta_c}\right) \quad (1)$$

Donde  $\beta_a$  y  $\beta_c$ , son los coeficientes de Tafel anódico y catódico respectivamente:

$$\beta_a = \frac{RT}{\alpha nF} \quad \beta_c = \frac{RT}{(1-\alpha)nF} \quad (2)$$

En la práctica se acostumbra a la representación gráfica del log I versus E que también se conoce como diagrama de Tafel. El diagrama de Tafel se puede generar directamente a partir de la ecuación de Butler-Volmer.

En la práctica, muchos sistemas de corrosión están controlados cinéticamente por la polarización de activación y obedecen por tanto a la ecuación de Butler – Volmer. Si éste es el caso, la representación gráfica del logaritmo de la corriente respecto al potencial aplicado debe presentar un comportamiento lineal (Tafeliano) en sentido anódico y catódico que indica precisamente el control cinético del sistema bajo estudio. [22]

## 1.7 Métodos para determinar la velocidad de corrosión

La aplicación de técnicas de polarización, tales como la polarización potencioestática y la potenciodinámica ha sido muy exitosa en la evaluación de la velocidad de corrosión y también en el estudio de los fenómenos involucrados en la reacción de corrosión. El uso de estas técnicas se ha vuelto rutinario, gracias a la ayuda de computadoras y programas que permiten llevar a cabo de manera automática los experimentos. [23]

Existen diferentes métodos para determinar la velocidad de corrosión de un material, en este caso se usó el método de extrapolación de Tafel; ya que presenta ventajas como la rapidez en las mediciones dando valores casi inmediatos de la velocidad de corrosión.



### 1.7.1 Potencial corrosión (Ecorr)

En esencia, la teoría del potencial mixto postula que las reacciones de oxidación y reducción en la corrosión electroquímica se producen a igual velocidad sobre la superficie metálica.

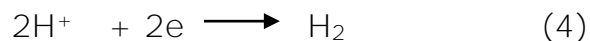
Las reacciones de oxidación o anódicas pueden ser representadas por la ecuación general siguiente:



La teoría de potencial mixto propone que todos los electrones generados por las reacciones anódicas son consumidos por las correspondientes reacciones de reducción o catódicas. [24]

Las reacciones catódicas más comunes en soluciones acuosas son las siguientes:

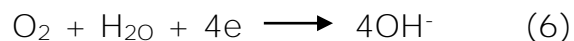
- Reducción de protones (deprotonación, soluciones ácidas)



- Reducción de oxígeno (solución ácida)



- Reducción de oxígeno (solución neutra o básica)



- Reducción de iones metálicos



- Deposición de iones metálicos



### 1.7.2 Extrapolación de Tafel

Las ecuaciones de Tafel describen los límites anódico y catódico de la ecuación de Butler-Volmer. Su descubrimiento a principios del siglo veinte, en el año de 1904, por Tafel al estudiar el comportamiento del sobrepotencial para la reacción de desprendimiento de  $H_2$  en función de la densidad de corriente, precedió durante muchos años a la ecuación de Butler-Volmer.

Cuando se obtiene una curva de polarización experimental, la extrapolación de la recta que aparece en el dominio Tafeliano al valor del potencial de equilibrio, permite determinar la densidad de corriente de intercambio. El inverso del valor de la pendiente de estas rectas proporciona el valor de los coeficientes de Tafel,  $\beta_a$  y  $\beta_c$ . [22]

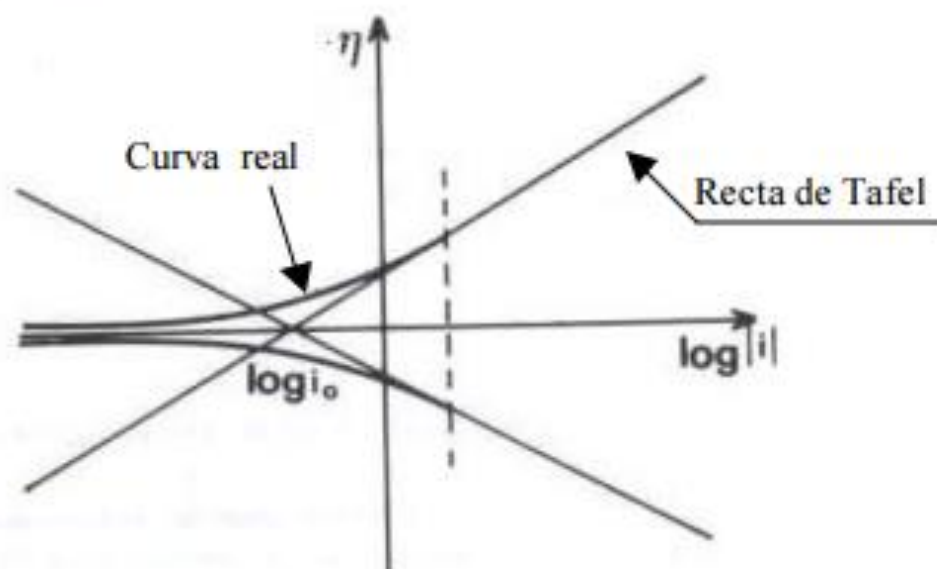


Figura 5 Representación de una curva de extrapolación de Tafel [23]

# **Capítulo 2 Desarrollo experimental**

## 2.1 Preparación de piezas

Se contaban con 4 piezas de hierro nodular con diferentes adiciones de Cr, para poder realizar las pruebas se requería hacer el corte de las piezas hasta tener probetas pequeñas de aproximadamente un centímetro por lado y 0.5 centímetros de espesor. Para el corte de las piezas se usó un disco MetCut debido a la dureza de las mismas.

Se cortaron y montaron 8 piezas para cada una de las composiciones empleadas, 4 para las pruebas realizadas sin tratamiento térmico y 4 para las pruebas realizadas después del tratamiento al material.

Una vez cortadas las piezas, estas se montaron en resina epóxica para tener un mejor manejo de las mismas durante las pruebas.

**Tabla 6 Composiciones químicas de los hierros nodulares**

	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Cu	%Ni	%Al	%P	%S	%Mg	P (g/cm <sup>3</sup> )
Llegada	3,62	2,453	0,595	0,1347	0,3377	0,0418	0,0119	0,0129	0,0119	0,0449	7,571
1,50%	3,761	2,485	0,601	1,343	0,3348	0,0416	0,0155	0,0159	0,0208	0,0902	7,551
2%	3,624	2,303	0,629	1,951	0,3451	0,0262	0,014	0,0164	0,0185	0,0615	7,564
2,50%	3,783	2,341	0,597	2,485	0,3065	0,0411	0,0158	0,0173	0,0255	0,0864	7,549

Los contenidos de Cr en las piezas se muestran en la tabla 2.5, las piezas fueron analizadas por chispa, para el desarrollo de este trabajo los contenidos se manejarán como llegada (0.1347%Cr), 1.5% (1.343%Cr), 2%(1.951%Cr) y 2.5%(2.485%Cr).

