



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

“OPTIMIZACION DEL PROCESO DE CROMATACIÓN
EN ACERO AL CARBONO Y ALUMINIO 1200 H14”

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA:

CONTRERAS GARCÍA SERGIO



MÉXICO, D.F.

2006



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 Prof. Francisco Javier Rodríguez Gómez

Vocal Prof. Carlos Rodríguez Rivera

Secretario Prof. José Hernández Espinosa

1er Suplente Prof. Vianey Torres Mendoza

2do Suplente Prof. Edgar Onofre Bustamante

Lugar en donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de corrosión
Edificio "D" Facultad de Química
Ciudad Universitaria
UNAM

Asesor del tema: _____
Dr. Francisco Javier Rodríguez Gómez

Sustentante: _____
Sergio Contreras García

A MIS PADRES:

POR SU TIEMPO, RESPETO, CONFIANZA Y AMOR
QUE SIEMPRE ME HAN BRINDADO.
ASÍ COMO SUS CONSEJOS, PARA PODER SER
UNA MEJOR PERSONA EN TODOS LOS AMBITOS
Y DARMÉ LA OPORTUNIDAD DE SUPERARME
DÍA A DÍA.

A MI HERMANO:

POR SER MI EJEMPLO DE SUPERACION Y MOTIVACION,
YA QUE TAMBIEN ES MI MEJOR AMIGO, ASI COMO
MI CUÑADA Y MI SOBRINA.
POR QUE SIEMPRE ESTAN CONMIGO EN LAS
BUENAS Y EN LAS MALAS.

ESTE TRABAJO REALIZADO, ASI COMO TODOS
LOS ESCALONES QUE TUVE QUE ESCALAR
PARA OBTENER DICHO TITULO
ES PARA ELLOS COMO PARA MI.

A MIS FAMILIARES Y AMIGOS:

POR AYUDARME A CUMPLIR ESTA META
SIEMPRE APOYANDOME EN CUALQUIER MOMENTO
EN ESPECIAL A MI COMPAÑERA Y FAMILIA
QUE CONFIAN EN MI...

Gracias a todos, y esto es una muestra de la confianza que depositan en mí.

...Sergio Contreras García.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente al Dr. Francisco. J. Rodríguez y al Ing. Edgar Onofre, por su paciencia y apoyo, así como las dudas que me aclararon en la realización de este trabajo, en especial por la confianza que me otorgaron para poder trabajar con ellos, lo cual me motiva a seguir adelante y plantearme nuevas metas.

También al Ing. Adrián Amaro por el apoyo brindado para conocer la composición química de los metales a evaluar.

Así como el apoyo del señor Gabriel y Fermín, al igual de las personas encargadas del taller mecánico del edificio "D" de la Facultad de Química, quienes me brindan la confianza de usar los equipos del taller para las preparaciones de probetas o placas a evaluar.

Gracias al jurado por sus comentarios, para enriquecer el trabajo presentado. Así como el interés que prestaron para la revisión y continuidad del trámite de titulación.

Este trabajo fue realizado con el apoyo del proyecto DGAPA PAPIIT IN 115603 "Estudio de tratamientos superficiales de conversión libres de cromato".

ÍNDICE GENERAL

	PP.
RESUMEN	1
I. INTRODUCCION	2
1.1 A. Formas de la corrosión	3
B. Electroquímica de la corrosión	4
C. Proceso Cronak	5
D. Sistemas de recubrimientos	5
1.2.- Potencial de corrosión	7
1.3.- Fenómenos de polarización	7
1.4.- Resistencia a la polarización	8
1.5.- Espectroscopia de Impedancia Electroquímica "EIS"	10
1.6.- Adherencia	16
1.7.- Ensayo de tracción ("PULL OFF")	16
1.8.- Ensayo de retención con N-Metil Pirrolidona	17
1.9.- Método de la cuadrícula ("CROSSHATCH")	17
II. OBJETIVOS	18
III. MATERIAL Y REACTIVOS	19
IV. DISEÑO EXPERIMENTAL	
4.1.- Potencial de corrosión en función del tiempo	20
4.2.- Resistencia a la polarización	20
4.3.- Preparación de placas para barnizar	21
4.4.- Técnica de impedancia "EIS"	22
4.5.- Ensayo de tracción	22
4.6.- Ensayo de N-Metil Pirrolidona	23
4.7.- Método de la cuadrícula	24
V. RESULTADOS	
5.1.- Potencial de reposo y resistencia a la polarización	26
5.2.- Ensayo de tracción	33
5.3.- Ensayo de N-Metil Pirrolidona	34
5.4.- Método de la cuadrícula	36
5.5.- Impedancia "EIS"	36

VI.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	
6.1.-	Potencial de reposo y resistencia a la polarización	41
6.2.-	Preparación de placas para barnizar	45
6.3.-	Ensayo de tracción	46
6.4.-	Ensayo de N-Metil Pirrolidona	47
6.5.-	Método de la cuadrícula	47
6.6.-	Impedancia "EIS"	48
VII.	CONCLUSIONES	52
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	53
	APÉNDICE	
	Composición química de Acero al carbono AISI 1018	55
	Composición química de Aluminio 1200 H 14	56
	Ficha técnica de N-Metil Pirrolidona	57
	Ficha técnica del Barniz transparente 11000	58

1.- INTRODUCCIÓN

La corrosión ha sido definida como la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica con el medio ambiente, y representa la diferencia entre una operación libre de problemas y trabajar con gastos de operación.

Para efectos prácticos, es casi imposible eliminar la corrosión, por consecuencia es preferible trabajar más en su control que en su eliminación, siendo necesario tomar en cuenta el fenómeno corrosivo desde el diseño de las instalaciones y no después de ponerlas en operación.

Para esto es necesario saber dónde empezar, por dónde se produce, cómo se puede impedir o en su defecto retardar dicho efecto corrosivo, qué herramientas son necesarias, qué técnicas existen para prevenirla, la selección de materiales, cómo aplicar la información del problema corrosivo, etc. Estos son solo algunos aspectos que hay que tomar en cuenta para conocer y saber como prevenir la corrosión.

Todos los metales y aleaciones son susceptibles de sufrir el fenómeno de corrosión. A pesar de tener bastantes aleaciones que pueden comportarse satisfactoriamente en medios corrosivos específicos, también se tienen métodos de control de la corrosión para poder reducir dicho problema, ya sea desde el punto de vista de los gastos directos e indirectos, ya sean de aspecto económico y humano⁽¹³⁾.

Dentro de los aspectos económicos tenemos:

- a).- Reposición del equipo corroído.
- b).- Coeficiente de seguridad y sobre diseño para soportar la corrosión.
- c).- Mantenimiento preventivo como la aplicación de recubrimientos.
- d).- Paros de producción debidos a fallas por corrosión.
- e).- Contaminación de productos.
- f).- Pérdida de eficiencia ya que los coeficientes de seguridad, sobre diseño de equipo y productos de corrosión por ejemplo, decrecen la velocidad de transmisión de calor en cambiadores de calor.
- g).- Pérdida de productos valiosos.
- h).- Daño de equipo adyacente a aquel en el cual se tuvo la falla de corrosión.

Dentro de los aspectos humanos y sociales se tienen:

- a).- La seguridad, ya que fallas violentas pueden producir incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos.
- b).- Condiciones insalubres, por ejemplo, contaminaciones debido a productos del equipo corroído o bien un producto de la corrosión misma.
- c).- Agotamiento de los recursos naturales, tanto en metales como en combustibles usados para su manufactura.
- d).- Apariencia, ya que los materiales corroídos generalmente son desagradables a la vista.

Naturalmente, estos aspectos sociales y humanos también tienen sus aspectos económicos y podemos ver claramente que hay muchas razones para controlar la corrosión.

1.1. A. FORMAS DE LA CORROSION

La corrosión ocurre en muchas y muy variadas formas como se muestra en la figura 1, pero su clasificación suele basarse en uno de los tres siguientes factores⁽²⁾:

1.- Naturaleza de la sustancia corrosiva. La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido mientras que para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.

2.- Mecanismo de corrosión. Este comprende las reacciones electroquímicas o bien, las reacciones químicas.

3.- Apariencia del metal corroído. La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas.

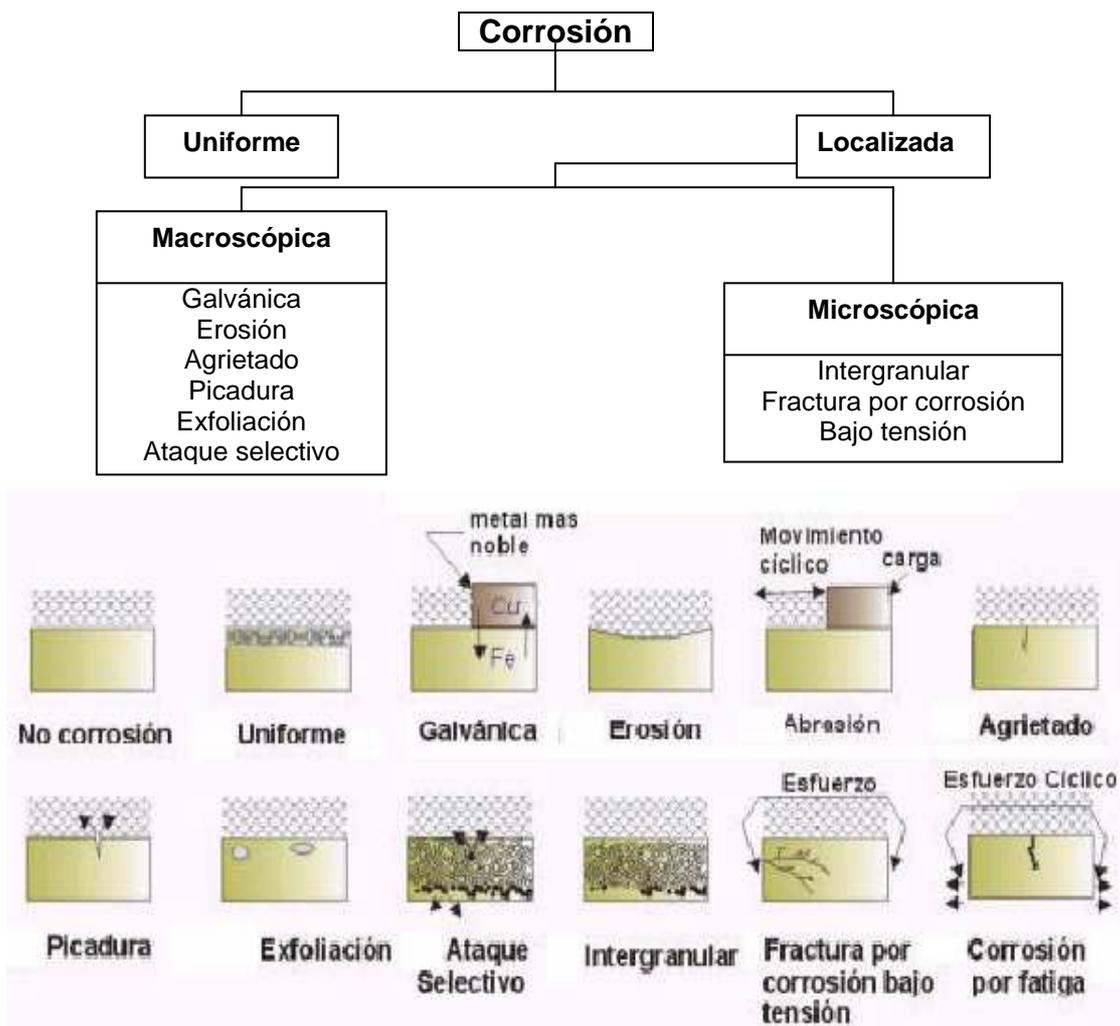


Figura 1. Formas de la corrosión⁽²⁾.

Los productos de la corrosión, por ejemplo el óxido son una de las formas por las cuales se detectan éstos productos. Sin embargo, es conveniente notar que los productos insolubles de la corrosión no siempre son visibles, por ejemplo al exponer una pieza de aluminio al aire se forma una película de óxido que protege al metal de un ataque posterior y la película es casi invisible porque es extraordinariamente delgada, siendo ésta la razón del uso extensivo del aluminio en la construcción de ventanas, cancelas, molduras automotrices, etc.

1.1. B.- ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN

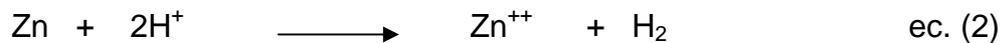
Una reacción electroquímica se define como una reacción química en la cual existe una transferencia de electrones, es decir, una reacción química que comprende el fenómeno de oxido-reducción.

Un ejemplo claro de ésta es la corrosión de los metales o aleaciones, para su mejor comprensión se muestra la siguiente reacción de corrosión.



Cuando la reacción se escribe en esta forma (ionizados) es obvio que el ión cloruro no participa en forma directa en la reacción puesto que éste aparece en ambos miembros de la ecuación y no es alterado por la reacción de corrosión.

De tal forma que la ecuación queda simplificada a:



Mostrando así que la corrosión del zinc consiste básicamente de la reacción entre el zinc y los iones hidrógeno, produciendo iones zinc y gas hidrógeno.

Durante esta reacción el zinc es oxidado a iones zinc, es decir, la valencia del zinc se incrementa y simultáneamente los iones hidrógeno son reducidos a gas hidrógeno disminuyendo su valencia.

Dicha reacción puede ser simplificada aún más al dividirla en una reacción de oxidación y una reacción de reducción.



Una reacción de oxidación, significa un incremento en el estado de oxidación con producción de electrones y en forma similar, la reacción de reducción representa una disminución en el estado de oxidación y el consumo de electrones.

Todo proceso de corrosión necesita por lo menos una reacción de oxidación y una reacción de reducción, por lo que las reacciones de corrosión son electroquímicas en naturaleza y debido a esto es posible dividir el proceso de la corrosión, en reacciones anódicas y reacciones catódicas que permiten simplificar la presentación de la mayoría de los procesos.

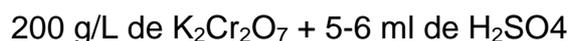
Con las reacciones anódicas en medio ácido, se presenta la reducción de los iones hidrógeno a gas hidrógeno y la única diferencia entre ellas es la naturaleza de sus procesos anódicos de oxidación. Este desprendimiento de hidrógeno ocurre en las reacciones de metales y de ácidos, tales como el clorhídrico, sulfúrico, fluorhídrico, acético, fórmico y otros ácidos orgánicos solubles en agua.

Durante la corrosión de los metales, se encuentran las reacciones catódicas tales como:

- Desprendimiento de Hidrógeno.
- Reducción de Oxígeno (tanto en soluciones básicas como neutras o alcalinas).
- Reducción de iones metálicos.
- Depositación de metal.

1.1. C.- PROCESO CRONAK

Consiste en la preparación de la solución cromatante bajo la siguiente formulación:



Posteriormente se sumergen aquellas probetas metálicas (baño) que se van a cromatar en intervalos de tiempos cortos de inmersión, hasta 60 segundos máximo.

El baño contiene principalmente dicromato de potasio en concentración elevada, acidificada ligeramente con ácido sulfúrico⁽¹⁵⁾. Estudios analíticos indican que la película formada por este baño es un cromato básico de cromo de fórmula:



La película formada es de tipo gel y debe dejarse secar de 12 a 24 horas antes de someter la probeta a las operaciones de laboratorio o de taller⁽¹⁴⁾. La película esta formada por metal-óxido de cromo, la cual se comporta en forma pasiva y frecuentemente es de color amarillo.

En general, el recubrimiento de cromo se emplea sólo como base para la adherencia de barnices y pinturas, cuando se requiere un valor protector grande.

1.1. D.- SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS

Los recubrimientos de pintura aplicados sobre superficies metálicas pueden cumplir funciones muy diversas: estética, anticorrosión y otras⁽¹⁷⁾.

Por lo general, en la protección de estructuras metálicas no se acude a una única pintura, sino a un conjunto de ellas, que se denomina sistema o esquema de pintura. El sistema lo componen diversos recubrimientos, aplicados a modo de "sandwich" (fig. 2), cada uno de los cuales cumple una función determinada.

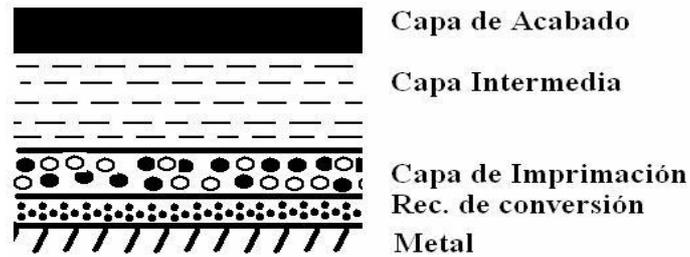


Figura 2. Representación esquemática de un sistema de pintura⁽¹⁷⁾.

Es fácil comprender que la existencia de este conjunto de pinturas con diferentes características y propiedades, dificulte aún más el conocimiento de un sistema. Este modelo de estudio considera únicamente la capa de imprimación, donde descansa principalmente la función anticorrosiva del esquema. En ocasiones, se ignora incluso la existencia del pigmento anticorrosivo, considerando entonces el recubrimiento como un barniz o material polimérico.

Los tres componentes principales son: la superficie metálica, el recubrimiento de pintura y la región interfacial (fig. 3), donde residen los aspectos más fundamentales, del sistema metal-pintura.



Figura 3. Representación esquemática de los elementos principales del sistema metal-pintura⁽¹⁷⁾.

Superficie metálica:

Desde un punto de vista puramente geométrico, la estructura superficial de un metal se aproxima al modelo TLK de terrazas, bordes y entrantes (fig. 4), con átomos en distinta situación energética y reactividad. A escala microscópica tenemos que imaginar una superficie metálica con heterogeneidades muy diversas de composición, estructura, contaminación, estado tensional, etc.

La mayoría de las teorías de sobre la adherencia han resaltado la importancia de la limpieza y rugosidad superficial, aunque todavía no se conozcan con exactitud las bases fundamentales sobre las que descansa el fenómeno de la adherencia, trascendental para la resistencia anticorrosivo del sistema⁽¹⁷⁾.

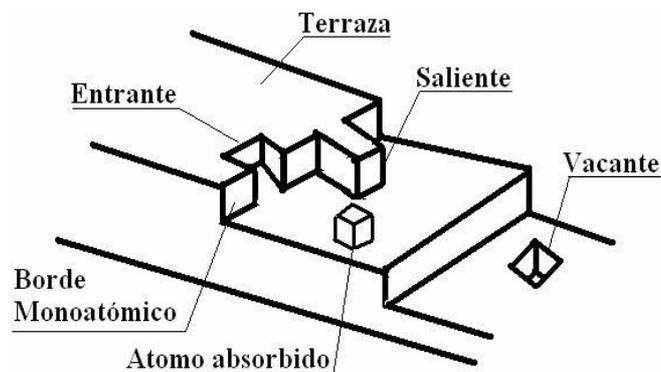


Figura 4. Modelo TLK de estructura superficial metálica según Rossel y Stranski⁽¹⁷⁾.

El recubrimiento de pintura:

Se puede definir como un material compuesto por una matriz polimérica (vehículo) y por un conjunto de partículas (pigmentos, entendedores o cargas, etc.) dispersas en ella.

Región interfacial:

Es el lugar en donde juegan las propiedades de los sólidos, es decir, dependen directamente o indirectamente de las características de su superficie. Donde se lleva a cabo los fenómenos de adsorción (física o química), adhesión, corrosión, difusión, etc., del sistema metal-pintura.

1.2.- POTENCIAL DE CORROSION

El potencial de un metal que se corroe es muy útil en los estudios de corrosión y se puede obtener fácilmente en el laboratorio y en condiciones de campo; se determina midiendo la diferencia de potencial existente entre el metal sumergido en un medio corrosivo y un electrodo de referencia apropiado al medio corrosivo. Los electrodos de referencia más utilizados son el electrodo saturado de calomel, el electrodo de cobre – sulfato de cobre y el electrodo de platino – hidrógeno. A este electrodo de platino-hidrógeno, se le suele llamar electrodo normal de hidrógeno, porque el H^+ y el H_2 necesitan un sustrato sobre el cual puedan intercambiar electrones.

1.3.- FENÓMENOS DE POLARIZACIÓN.

Es de interés primordial conocer la velocidad a la cual se desarrollan las reacciones catódicas y anódicas que puede ser determinada por varios métodos físicos y químicos. Cuando una reacción electroquímica se retarda, se dice que está polarizada y hay tres tipos diferentes de polarización: polarización de activación (o por transferencia de carga), polarización por concentración (o por transporte de masa) y polarización óhmica.

