

## VELOCIDAD DE CORROSION DE ACEROS NACIONALES AISI 1010 EN ACIDO SULFURICO COMO MEDIO AGRESIVO

D. Alberto Ugaz L., Z. Inés Meza M., Dionisio Ugaz M.\*

### INTRODUCCION

Es evidente la importancia que tiene el entender los procesos de corrosión, especialmente si involucran un reactivo tan usado como es el ácido sulfúrico.

En el presente trabajo se evalúa el efecto de la temperatura manteniendo constante la concentración del  $H_2SO_4$  (98,37%) y el efecto de la concentración de  $H_2SO_4$  a temperatura ambiente, en la rapidez de la acción corrosiva sobre acero nacional AISI 1010, utilizando un método electroquímico consistente en la determinación de curvas de polarización, comparando los resultados con el método tradicional gravimétrico.

### ASPECTOS TEORICOS

Se admite que la corrosión es el deterioro de una sustancia por reacción con su ambiente. Si se trata de un metal, esta reacción puede ser de origen químico o electroquímico. La corrosión electroquímica se basará entonces en la termodinámica y cinética de las reacciones electroquímicas [1].

En un proceso de corrosión hay un equilibrio dinámico (Fig. Nº 1), donde los flujos de corriente en el sentido de oxidación,  $I_o$ , y en el de reducción,  $I_r$ , son iguales y a los que se denomina corriente de corrosión,  $I_{corr}$ .

---

\* PUCP, Departamento de Ciencias, Laboratorio de Corrosión

Las  $V_{\text{corr}}$  se determinan a partir de la densidad de corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}/\text{A}$ ) y por la ley de Faraday (ec. 1),

$$V_{\text{corr}} = k \frac{P\text{-eq}}{\rho \cdot F} i_{\text{corr}} \quad (\text{ec.1})$$

donde  $V_{\text{corr}}$  = velocidad de corrosión en mm/año  
 $k$  = factor de conversión,  $3,1536 \times 10^{-3}$   
 $P\text{-eq}$  = peso equivalente  
 $\rho$  = densidad en  $\text{g}/\text{cm}^3$   
 $F$  = faradio,  $96\,487 \text{ C}/\text{eq}$   
 $i_{\text{corr}}$  = densidad de corriente de corrosión en  $\mu\text{A}/\text{cm}$

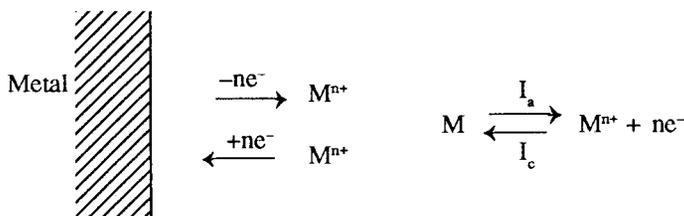
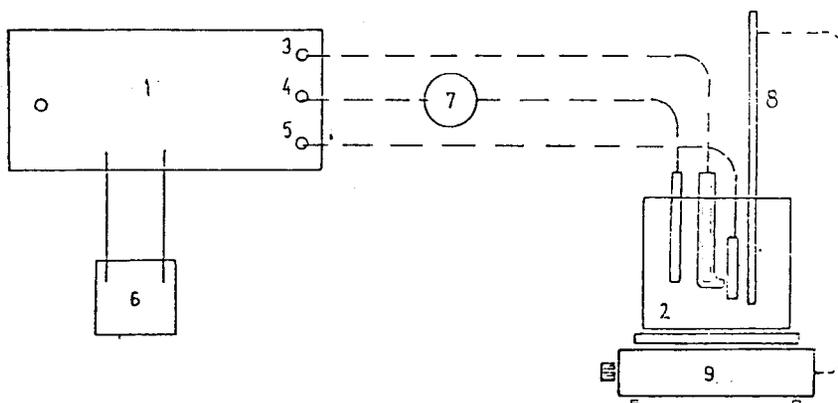


Figura N° 1: Equilibrio dinámico sobre una superficie metálica

El valor de  $i_{\text{corr}}$ , no es posible medirlo directamente, debiéndose recurrir al **método de intersección** para su evaluación, que consiste en el trazado de una curva de polarización en la zona donde se cumple la relación de Tafel,  $\eta = a + b \log i$ , y por extrapolación de las rectas se tendrá que para  $\eta = 0$ ,  $i = i_{\text{corr}}$ .

Un método electroquímico muy empleado para esta evaluación, es el potencioestático, en el cual se polariza el sistema mediante un potencioestato. Se precisa además, una celda electroquímica en donde se ponen en contacto el medio agresivo y el material metálico en estudio, un electrodo de referencia y un contraelectrodo por donde atraviesa la corriente a registrar (Fig. N°2).