## 2.2 Tratamiento térmico

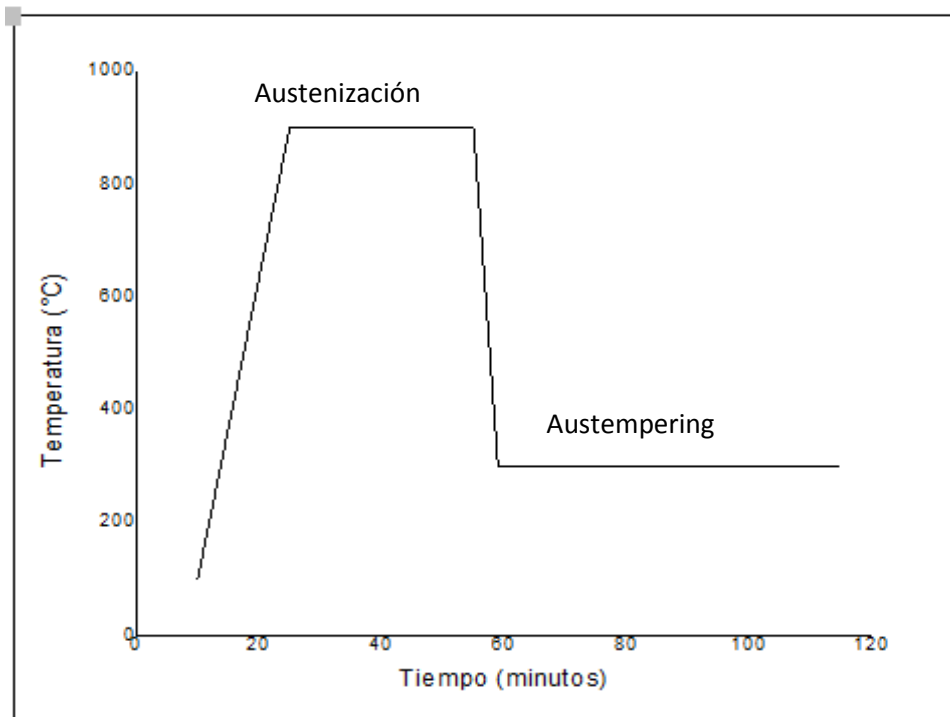
Las dimensiones reales de las piezas de estudio variaban de acuerdo a cada composición, se contaban con piezas en barras de 1 cm de espesor y planchas; por lo que se cortaron hasta tener cubos de aproximadamente 1 cm de lado.

Las piezas fueron desbastadas hasta tener una superficie homogénea, se sujetaron a alambres y se sumergieron en una solución de sulfato de cobre para evitar la descarburización.

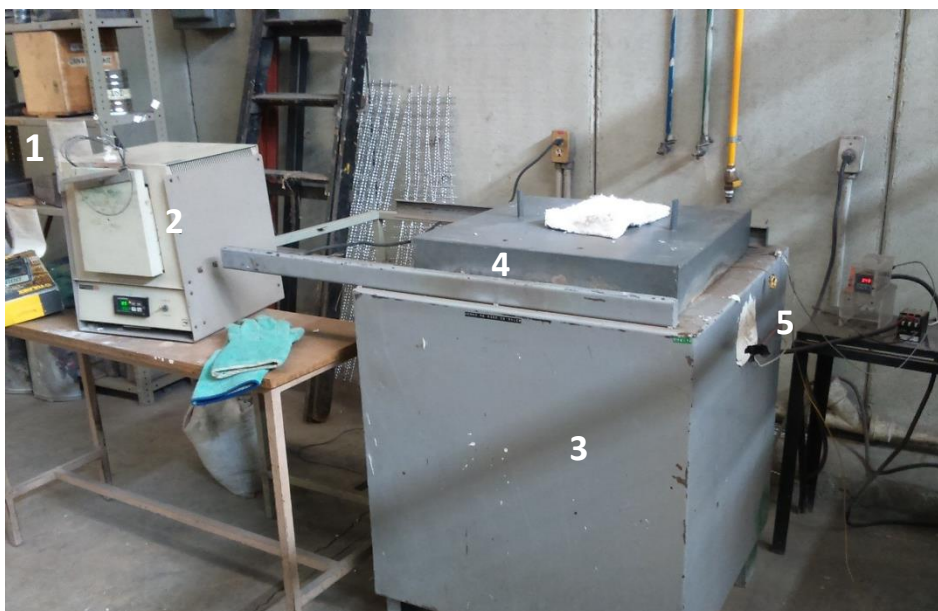
Las piezas se colocaron en una mufla a 940°C durante 30 minutos para el tratamiento de austenización.

La temperatura de la mufla, además del indicador se verificaba con la ayuda de un termopar.

El enfriamiento en baños de sales se realizó de manera inmediata al salir las piezas de la mufla; el baño se encontraba a 350°C y el tiempo de permanencia fue de 60 minutos.



**Figura 6 Tratamiento isotérmico aplicado**



**Figura 7** Equipo usado para el tratamiento; 1) Piezas; 2) Mufla; 3) Horno de resistencia eléctrica; 4) Baño de sal; 5) Termopar de medición de temperatura de sales

## 2.3 Preparación de probetas

Las piezas fueron montadas en resina epóxica se llevaron a desbaste grueso en lija de banda número 80 por ambos lados. En uno de los lados se preparó la superficie con una serie de lijas en el siguiente orden; 120, 240, 320, 400, 600. Este procedimiento se realizó en 3 piezas para cada composición sin tratamiento térmico y 3 piezas para cada composición con tratamiento térmico.

## 2.4 Técnicas electroquímicas

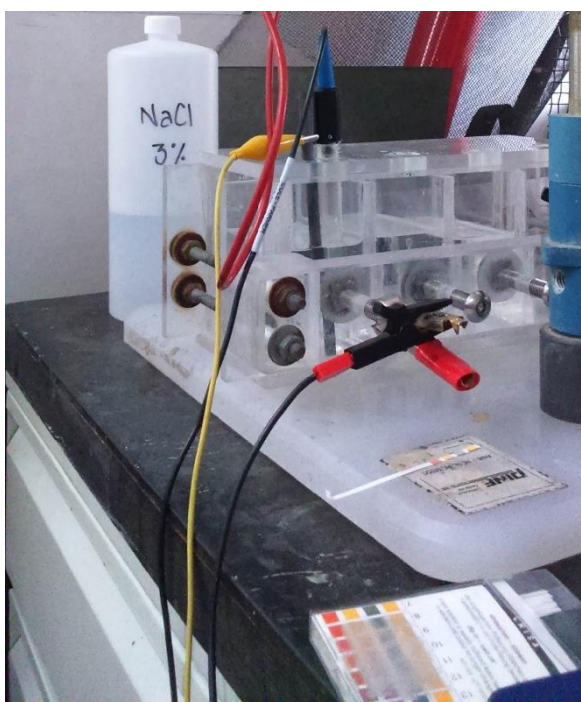
Para las pruebas de corrosión se usó una celda típica de tres electrodos, como electrodo de referencia se usó Ag/AgCl, y un contra electrodo de barra de grafito.

La secuencia de las técnicas electroquímicas empleadas fue:

- Ecorr vs, t (1h)

- Curvas de polarización en estado estacionario, partiendo de  $E_{corr}$  aplicando un sobrepotencial ( $\eta$ ) de -500mV a 1000mV, con una velocidad de barrido de 1mV/seg.
- Una vez obtenidas las curvas de polarización se realizó la extrapolación de Tafel en estado estacionario, **partiendo del  $E_{corr}$  dando un  $\eta \pm 300$  mV** con una velocidad de barrido de 1mV/seg para determinar la  $V_{corr}$  y **parámetros  $\beta_a$  y  $\beta_c$** .

El medio en el que se realizaron las pruebas fue NaCl al 3% y todas las pruebas se realizaron por triplicado.