La polarización por activación se refiere a aquellos factores retardadores de la reacción que son inherentes a la reacción misma como por ejemplo, la velocidad a la cual los iones hidrógeno se reducen a gas hidrógeno. La polarización por activación es función de varios factores que incluyen la velocidad de transporte del electrón al ion hidrógeno en la superficie metálica, que naturalmente es inherente de un metal en especial y depende de la concentración de iones hidrógeno y de la temperatura del sistema, por lo que la velocidad de desprendimiento del hidrógeno es muy diferente para cada metal.

La polarización óhmica la causa la resistencia interna de la celda, e incluye la caída de voltaje.

Por otra parte, la polarización por concentración se refiere al retardo de la reacción electroquímica como resultado de los cambios de concentración en la solución adyacente a la superficie metálica.

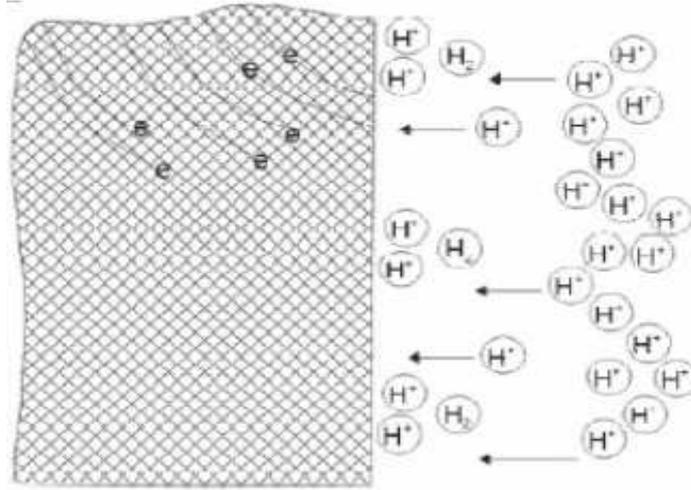


Figura 5. Polarización por concentración durante la reducción catódica de iones hidrógeno⁽⁴⁾.

Si la reacción procede a muy alta velocidad y la concentración de iones hidrógeno de la solución es baja, se puede ver que la región cercana a la superficie metálica se agota en sus iones hidrógeno puesto que son consumidos en la reacción química. Bajo estas condiciones, la reacción es controlada por la velocidad de difusión de los iones hidrógeno desde el seno de la solución a la superficie del electrodo como se muestra en la figura 5.

La polarización por activación es generalmente el factor que controla la corrosión en ácidos fuertes, mientras que la polarización por concentración predomina cuando la concentración de las especies activas es baja, por ejemplo, en ácidos diluidos o en soluciones salinas y agua con oxígeno, ya que la solubilidad del oxígeno es muy baja en soluciones acuosas y en agua⁽⁴⁾.

1.4.- RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN

Es la resistencia que relaciona la corriente de salida con el potencial aplicado para establecer la densidad de corriente y con esto poder determinar la velocidad de corrosión.

Existen dos métodos para obtener la velocidad de corrosión por técnicas de corriente directa, los cuales parten de la ecuación de Butler-Volmer de cinética electroquímica, para potenciales de corrosión suficientemente alejados de los potenciales reversibles (Una manera conveniente de determinar la cinética de reacción entre el medio y material es mediante los diagramas de Evans que han sido usados en el análisis de reacciones de corrosión. Los diagramas son la superposición de las dos curvas (Polarización) para un metal arbitrario es mostrado en la Fig. 6. En muy bajas corrientes el E_{corr} , es equivalente al potencial de electrodo reversible. Cuando E , es hecho negativo (catódico), los iones metálicos comienzan a ser reducidos. En algún punto el potencial empieza a variar linealmente con el $\log i$ esta región de la curva de polarización es conocido como la región de Tafel para valores negativos grandes de potencial, la densidad de corriente alcanza un valor máximo que es la densidad

de corriente límite, bajo estas condiciones la corriente es determinado por la velocidad de transporte para la conducta anódica del sistema cuando el potencial es hecho más positivo que $E_{corr}^{(16)}$, de las reacciones acopladas anódica y catódica, se obtiene la relación entre el potencial y la corriente:

$$I = I_{corr} (\exp 2.303 (E - E_{corr}) / \beta_a - \exp(-2.303 (E - E_{corr}) / \beta_c)) \quad \text{ec. (3)}$$

donde β_a y β_c son las pendientes anódica y catódica de Tafel respectivamente, e I_{corr} es la intensidad de corrosión.

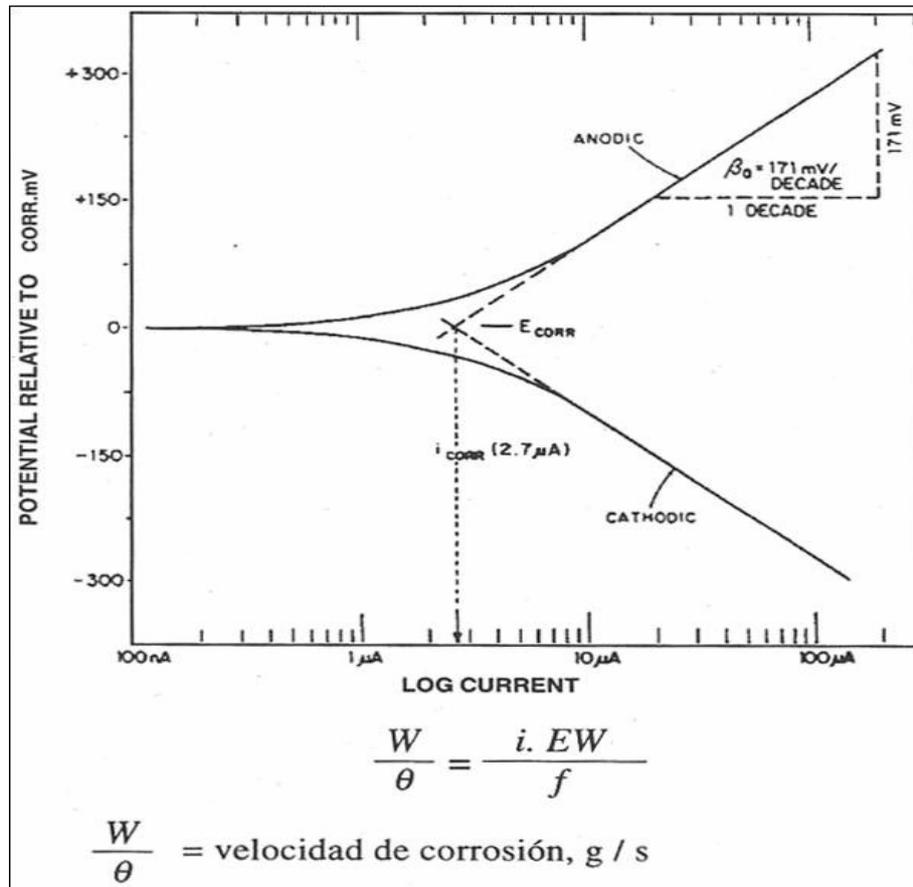


Figura 6. Diagrama de Evans⁽¹⁶⁾.

Al alejarse lo suficiente del potencial de corrosión, uno de los términos exponenciales de la ecuación se hace despreciable. Suponiendo que el primer término de la ecuación es el dominante, se obtiene la ecuación de Tafel para la parte anódica:

$$\log I = \log I_{corr} + 2.303 (E - E_{corr}) / \beta_a \quad \text{ec. (4)}$$

donde: E_{corr} = potencial de corrosión, E = potencial e I = Corriente

De manera análoga se realiza el análisis para la rama catódica. La intensidad de corrosión se obtiene extrapolando las pendientes anódica y catódica de la curva de polarización, donde se cruzan éstas o bien donde alguna de ellas cruza con el valor de potencial de corrosión.

Contrariamente al método de Tafel, el de resistencia a la polarización requiere polarizaciones pequeñas. Se deduce a partir de la misma ecuación de Butler-Volmer, teniendo en cuenta que dicha ecuación presenta un comportamiento lineal en la curva de polarización, cuando $E - E_{corr}$ tiende a cero. Por analogía con la ley de Ohm, el cociente del sobrepotencial entre la respuesta de corriente (dE/dI) tiene dimensiones de corriente eléctrica por lo que se conoce como resistencia de polarización R_p . El cálculo de la velocidad de corrosión propuesto por Stern-Geary⁽²⁾ está dado por:

$$i_{corr} = B / R_p \quad \text{ec. (5)}$$

$$B = (b_a) \cdot (b_c) / 2.303(b_a + b_c) \quad \text{ec. (6)}$$

Donde:

B es una constante definida por las pendientes anódica y catódica. b_a y b_c son las pendientes de Tafel. (b_a = anódica y b_c = catódica)

En sistemas electroquímicos controlados por difusión, los sistemas electroquímicos presentan un fenómeno donde la corriente catódica se ve limitada por la concentración de los reactivos catódicos, es decir, por transporte de masa a través del electrolito (control difusivo). Para estos casos se dice que existe una corriente límite con pendiente al infinito (o bien llamada pendiente de Tafel).

Donde la ecuación de Stern-Geary (ecuación 6), queda:

$$i_{corr} = b_a / 2.303 \cdot R_p \quad \text{ec. (7)}$$

1.5.- ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA "EIS"

La impedancia, Z, puede ser vista operacionalmente como una resistencia dependiente de la frecuencia. Al igual que una resistencia óhmica, es definida como una relación potencial / corriente. Sin embargo, en el caso de la impedancia se considera a un potencial E y una corriente I dependientes de la frecuencia⁽⁷⁾.

De esta manera la impedancia es una generalización del concepto de resistencia, cuyo caso particular es la relación entre potencial y corriente directo. Dado que usualmente se trabaja con funciones periódicas de E e I tales como seno y coseno, éstos pueden ser considerados como vectores. Por lo tanto la impedancia, el cociente de estas funciones, es también un vector y puede expresarse tanto en coordenadas cartesianas como en coordenadas polares. En el primer caso la impedancia se expresa, utilizando la nomenclatura de los números complejos, como:

$$Z(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega) \quad \text{ec. (8)}$$

Donde Z' y Z'' son respectivamente la componente real y la componente imaginaria de la impedancia y j es el número imaginario. En el segundo caso la impedancia queda definida por el módulo $|Z(\omega)|$ y el ángulo de fase $\theta(\omega)$:

$$|Z(\omega)| = \{ |Z'(\omega)|^2 + |Z''(\omega)|^2 \}^{1/2} \quad \text{ec. (9)}$$

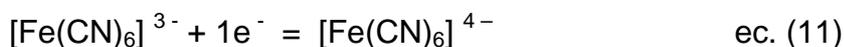
$$\theta(\omega) = \arctan \frac{Z'(\omega)}{Z''(\omega)} \quad \text{ec. (10)}$$

Las representaciones gráficas de los datos de impedancia más usadas se basan en estas definiciones. El diagrama de Nyquist (fig. 7), es una representación de la componente imaginaria contra la componente real.

El diagrama tiene la ventaja de presentar un panorama global del comportamiento de la impedancia y de resaltar el proceso predominante. Sin embargo, presenta la desventaja de no incluir explícitamente la dependencia con la frecuencia, y de ocultar a simple vista los procesos no predominantes en la impedancia (y que pueden ser importantes en el desarrollo del proceso global). El diagrama de Bode (fig. 8) es la representación del módulo o el ángulo de fase en función de la frecuencia. En este diagrama se encuentra explícita la dependencia del módulo o el ángulo con la frecuencia, además de que los procesos que contribuyen poco a la impedancia también pueden ser discernibles. Es por eso que su uso es más recomendado que los diagramas de Nyquist. No obstante, el uso de ambos es una buena medida para probar la coherencia de los datos y revelar errores experimentales.

1.5. A. SISTEMA CONTROLADO POR DIFUSIÓN

El primer ejemplo concierne a un sistema modelo muy utilizado en electroquímica por considerarse un sistema reversible de cinética rápida: La reacción de transformación ferrocianuro – ferricianuro.



La figura 2 muestra el espectro de impedancia (diagrama de Nyquist) de un electrodo de disco rotatorio de Pt sumergido en una solución equimolar de ferrocianuro/ferricianuro $5 \times 10^{-3} \text{M}$ y KCl 1M como electrolito soporte. En este diagrama predomina un semicírculo o bucle no simétrico asociado a un proceso de difusión en capa finita, lo cual está de acuerdo con lo esperado puesto que la transferencia de electrones involucrada es de cinética muy rápida y en consecuencia la etapa limitante de transformación es la difusión.

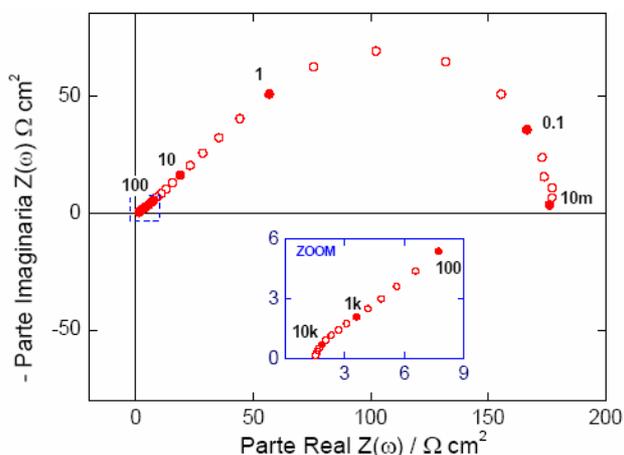


Figura 7. Diagrama de Nyquist para el sistema ferrocianuro/ferricianuro $5 \times 10^{-3} \text{M}$ en KCl 1M polarizado a $0.3V_{ECS}$. Electrodo de disco rotatorio de Pt, a 600rpm. Amplitud de la perturbación sinusoidal $\Delta E = 10 \text{mV}$. Etiquetas de frecuencia en $\text{Hz}^{(16)}$.

1.5. B. SISTEMA CONTROLADO POR ACTIVACIÓN

La técnica de impedancia es particularmente útil en la validación de mecanismos de reacción que suponen la existencia de intermediarios adsorbidos. La premisa básica establece que la relajación de las concentraciones de estos intermediarios adsorbidos genera los semicírculos que aparecen en los diagramas de Nyquist a bajas frecuencias y que caracterizan a la impedancia faradaica. Un ejemplo ilustrativo de esta situación es la disolución activa de un electrodo de hierro en medio ácido. La figura 8 muestra el espectro de impedancia para este sistema.

En esta figura 8 se observan tres bucles bien definidos y en diferentes cuadrantes del plano complejo. El bucle de más alta frecuencia revela una contribución de tipo capacitivo acoplada en paralelo con una contribución resistiva. En contraste, los bucles en bajas frecuencias semejan contribuciones de tipo inductivo acopladas en paralelo a contribuciones resistivas. Se asume que cada uno de estos bucles está ligado a procesos básicos con tiempos característicos diferentes. La frecuencia del máximo o mínimo para cada bucle tomado independientemente está ligada a este tiempo característico denominado "la constante de tiempo del proceso". Es esta separación de procesos por sus tiempos característicos en lo que recae la potencia de la técnica de impedancia para estudios electrocinéticos.

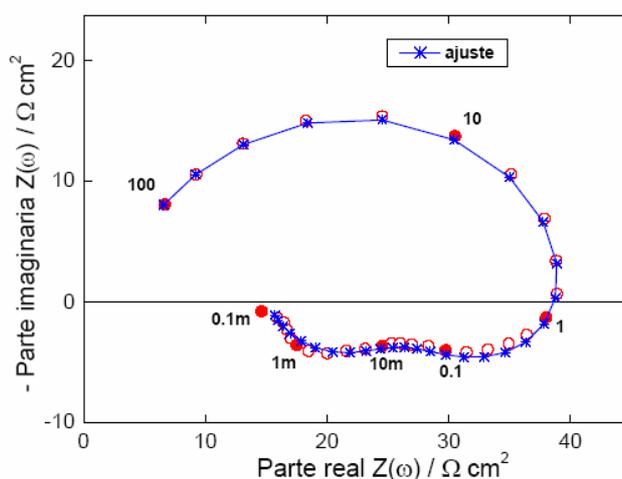


Figura 8. Espectro de impedancia de un electrodo de hierro en solución ácida (pH = 4) de Na_2SO_4 1M, y sometido a una corriente anódica, $i = 510 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Electrodo de disco rotatorio a 600rpm. Amplitud de perturbación sinusoidal $\Delta E = 10\text{mV}$. Etiquetas en $\text{Hz}^{(16)}$.

Así por ejemplo, permite estudiar sin restricción alguna procesos globales controlados ya sea por activación, por difusión, o en control mixto. La figura 9 muestra los diagramas de Bode del módulo y del ángulo de fase para el ejemplo de la disolución anódica del hierro en medio ácido (figura 8). En ellos podemos ver los dominios de frecuencia correspondientes a la manifestación de las diferentes contribuciones capacitivas, inductivas y resistivas a la impedancia. Sin embargo, esta separación no es tan clara como en el diagrama de Nyquist.

Tampoco las frecuencias ligadas a las constantes de tiempo son tan fáciles de identificar, ya que en el diagrama de Bode éstas no están ligadas a los máximos o mínimos. Se puede demostrar que son cercanas a las frecuencias de los puntos de inflexión, pero no corresponden exactamente a estos puntos. El espectro de la figura 8 (y en consecuencia los de la figura 9) pueden ser ajustados con el circuito equivalente mostrado en la figura 6, en donde se han sustituido las capacitancias e inductancias ideales por los denominados elementos de fase constante (CPE por sus siglas en inglés).

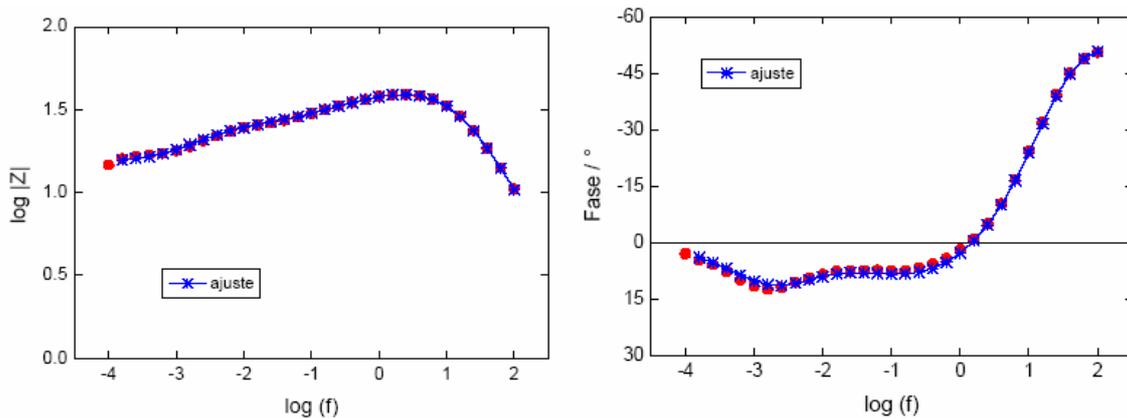


Figura 9. Diagramas de Bode módulo y fase, correspondientes al espectro de la figura 8⁽¹⁶⁾.

Los CPE son términos empíricos que introducen un parámetro adicional para tomar en cuenta la no idealidad de las capacitancias e inductancias y que son del tipo general:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^\alpha} \quad \text{ec. (12)}$$

Donde Y_0 es un parámetro constante y α un exponente que puede variar entre -1 y 1 . Si $n = 1, 0$ ó -1 el elemento de fase constante es idéntico a una capacitancia ideal, una resistencia o una inductancia ideal, respectivamente. Dada su generalidad el elemento de fase constante puede representar incluso la impedancia de una difusión semi-infinita para $\alpha = 0.5$. El ajuste logrado con el circuito de la figura 10 se muestra con las líneas continuas en las figuras 8 y 9, constatándose el buen funcionamiento del mismo. Sin embargo, el significado físico de los parámetros R_1 y R_2 , involucrados en los bucles inductivos, no es muy claro. Esta es la principal desventaja de los circuitos equivalentes al ser usados para describir contribuciones inductivas a la impedancia.