- |    |                         |    |                        |
|----|-------------------------|----|------------------------|
| 1. | Potenciostato           | 6. | Voltímetro             |
| 2. | Celda de corrosión      | 7. | Amperímetro            |
| 3. | Electrodo de referencia | 8. | Termómetro de contacto |
| 4. | Electrodo auxiliar      | 9. | Cocina eléctrica       |
| 5. | Electrodo de trabajo    |    |                        |

**Figura N° 2:** Equipo usado para las determinaciones potenciostáticas

## PARTE EXPERIMENTAL

### 1. Equipos, Materiales y Reactivos

- Potenciostato, Wenking, modelo LT - 78
- Celda electroquímica, construida en el taller de vidrio de la PUCP
- Electrodo de referencia Ag/AgCl/Cl<sup>-</sup> (saturado)
- Electrodo de platino
- Multímetros
- Planchas eléctricas con agitador magnético
- Termómetros de contacto
- Probetas de acero nacional con bajo contenido de carbono
- Acido sulfúrico cc

### 2. Ensayos Preliminares

Se realizaron los ensayos preliminares siguientes:

- a) análisis químico del acero según norma ASTM-E350-77 para los elementos: manganeso (Mn), azufre (S) y fósforo (P) y el contenido de carbón mediante analizador de carbono “Strolhein”, modelo Universal;
- b) análisis metalográfico del acero a 500 aumentos;
- c) análisis de dureza con un durómetro Vickers utilizando una carga de 30 kg, y
- d) análisis de concentración total y densidad del ácido sulfúrico según norma ASTM-E223-68.

### 3. *Determinaciones Gravimétricas*

- *Efecto de la temperatura.* Se realizó con dos tipos de muestras, probetas de acero normalizadas y probetas de acero sin normalizar. Las primeras fueron sometidas a un tratamiento térmico posterior al de su fabricación, a 500°C durante 1 hora. Se utilizó como solución de ensayo, ácido sulfúrico cc (sin agitación) a las temperaturas de, 25, 30, 40, 50 y 70 °C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ).
- *Efecto de la concentración.* Se realizó sobre acero normalizado en ácido sulfúrico a distintas concentraciones, 10%, 20%, 30%, 50%, 75% y cc, y a temperatura ambiente (20-22°C).

Se trabajó con probetas rectangulares de aproximadamente 3,5 cm x 1,5 cm x 0,1 cm.

Las probetas metálicas antes del ensayo fueron limpiadas superficialmente mediante un baño de decapado, con solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 20% y 0,05% de inhibidor. Una vez limpias, se determinaba sus dimensiones exactamente para conocer el área total expuesta y se les pesaba. A continuación las muestras eran inmersas en las soluciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a la temperatura o concentración de ensayo por 168 horas.

Al finalizar este período, las probetas eran sacadas de las soluciones y puestas en el baño de decapado junto con una probeta “blanco”, durante una hora a 60°C. Luego eran pulidas, desengrasadas y pesadas.

La velocidad de corrosión en mm/año se calculó usando la ec. 2

$$V_{\text{corr}} = \frac{8,76 \times 10^4 (W/A)}{t \times \rho} \quad (\text{ec. 2})$$

donde  $W/A$  = pérdida de peso por unidad de superficie ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )  
 $t$  = 168 h  
 $\rho$  = 7,85  $\text{g}/\text{cm}^3$

#### 4. Determinaciones Potenciostáticas

Se trazaron curvas potenciostáticas de Tafel y de polarización anódica, empleando el potenciostato Wenking LT-78 y una celda de tres electrodos (Fig. N° 2). Los electrodos de trabajo fueron probetas de acero nacional AISI 1010 previamente medidas. Como electrólito se empleó ácido sulfúrico (con agitación).

- *Efecto de la temperatura.* Las probetas de acero normalizado y sin normalizar fueron sumergidas en ácido sulfúrico cc, termostatzado a 25, 30, 40, 50 y 70 °C ( $\pm 1$  °C).
- *Efecto de la concentración.* Las probetas de acero normalizado fueron sumergidas en sol. de ácido sulfúrico de concentraciones 10%, 20%, 30%, 50%, 75% y cc a temp. ambiente.

Se trabajó con probetas rectangulares de aproximadamente 7,0 cm x 1,5 cm x 0,1 cm.

*Rectas de Tafel.* Se determinó el  $E_{\text{corr}}$  después de 2 horas y luego se polarizó el sistema variando el potencial 10 mV cada 3 minutos desde -150 mV hasta +150 mV.

*Curvas de polarización anódica.* Se determinó el  $E_{\text{corr}}$  después de 2 horas y luego se polarizó el sistema positivamente variando el potencial 100 mV cada 3 minutos hasta 2000 mV.