**Figura 8 Celda electroquímica empleada en las pruebas de corrosión**

La celda electroquímica se conectó a un equipo de Gills AMC Instruments para realizar las mediciones, los datos fueron analizados mediante el software BioLogic EC-Lab para el cálculo de la velocidad de corrosión.

## **2.5 Análisis metalográfico**

Se tomó una probeta para cada porcentaje de Cr sin tratamiento (llegada, 1.5%, 2% y 2.5%), y una para cada porcentaje de Cr con tratamiento isotérmico.

Las piezas se llevaron a desbaste con lijas en el siguiente orden: 80, 120, 240, 320, 400 y 600; posteriormente pulido fino en paño EXTEC con alúmina de 0.3  $\mu\text{m}$ , hasta espejo.

El ataque se realizó con nital 2 para revelar la microestructura y observar en microscopio óptico marca Olympus.



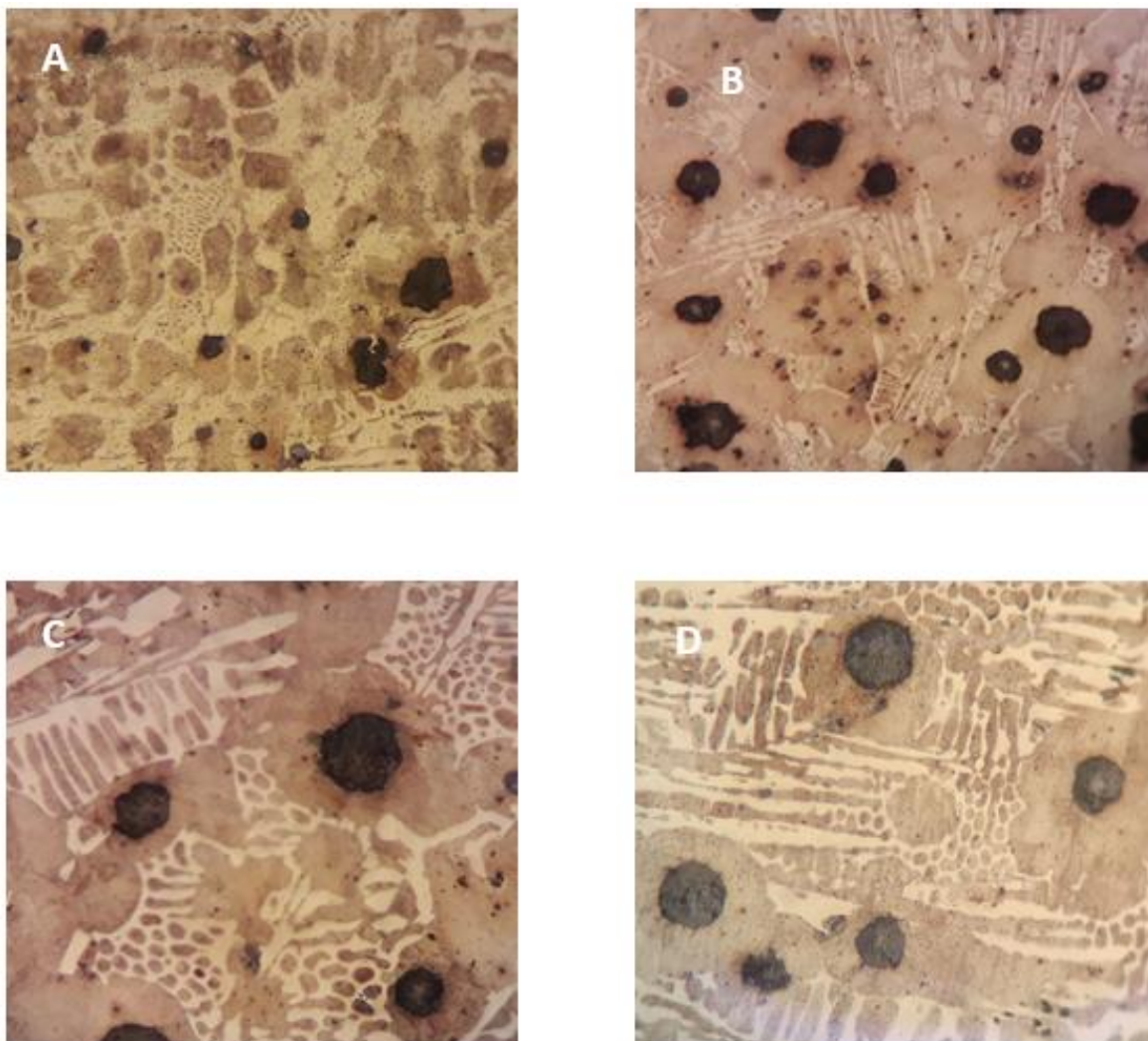
# **Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados**

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas para determinar la velocidad de corrosión así como el análisis metalográfico del hierro nodular empleado.

### 3.1 Análisis metalográfico

#### 3.1.1 Análisis metalográfico de los hierros nodulares sin tratamiento térmico.

Las imágenes fueron tomadas en microscopio óptico a 20X atacadas con Nital 2.



**Figura 9 Metalografías de los hierros nodulares sin tratamiento térmico a 20x atacadas con Nital 2; A) Llegada; B) 1.5% Cr; C) 2% Cr; D) 2.5% Cr**

La figura 8 muestra las metalografías de los hierros nodulares antes del tratamiento térmico; en el caso del hierro nodular de llegada (A) el tamaño de nódulo no es homogéneo, ya que presenta diferentes tamaños en la misma estructura y la matriz es ferrítica-perlítica, se puede observar cierta cantidad de carburos ledeburíticos mientras que para el hierro con contenido de 1.5% Cr (B) la densidad de nódulos incrementa siendo el tamaño más homogéneo, la matriz que se presenta es perlítica.

Para los contenidos de Cr de 2 y 2.5% se sabe que las piezas no tuvieron un tratamiento de inoculación durante el proceso de fundición a lo que se puede atribuir la falta de homogeneidad en el tamaño y densidad de nódulos.

Las piezas con 2% de adición de Cr (C) muestran una matriz perlítica-ferrítica con algunos carburos ledeburíticos mientras que las piezas con contenido de Cr de 2.5% (D) presentan nódulos de grafito mejor formados con una matriz perlítica-ferrítica y carburos ledeburíticos.