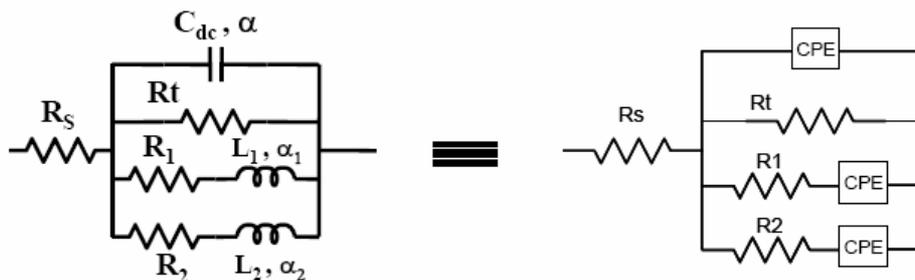


Figura 10. Circuito equivalente utilizado en el ajuste a los datos de impedancia de un electrodo de hierro en disolución activa en medio ácido⁽¹⁶⁾.

1.5.1 Medición de los datos de impedancia

La figura 11 muestra el montaje típico para la medición de impedancia en electroquímica, que consta esencialmente de un generador de señales, un potencióstato o galvanostato, y un dispositivo de cálculo de la impedancia. Dependiendo de la naturaleza del estudio a realizar se puede trabajar tanto en modo potencióstático o galvanostático, aunque generalmente el primer modo es el preferido. Estrictamente en modo potencióstático la función de transferencia que se evalúa es la admitancia, pero obtener de aquí la impedancia es sencillo, dado que es su recíproco. Trabajando en modo potencióstático, el experimento consiste en aplicar una perturbación sinusoidal de potencial de pequeña amplitud y en medir su respuesta en corriente a la misma frecuencia de perturbación.

Usualmente este proceso se repite para un conjunto de frecuencias, constituyendo lo que se conoce como un espectro de impedancia.

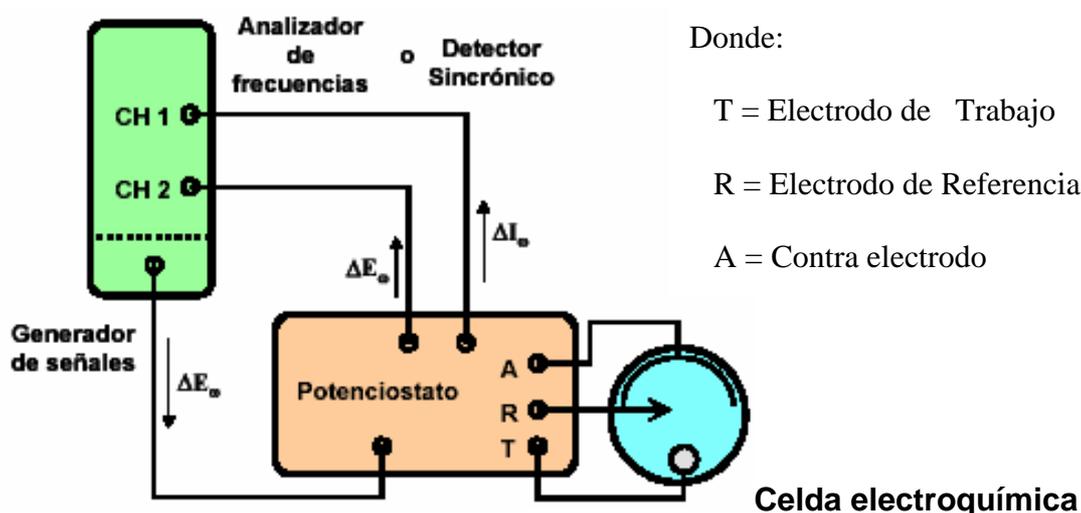


Figura 11. Arreglo experimental típico para la medición de impedancia⁽⁸⁾.

En el arreglo esquematizado en la figura 3 el generador de señales provee la señal sinusoidal para aplicarla al sistema a través del potencióstato. Éste impone el potencial solicitado y mide al mismo tiempo la respuesta en corriente. Finalmente las lecturas de corriente y potencial son enviadas al dispositivo de cálculo de la función de transferencia.

Dicho dispositivo puede ser de dos tipos: Un analizador de frecuencias (FRA por sus siglas en inglés) o un detector sincrónico ("lock-in amplifier"). Aunque el método de cálculo empleado por ambos dispositivos es diferente, el resultado final es el mismo: La estimación de la componente real (o en fase) e imaginaria (o en cuadratura) de la función de transferencia de interés, en nuestro caso la impedancia.

Los equipos más recientes de impedancia integran en un solo aparato el generador, potencióstato y analizador conectados internamente y controlados por computadora. Estos montajes presentan la ventaja de ser automatizados y

de uso simple para mediciones convencionales de impedancia en un intervalo de 0.1Hz a 1kHz. Sin embargo, cuando se estudian sistemas poco conductores, o al contrario, muy conductores, y en un rango de frecuencias más amplio, estos equipos evidencian sus limitaciones. Adicionalmente los programas comerciales de control de estos equipos no ofrecen mucha flexibilidad en cuanto al tipo de estudios posibles y a la propuesta de variantes.

1.5.2 *Proposición de un modelo*

Esta es una de las etapas más importantes del procedimiento puesto que de la elección de un modelo adecuado depende la validez de los parámetros evaluados a partir de las mediciones de impedancia. Para la elaboración de los modelos se ha recurrido principalmente a dos enfoques: Circuitos equivalentes y modelos reaccionales.

En el enfoque de circuitos equivalentes el sistema electroquímico se modela como un circuito eléctrico compuesto por elementos pasivos como resistores, capacitores e inductores. Éstos están asociados a diversos parámetros electroquímicos necesarios para la descripción de las etapas fundamentales del proceso en estudio. Así, un resistor se asocia con las propiedades conductoras del electrolito (resistencia del electrolito), con la cinética de transferencia de carga a través de la interfase (resistencia de transferencia de carga).

Un capacitor se asocia con los fenómenos de separación de carga en la interfase (capacitancia de la doble capa) o a procesos de adsorción. Un inductor se asocia también a procesos de adsorción. La facilidad de uso para el estudio de sistemas simples ha popularizado este tipo de enfoque, sin embargo, también lleva a una simplificación excesiva de los complejos procesos electroquímicos. Por ejemplo, la asociación de un proceso de adsorción a un capacitor o un inductor no tiene un sustento fenomenológico claro. Por otro lado los parámetros que intervienen en la expresión de impedancia, y la impedancia misma, no presentan una dependencia explícita con el potencial, por lo que de hecho para cada potencial se tiene un juego diferente de valores de parámetros.

La etapa final de un estudio de impedancia es el análisis de los valores de los parámetros involucrados en el modelo propuesto, a fin de inferir las propiedades de interés del sistema electroquímico en cuestión. En el caso de los modelos basados en circuitos equivalentes se tiene que establecer primero una relación entre los parámetros del circuito equivalente y estas propiedades del sistema. Así por ejemplo se necesita conocer la relación entre la resistencia de transferencia de carga y la velocidad de la reacción electroquímica, entre la resistencia de la solución y la conductancia de la misma, o entre la capacitancia de la doble capa y la concentración de especies adsorbidas. En contraste, en los modelos reaccionales los parámetros involucrados en el modelo ajustado son directamente parámetros electrocinéticos, como las velocidades de reacción de cada etapa, las corrientes de cada etapa, y los recubrimientos de cada especie adsorbida participante en la reacción⁽⁸⁾.

1.6 ADHERENCIA.

Existen varios tipos o ensayos de adherencia, entre los más usados están:

Ensayo de Tracción (“Pull Off”), la determinación del tiempo de retención con N-Metil pirrolidona y el método de la cuadrícula (“Crossshatch”). Estos se llevan a cabo evaluando la adherencia que tiene la pintura sobre la superficie del metal que fue tratado, es decir, aquellas placas a las cuales se les aplicó el tratamiento de conversión química de cromatación⁽⁶⁾.

1.7 Ensayo de Tracción



El método de empleo consiste en:

- Colocar adhesivo epóxico sobre la superficie de la pintura (de la probeta ya cromatada) ya sea la de aluminio o de acero. La cantidad necesaria solo para cubrir el área de la probeta “dolly” (aprox 1.5 cm).
- Dejar secar el adhesivo en un periodo de 12 horas a 24 horas, con la finalidad de obtener la resistencia máxima (recomendaciones del uso del adhesivo epóxico).
- Una vez seco, limpiar la zona alrededor de la probeta “dolly”, hasta dejar la superficie plana.
- Colocar el equipo Tester 525 y girar el cabezal, hasta desprenderse la probeta “dolly”.

- Registrar el valor. (esfuerzo). La adherencia se reporta como la resistencia de la película (en psi o MPa) a desprenderse del sustrato.

1.8 Determinación del tiempo de retención con N-Metil Pirrolidona

En este ensayo se sumergen las probetas de acero al carbono como de aluminio ya con tratamiento de cromatación (también probetas sin cromatar para cada aleación, las cuales se les llamara probetas testigo) así como pintadas.

El tiempo de inmersión máximo empleado en este ensayo es de 3 horas, ya que el principal interés es el comportamiento o la resistencia la adhesión que posee el tratamiento de cromatado.

La evaluación se lleva a cabo en tiempos arbitrarios, para este caso se tomarán tiempos de evaluación cada 15 minutos, **debido a que es un ensayo no estandarizado.**

1.9 Método de la cuadrícula (“CROSSHATCH”).

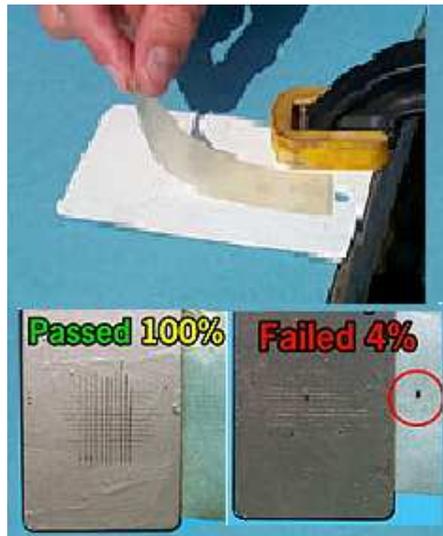


Figura 13. Método de la cuadrícula⁽¹⁰⁾.
NORMA ASTM D3359⁽¹⁰⁾.

La prueba consiste en hacer una cuadrícula de 25 cuadros en forma de tablero con ayuda de una navaja lo más fina posible sobre la placa ya tratada y pintada, posteriormente se coloca cinta dejándola lo mejor pegada posible, presionándola con una superficie plana o bien con la uña, para evitar que queden atrapadas burbujas de aire, una vez bien adherida la cinta en la placa se retira de un solo movimiento.

El número de cuadrados que permanecen proporciona la eficiencia de la resistencia a la adhesión.

Los métodos de la prueba cubren los procedimientos para evaluar la adherencia de las películas al sustrato metálico aplicando y quitando la cinta que es sensible a la presión encima de los cortes hechos en la película

RESUMEN

Todos los metales tienden a regresar a su estado basal, es decir a oxidarse. En realidad el medio que lo rodea es uno de los principales problemas, por lo cual el hombre ha empleado recubrimientos anticorrosivos contra la corrosión, es decir, pinturas que actúan como barrera en contra de un ambiente agresivo evitando el contacto entre éste y la estructura metálica a proteger. Algunos recubrimientos no sólo actúan como barrera impidiendo el contacto de la humedad con la superficie metálica, sino que poseen una segunda función: pueden actuar como inhibidores de la corrosión protegiendo la estructura sobre la cual son aplicados.

Para evitar la corrosión existen varias formas de tratamientos de conversión química o bien diferentes tipos de protección, para lo cual se requiere que los recubrimientos tengan una buena adherencia, formando en la superficie del metal una película cristalina que sirve como perfil de anclaje.

En este trabajo se presenta la evaluación del tratamiento de conversión química mediante el proceso Cronak (ver apartado 1.C), el cual consiste básicamente en sumergir probetas de acero al carbón y aluminio (AISI 1018 y Al 1200 H14, respectivamente) de acuerdo a las condiciones óptimas de operación (tiempo de inmersión y temperatura de secado), una vez obtenido el cromatado se emplea un barniz epóxico con espesor de capa controlado en toda la superficie de la placa.

El objetivo principal es evaluar la velocidad de corrosión por medio de la técnica de **Resistencia a la Polarización** (es la resistencia que relaciona la corriente de salida con el potencial aplicado) y **Espectroscopia de Impedancia Electroquímica "EIS"** (se considera a un potencial E y una corriente I dependientes de la frecuencia, cuyo caso particular es la relación entre potencial y corriente directa más una variación senoidal), antes y después de cromatar, de igual manera con barniz epóxico. Además se evaluará la **adhesión** mediante las técnicas de **Pull Off o tracción** (de acuerdo con la norma ASTM D 4541), técnica **Crosshatch o de cuadrícula** (norma ASTM D3359), y por inmersión en **N-Metil Pirrolidona**, que es un ensayo no estandarizado.

Con esto se podrá determinar la temperatura y tiempo mínimo de operación de cromatación en acero al carbón y aluminio a través de las técnicas electroquímicas mencionadas.

II.- OBJETIVOS.

- Determinar el comportamiento del potencial de corrosión mediante gráficas de E_{corr} vs tiempo.
- Determinar la resistencia a la polarización empleando la técnica de EIS y R_p , para las condiciones óptimas del proceso de cromatado, puesto que, la velocidad de corrosión es inversamente proporcional a la resistencia a la polarización.
- Determinar las condiciones apropiadas (tiempo de inmersión en el proceso "Cronak" y tiempo de secado) para la formación de una película protectora anticorrosiva.
- Mediante la técnica de Impedancia se identificara el tipo de control de proceso dominado (activación o difusión), tanto en metal desnudo, metal con tratamiento: "cromatado" y pintado.
- Determinar la resistencia a la adhesión que posee el recubrimiento tanto en Acero al Carbono AISI 1018 como en una aleación de Aluminio 1024 H14.

III.- MATERIAL Y REACTIVOS.

Probetas de Aluminio bajo la especificación Al1024 H14(la composición se muestra mas adelante)	Cloruro de Potasio en cristales industrial al 97% de pureza
Celda electroquímica, multímetro y potencióstato	Ácido Sulfúrico concentrado fumante al 97.7% de pureza
Adhesivo Top	N-Metil Pirrolidona (ver ficha técnica)
Probetas de Acero al Carbono, AISI 1018(la composición de muestra mas adelante)	Solución de NaCl al 3%
Equipo de Tracción ElcometerTester 525	Resina y Catalizador
Potenciostato VIMAR Y GILL	Rasador y Nivelador
Contra electrodo de Grafito	Dicromato de Potasio heptahidratado Al 99.92% de pureza
Electrodo de Calomel	Barniz de Poliuretano Transparente 11000
Medidor de espesores Elcometer 345	Agua Destilada

IV.- DISEÑO EXPERIMENTAL.

Preparar la solución cromatante según el proceso "Cronak" con la siguiente formulación:

200 g/L de $K_2Cr_2O_7$ + 5-6 ml de H_2SO_4

aforados o llevados a un litro con agua destilada.

4.1) Identificar el potencial de corrosión o de reposo en función del tiempo.

1.- Montar el sistema de trabajo, que consta de la celda electroquímica conectada al potencióstato. En aluminio y acero, se empleó como electrolito cloruro de sodio al 3% para conocer su potencial de corrosión, empleando además un electrodo de referencia de Calomel.

2.- Evaluar el potencial de reposo en función del tiempo en pequeños intervalos de tiempo (15 segundos) hasta que el potencial se estabilice, usando contra electrodo de grafico, electrodo de calomel saturado como de referencia y como electrodo de trabajo acero al carbono 1018 y aluminio 1200 H14.

3.- El potencial de corrosión servirá como punto de partida, ya que la solución electrolítica que se usará posteriormente es la solución cromatante.

4. 2) RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN

Área de contacto que se llevará en las pruebas $0.7854cm^2$.

1. Cortar placas de acero AISI 1018 y Al 1024 H14 de las siguientes medidas: 2cm x 2cm x 0.1cm.
2. Una vez cortadas las placas, llevar a cabo la limpieza de éstas, que consiste básicamente en:
 - Desengrasar con acetona para dejar totalmente la superficie limpia.
 - Lijar a número 600, con la finalidad de eliminar cualquier indicio de corrosión solo en placas de acero al carbono.
 - Una vez lijadas las piezas, enjuagar con agua destilada y dejar secar.
 - Se emplea acetona con la finalidad de que se lleve a cabo más rápido el secado.
3. Una vez secas las placas colocarlas en la solución cromatante⁽³⁾, como se muestra en la siguiente tabla para los diferentes tiempos de inmersión.

	Tiempo de inmersión (segundos)				
probetas	0 (testigo)	10	30	60	5

4. Secar las placas a temperatura de 20°C y 70°C co rrespondientemente.
5. Llevar a cabo las pruebas de Resistencia a la Polarización de las placas una vez pasadas 24 horas de secado. Es importante señalar que para poder realizar las corridas para las placas, es necesario haber calibrado antes el Potenciostato Vimar con ayuda de una resistencia de 10ohms.
6. Registrar el área de contacto del electrodo de trabajo el cual permanecerá constante. Siendo el electrodo de trabajo aluminio y acero (la composición para cada aleación se muestra más adelante).
7. Graficar las curvas de potencial aplicado vs corriente, registrando los valores proporcionados por el equipo Vimar, para obtener la pendiente, esto es, la resistencia a la polarización.

4.3) PREPARACIÓN DE LAS PLACAS PARA BARNIZAR.

1.- Preparar 100ml de barniz de poliuretano, el cual consta de 2/3 partes de resina por 1/3 parte de catalizador.

2.- Colocar las placas de Acero al Carbono AISI 1018 y Aluminio Al1024 H14 una vez cromatadas (de acuerdo a cada una de las condiciones óptimas de operación, es decir, el tiempo de inmersión y temperatura de secado) sobre una superficie plana y con ayuda de un nivelador verificar que se encuentre plana (figura 14).

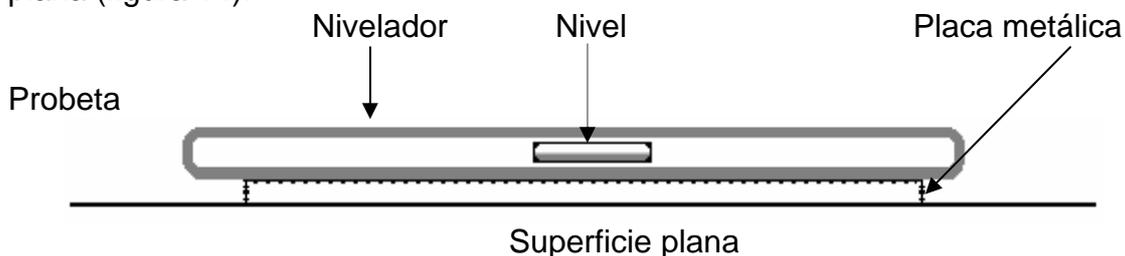


Figura 14. Preparación de las placas para ser pintadas.

3.- Una vez obtenida una superficie plana, colocar pintura sobre un lado de la probeta a lo ancho y deslizar lentamente el rasador hasta el extremo de la probeta y regresarlo, con la finalidad de obtener un espesor homogéneo de película húmeda sobre la superficie (figura 15).

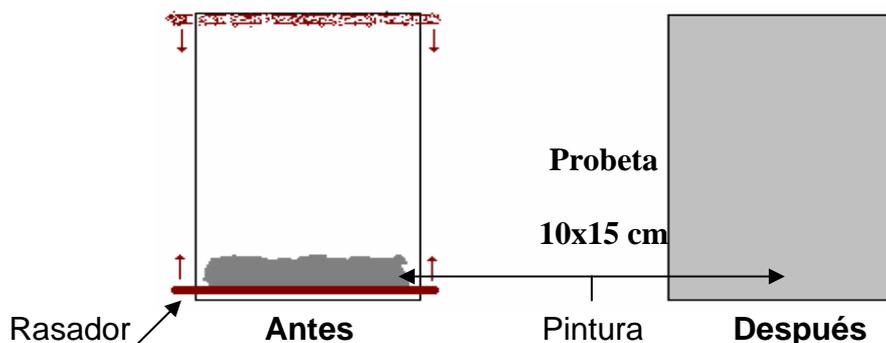


Figura 15. Obtención de placas pintadas.

4.- Dejar 48 horas de secado de acuerdo con la recomendación del fabricante (POLYFORM), para su posterior uso.

4. 4) Técnica de Impedancia “EIS”.