La velocidad de corrosión en mm/año se determina a partir de la ec. 3

$$V_{\text{corr}} = 3,255 \times 10^{-3} i_{\text{corr}} P_{\text{ef}} / \rho \quad (\text{ec.3})$$

que para el acero AISI 1010:

$$\begin{aligned}P_{eq} &= 27,923 \text{ g/eq} \\ \rho &= 7,85 \text{ g/cm}^3 \\ i_{corr} &= \mu\text{A/cm}^2\end{aligned}$$

## RESULTADOS

### 1. Ensayos Preliminares

- a) En el análisis químico del acero AISI 1010 se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla N° 1:** Resultados del análisis químico del acero AISI 1010

Componente	Porcentaje (%)
Carbono	0,07 ± 0,02
Manganeso	0,74 ± 0,03
Fósforo	0,015 ± 0,001
Azufre	0,038 ± 0,005

- b) El análisis metalográfico del acero AISI 1010 reveló la siguiente microestructura para ambas muestras:

fase matriz: granos equiaxiales de ferrita,  
otras fases: pequeñas trazas de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), casi imperceptibles,  
tamaño de grano: N° 8 (según norma ASTM E 112).

- c) El ensayo de dureza dio como valor de dureza: 103  $H_{v30}$
- d) La concentración del ácido sulfúrico: 98,37 ± 0,10% y la densidad: 1,8363 ± 0,0018  $\text{gcm}^{-3}$ .

### 2. Determinaciones Gravimétricas

Las velocidades de corrosión en mm/año del acero AISI 1010 en ácido sulfúrico 98,37% a diferentes temperaturas y a diferentes concentraciones

nes de ácido sulfúrico a temperatura ambiente, determinadas gravimétricamente, se muestran en las Tablas N° 2 y 3 respectivamente.

**Tabla N° 2:** Velocidad de corrosión del acero AISI 1010 en ácido sulfúrico 98,37%, (mm/año), a diferentes temperaturas, determinada gravimétricamente

Temp °C	Velocidad de corrosión, mm/año	
	probeta sin normalizar	probeta normalizada
25	0,1156 ± 0,0061	0,1091 ± 0,0079
30	0,1624 ± 0,0153	0,1244 ± 0,0010
40	0,1940 ± 0,0075	0,1885 ± 0,0835
50	0,2425 ± 0,0258	0,2376 ± 0,0082
70	0,3707 ± 0,0039	0,3177 ± 0,0228

**Tabla N° 3:** Velocidad de corrosión del acero AISI 1010 en ácido sulfúrico a diferentes concentraciones, (mm/año), a temperatura ambiente, determinada gravimétricamente

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (% p)	Velocidad de corrosión, mm/año
	probeta normalizada
10	1,1444 ± 0,1079
20	1,6950 ± 0,0891
30	2,5707 ± 0,0328
50	2,1788 ± 0,0311
75	0,1272 ± 0,0163
98,37	0,0686 ± 0,0213

### 3. Determinaciones Potenciostáticas

Las velocidades de corrosión en mm/año del acero AISI 1010; en ácido sulfúrico 98,37% a diferentes temperaturas y a diferentes concentraciones de ácido sulfúrico a temperatura ambiente, se muestran en las Tabla N° 4 y 5 (Fig. N° 3, 4, 5, 6, 7 y 8).

**Tabla N° 4:** Velocidad de corrosión del acero AISI 1010 en ácido sulfúrico 98,37%, mm/año, a diferentes temperaturas, determinada potencioestáticamente

Temp °C	Velocidad de corrosión, mm/año	
	probeta sin normalizar	probeta normalizada
25	0,7272 ± 0,0809	0,5952 ± 0,0601
30	1,3815 ± 0,0862	1,2397 ± 0,1240
40	1,9039 ± 0,0666	1,4516 ± 0,0341
50	2,2729 ± 0,0540	1,5558 ± 0,0369
70	2,9955 ± 0,0540	2,6983 ± 0,0627

De los valores de  $V_{corr}$  determinadas potencioestáticamente al graficar  $\ln V_{corr}$  en función de  $1/T$  se obtuvo:

- 1) Para acero AISI 1010 sin normalizar,  
Ea = 16,233 kJ
- 2) Para acero AISI 1010 normalizado,  
Ea = 16,611 kJ

**Tabla N° 5:** Velocidad de corrosión del acero AISI 1010 en ácido sulfúrico, a diferentes concentraciones, (mm/año), a temperatura ambiente, determinada potencioestáticamente

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (% p)	Velocidad de corrosión, mm/año
	probeta normalizada
10	0,8922 ± 0,0684
20	1,4929 ± 0,1065
30	2,0262 ± 0,1427
50	1,5107 ± 0,1046
75	1,0375 ± 0,5940
98,37	0,3673 ± 0,0367