### **3.1.2 Análisis metalográfico de los hierros nodulares con tratamiento isotérmico.**

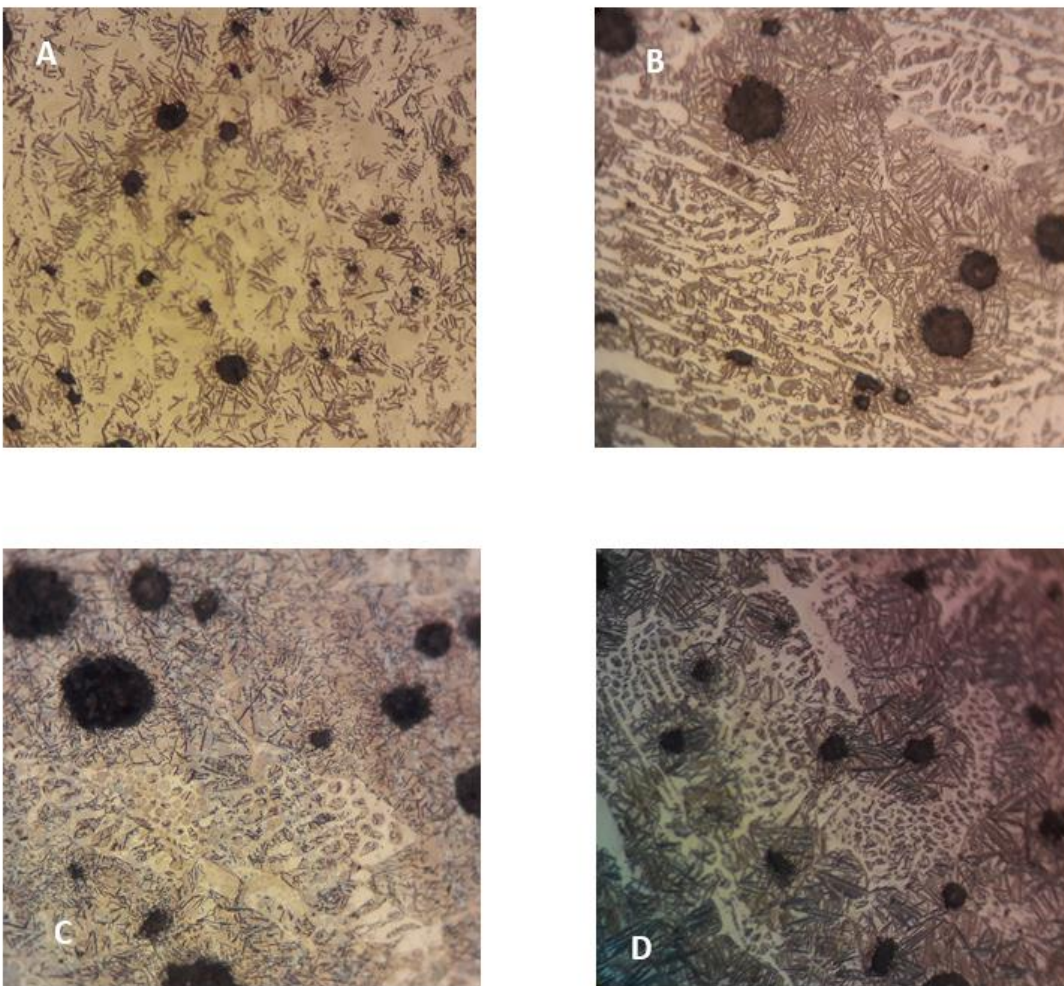
La figura 9 muestra las piezas después del tratamiento isotérmico aplicado al hierro nodular, las piezas muestran una matriz austenítica, cerca de los nódulos se nota una mayor concentración de ferrita acircular (la ferrita acircular se puede presentar en forma de placas o listones), para la pieza de llegada (A) la formación de placas de ferrita es menor, siendo estas placas muy delgadas y con poca formación alrededor del nódulo de grafito; sin embargo en las piezas con contenidos de Cr mayores presentan una mayor formación de placas de ferrita.

Los elementos promotores de carburos, como el Cr, Mn y Mo presentes en la aleación, se encontrarán preferentemente en solución dentro de los carburos ledeburíticos haciéndolos más estables.

Para las piezas con contenido de 1.5% de Cr (B) la mayor cantidad de ferrita se presenta alrededor de los nódulos a pesar de no tener una densidad de nódulo muy alta.

Las piezas con contenido de Cr de 2% (C) presentan gran cantidad de ferrita, sin embargo las placas son más delgadas que en las piezas con el contenido de cromo más alto.

La pieza con 2.5% de cromo (D) presenta la mayor cantidad de ferrita acircular con placas más gruesas, además la presencia de las placas es visible no solo cerca de los nódulos de grafito.



**Figura 10 Metalografías de los hierros nodulares con tratamiento isotérmico a 20x atacadas con Nital 2 ; A) Llegada; B) 1.5% Cr; C) 2% Cr; D) 2.5% Cr**

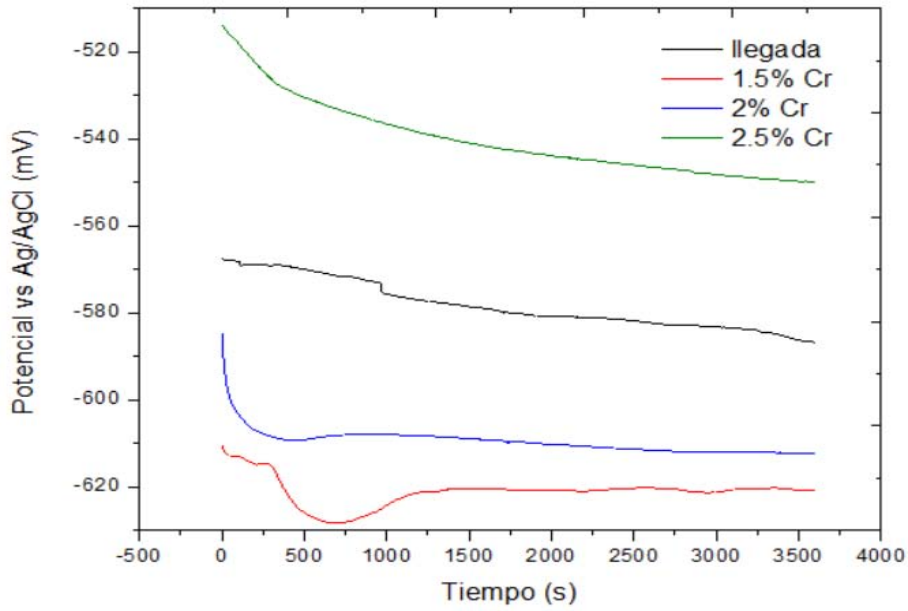
**Tabla 7. Caracterización de metalografías**

	Sin tratamiento isotérmico		Con tratamiento isotérmico	
	% Nodularidad	Matriz	% Nodularidad	Matriz
<b>Llegada</b>	15%	Ferrítica-perlítica con grafito tipo A forma V	10%	Ferrítica-perlítica con grafito tipo A forma I y VI
<b>1.5% Cr</b>	30%	Perlítica con grafito tipo A formas V-VI	15%	Perlítica-ferrítica con grafito tipo A forma I y VI
<b>2% Cr</b>	20%	Perlítica-ferrítica con grafito tipo A forma V	20%	Perlítica-ferrítica con grafito tipo A forma I y VI
<b>2.5% Cr</b>	20%	Perlítica-Ferrítica con grafito tipo A forma V	20%	Perlítica-ferrítica con grafito tipo A forma I y VI