1. Repetir los pasos 1 y 4 como se indica en el punto 5.2 (Rp).
2. Montar el equipo como se muestra en la figura 3, donde el electrodo de trabajo es la aleación a evaluar (acero y/ó aluminio), el contra electrodo es de carbón grafito y el electrodo de referencia es electrodo de Calomel.
3. Correr las pruebas de Impedancia de cada una de las placas por duplicado. Es importante señalar que para poder llevar a cabo las corridas con las placas, es necesario haber calibrado antes el Potenciostato Gill - AC.
Operando a: 10^{-2} Hz a 10^4 Hz, tomando 10 puntos por década.
4. Análisis de las gráficas, para poder determinar el tipo de control (por activación o difusión) de fenómeno de corrosión que domina para cada una de estas aleaciones.

4. 5) ENSAYO DE TRACCIÓN.

1.- Medir el espesor de la película seca de recubrimiento en la placa de acero tanto a lo largo como a lo ancho (10x15 cm), para conocer el espesor promedio con su respectiva desviación estándar, el cual servirá como guía para la colocación de las probetas sobre la placa.

2.- Una vez identificando los lugares en donde el espesor es controlado, colocar en las probetas “dolly” adhesivo “top” sobre la superficie de la probeta evitando el exceso de adhesivo (colocando una capa delgada de adhesivo homogénea), para la realización del ensayo.

3.- Ensayo de Al 1024 H14 por duplicado.

Espesores (μm)		Figura 16. Colocación de probetas sobre la placa
Probeta Tamb		
32	32	
32	32	
Probeta T ₇₀		
32	32	
32	32	
32	32	

En caso del aluminio, como no es posible la medición de espesores con el equipo disponible, se aplicó un espesor de 32μm de película seca sobre la superficie del aluminio, manteniendo lo más uniforme posible el pintado. El modo de determinación de espesores se menciona en el apartado 7.3.

4.- Ensayo de tracción en Acero al Carbón 1018 por duplicado.

P₁ Tamb = Placa #1 cromatada a temperatura ambiente (20°C)

P₂ Tamb = Placa #2 cromatada a temperatura ambiente (20°C)

P₁ T₇₀ = Placa #1 cromatada a temperatura de 70°C.

P₂ T₇₀ = Placa #2 cromatada a temperatura de 70°C.

Espesores (μm)				Figura 17. Colocación de probetas sobre la Placa
P ₁ Tamb				
54	32	32	30	
26	32	28	40	
2.7	1.7	2.2	4.8	
17.2	6.8	4.8	10.3	
29	10.5	13.0	4.3	
P ₂ Tamb				
40	39	31	17.4	
52	47	27	13.9	
58	52	23	12.8	
53	38	22	7.4	
69	70	58	40	
P ₁ T ₇₀				
42	59	53	24	
43	37	25	43	
38	40	35	36	
42	37	32	34	
39	37	42	27	
P ₂ T ₇₀				
38	43	23	22	
44	44	39	21	
66	59	29	17.3	
72	60	26	13.7	
53	40	20	10.7	

4. 6) ENSAYO DE N-Metil Pirrolidona

1.- Colocar 3 probetas de cada aleación cromatadas y pintadas, así como con su respectiva probeta testigo que consiste en que sólo estén pintadas sin cromatar, ya que el principal objetivo es determinar la adherencia que promueva el tratamiento de cromatado.

2.- Las probetas metálicas son de 2x2cm, para el acero al carbono (AISI 1018) y el aluminio (Al 1024 H14).

3.- Sumergirlas en N-Metil Pirrolidona a 70°C durante 3 horas, cada 15min se debe de agitar levemente con la finalidad de apreciar el desprendimiento de la pintura, continuar hasta que la pintura sea desprendida por completo o bien evaluar las probetas durante las 3 horas de exposición.

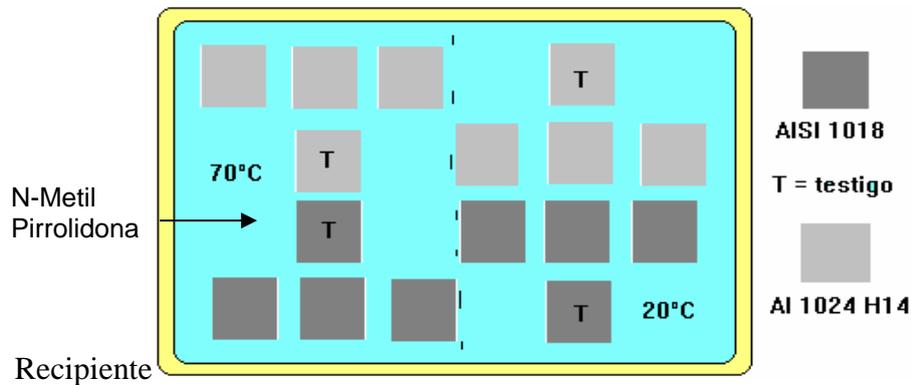


Figura 18. Colocación de las placas sumergidas en N-Metil Pirrolidona.

4.7) Método de la cuadrícula (“Crossshatch”).

- 1.- Se toman dos placas testigo para cada aleación, que constan de metal pintado sin cromatar. Se evalúan y se comparan con las placas cromatadas.
- 2.- Se mide el espesor de los recubrimientos en las placas tanto a lo largo como a lo ancho (10x15cm), con la finalidad de obtener un espesor estándar, el cual servirá como guía para la formación de la cuadrícula. Es en esa área en donde se realiza el ensayo de adhesión.
- 3.- Con ayuda de una navaja delgada (“cutter”) se hace una cuadrícula de 5x5 con una separación de 1mm entre incisiones sobre la placa ya pintada.
- 4.- Colocar cinta canela, presionándola sobre la superficie con una superficie plana o bien con la uña, con la finalidad de evitar que queden atrapadas burbujas de aire, y retirar la cinta de un solo paso.
- 5.- Registrar el número de cuadros desprendidos para conocer el % de aceptación.
- 6.- Llevar dicha prueba por triplicado.

En las secciones o zonas donde se trazó la cuadrícula sobre la probeta pintada (con barniz epóxico), fueron previamente medidos los espesores para dichos ensayos.

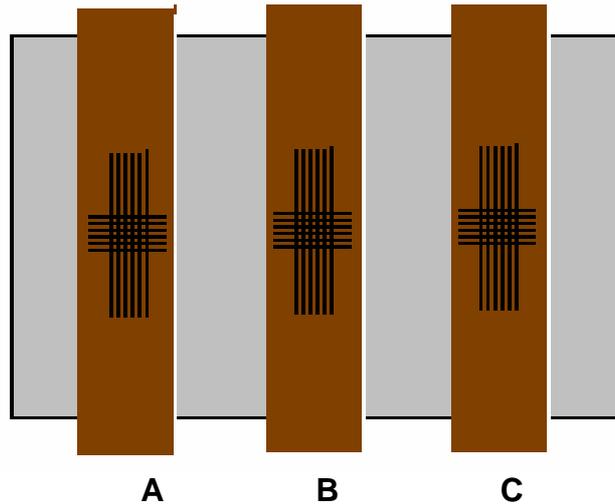


Figura 19. Zonas a evaluar (“Crossshatch”).

A, B y C corresponde a las 3 zonas de evaluación para cada una de las placas.

Los valores pueden ser registrados como porcentaje de falla o bien por el número de cuadros desprendidos como falla o número de cuadros no desprendidos.

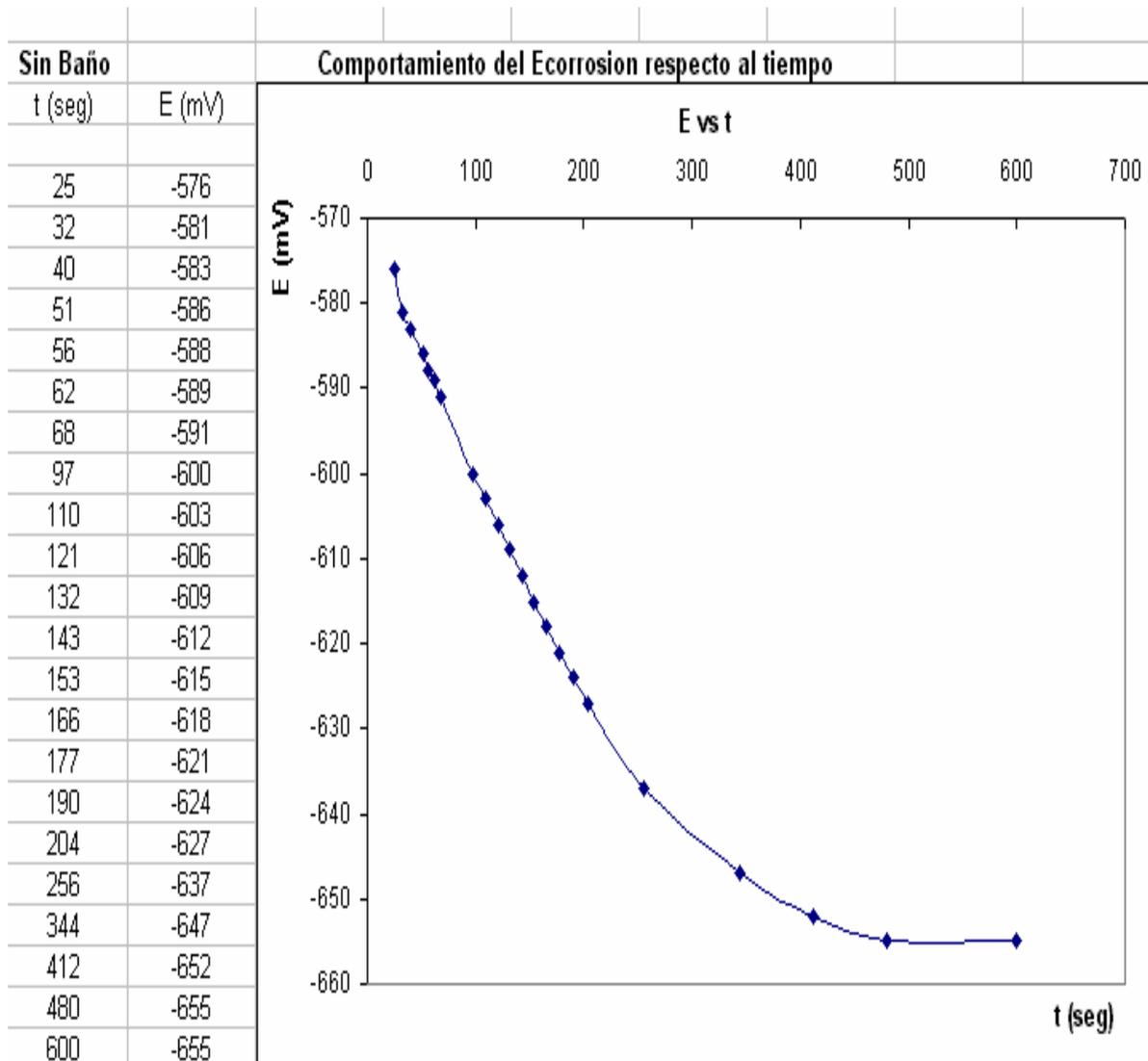
En las zonas donde se traza la cuadrícula se debe tener mayor cuidado al momento de pegar la cinta, se debe aplicar la presión del centro de la cuadrícula hacia las orillas evitando no desprender el barniz, ya que en ocasiones si se llevó mal una selección de la zona a ensayar o bien se aplica demasiada fuerza, es posible que exista desprendimiento antes de retirar la cinta, ya que solo se trata de evitar que queden burbujas atrapadas dentro de la cuadrícula que se formó, por lo que no es necesario aplicar una presión excesiva.

V.- RESULTADOS

5. 1) *Potencial de reposo y Resistencia a la polarización.*

En el gráfico 5.1 se presentan los resultados para una probeta de acero al carbono 1018 sin cromatar. Este ensayo se realizó por triplicado, sin embargo, dada la alta reproducibilidad de los resultados se decidió presentar solamente uno de ellos.

Gráfico 5.1: E vs t para acero al carbono (AISI 1018) al desnudo a temperatura 20°C, probeta testigo. Con respecto al electrodo de referencia ECS .



En los gráficos 5.2 a 5.5 se presentan los resultados de Rp para las probetas de acero al carbono 1018. Se incluye la tabulación con los valores de potencial y corrientes correspondientes y las gráficas para mostrar qué tanta histéresis se presenta en cada caso. Este fenómeno se discutirá mas adelante.

Gráfico 5.2: Resistencia a la polarización (Rp) para acero al carbono (AISI 1018) al desnudo a temperatura 20°C, probeta testigo o.

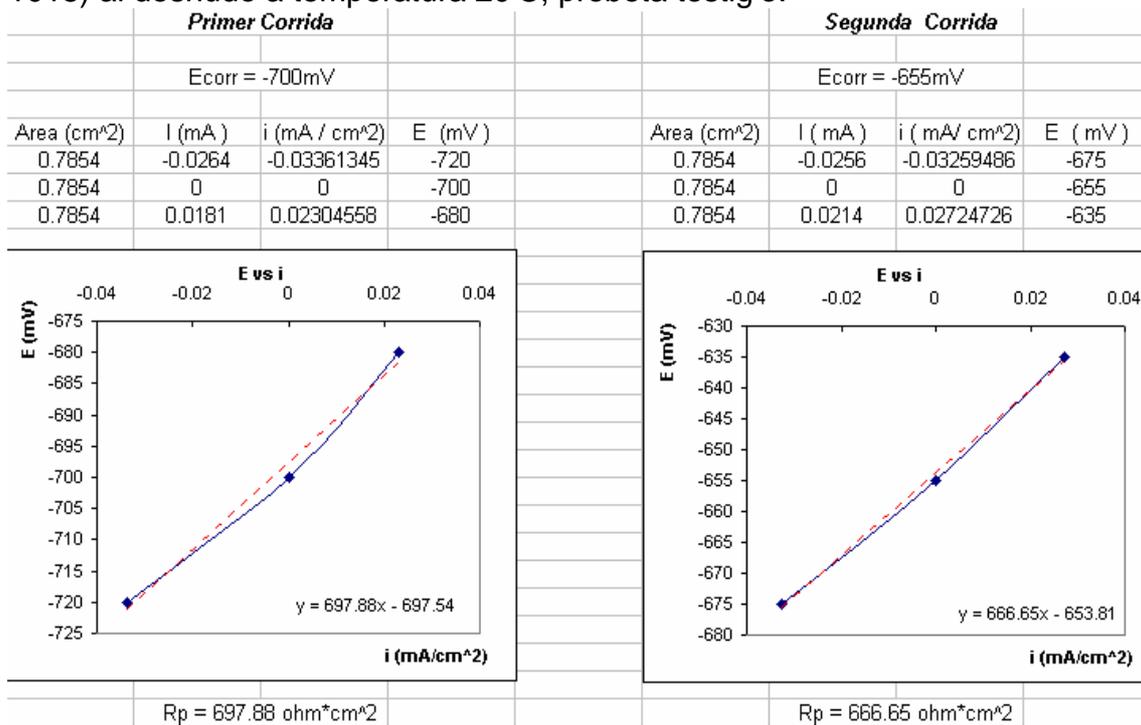
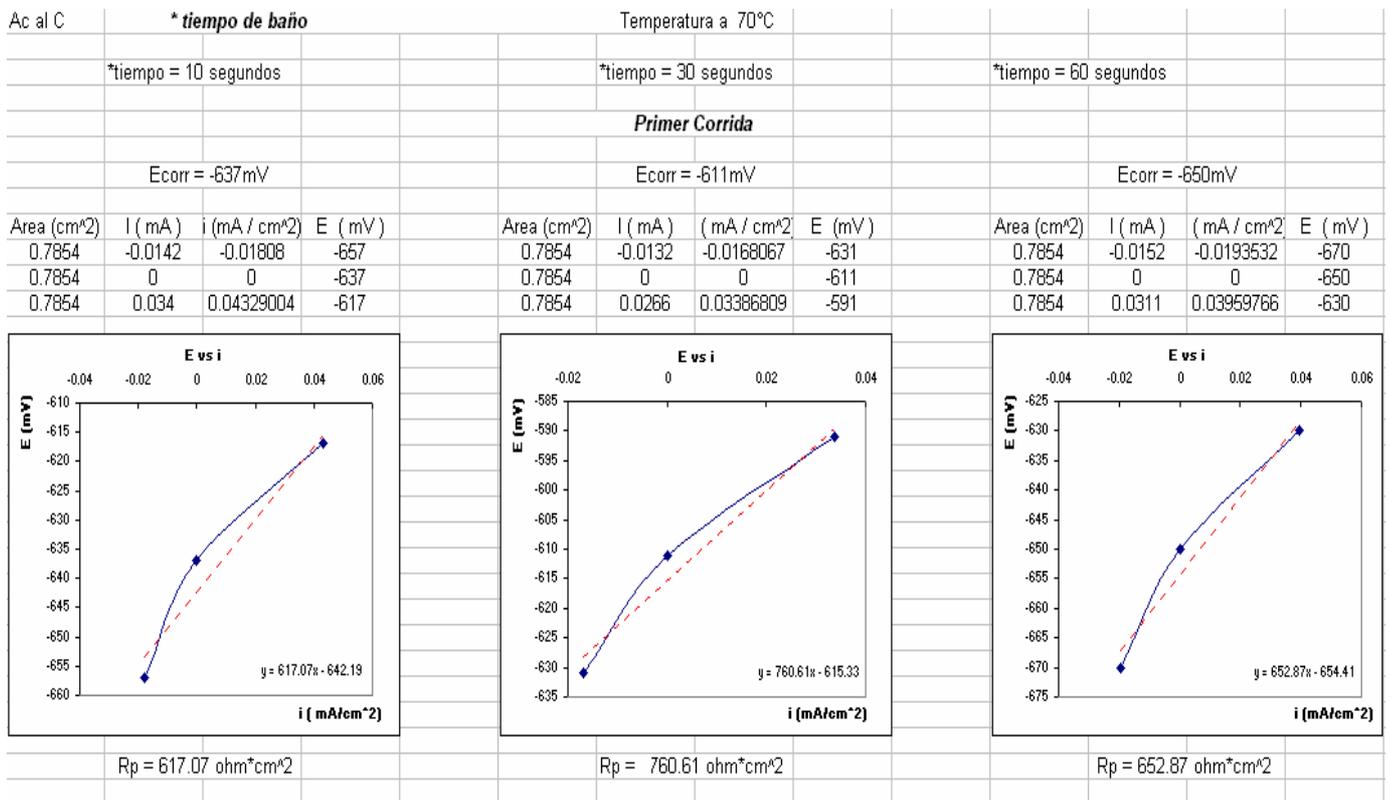


Gráfico 5.3: Resultados obtenidos a 10, 30 y 60 segundos de tiempo de inmersión en la solución cromatante y secados a temperatura de 70° C para acero al carbono.