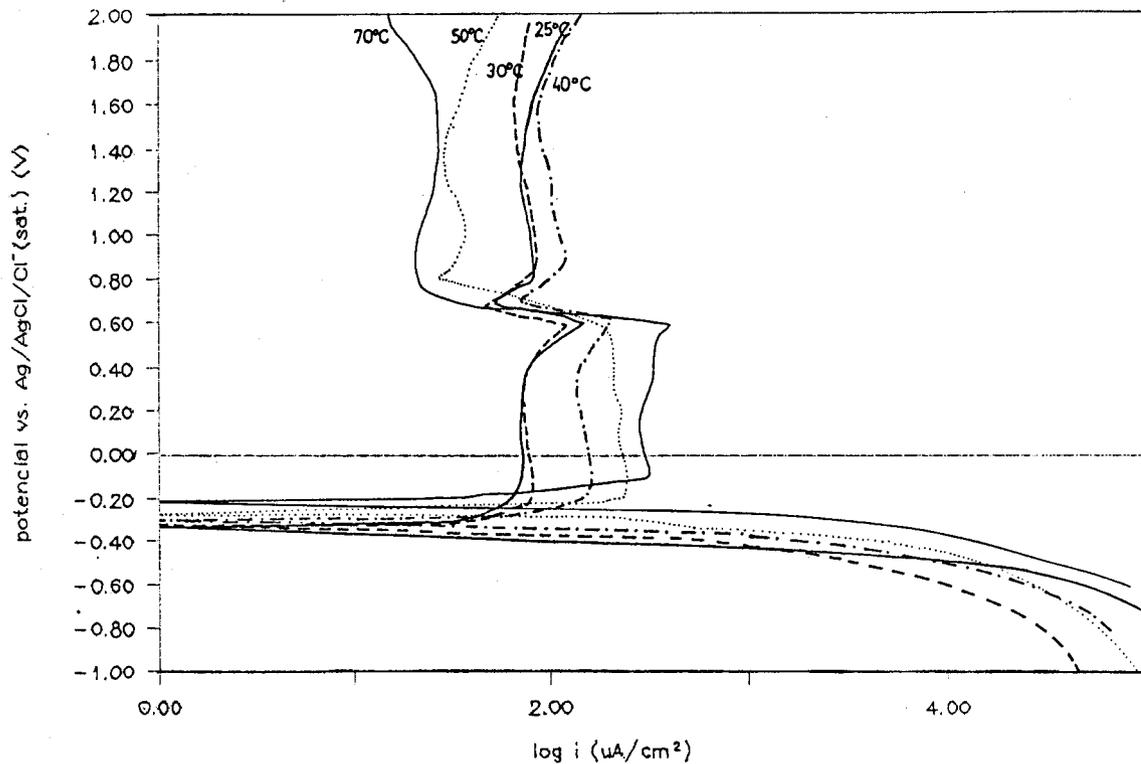


Figura N° 3: Curvas de Polarización total obtenidas para el acero AISI 1010 sin normalizar en ácido sulfúrico 98,37% a diferentes temperaturas.