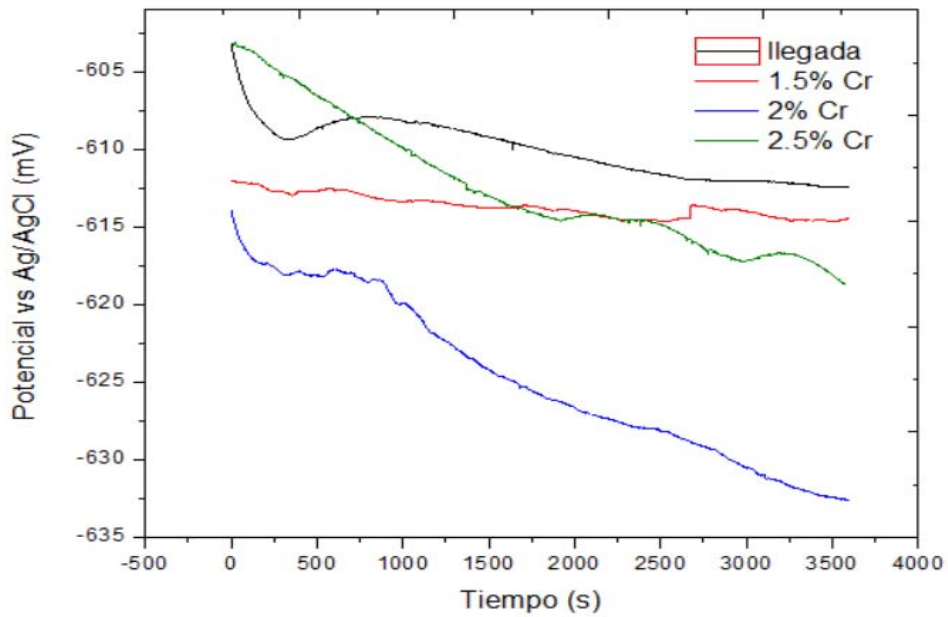
### 3.2 Potencial de corrosión vs tiempo ( $E_{corr}$ vs. $t$ )

Los siguientes esquemas muestran la comparación del potencial en función del tiempo para cada composición en los hierros usados en las pruebas. El área de contacto del hierro con la solución de NaCl al 3% en peso fue de 0.1963 cm<sup>2</sup>.

Las curvas de polarización en estado estacionario partiendo de  $E_{corr}$  se realizaron aplicando un  $\eta$  de -500mV a 1000mV, con una velocidad de barrido de 1mV/seg.



**Figura 11 Potencial vs tiempo de hierro nodular en solución de NaCl al 3% sin tratamiento isotérmico**



**Figura 12 Potencial vs tiempo de hierro nodular en solución de NaCl al 3% con tratamiento isotérmico**

En las gráficas de potencial tiempo para los hierros nodulares (figura 10) se puede ver que el contenido de Cr de 2.5% tiene un potencial de corrosión menos negativo en comparación con el resto de las piezas, siendo el contenido 1.5% de Cr el potencial más negativo. Para los 4 contenidos de Cr las piezas permanecieron prácticamente constantes y con una diferencia relativamente pequeña en los potenciales de cada una.

Para la gráfica de potencial tiempo en hierros tratados isotérmicamente (figura 11), el potencial de las cuatro composiciones no resulto tan estable comparados con los obtenidos en las piezas sin tratamiento térmico siendo el de 2% de Cr el que muestra menor estabilidad, para el resto de composiciones los valores se mantuvieron estables y con poca diferencia en los valores de potencial, se puede considerar que el contenido de Cr de 1.5% es el más estable para las piezas tratadas isotérmicamente.

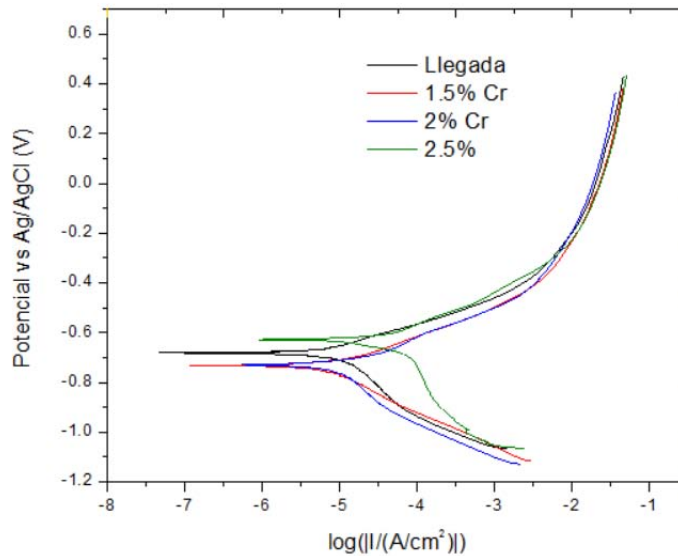
Comparando las piezas con la misma composición con y sin tratamiento térmico es posible decir las piezas sin tratamiento térmico resultan más estables y con valores de potencial menos negativos que las piezas a las que se realizó el tratamiento térmico.

### **3.3 Curvas de polarización**

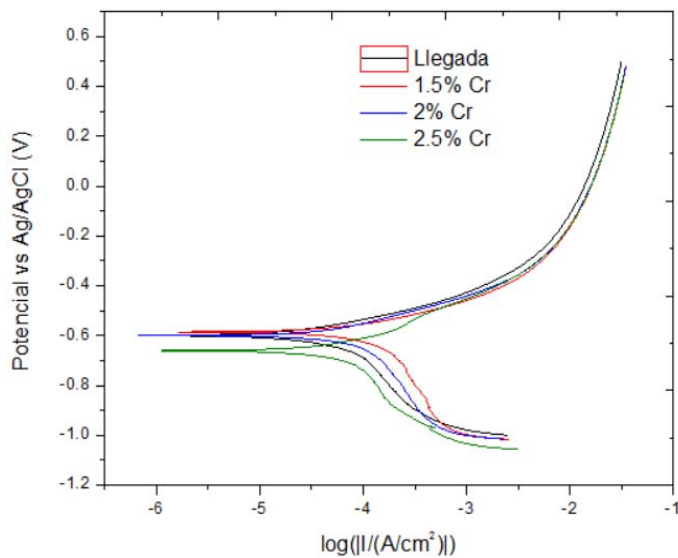
Las curvas de extrapolación de Tafel en estado estacionario se realizaron **partiendo del Ecorr dando un  $\eta \pm 300$  mV** con una velocidad de barrido de 1mV/seg.

Con ayuda del método de extrapolación de Tafel se obtiene el valor de velocidad de corrosión que se presenta en milipulgadas al año (mpy) y milímetros por año (mm/y) presentado en la tabla 9.

### 3.3.1 Curvas de polarización sin tratamiento térmico



**Figura 13** Curva de polarización en estado estacionario de hierro nodular en solución de NaCl al 3% sin tratamiento isotérmico



**Figura 14.** Curva de polarización de hierro nodular en solución de NaCl al 3% sin tratamiento isotérmico



Para las curvas de polarización de los hierros nodulares en estado estacionario (figura 12) no se notaron grandes diferencias entre las curvas, las curvas con 1.5 y 2 %Cr se encuentran prácticamente sobrepuestas, la curva de llegada muestra una ligera diferencia pero prácticamente en el mismo rango de valores. La pieza de 2.5% de Cr es la única que podría considerarse con mayor diferencia, sin embargo, esta diferencia es tan pequeña que no resulta significativa en los valores de velocidad de corrosión.

En la figura 13 las curvas para las cuatro composiciones de Cr resultaron aún más estables, siendo nuevamente la de 2.5% de Cr la única con una pequeña diferencia.

La diferencia entre las curvas de polarización en las figuras 12 y 13 no presenta cambios significativos.