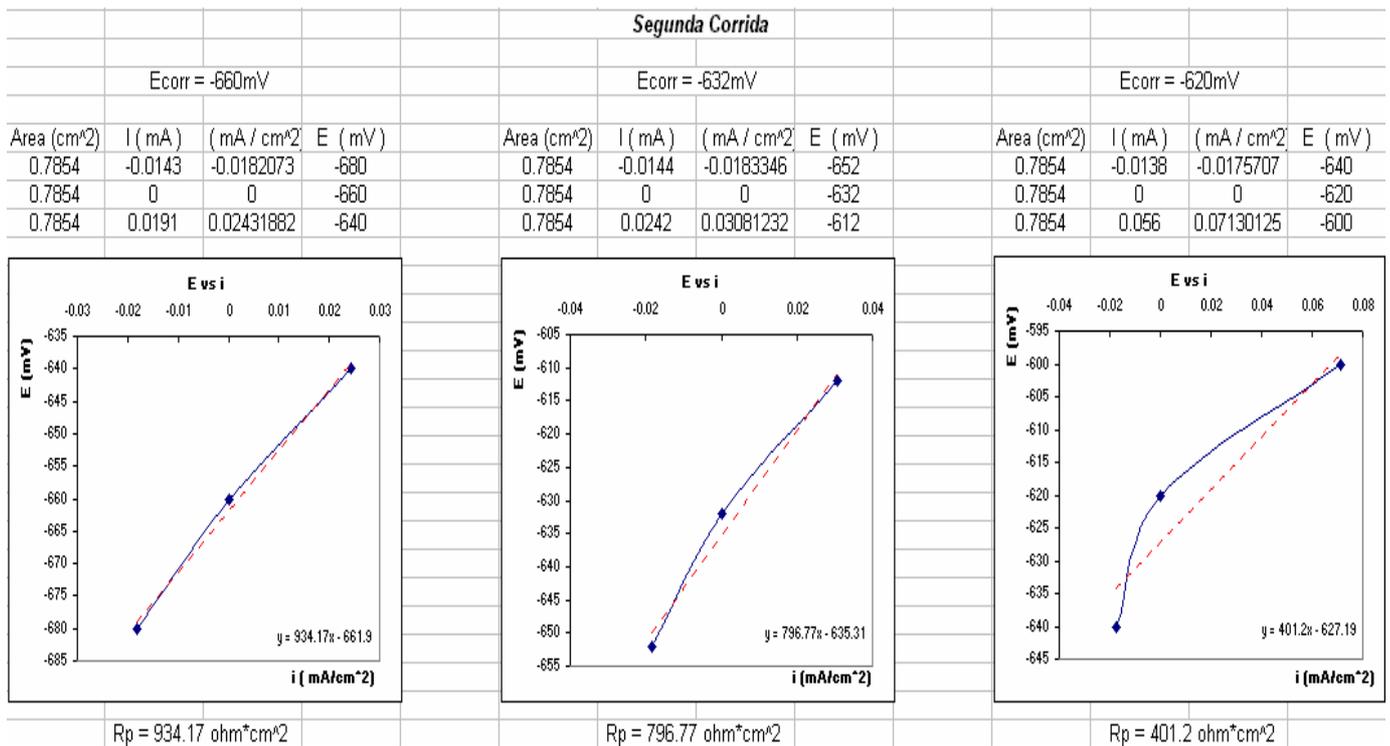
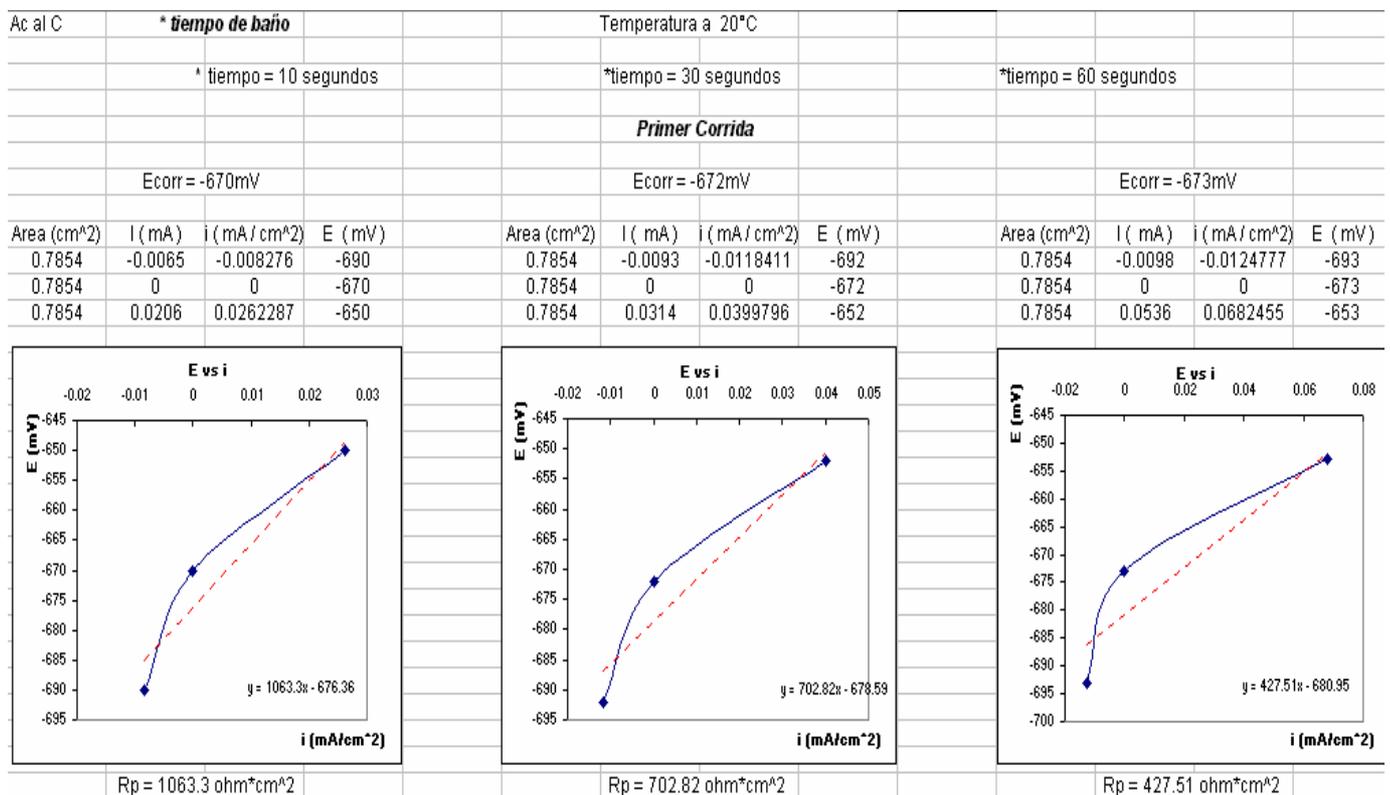


Gráfico 5.4: Resultados obtenidos a 10, 30 y 60 segundos de tiempo de inmersión en la solución cromatante y secados a temperatura de 20° C para acero al carbono.



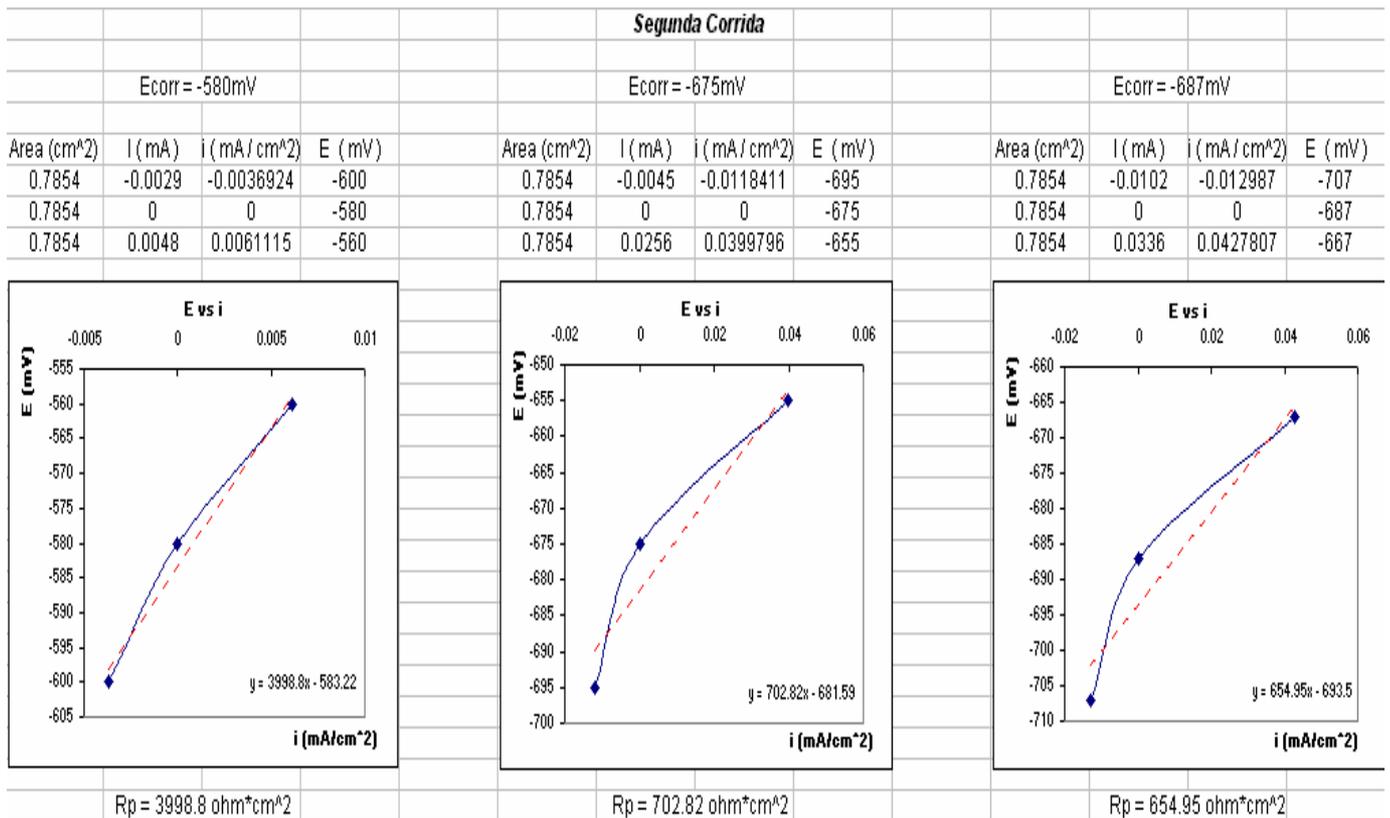
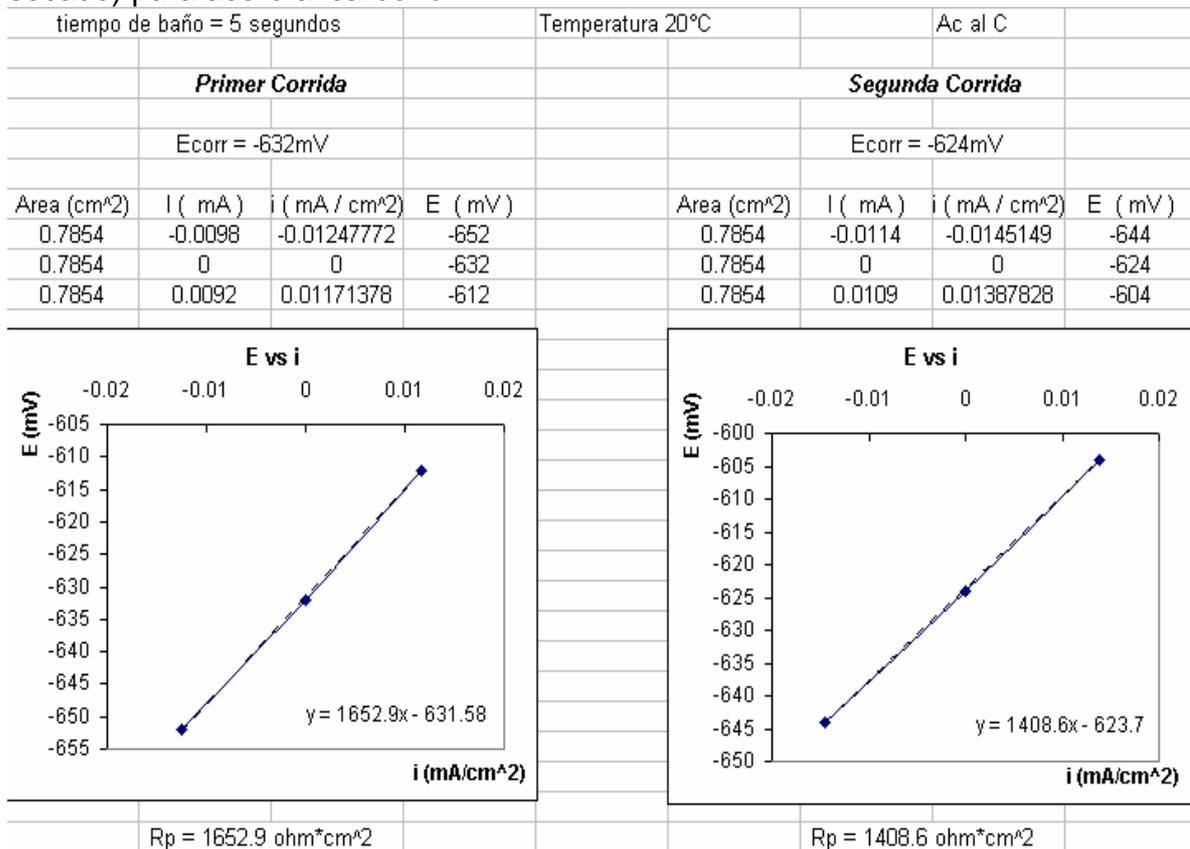
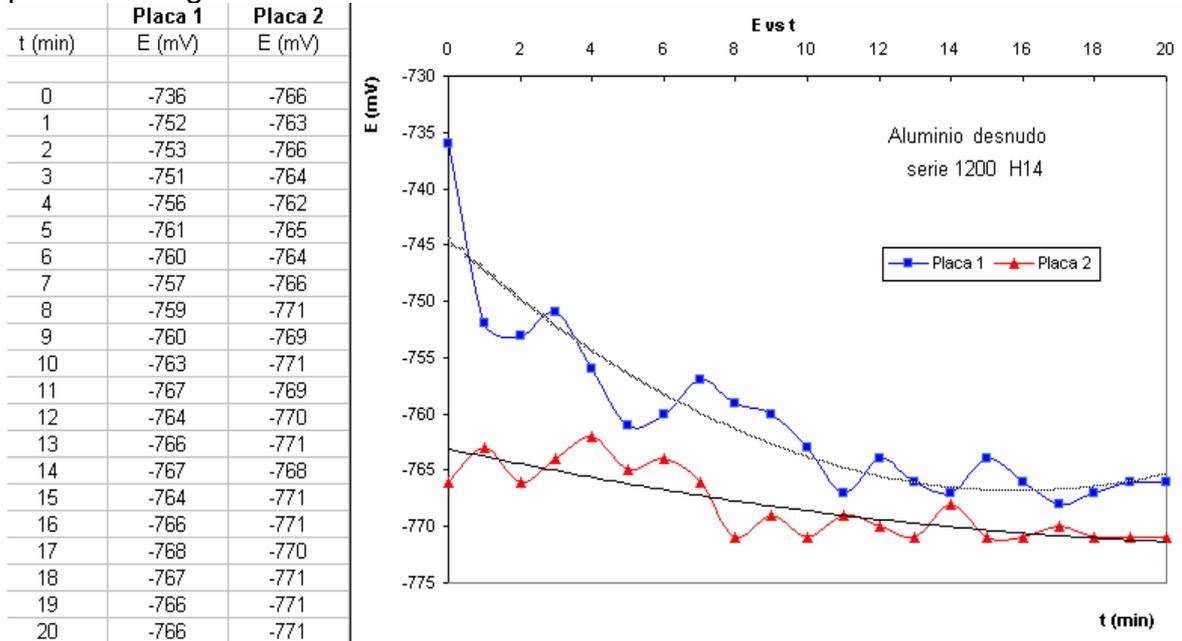


Gráfico 5.5: Resultados obtenidos a 5 segundos de inmersión en la solución cromatante y secados a temperatura de 20° C (temperatura óptima de secado) para acero al carbono.



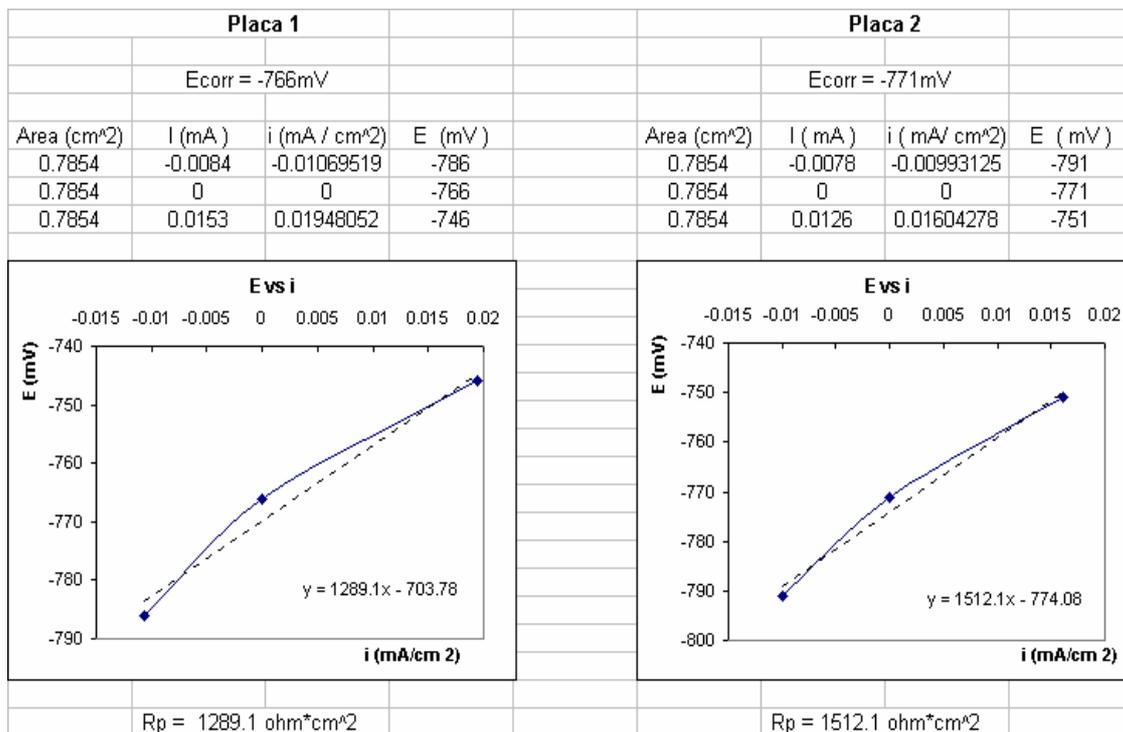
En el caso de las placas de aluminio 1024, el potencial mostró tendencias poco reproducibles, sin embargo, después de 20 minutos se alcanza un valor de -766 a -771 mV vs ECS, como puede apreciarse en el gráfico 5.6

Gráfico 5.6: E vs t para aluminio (Al1024 H14) al desnudo a temperatura 20°C, probeta testigo.



Las líneas negras delgadas dentro del gráfico representan el comportamiento de la estabilización del potencial respecto al tiempo.

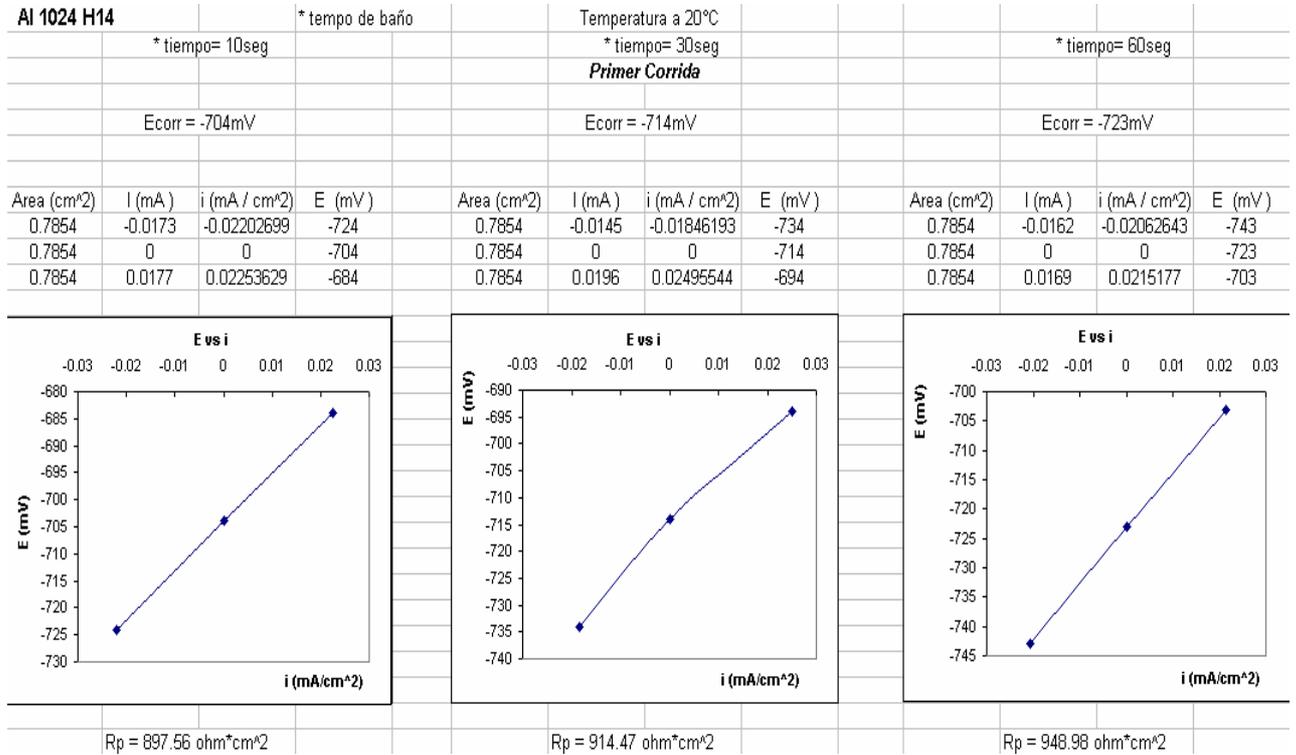
Gráfico 5.7: Resistencia a la polarización (R_p) para aluminio (Al1024 H14) desnudo a temperatura 20°C, probeta testigo.