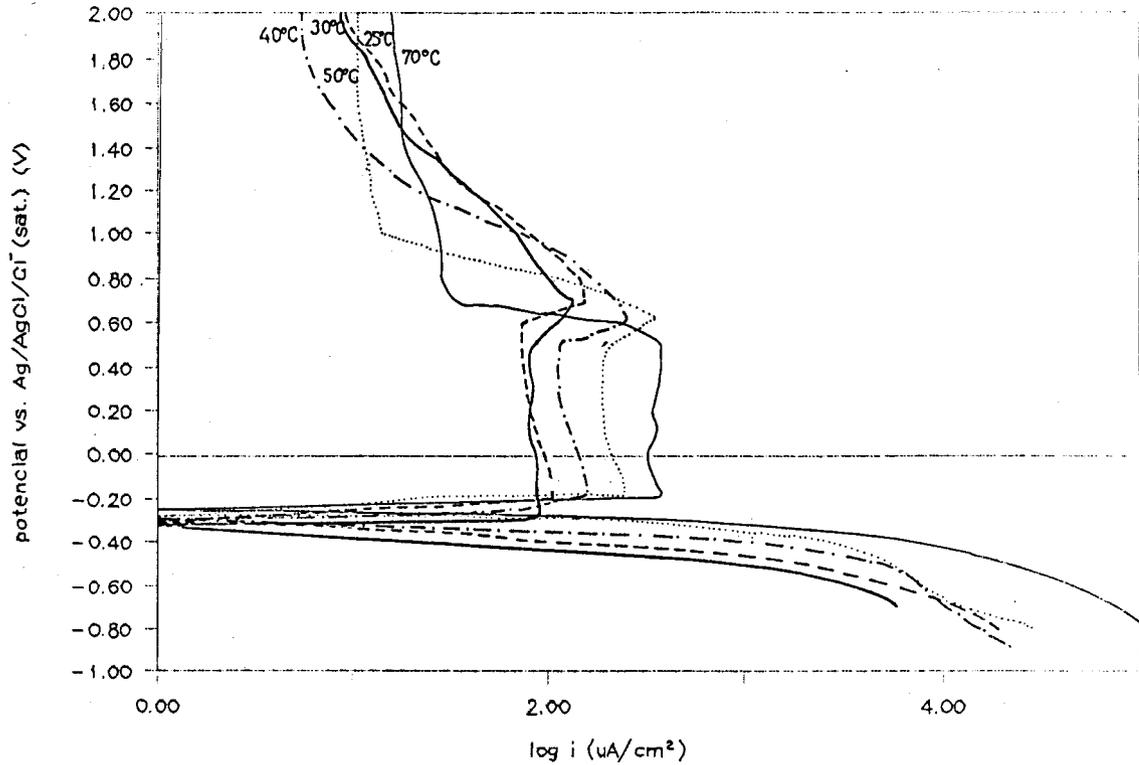
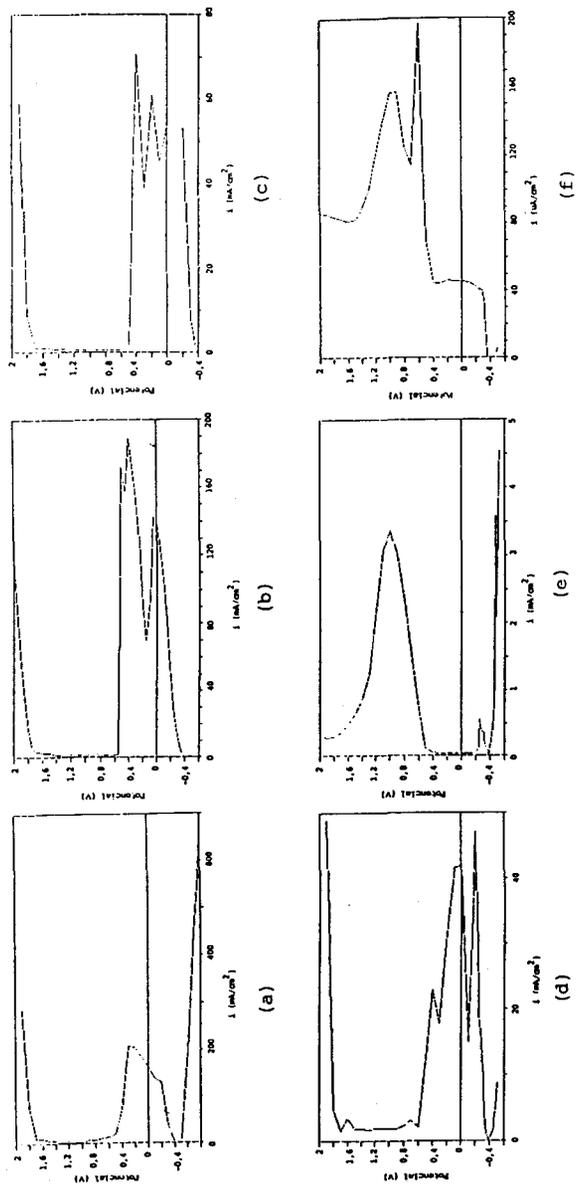


Figura N° 4: Curvas de Polarización total obtenidas para el acero AISI 1010 normalizado en ácido sulfúrico 98,37% a diferentes temperaturas.



**Figura N° 5:** Curvas de polarización anódica del acero nacional AISI 1010 para distintas concentraciones de ácido sulfúrico: (a) 10% (b) 20%; (c) 30%; (d) 50%; (e) 75%; y (f) 98.4%.