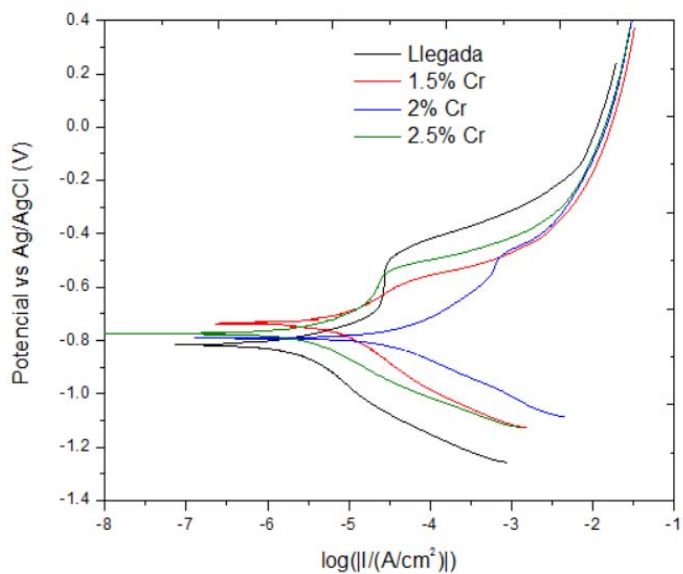
La figura 14 muestra las curvas de polarización en estado estacionario, en las cuales se presenta una mayor variación en el comportamiento con respecto a las composiciones obtenidas en los hierros sin tratamiento térmico.

La curva de llegada y 1.5% Cr muestran cierta tendencia a la pasivación. En el caso de la figura 15 la curva de llegada es la única que muestra cierta diferencia respecto al resto de las composiciones.

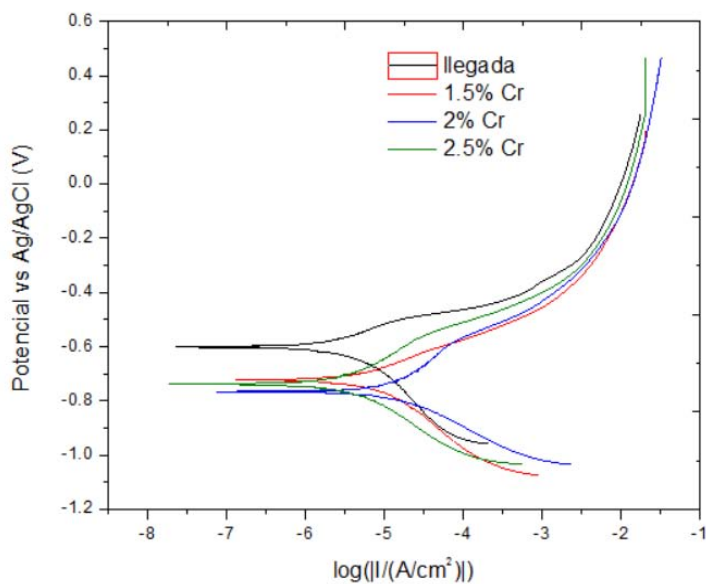
En el caso de los hierros sin tratamiento térmico las piezas con menor contenido de Cr muestran corrosión localizada en toda el área de contacto con la disolución; para las piezas con 2.5% de Cr la corrosión disminuye, mostrando incluso zonas en las que parece no haber ataque sobre la superficie.

Las piezas de llegada y 1.5% de Cr contaban con pequeñas porosidades en la superficie lo que pudo haber afectado los resultados ya que el contacto con la solución era mayor.

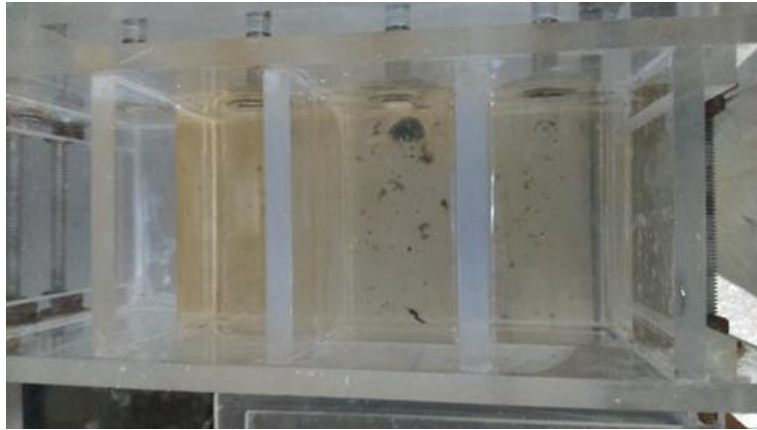
### 3.3.2 Curvas de polarización con tratamiento térmico



**Figura 15** Curva de polarización en estado estacionario de hierro nodular en solución de NaCl al 3% con tratamiento isotérmico



**Figura 16** Curva de polarización de hierro nodular en solución de NaCl al 3% con tratamiento isotérmico



**Figura 17 Solución después de realizar las pruebas de hierro nodular.**

En el caso de las composiciones de llegada, 1.5% y 2% de Cr la disolución se tornaba amarillenta (Figura 16) y en algunos casos era posible ver desprendimientos de material.

Para las piezas de hierro ADI la corrosión presente también fue localizada pero más ligera que la presente en los hierros sin tratamiento térmico.

### **3.4 Resultados de velocidad de corrosión**

Con la composición química de cada uno de los materiales se realizó el cálculo de las densidades teóricas para cada adición de Cr.

$$\rho_{\text{aleación}} = (\%A)(\rho_A) + (\%B)(\rho_B) + \dots + (\%n)(\rho_n) \quad (9)$$

**Tabla 8 Densidades teóricas de los hierros usados en las pruebas**

Muestra	$\rho_{\text{teórica}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Llegada	7.5719
1.5% Cr	7.5513
2% Cr	7.5648
2.5% Cr	7.5497

El software EC-Lab usado para tratar los resultados proporciona los datos de velocidad de corrosión, sin embargo, se realizaron los cálculos de forma manual a partir de la  $i_{corr}$  para corroborar los datos.

$$V_{corr(mpy)} = 0.128 \frac{\mu A/cm^2}{\rho(cm^3)} \times P.E(g) \quad (10)$$

$$V_{corr(mm/y)} = 3.27 \times 10^{-3} \frac{\mu A/cm^2}{\rho(cm^3)} \times P.E(g) \quad (11)$$

Las ecuaciones (10) y (11) muestran el ejemplo de cálculo realizado para obtener la velocidad de corrosión a partir de la  $i_{corr}$ ; una vez que se tiene la velocidad en mpy solo se realiza la conversión a mm/y.

Los resultados presentados en el apéndice muestran las velocidades de corrosión por triplicado de las pruebas realizadas, en algunos resultados existen pequeñas variaciones que pueden ser atribuidas a las diferencias en la superficie de las piezas; como se había mencionado con anterioridad algunas de las piezas presentaban porosidades en la superficie.

Para poder realizar una mejor comparación entre las composiciones y los materiales antes y después del tratamiento térmico se usarán las velocidades promedio

**Tabla 9 Velocidades de corrosión promedio**

	Sin tratamiento térmico		Con tratamiento térmico	
	mpy	mm/y	mpy	mm/y
<b>llegada</b>	3.5803	0.0896	3.3000	0.0830
<b>1.5%</b>	2.6410	0.0670	1.4119	0.0358
<b>2%</b>	2.4721	0.0627	1.1609	0.0294
<b>2.5%</b>	1.4432	0.0363	0.5910	0.0147

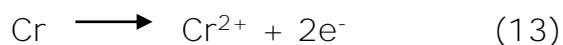
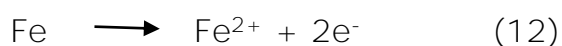
La tabla 9 nos muestra que en caso de los hierros nodulares el comportamiento es el esperado, al aumentar el contenido de Cr en el hierro la velocidad de corrosión disminuye, entre el hierro de llegada y el de 2.5% Cr la diferencia es significativa, sin embargo, para los hierros de 1.5 y 2% de Cr la diferencia es muy pequeña.