En los gráficos 5.8 y 5.9 se presentan los resultados de R_p para las probetas

de aluminio 1024. Se incluye la tabulación con los valores de potencial de corrosión y corrientes correspondientes.

Gráfico 5.8: Resultados obtenidos a 10, 30 y 60 segundos de tiempo de inmersión en la solución cromatante y secados a temperatura de 20° C para aluminio.



Segunda Corrida

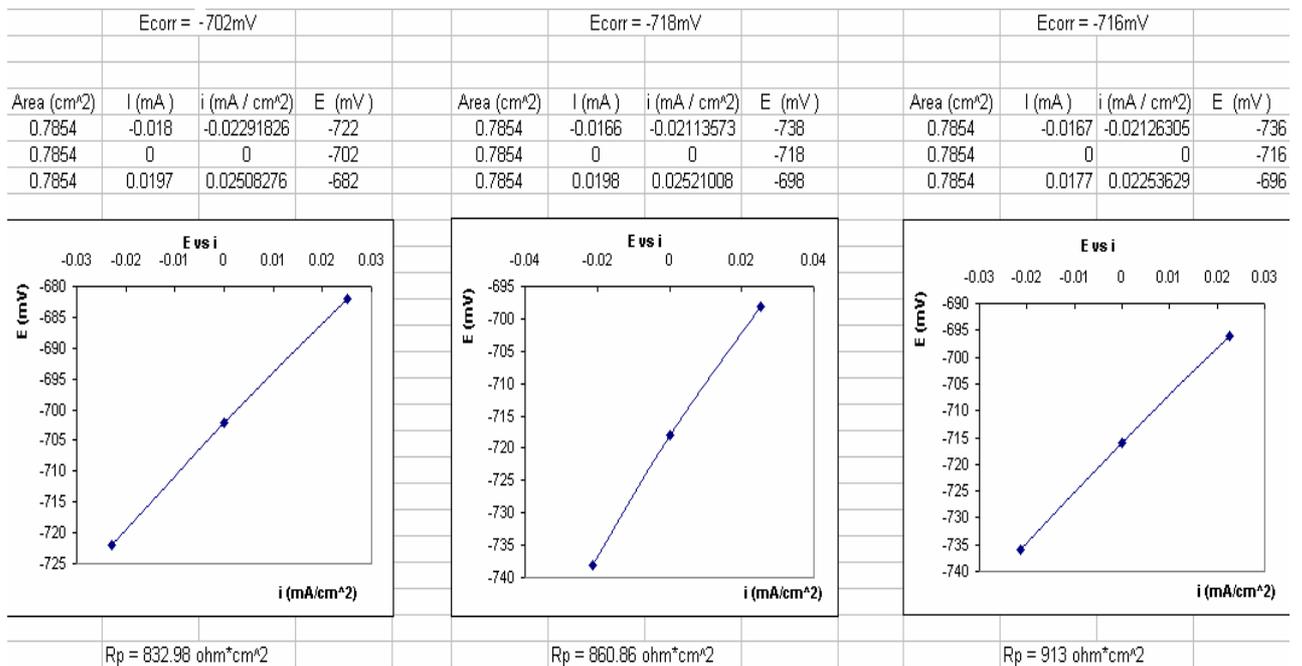
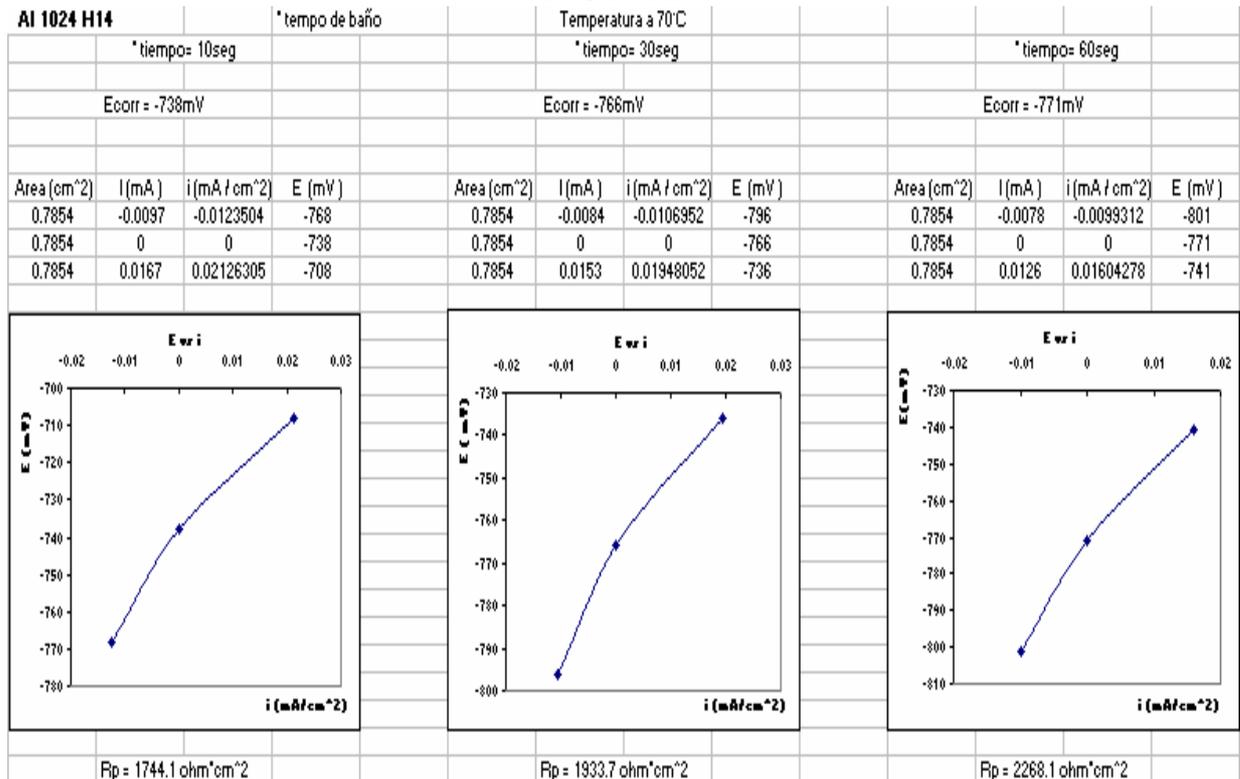
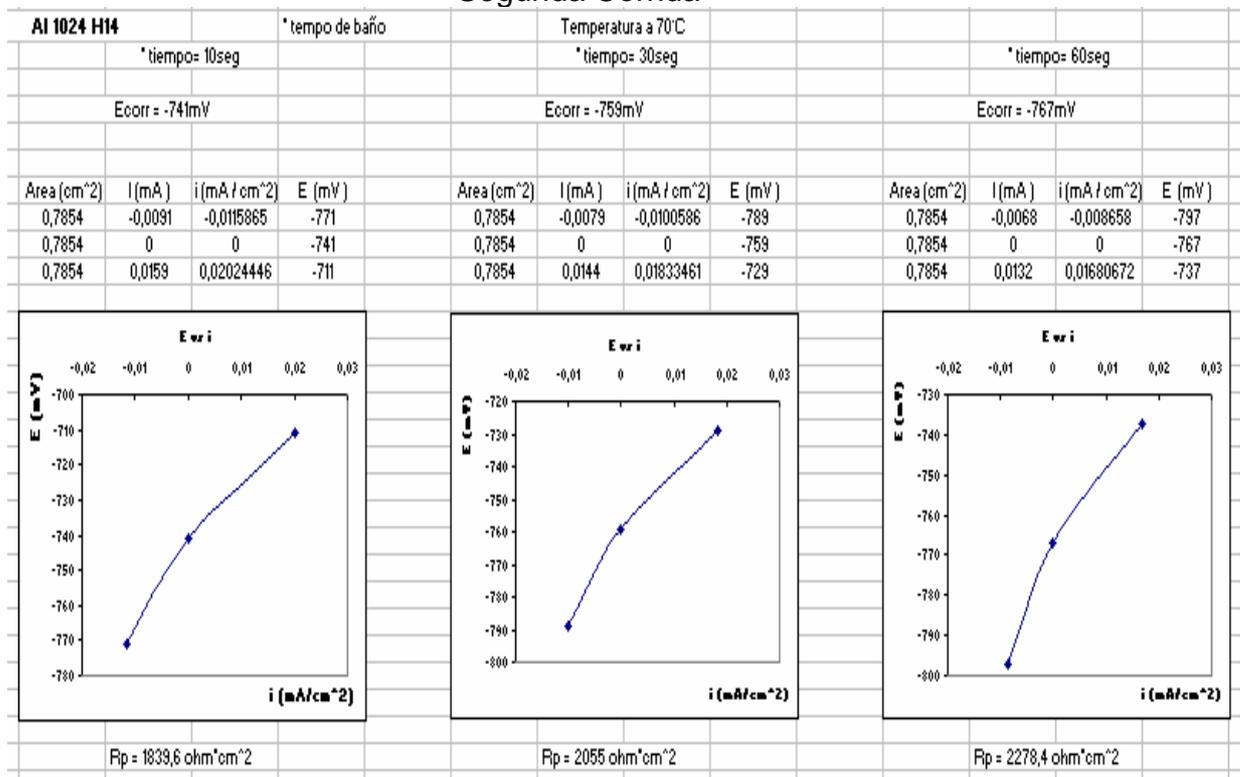


Gráfico 5.9: Resultados obtenidos a 10, 30 y 60 segundos de tiempo de inmersión en la solución cromatante y secados a temperatura de 70° C para aluminio.

Primer Corrida



Segunda Corrida



5.2) Resultados de la prueba de tracción para acero al carbono 1018

Valores de los espesores (μm) en donde se llevó a cabo la prueba de tracción ("pull off").	Placa ₁ T _{20°}	Placa ₂ T _{20°}	Placa ₁ T _{70°}	Placa ₂ T _{70°}	
				42	38
	54		24	22	
	32	40	43	44	
	32	52	43	44	
	30	23	42	39	
	26	53	34	59	
	40	38	39	29	
	29	40	27	60	
			53		
Promedio	34.71	41.00	36.75	43.11	
Desviación estándar	9.53	10.95	7.59	12.87	
	Placa T _{20°}		Placa T _{70°}		
Promedio	37.86		39.93		
Desviación estándar	10.24		10.23		

5.2.1. Para probetas de acero al carbono a 5 segundos de inmersión.

Ensayo	Resistencia		% Desp	Res. al 100%
	MPa	lb/in ²		lb/in ²
P₁ T₂₀				
1	1	150	50	300
2	1.2	180	65	276.92
3	1.1	160	50	320
4	1.3	190	85	223.53
P₂ T₂₀				*280.11
1	1	150	50	300
2	1.3	190	90	211.11
3	1.1	160	30	533.33
4	1.3	190	45	422.22
P₁ T₇₀				*366.66
1	1	150	92	163.04
2	1.2	180	88	204.54
3	0.9	140	65	215.38
4	1	150	75	200
P₂ T₇₀				*195.74
1	1.1	160	50	320
2	1.2	180	90	200

3	1.2	180	70	257.14
4	1.3	190	87	218.39
* Promedios				*248.88

% Desp: Porcentaje desprendido.

Temperatura	20°C	70°C
Resistencia Promedio (lb/in ²)	323.39	222.31

% = Porcentaje de la superficie desprendida en el ensayo de adhesión.

P_i = Placa; i = Numero de placa a evaluar.

T₂₀ = Temperatura de 20°C. T₇₀ = Temperatura de 70°C.

Res. al 100% = Resistencia al 100% (toda la superficie desprendida).

5.2.2. Resultados de Tracción para probetas de Al 1024 H 14 a 60 segundos de inmersión.

Temperatura	Ensayo	Resistencia			Res. al 100%
		MPa	lb/in ²	%	lb/in ²
Prob T ₂₀	1	1	150	50	300
	2	0.9	140	65	215.38
	3	0.9	120	70	171.43
	4	0.1	120	55	218.18
	* Promedios				*226.25
Prob T ₇₀	1	0.8	130	75	173.33
	2	0.7	120	65	184.61
	3	1	145	50	290
	4	0.85	135	65	207.69
	* Promedios				*213.91

Temperatura	20°C	70°C
Resistencia Promedio (lb/in ²)	226.25	213.91

5.3) Resultados de adherencia con el ensayo de N-Metil Pirrolidona (tiempo de retención).

5.3.1. Para acero AISI 1018 (Testigo, Cromatado en 20°C y 70°C):

Min	Observaciones (condiciones similares)
15	No existe cambio en ninguno de las 3 condiciones.

30	Empieza a removerse el barniz solo para testigo.
45	Empieza a remover barniz en placa de 70°C.
60	Existe poco desprendimiento de pintura en testigo, se reblandece más barniz en 70°C y se reblandece muy poco el barniz en 20°C.
75	Existe del orden de 40% de barniz desprendida en testigo, existe poco desprendimiento en 70°C y empieza a reblandecer en zonas en 20°C.
90	Desprendimiento de 70% en testigo, 10% de desprendimiento en 70°C y se reblandece barniz cerca de 75% en 20°C.
105	Desprendimiento cerca de 85% en testigo, 25% de desprendimiento en 70°C y se reblandece cerca del 90% en 20°C.
120	Desprendimiento del 95% en testigo, 55% de desprendimiento en 70°C e inicia desprendimiento en 20°C.
135	Desprendimiento total en testigo, 80% de desprendimiento en 70° y 20% de desprendimiento en 20°. Se retira probeta t estigo.
150	93% de desprendimiento en 70° C y 55% de desprendimiento en 20° C.
165	Desprendimiento total en 70°C y 85% de desprendimiento en 20°C. Se retira probeta de 70°C.
180	De 8 a 10% de barniz se queda retenido en probeta, en 20°C.

5.3.2. Para AI 1024 H 14 (Testigo, Cromatado en 20°C y 70°C):

Min	Observaciones (condiciones similares)
15	Se reblandece el barniz para las 3 condiciones.
30	Desprendimiento de barniz del 20% en testigo, inicia desprendimiento de barniz en 70° y reblandece el 90% de barniz en 20°C.
45	Desprendimiento del 70% de barniz en testigo, desprendimiento del 30% en 70°C y 5% de desprendimiento en 20°C.
60	Desprendimiento del 98% en testigo, desprendimiento del 80% en 70°C y desprendimiento del 15% en 20°C.
75	Desprendimiento total en testigo, desprendimiento del 95% en 70°C y desprendimiento del 55% en 20°C. Se retira probeta Testigo.

90	Desprendimiento total en 70° C y desprendimiento de l 91% en 20° C. Se retira probeta de 70°C.
98	Desprendimiento total. Se termina ensayo.

5.4) Método de la cuadrícula (“*Crossshatch*”).

5.4.1. Testigo:

Placa de:	Ensayo (cuadros desprendidos):		
	A	B	C
AISI 1018	$^{10}/_{25}$	$^{9.5}/_{25}$	$^7/_{25}$
AI 1024 H 14	$^{12}/_{25}$	$^{15}/_{25}$	$^{14}/_{25}$
	placa	promedio	
	AISI 1018	$^{8.83}/_{25} = 35$	
	AI 1200 H14	$^{13.66}/_{25} = 55$	

La prueba se llevo a cabo por triplicado para cada una de las placas. Las letras A, B y C corresponden a cada una de las pruebas por placa.

5.4.2. Resultados a 20°C:

Placa de:	Ensayo (cuadros desprendidos)		
	A	B	C
AISI 1018	$^4/_{25}$	$^7/_{25}$	$^6/_{25}$
AI 1024 H 14	$^8/_{25}$	$^{10}/_{25}$	$^{12.5}/_{25}$
	placa	promedio	
	AISI 1018	$^{5.66}/_{25} = 22$	
	AI 1200 H14	$^{10.16}/_{25} = 41$	

5.4.3. Resultados a 70°C:

Placa de:	Ensayo (cuadros desprendidos)		
	A	B	C
AISI 1018	$^{10}/_{25}$	$^{8.5}/_{25}$	$^7/_{25}$
AI 1024 H 14	$^{15}/_{25}$	$^{11}/_{25}$	$^{12.5}/_{25}$
	placa	promedio	
	AISI 1018	$^{8.5}/_{25} = 34$	
	AI 1200 H14	$^{12.83}/_{25} = 51$	

Nota: Los valores pueden expresarse ya sea como fracción o bien como porcentaje de desprendimiento, o bien por el porcentaje de aprobación.

5.5) Resultados de Impedancia “EIS”

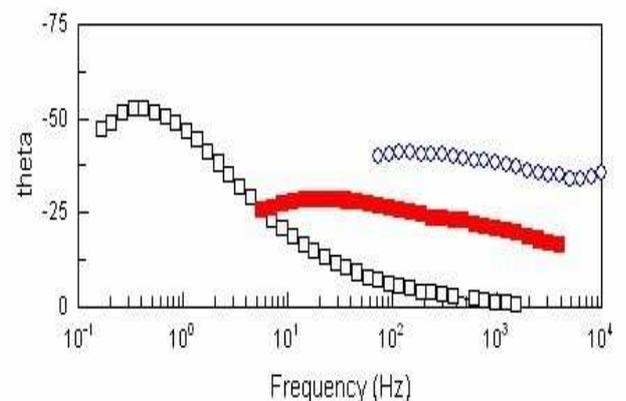
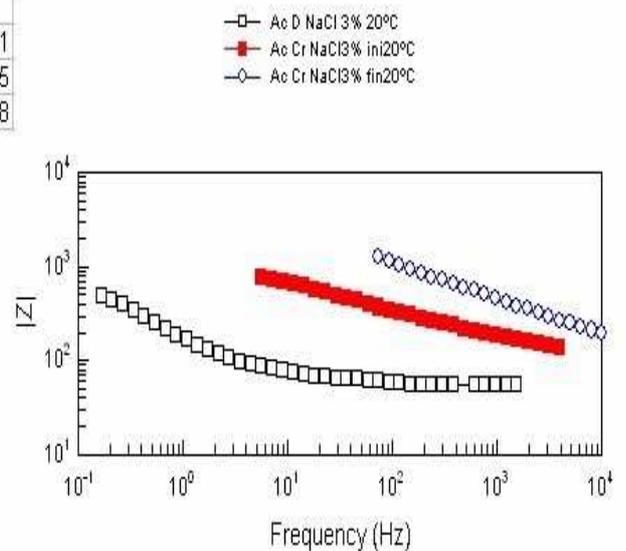
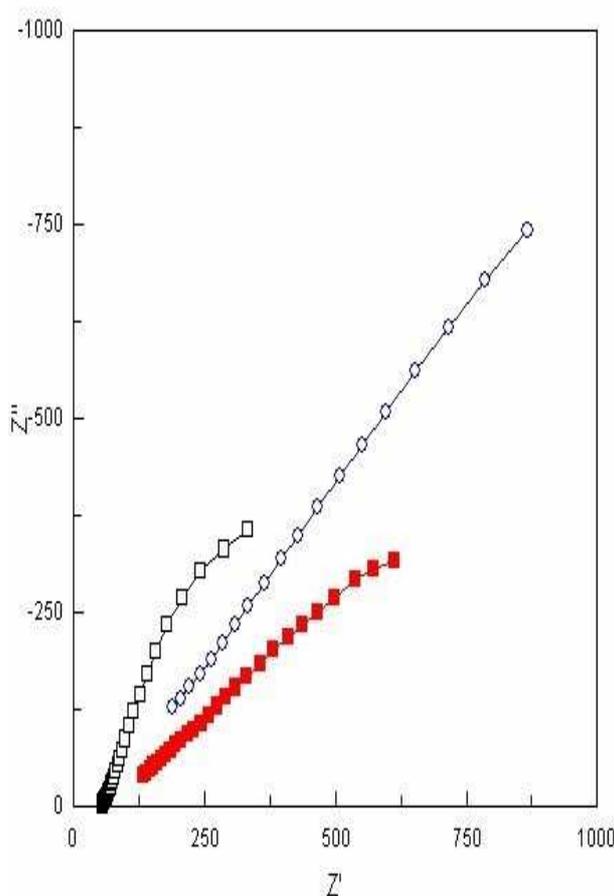
Los resultados obtenidos se presentaron por duplicado y debido a su reproducibilidad se presenta solo un gráfico a la temperatura de trabajo para acero y aluminio.