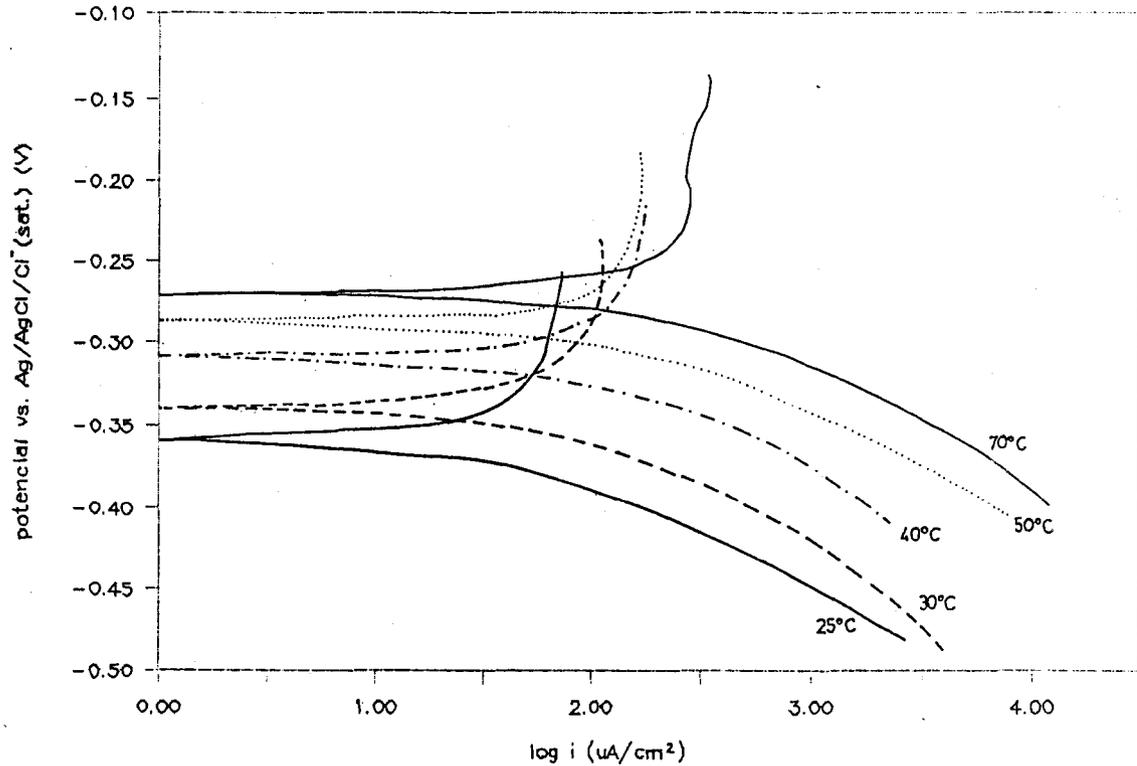


Figura N° 6: Curvas de polarización en la zona de Tafel para el acero AISI 1010 sin normalizar en ácido sulfúrico 98,37% a diferentes temperaturas.

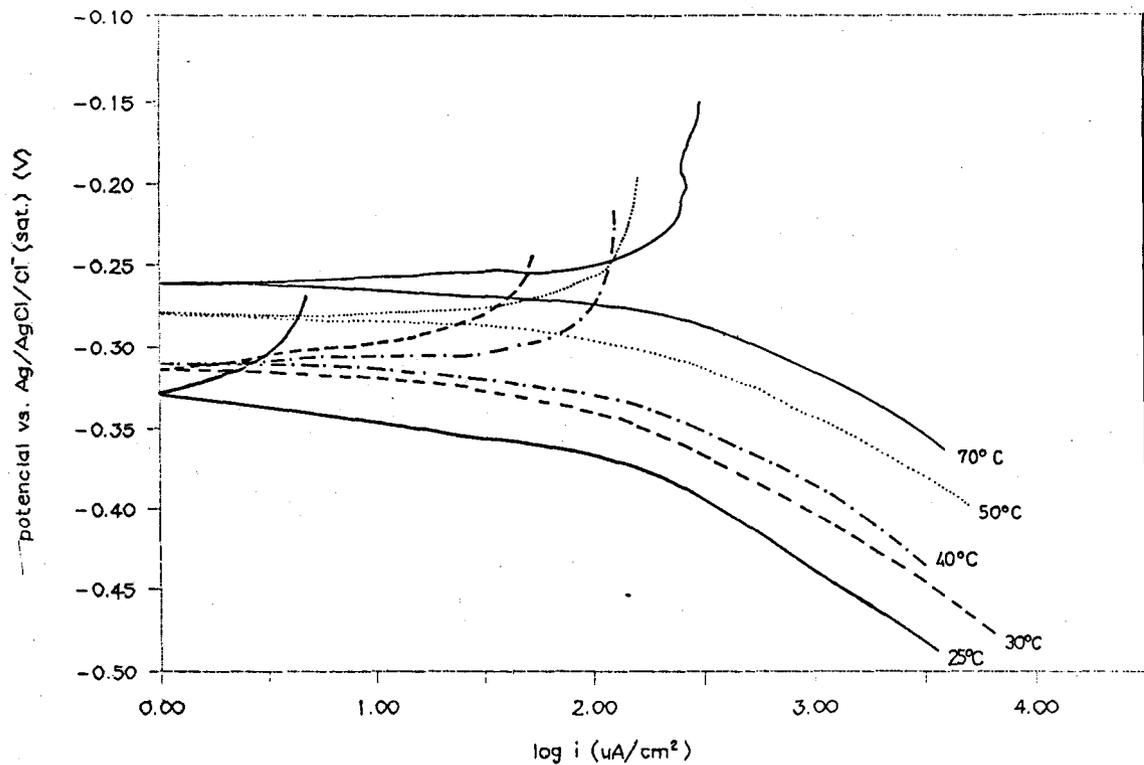


Figura N° 7: Curvas de polarización en la zona de Tafel para el acero AISI 1010 normalizado en ácido sulfúrico 98,37% a diferentes temperaturas.