Por lo tanto, se puede concluir que el aumento en el contenido de Cr resultará en una disminución de la tasa de corrosión.

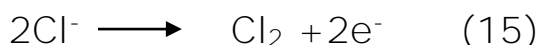
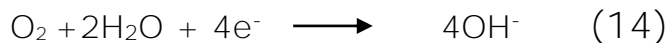
En el caso de los hierros nodulares con tratamiento isotérmico (ADI), la velocidad de corrosión disminuye no solo al aumento de contenido de Cr, también se puede observar una diferencia significativa entre las mismas composiciones respecto al material sin tratamiento térmico.

### **3.5 Mecanismo de reacción presente durante el proceso de corrosión.**

Las reacciones anódicas son las de disolución del material metálico, o sea, el pasaje de iones metálicos al medio corrosivo. <sup>[25]</sup> En la reacción anódica, se producen electrones, los cuales permanecen en el metal, y los átomos del metal forman cationes (Ec. 12)



Una de las reacciones catódicas más importante se da con la reducción en la cual un metal o un no metal se reduce su carga, por lo tanto en la reacción catódica hay un consumo de electrones. <sup>[26]</sup>



El medio en el que se realizaron las pruebas de corrosión es una solución de NaCl al 3%, éste medio forma HCl producto de la reacción del NaCl con el agua.

La reacción de corrosión se da debido a que el HCl presente reacciona con el Fe<sup>0</sup> para formar Fe<sup>2+</sup>.

Los OH<sup>-</sup> producto de la semireacción 14 reaccionan con los iones Fe<sup>2+</sup> y Na<sup>+</sup> formando el Fe(OH)<sub>2</sub> (solución naranja mostrada en la figura 17) y NaOH que da el pH básico a la solución una vez terminadas las pruebas.

# **Capítulo 4. Conclusiones**

- Los potenciales de corrosión en los ensayos de  $E_{corr}$  vs  $t$  para los hierros sin tratamiento térmico a pesar de mostrar diferencias en las que el potencial del hierro al 2.5% son menos negativas que las del hierro de llegada, 1.5 y 2% de contenido de Cr son constantes.
- El comportamiento respecto a la velocidad de corrosión en las piezas sin tratamiento térmico muestra que al aumento en el contenido de Cr, la velocidad de corrosión disminuye.
- Una vez aplicado el tratamiento isotérmico a las piezas la velocidad de corrosión disminuye respecto a la de los hierros sin tratamiento en los mismos contenidos de Cr, además la velocidad de corrosión también disminuyó al incrementar en el contenido de Cr de los hierros nodulares.
- Las curvas de polarización en el material sin tratamiento térmico prácticamente no presentaron cambio, mientras en las piezas con tratamiento isotérmico mostraron poca tendencia a pasivarse en corto tiempo.
- En ambos casos las piezas con contenidos de 2.5% de Cr presentaron los mejores resultados respecto a la velocidad de corrosión.



## Bibliografía

[1] Metals Handbook, "*Heat Treating*", Vol. 4, 9th edition, ASM, pág. 1485-1494, 1503-1506 (1991).

[2] Steven R. Schmid "*Manufactura, ingeniería y tecnología*" Ed. Prentice Hall. Cuarta edición. pág.114

[3] Fundinox Chile S.A "*Fundición nodular*" [online] Disponible en: [http://www.fundinox.cl/ASTM\\_A536.pdf](http://www.fundinox.cl/ASTM_A536.pdf) [Acceso noviembre 2016]

[4] Felipe D.Del Castillo, "*Hierros fundidos*" [online] Disponible en: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/hierro%20fundido.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/hierro%20fundido.pdf) [Acceso Noviembre 2016]

[5] J. Roberto B. Treviño Tesis "*estudio de la solidificación del hierro nodular*" Universidad Autónoma de Nuevo León, 2011

[6] KEMPERS, Hans - GRAHL, Joachin De. "Fundición de grafito esferoidal". Número 112, , pp 37 - 43. (1969)

[7] D. R. Askeland, Pradeep P. Phulé, "*Ciencia e Ingeniería de Materiales*", Editorial Thomsom, 4ta edición, México.

[8] Juan J. Ramirez N. Tesis "*Optimización del proceso de producción de hierro nodular para piezas automotrices*" Universidad Autónoma de Nuevo León, 2015

[9] John D. Verhoeven, "*Metallurgy of Steel for Bladesmiths & Others who Heat Treat and Forge Steel*", pág 171, 181 (2005).

[10] **Metals Handbook, "Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys"**, Vol. 1, 10th edition, ASM, pág. 17-18, 65, 79-80 (1993).

[11] ASTM A536-84(2014), Standard Specification for Ductile Iron Castings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014

[12] **Zhou Jiyang, "Colour Metallography of Cast Iron" Chapter 3, Spheroidal Graphite Cast Iron China Foundry 2009**

[13] **Metals Handbook, "Heat Treating"**, Vol. 4, 9th edition, ASM, pág. 1485-1494, 1503-1506 (1991).

[14] C.Campbell "Elements of metallurgy and **engineering alloys**" ASM International, Ohio 2008, pág 196

[15] **Flake C. Campbell "Elements of metallurgy and engineering alloys"** ASM International, pág. 196 (2008)

[16] **José Crisanti "ADI:obtencion a partir de fundiciones esferoidales y uso"** Facultad de ingeniería, Universidad de Palermo [Online] Disponible en: <http://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/CyT6/6CyT%2007.pdf> [Acceso Mayo 2017]

[17] **John R. Brown, "Foseco ferrous foundryman's handbook"**, Butterworth-Heinemann, Great Britain, pág. 84 (2000).

[18] **Acosta E. M., Martínez M., López J., "El Tratamiento de los Hierros Nodulares en el Mejoramiento de los Materiales en la Industria Automotriz"**, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 148, pág.21 (2000).

[19]**Gómez F. C., Alcaráz D. J., "Manual básico de corrosión para ingenieros"** Universidad de Murcia, España, pág.13-14 (2004)

[20] Francisco J. Pancorbo "Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación" Ed Marcombo, 2011, Barcelona, Pág. 9

[21] "Fundamentos de corrosión y protección: Tipos de corrosión" Universidad Politécnica de Valencia [online] Disponible en: [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12\\_4.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12_4.html) [Acceso diciembre 2016]

[22] J. Ávila, J. Genescá. "Más allá de la herrumbre II: La lucha contra la corrosión." Primera edición, tercera impresión. Fondo de cultura económica. Capítulo III.

[23] J. Genescá. "Técnicas electroquímicas de corriente directa para la determinación de la velocidad de corrosión. Técnica de extrapolación de Tafel o de intersección". Dpto. Ingeniería Metalúrgica. Facultad Química. UNAM.