Para poder obtener el circuito equivalente de cada uno de los diagramas de impedancia se uso el programa Zview, el cual permite ajustar el comportamiento y proporciona valores que estos a su vez serán analizados mas adelante.

5.5.1) Para acero al carbono AISI 1018

En el siguiente gráfico solo se presenta los aceros al carbono AISI 1018 en donde fue posible llevar a cabo su representación mediante circuitos equivalentes.

Material	Rs	Rp	CPE-T	CPE-P
Ac D NaCl 3% test	51,71	3,76E+03	2,00E-03	0,71
Ac Cr NaCl 3% ini 20°	51,71	9,30E+04	4,00E-04	0,35
Ac Cr NaCl 3% fin 20°	51,71	1,00E+08	3,80E-05	0,48

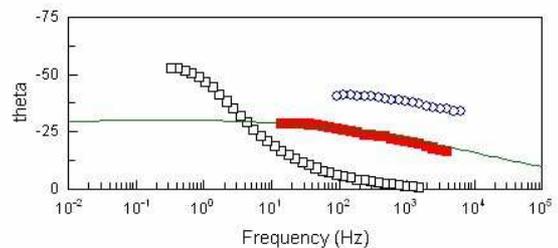
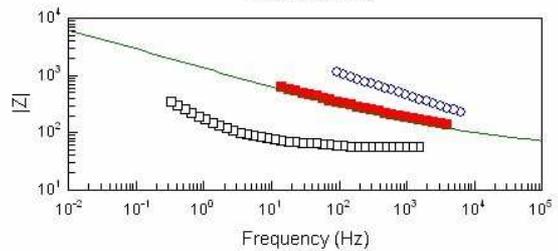
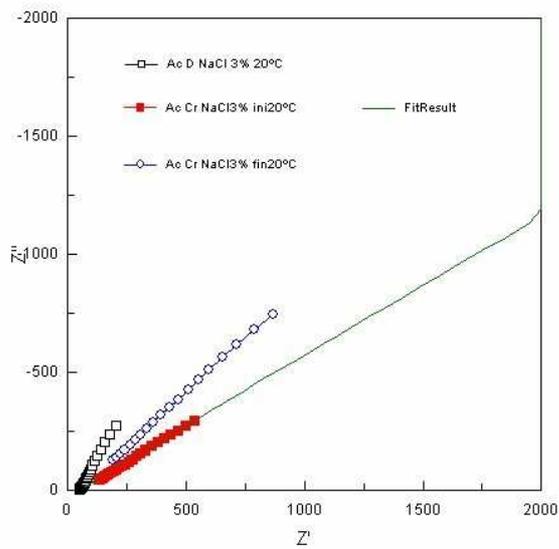
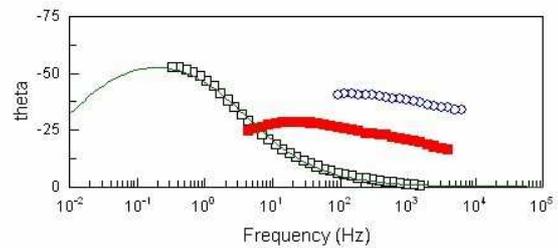
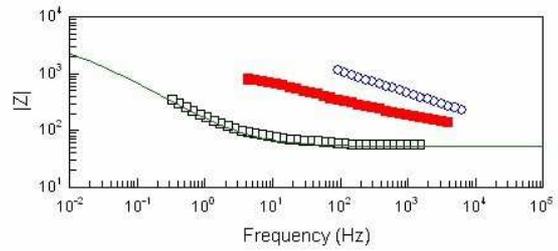
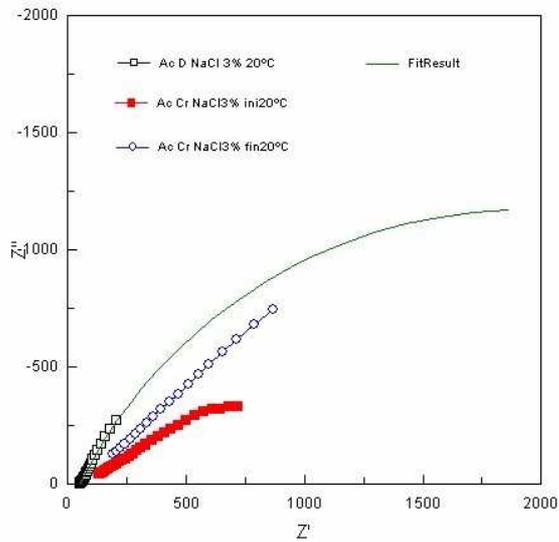


Nomenclatura:

Ac D NaCl 3% 20°C = Acero desnudo (testigo), inmerso en NaCl al 3% .

Ac Cr NaCl 3% ini20°C = Acero cromatado, inmerso en NaCl al 3% a 20°C.

Ac Cr NaCl 3% fin20°C = Acero cromatado y barnizado, inmerso en NaCl al 3% a 20°C.



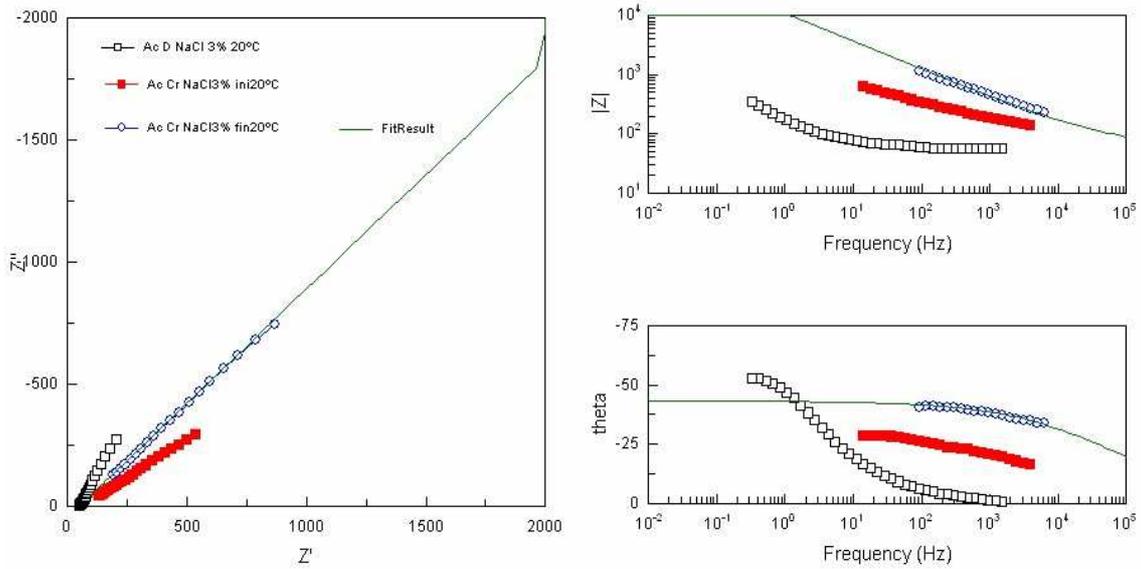
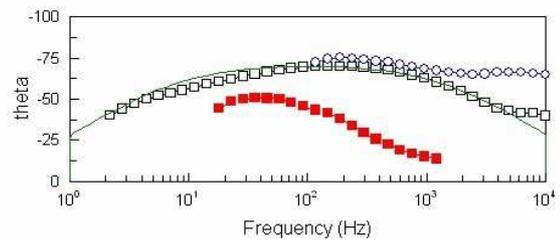
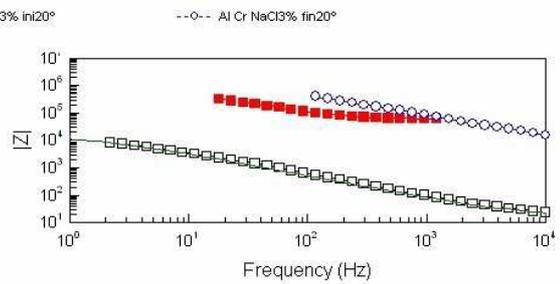
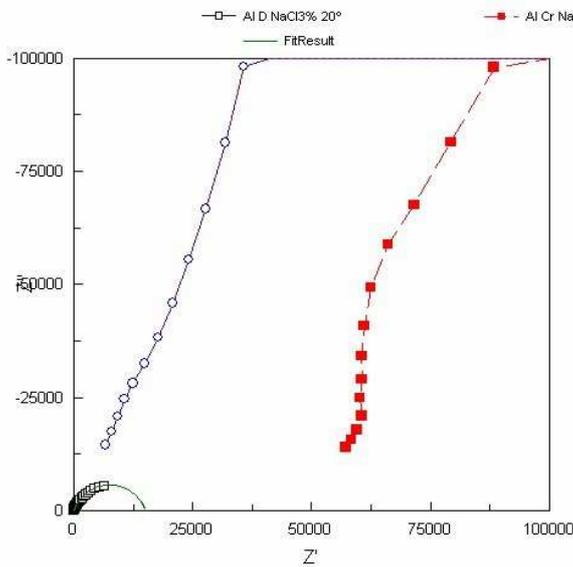
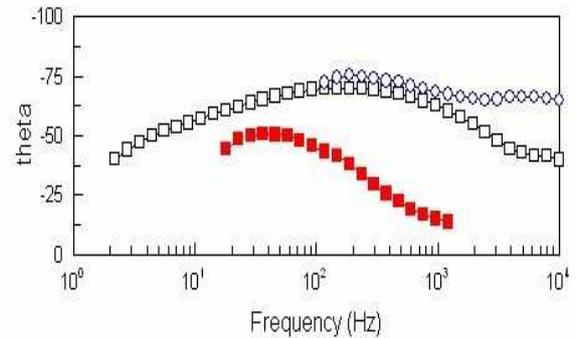
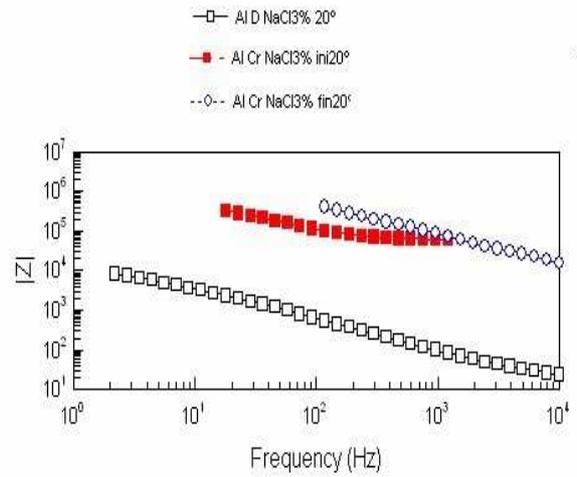
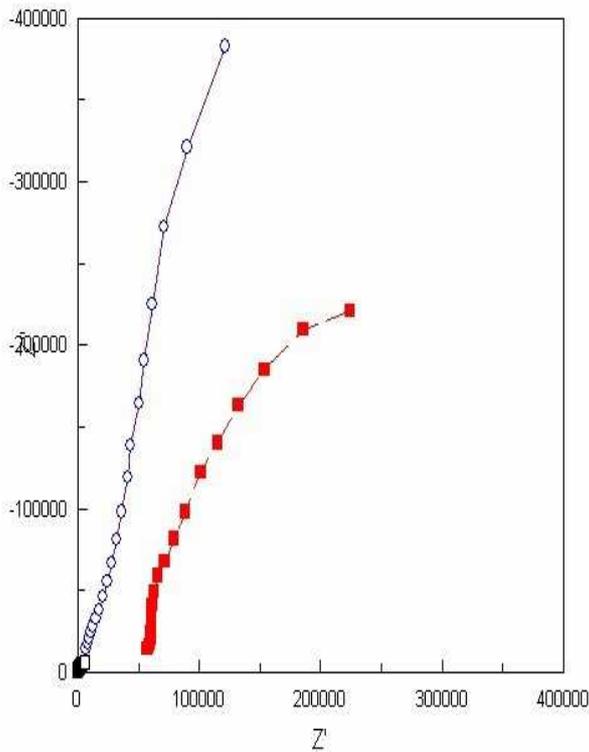


Gráfico 5.5.1. Valores de impedancia para acero al carbono 1018 y su ajuste mediante circuitos equivalentes (representado por “fit result”).

5.5.2) Para aluminio 1200 H 14

En el siguiente gráfico solo se presenta los aluminios 1200 H14 en donde fue posible llevar a cabo su representación mediante circuitos equivalentes.

Material	Rs	Rp	CPE-T	CPE-P
Al D NaCl 3% test	17,2	1,5E+04	9,8E-06	0,82
Al Cr NaCl 3% ini 20°	47000	7,50E+05	5,60E-08	0,83
Al Cr NaCl 3% fin 20°	978,1	8,55E+06	1,40E-08	0,79



Nomenclatura:

Al D NaCl 3% 20°C = Aluminio desnudo (testido), inmerso en NaCl al 3% .

Al Cr NaCl 3% ini 20°C = Aluminio cromatado, inmerso en NaCl al 3% a 20°C.

Al Cr NaCl 3% fin 20°C = Aluminio cromatado y barnizado, inmerso en NaCl al 3% a 20°C.

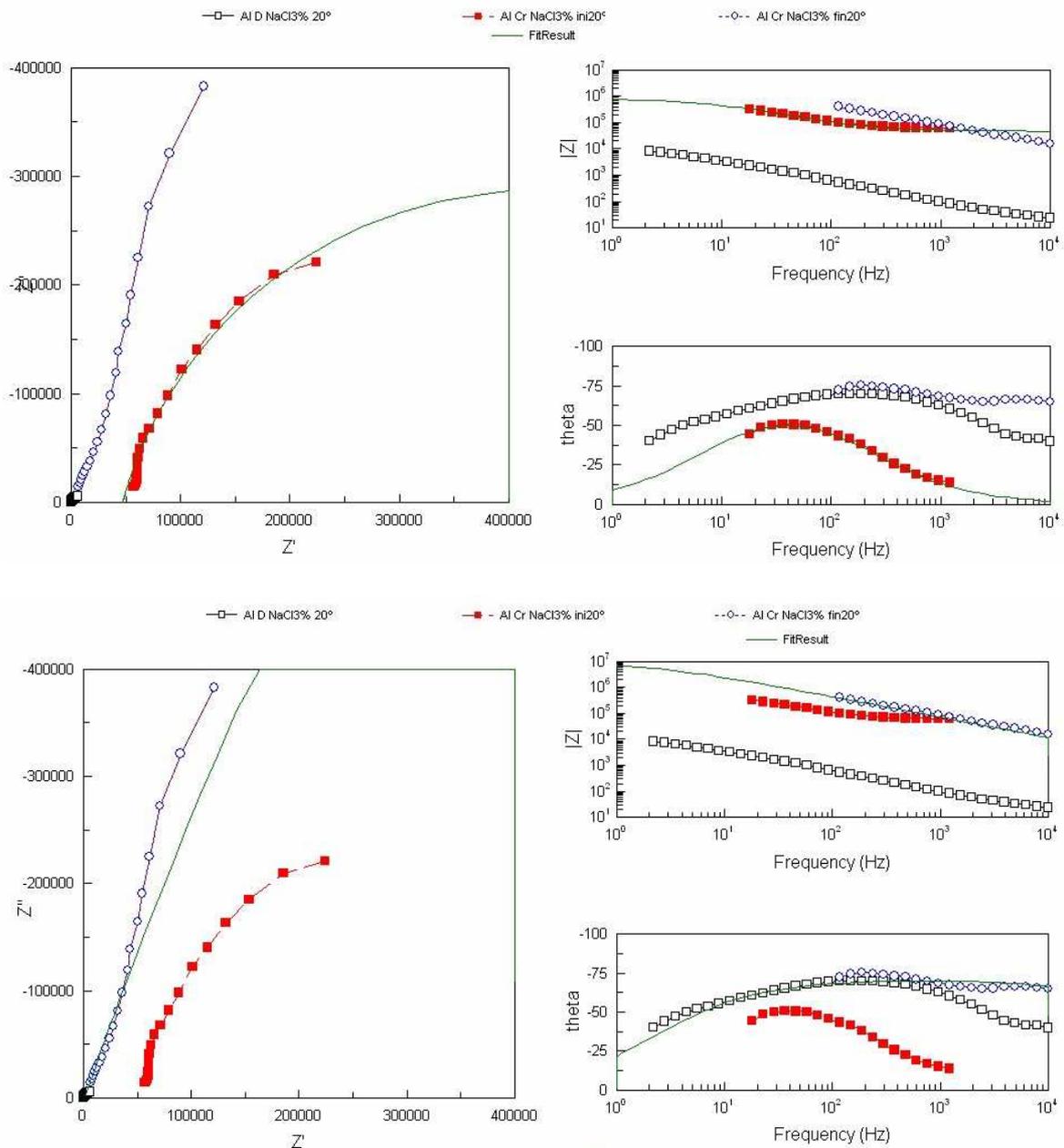


Gráfico 5.5.2. Valores de impedancia para aluminio 1200 H14 y su ajuste mediante circuitos equivalentes (representado por “fit result”).

Los recubrimientos de barniz para las probetas de aluminio fueron previamente medidos, con un espesor correspondiente a 32micras.

Para el caso de los aceros era fácil medir el espesor con ayuda del equipo de medición de espesores, los espesores donde se efectuó el ensayo de impedancia eran del orden de 36 a 38micras.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. POTENCIAL DE REPOSO Y RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN PARA ACERO AL CARBONO 1018.

Análisis correspondiente a placas sin recubrimiento a temperatura de 20°C en NaCl al 3%.

- El tiempo aproximado para que el potencial llegue al estado estacionario es de 10 minutos, alcanzando un valor de potencial de corrosión de -655mV vs ECS, tal como se muestra en el gráfico 5.1.
- En estas placas el metal se encontraba desnudo y tenía fácil contacto con el medio agresivo que actúa sin ninguna dificultad sobre la superficie metálica desarrollando óxidos diversos cubriendo la placa, de hecho, se deja la placa en contacto directo con los iones Cl^- de la solución. Esto resulta en variaciones del potencial de corrosión y en consecuencia, de la resistencia a la polarización.
- Los valores de resistencia a la polarización van del orden de 268 a $364\text{ohms}\cdot\text{cm}^2$.

Análisis de gráficos correspondientes a 70°C:

- Las placas presentan potenciales de corrosión muy parecidos entre si, sin embargo existe una diferencia notable respecto al valor de resistencia a la polarización obtenida, excepto a un tiempo de inmersión de la placa cromatada a 30 segundos, como se muestra en el gráfico 5.3.
- El potencial de corrosión se ve afectado debido a la formación de un espesor grueso de cromatado, ocasionado por la forma de secado, es decir, la forma de secado a esta temperatura era de forma horizontal y como se mencionó la placa había sido previamente lijada, por lo que la superficie presentaba zonas de mayor concentración de cromo, pero a su vez ocasionaba un desprendimiento rápido como si fuera costras, ya que el tratamiento de cromatado sobre la superficie de la placa tendría que ser homogéneo, razón por la cual es necesario repetir el ensayo y con esto poder obtener el tiempo óptimo de inmersión a la temperatura de 70°C.
- Para un tiempo de baño de 10 segundos de inmersión las placas presentan un potencial de corrosión parecido, pero una diferencia mayor de resistencia a la polarización, debido a que ambas no tuvieron una película homogénea. Los valores de resistencia a la polarización obtenidos son de 617 y $934\text{ ohms}\cdot\text{cm}^2$ respectivamente.
- Para un tiempo de baño de 30 segundos de inmersión las placas tienen un comportamiento muy similar, tanto en potencial de corrosión como resistencia a la polarización, lo cual indica que ambas mantienen una película uniforme de la solución "Cronak", siendo así el tiempo de inmersión y temperatura de secado

óptimas para estas condiciones. Obteniendo valores de resistencia a la polarización del orden de 760 y 797mV.

- Para un tiempo de baño de 60 segundos de inmersión las placas mostraron diferencia en el potencial de corrosión, de igual manera en la resistencia a la polarización con una diferencia significativa de 251mV.