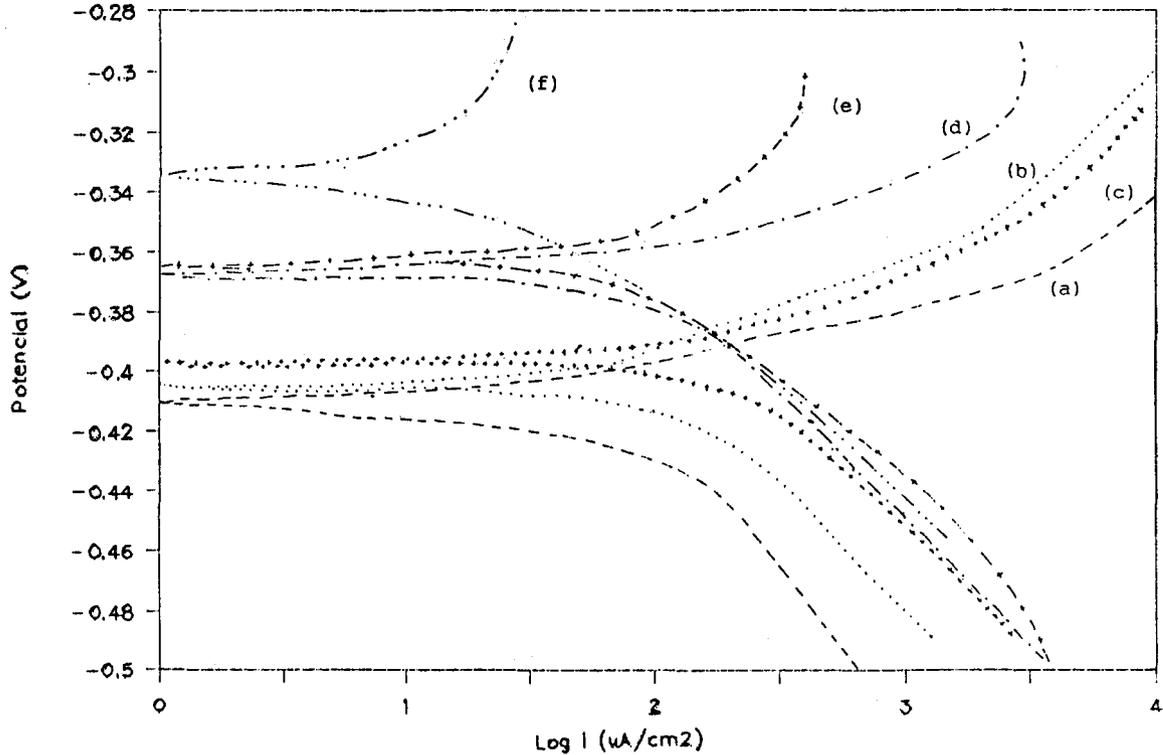


Figura N° 8: Curvas de polarización en zona de Tafel del acero nacional AISI 1010 a distintas concentraciones de ácido sulfúrico: (a) 10%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 50%; (e) 75% y (f) 98,4%.

## DISCUSION DE RESULTADOS

### 1. *Ensayos Preliminares*

Los resultados obtenidos en los análisis químicos, Tabla N° 1, revelan la composición típica de un acero con bajo contenido de carbono, concordando con los resultados del análisis metalográfico que revela una estructura Fe- $\alpha$  o ferrita y el ensayo de dureza que dio un valor relativamente bajo.

Las probetas sin normalizar y las normalizadas muestran la misma microestructura y el mismo valor de dureza, pero se diferencian en los valores de  $E_{\text{corr}}$  y de  $V_{\text{corr}}$  determinados en los ensayos potencioestáticos y en los gravimétricos (estudio del efecto de la temperatura). Las primeras tuvieron mayores valores de  $E_{\text{corr}}$  y  $V_{\text{corr}}$  menores, debido a que el tratamiento térmico recibido por estas probetas, eliminó tensiones disminuyendo así el contenido energético del metal y por lo tanto su tendencia a corroerse.

### 2. *Determinaciones Potencioestáticas*

De las curvas de polarización anódica (Fig. N° 3, 4 y 5), se observa que el acero sin normalizar y el normalizado presentan un comportamiento "activo-pasivo" para todas las temperaturas y concentraciones de estudio.

Las curvas de polarización anódica (Fig. N° 5) para las concentraciones de 10%, 20%, 30% y 50% presentan una forma semejante, mostrando una zona de activación hasta los +200 a +400 mV, una zona de pasivación entre +400 y +1700 mV y una zona de transpasivación a partir de +1700 mV. Para soluciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  de menor concentración se forma en la zona de activación una capa de sulfato ferroso, posiblemente monohidratado, adherente y no conductor pero poroso [2], por lo que se obtienen altas densidades de corriente. La pasivación se produce por formación de una película delgada de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  adherente, no conductor y de naturaleza protectora [3]. La transpasivación se debe a la formación de oxígeno por oxidación del agua y, simultáneamente, por formación de iones  $\text{Fe}^{3+}$  a partir de la capa oxidica [4].