[24] Yunni Meas "Técnicas electroquímicas para la medición de la velocidad de corrosión" CIDETEQ Querétaro [online] Disponible en: <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Teoriacorrosion.PDF> [Acceso diciembre 2016]

[25] Ugaz Lock, Diaz Tang "Principios de las técnicas electroquímicas en estudios de procesos de corrosión" Universidad católica de Peru [online] Disponible en: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/viewFile> [Acceso Mayo 2017]

[26] Universidad de Buenos Aires, "trabajos prácticos de química: corrosión" [Online] Disponible en: <http://materias.fi.uba.ar> [Acceso febrero 2017]

[27] Smith Hashemi, "Fundamentos de ciencia de los materiales" Ed. Mc Graw hill Cuarta edición, pág 410-411 (2006)

## Anexos

### Apendice

#### Tablas de resultados por triplicado de pruebas realizadas.

**Tabla 10 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares de llegada**

	$E_{corr}$ (V)	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	mpy	mm/y
Prueba 1	-0.687	7.517	3.576	0.0908
Prueba 2	-0.678	7.33	3.48	0.0883
Prueba 3	-0.664	7.432	3.535	0.0897

**Tabla 11 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con 1.5% de Cr**

	$E_{corr}$ (V)	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	mpy	mm/y
Prueba 1	-0.607	5.39	2.5714	0.0653
Prueba 2	-0.603	5.372	2.5628	0.0650
Prueba 3	-0.615	5.846	2.7889	0.0708

**Tabla 12 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con 2% de Cr**

	$E_{corr}$ (V)	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	mpy	mm/y
Prueba 1	-0.645	5.494	2.6163	0.0664
Prueba 2	-0.659	5.473	2.6063	0.0662
Prueba 3	-0.687	4.607	2.1939	0.0557

**Tabla 13 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con 2.5% de Cr**

	$E_{corr}$ (V)	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	mpy	mm/y
Prueba 1	-0.658	3.005	1.4338	0.0364
Prueba 2	-0.642	3.065	1.4625	0.0371
Prueba 3	-0.620	3.004	1.4334	0.0364

**Tabla 14 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con tratamiento isotérmico de llegada**

	$E_{corr}$ (V)	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	mpy	mm/y
Prueba 1	-0.808	8.71	4.1439	0.1052
Prueba 2	-0.808	6.08	2.8926	0.0734
Prueba 3	-0.862	6.09	2.8974	0.0735

**Tabla 15 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con tratamiento isotérmico con 1.5% de Cr**

	$E_{corr}$ (V)	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	mpy	mm/y
Prueba 1	-0.705	3.885	1.8534	0.0470
Prueba 2	-0.715	3.795	1.8104	0.0459
Prueba 3	-0.693	1.199	0.5720	0.0145

**Tabla 16 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con tratamiento isotérmico con 2% de Cr**

	$E_{\text{corr}}$ (V)	$i_{\text{corr}}$ (A/cm <sup>2</sup> )	mpy	mm/y
Prueba 1	-0.661	2.363	1.125	0.0285
Prueba 2	-0.673	2.236	1.064	0.0270
Prueba 3	-0.691	2.717	1.2938	0.0328

**Tabla 17 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con tratamiento isotérmico con 2.5% de Cr**

	$E_{\text{corr}}$ (V)	$i_{\text{corr}}$ (A/cm <sup>2</sup> )	mpy	mm/y
Prueba 1	-0.767	1.276	0.608	0.0154
Prueba 2	-0.785	1.195	0.570	0.0144
Prueba 3	-0.751	1.247	0.5950	0.0151

## Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de fases metaestable ( ) y estable (- - -) .....	2
Figura 2 formas de grafito tipo A .....	4
Figura 3 Diagrama esquemático del ciclo de tratamiento térmico del austempering para un acero de medio carbono. <sup>[13]</sup> .....	9
Figura 4 Clasificación de la corrosión .....	15
Figura 5 Representación de una curva de extrapolación de Tafel <sup>[23]</sup> .....	19
Figura 6 Tratamiento isotérmico aplicado .....	22
Figura 7 Equipo usado para el tratamiento; 1) Piezas; 2) Mufla; 3) Horno de resistencia eléctrica; 4) Baño de sal; 5) Termopar de medición de temperatura de sales.....	23
Figura 8 Celda electroquímica empleada en las pruebas de corrosión .....	24
Figura 9 Metalografías de los hierros nodulares sin tratamiento térmico a 20x atacadas con Nital 2; A) Llegada; B) 1.5% Cr; C) 2% Cr; D) 2.5% Cr .....	27
Figura 10 Metalografías de los hierros nodulares con tratamiento isotérmico a 20x atacadas con Nital 2 ; A) Llegada; B) 1.5% Cr; C) 2% Cr; D) 2.5% Cr	29
Figura 11 Potencial vs tiempo de hierro nodular en solución de NaCl al 3% sin tratamiento isotérmico .....	31
Figura 12 Potencial vs tiempo de hierro nodular en solución de NaCl al 3% con tratamiento isotérmico .....	31
Figura 13 Curva de polarización en estado estacionario de hierro nodular en solución de NaCl al 3% sin tratamiento isotérmico .....	33
Figura 14. Curva de polarización de hierro nodular en solución de NaCl al 3% sin tratamiento isotérmico .....	33
Figura 15 Curva de polarización en estado estacionario de hierro nodular en solución de NaCl al 3% con tratamiento isotérmico .....	35

Figura 16 Curva de polarización de hierro nodular en solución de NaCl al 3% con tratamiento isotérmico ..... 35

Figura 17 Solución después de realizar las pruebas de hierro nodular. .... 36

## **Índice de tablas**

Tabla 1 Clases de hierros nodulares. [8] ..... 5

Tabla 2 Composición química de los hierros nodulares. [9] ..... 6

Tabla 3 Clasificación de la fundición nodular teniendo en cuenta sus características mecánicas de acuerdo con la norma ASTM A536. [10] ..... 6

Tabla 4 ASTM A 897-90/A 897M-90 para los grados ADI. [16] ..... 11

Tabla 5 Aplicaciones de los hierros ADI [17] ..... 13

Tabla 6 Composiciones químicas de los hierros nodulares ..... 21

Tabla 7. Caracterización de metalografías ..... 30

Tabla 8 Densidades teóricas de los hierros usados en las pruebas ..... 36

Tabla 9 Velocidades de corrosión promedio ..... 37

Tabla 10 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares de llegada ..... 45

Tabla 11 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con 1.5% de Cr ..... 45

Tabla 12 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con 2% de Cr ..... 45

Tabla 13 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con 2.5% de Cr ..... 46

Tabla 14 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con tratamiento isotérmico de llegada ..... 46



Tabla 15 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con tratamiento isotérmico con 1.5% de Cr ..... 46

Tabla 16 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con tratamiento isotérmico con 2% de Cr ..... 47

Tabla 17 Resultados de velocidades de corrosión para hierros nodulares con tratamiento isotérmico con 2.5% de Cr ..... 47

## **Índice de ecuaciones**

(1) Ec. Butler y Volmer	17
(2) Coeficientes de Tafel	17
(3) Reaccion de oxidación general	18
(4) Reducción	18
(5) Reducción de oxígeno (ácido)	18
(6) Reducción de oxígeno (neutra/básica)	18
(7) Reducción de iones metálicos	18
(8) Deposición de iones metálicos	18
(9) <b>Cálculo de <math>\rho</math> teórica</b>	36
(10) Cálculo de la velocidad de corrosión en mpy a partir de $i_{corr}$	37
(11) Cálculo de la velocidad de corrosión en mm/y a partir de $i_{corr}$	37
(12) Reacción de oxidación	38
(13) Reacción de oxidación	38
(14) Reacción de reducción	38
(15) Reacción de reducción	38