Las curvas correspondientes a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  75% y 98,37% presentan un comportamiento algo diferente. En la de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  75% se observa una rápida pasivación a -200 mV hasta +500 mV. En la curva para 98,37% se observa el efecto del control por difusión del sulfato ferroso [5] entre los -200 a +400 - +600 mV en todas las temperaturas de estudio.

Para concentraciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  entre 14 y 18M (80–98%), la capa formada inicialmente sería de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  [6], la cual es más protectora que la monohidratada. La zona de transpasivación no se observa claramente.

Para la determinación de las velocidades de corrosión, se trabajó con las ramas catódicas de las curvas de polarización en la zona de Tafel (Fig. N° 6, 7 y 8) siendo las velocidades de corrosión determinadas por el trazado de las rectas de Tafel y su intersección con el  $E_{\text{corr}}$  ( $\eta = 0$ ); no se usaron las ramas anódicas, debido a que los valores de las velocidades de corrosión y constantes de Tafel no eran reproducibles y presentaban gran desviación del comportamiento lineal, debido a la capa de  $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  y de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (según el caso), que introdujo el componente de polarización de difusión y posiblemente también el de polarización de resistencia.

### 3. *Velocidades de Corrosión*

De las Tablas N° 2 y 4, se observa que las velocidades de corrosión halladas gravimétricamente son menores que las potencioestáticas. Esto se debe a que las segundas se obtuvieron a partir de la reacción catódica —evolución de hidrógeno— sin considerarse la formación de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  que es el factor que controla la corrosión del acero en ácido sulfúrico.

El efecto de la concentración del  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en la velocidad de corrosión del acero AISI 1010, Tabla N° 3 y Tabla N° 5, muestra una  $V_{\text{corr}}$  máxima para una concentración de 30% de ácido, hecho que coincide con el máximo de concentración de hidrógeno y de conductancia específica observadas en función de la concentración de ácido sulfúrico a 25°C.

La  $V_{\text{corr}}$  de aceros al carbono en ácido sulfúrico para concentraciones entre 50% y 99% está controlada por la velocidad de difusión del sulfato ferroso producido por la corrosión del acero. De ahí que las  $V_{\text{corr}}$  para  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10%, 20%, 30% y 50% sean mayores que para  $\text{H}_2\text{SO}_4$  75% y 98,37%.

El efecto de la temperatura del  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en la velocidad de corrosión del acero AISI 1010, Tablas N° 2 y 4, muestran que un aumento de la temperatura del sistema, causa incremento en la velocidad de corrosión del acero.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La velocidad de corrosión del acero nacional AISI 1010 en ácido sulfúrico 98,37% se incrementa con el aumento de la temperatura.

2. El acero nacional AISI 1010 normalizado presenta mayor resistencia a la corrosión al ácido sulfúrico 98,37% que el acero sin normalizar.

Se recomienda, por tanto, un tratamiento de normalizado del acero AISI 1010 posterior al de su fabricación.

3. Las velocidades de corrosión del acero nacional AISI 1010 en  $H_2SO_4$  alcanza un máximo para  $H_2SO_4$  30%. Este hecho está relacionado con la concentración de iones hidrógeno y la conductancia específica del ácido.
4. La velocidad observada para el acero AISI 1010 normalizado en  $H_2SO_4$  98,37% a temperatura ambiente ( $20^\circ C - 22^\circ C$ ) es lo suficientemente baja como para ser empleado en los procesos que involucren su uso.
5. El acero nacional AISI 1010 en  $H_2SO_4$  presenta el típico comportamiento de un material pasivable.
6. El método de intersección es de gran utilidad para un reconocimiento rápido y comparativo sobre la resistencia a la corrosión entre varios metales.
7. Los valores promedios de las variables termodinámicas son:  $\Delta G_{corr} = -238,63 \text{ kJ}$ ,  $\Delta H_{corr} = -170,00 \text{ kJ}$  y  $\Delta S_{corr} = 217,10 \text{ J/K}$  en el intervalo de  $25^\circ C$  hasta  $70^\circ C$ .

## BIBLIOGRAFIA

1. M. Díaz Peña y A. Roig Muntaner, *Química-Física*, Vol. 2, Ed. Alhambra, Madrid, 1981.
2. G. Wranglen, **An Introduction to Corrosion and Protection of Metals**, p. 66, Chamman and Hall, Sweden, 1985.
3. Ref. (2), p. 66
4. U.F. Franck, *Z. Elektrochem.*, **56**, 814, 1952.
5. S.W. Dean, Proceedings of the Corrosion/85 Symposium on Corrosion in Sulfuric Acid, NACE-Texas, 1985.
6. G. Gill, *Corr. Sci.*, **8**, 801, 1968.