Análisis de gráficos correspondientes a 20°C:

- En estas placas se controla la forma de secado, el tipo de secado es de forma vertical obteniendo así una película homogénea cromatada sobre la superficie de la placa.
- Existe una gran similitud en los valores de potencial de corrosión que van del orden de -670 a -687mV excepto para la segunda corrida a 10 segundos de inmersión que presentó un potencial de corrosión de -580mV, como se muestra en el gráfico 5.4.
- Para un tiempo de 10 segundos las probetas presentaron diferencia tanto en potencial de corrosión como en resistencia a la polarización, pero en ambos casos presentan un valor mayor de resistencia a la polarización respecto a las probetas de un tiempo de inmersión de 30 y 60 segundos, en la primera corrida a 10 segundos de inmersión posee un potencial de corrosión muy parecido a las demás probetas con diferentes tiempos de inmersión y es notable que existe una diferencia en la Rp.
- Para un tiempo de baño de 30 segundos de inmersión las placas presentaron prácticamente los mismos valores de potencial de corrosión entre sí al igual que la resistencia a la polarización, lo cual podría explicarse debido a que son las condiciones óptimas de cromatación, pero cabe recordar que a 10 segundos se obtiene una mayor resistencia a la polarización y esto a su vez se refleja en una mayor resistencia a la corrosión.
- Para un tiempo de baño de 60 segundos de inmersión las placas mostraron similitud entre sí, al igual que en el potencial de corrosión, y una diferencia en la resistencia a la polarización, siendo mayor la segunda corrida.

Con esto se tiene que las placas que tienen una mejor similitud en cuanto a los resultados obtenidos, son aquellas que sufrieron inmersión de 30 segundos, por lo que serían las condiciones óptimas de trabajo a 70°C ó 20°C, para el recubrimiento de placas de acero 1018.

Se obtiene que las condiciones óptimas correspondan a temperatura ambiente (20°C) a un tiempo de inmersión de 10 segundos, ya que presentan un valor mayor de resistencia a la polarización que las demás. Debido a que conforme el tiempo de inmersión aumenta disminuye la resistencia a la polarización, lo cual indica que los tiempos de inmersión deben ser cortos.

Ya establecido el tiempo óptimo de inmersión que corresponde a 10 segundos, se necesitó efectuar 2 corridas más al mismo tiempo y a 20°C, debido a la gran diferencia que presentaron los valores de resistencia a la polarización; después de lo cual, se concluyó que era posible reducir el tiempo de inmersión a solo 5 segundos llevándolos a temperatura ambiente (20°C), por lo que se obtuvo lo siguiente (ver gráfico 5.5):

- Las placas llevadas a un tiempo de inmersión de 5 segundos presentaron valores similares de Rp y potencial de corrosión, presentando valores altos de Rp, lo cual indica que temperatura ambiente (20°C) y tiempos cortos de inmersión (5 seg) son las condiciones óptimas de cromatado de aceros al carbón (acero 1018).

6.2. POTENCIAL DE REPOSO Y RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN PARA ALUMINIO 1200 H14

Análisis correspondiente a placas sin recubrimiento a temperatura de 20°C.

- El tiempo aproximado para que el potencial llegue al estado estacionario es de 20 minutos. Se tuvo que llevar a cabo por duplicado dicho ensayo con la finalidad de obtener el potencial, esto debido que cada placa tenía variaciones del potencial respecto al tiempo (min) mostrado como picos que aumentaban y disminuían, pero conforme el tiempo avanza el potencial se estabiliza. No es extraño que ocurra esto ya que la presencia de cloruros en el medio vuelven inestable la superficie de aluminio. Se trazó una delgada línea negra en cada ensayo que indica el comportamiento del potencial de corrosión; los potenciales de corrosión obtenidos para la placa 1 y 2 fueron de -766Mv y -771Mv respectivamente, tal como se muestra en el gráfico 5.6.
- Para medir la resistencia a la polarización, se emplearon las placas mencionadas debido a que mostraban gran similitud de potencial de corrosión respecto al mismo tiempo, obteniendo así los valores de resistencia a la polarización correspondientes: $1298\text{ohms}\cdot\text{cm}^2$ y $1512\text{ohms}\cdot\text{cm}^2$ mostrados en el gráfico 5.7.

Análisis de gráficos correspondientes a 20°C:

- El tipo de secado se llevó a cabo de forma vertical, con la finalidad de controlar la película cristalina de cromo formada sobre la superficie de la placa; se llevó a cabo por duplicado a cada tiempo de inmersión, debido a que en la primer corrida a tiempo cortos se obtuvo un potencial de corrosión muy parecido, pero conforme aumenta el tiempo de inmersión se ve afectada la resistencia a la polarización, es decir, conforme aumenta el tiempo de inmersión disminuye la resistencia a la polarización en acero al carbono.

- De tal manera al efectuar el ensayo por duplicado se pudo demostrar lo siguiente: para tiempos que van de 10 segundos a 60 segundos de inmersión el potencial de corrosión va del orden de -702 a -723 Mv, esto indica que el espesor de la película era homogénea para estos tiempos de inmersión, existe una gran linealidad en el comportamiento y de igual manera se obtuvieron pequeñas diferencias en los valores de R_p del orden de $116 \text{ ohms} \cdot \text{cm}^2$ como se muestra en el gráfico 5.8.
- Al analizar los valores correspondientes para el caso del aluminio, el potencial de reposo y la resistencia a la polarización para cada tiempo de inmersión, muestra claramente que conforme el tiempo de inmersión crece, aumenta el valor de la resistencia a la polarización, dando como resultado que las condiciones óptimas de trabajo de cromatación correspondan a 20°C y a un tiempo de inmersión de 60seg, con una resistencia a la polarización de $949 \text{ ohms} \cdot \text{cm}^2$.

Análisis de gráficos correspondientes a 70°C :

- Una vez controlada la forma de secado, los valores de potencial de corrosión van del orden de -739 a -771 Mv, como se muestra en el gráfico 5.9.
- Existe un gran parecido en cada uno de los casos es decir, a los diferentes tiempos de inmersión, ya que tanto a 10, 30 y 60 segundos los valores de E_{corr} y R_p son parecidos para todos los tiempos de inmersión, de igual forma se muestra que conforme el tiempo de inmersión crece, aumenta el valor de la resistencia a la polarización, mismo caso que pasa a 20°C .

Analizando ambas condiciones de operación (20°C y 70°C) se puede observar claramente que la temperatura juega un papel importante, ya que aún cuando en ambos casos se concluye que los tiempos de inmersión óptimos corresponden a 60segundos por ser donde se obtiene una mayor resistencia a la polarización, el incremento en la temperatura de 20°C a 70° lleva un poco más del doble del valor de R_p obtenida, es decir, a mayor temperatura se obtiene mayor R_p para el caso de aluminio 1200 serie H14.

Por todo lo dicho, las condiciones óptimas de trabajo para obtener una mejor cromatación en aluminio corresponden a 70°C y 60 segundos de tiempo de inmersión, aclarando que la película cristalina de cromo formada en la superficie de la placa debe ser homogénea.

Una vez encontradas las condiciones óptimas de trabajo, se mandó una de las placas tratadas a dichas condiciones, al laboratorio de microscopía electrónica de barrido (MEB) para llevar a cabo un análisis de composición, pero el problema que se presentó fue que la película formada por la solución de cromo

era muy delgada y no se pudo realizar este análisis. Es probable que empleando tiempos de inmersión mayores se pudiera obtener mayor cantidad de producto y entonces si realizar el análisis por este medio o incluso por difracción de Rayos X. En estudios colaterales se está analizando este espesor mediante mediciones por Elipsometría.

6.3. PREPARACIÓN DE LAS PLACAS PARA BARNIZAR.

Para la preparación de las placas se deben tomar las siguientes consideraciones: la placa debe de estar completamente limpia y toda la superficie de la placa donde se va a pintar debe estar completamente lisa (evitar que la placa tenga bordes sobresalidos o rebaba), ya que si no se cuida esto, el espesor del recubrimiento no podrá ser controlado.

Se coloca barniz en una de las orillas de la placa y con ayuda del rasador se controla el espesor aplicado (medición de micras a aplicar) deslizando hacia el extremo opuesto; controlando la velocidad del desplazamiento, ya que se lleva a cabo de forma manual, en caso de que no se controle, se ve reflejado en el espesor en forma de una diagonal que corta la homogeneidad del recubrimiento, si esto ocurre es necesario colocar el rasador en el extremo deslizando lo más rápido posible y controlando el sentido del rasador hacia el extremo inicial.

Al llevar a cabo el deslizamiento hay de tener cuidado de no desprender los cristales de cromo formados sobre la superficie del metal, ya que este es el principal interés, es decir, la resistencia a la adherencia que posee el metal cromatado mediante el proceso "*Cronak*".

Se determina el valor del espesor aplicado mediante la ayuda del medidor de espesores; para el caso del acero al carbono 1018 se puede efectuar directamente la medición, en cambio con el aluminio 1024 existe dificultad para medir el espesor, esto debido a que su funcionamiento consiste básicamente en mandar una señal a la superficie metálica y esta a su vez al chocar con la superficie regresa la señal, dando como resultado el espesor de película formada sobre la superficie de la placa (recubrimiento) que en este caso es barniz epóxico.

Para el aluminio se tomó como referencia el espesor de 32 micras, que se logró controlando los espesores aplicados de las 2 siguientes maneras:

- 1.- El recubrimiento (película de barniz epóxico) se aplicó a una placa de 5x5cm y se efectuaron cortes lentos de 0.5cm en 0.5cm con ayuda de una cizalla hasta llegar a obtener una placa de 2x2cm y se desprende con ayuda de unas pinzas de laboratorio la película de barniz.
- 2.- Se coloca un pedazo de cinta canela sobre la placa de 2x2cm dejando un pedazo de cinta sobresaliente, se aplica el barniz epóxico, después se levanta la cinta con todo y la película formada por el barniz, se coloca

sobre la superficie del acero al carbono solo con la finalidad de medir el espesor (barniz más cinta) pero se resta la diferencia del espesor de la cinta de aquella parte que se dejó sobresaliente, obteniendo así un espesor controlado correspondiente a 32micras.

Es importante mencionar que todas las placas de aluminio en las cuales se tuvo que controlar el espesor habían sido previamente cromatadas.

6.4. ENSAYO DE TRACCIÓN

PROBETAS DE ACERO AL CARBONO.

Existe una diferencia respecto a los valores obtenidos de resistencia a la tracción a ambas temperaturas, por lo que se toma un promedio por cada placa. El ensayo de tracción se efectuó por duplicado, obteniendo valores promedio para cada una de las placas, los valores registrados son 280 y 366 psi para placas a 20°C y 195 y 248 psi para placas a 70°C; con esto se demostró que aunque hubo diferencias importantes, las placas llevadas a 20°C poseen una mayor resistencia a la tracción, con valores promedio de 323.66 psi a 20°C y 222.31psi a 70°C.

Existe una diferencia de resistencia a la tracción solo por efecto de la temperatura de secado, resultando ser que las condiciones en las cuales se obtiene una mejor resistencia corresponden a 20°. Aparentemente se puede mencionar que las mejores condiciones correspondan a 70°C pero la medida de espesor que se empleó ajustando el rasador es de 32micras, la desviación estándar por diferencia de una milésima indica que es mejor a 70°C pero el espesor promedio en donde se efectuó el ensayo de tracción que es el principal interés es de 39.93micras a 70°C y 37.86micras a 20°C, dando lugar que las mejores condiciones corresponden a 20°C.

PROBETAS DE ALUMINIO 1200 H 14.

La diferencia de valores obtenidos de resistencia a la tracción son muy semejantes a ambas temperaturas (20° y 70°C), ya que para el caso de la primera temperatura los valores van de 171 a 300 psi y para 70°C los valores van de 173 a 290 psi, por lo cual no existe diferencia alguna, lo cual indica que la resistencia a la tracción que posee el cromatado en aluminio no depende de la temperatura, ya que los valores promedio son: 226 psi a 20°C y 213 psi a 70°C, pero esta prueba pudiera no reflejar cambios mínimos que se pudieran dar en la superficie metálica como resultado de la diferente temperatura.

6.5. ENSAYO DE N-METIL PIRROLIDONA (TIEMPO DE RETENCIÓN)

Para acero AISI 1018

El tiempo de duración máximo es de tres horas, en el cual se registra el porcentaje de barniz retenido en la superficie del metal cromatado, solo la placa testigo presenta inicialmente reblandecimiento del barniz a los 30min de ensayo, a un tiempo de 45minutos empieza el reblandecimiento para la placa a 70°C, a los 60 minutos empieza a desprenderse el barniz en la probeta testigo, mayor reblandecimiento en placa de 70°C y empieza a reblandecerse el barniz a 20°C, a los 135minutos se desprende el 100% en testigo, 80% de desprendimiento en 70°C y desprendimiento del 20% en placa de 20°C, en 165min se desprende el 100% en 70°C y el 85% desprendimiento en 20°C, al finalizar el ensayo del 8 a 10% de barniz se queda retenida en la placa a 20°C.

Mostrando así que las condiciones óptimas de cromatación corresponden a 5 segundos de inmersión dejándolo secar a 20°C, ya que posee tanto una mayor resistencia a la tracción como mayor tiempo de retención.

Para aluminio 1200 H14

A los 15 minutos se reblandece el barniz para las 3 condiciones (testigo, 20°C y 70°C), a los 75 minutos hay desprendimiento total en testigo, desprendimiento del 95% en 70°C y desprendimiento del 55% en 20°C, a los 90 minutos desprendimiento total en 70°C y desprendimiento mayor del 90% en 20°C y a los 98 minutos termina el ensayo, es decir, se desprende el 100% en placa de 20°C.

Existe poca diferencia de tiempo de retención así como la resistencia a la tracción a pesar de que es poca la diferencia que existe entre estas, al parecer muestra mejores propiedades a 20°C respecto a 70°C.

6.6. MÉTODO DE LA CUADRICULA.

Para acero AISI 1018

La probeta testigo presenta un 35% de rechazo y al compararla con la probeta que se trató a 70°C no existe diferencia alguna, mientras que en la probeta tratada a 20°C se muestra claramente una diferencia de rechazo correspondiente a 22%, lo cual indica una vez más que las condiciones óptimas de operación corresponden a 20°C, esto debido a que se mostró en el ensayo de resistencia a la tracción así como el de tiempo de retención.

Para aluminio 1200 H14

El valor obtenido promedio de la probeta testigo fue de 55% de desprendimiento, y al comparar con las probetas que se trataron a 20° y 70°C se puede apreciar claramente que la probeta de 70°C disminuyó muy poco el porcentaje de desprendimiento, en cambio la probeta que se trató a 20°C disminuyó hasta un 41% de desprendimiento.

Esto también se puede entender ya que la placa tratada a 20°C tiene un 59% de aceptación, mientras que la placa a 70°C tiene un 49% de aceptación, esta

comparación sólo se pudo visualizar en este tipo de ensayo ya que en los valores resultados obtenidos mediante el ensayo de tracción y de n-metil pirrolidona no se pudo apreciar.

6.7. IMPEDANCIA

Para el análisis de las probetas tanto de acero al carbono como aluminio, fue necesario obtener su circuito equivalente (ver página 51) para poder obtener los valores de resistencia a la polarización (mostrados en el apartado 5.5), con la intención de poder llevar a cabo el siguiente análisis en base a los siguientes gráficos, así como el respectivo análisis que se hizo.

Valores que se ajustan al comportamiento

Material	Rs	Rp	CPE-T	CPE-P
Ac D NaCl 3% test	51,13	3,76E+03	1,83E-03	0,71
Al D NaCl 3% test	12,505	1,47E+04	7,32E-06	0,84
Ac Cr NaCl 3% ini 20°	74	2,01E+03	2,10E-04	0,43
Al Cr NaCl 3% ini 20°	51100	8,71E+05	6,00E-08	0,82
Ac Cr NaCl 3% fin 20°	30	1,00E+07	6,00E-05	0,42
Al Cr NaCl 3% fin 20°	980	9,40E+06	2,00E-08	0,75
Al Cr NaCl 3% fin 70°	367,1	9,65E+06	1,28E-07	0,76

*** Ajustando el valor promedio de Rs para acero al carbono, se puede tomar el valor de Rs = cte, y llevar a cabo un ajuste adecuado para los valores de Rp, CPE-T y CPE-P. Valor de Rs = 57.71**

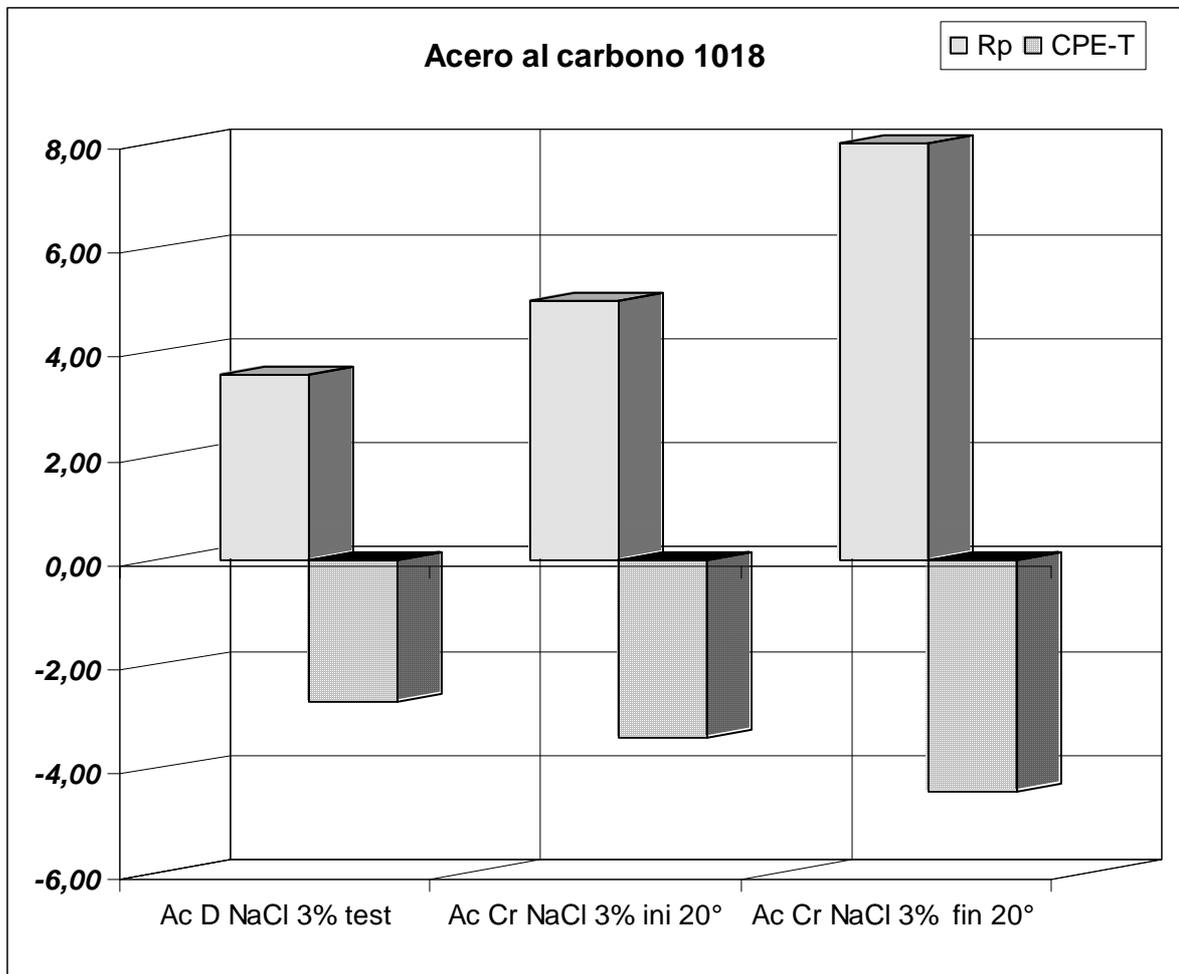
Material	Rs	Rp	CPE-T	CPE-P
Ac D NaCl 3% test	51,71	3,76E+03	2,00E-03	0,71
Ac Cr NaCl 3% ini 20°	51,71	9,30E+04	4,00E-04	0,35
Ac Cr NaCl 3% fin 20°	51,71	1,00E+08	3,80E-05	0,48
Al D NaCl 3% test	17,2	1,5E+04	9,8E-06	0,82
Al Cr NaCl 3% ini 20°	47000	7,50E+05	5,60E-08	0,83
Al Cr NaCl 3% fin 20°	978,1	8,55E+06	1,40E-08	0,79

Material	Rp	CPE-T	Se obtuvo el logaritmo de Rp y CPE-T, para poder simplificar el gráfico de acero al carbono 1018
Ac D NaCl 3% test	3,58	-2,70	
Ac Cr NaCl 3% ini 20°	4,97	-3,40	
Ac Cr NaCl 3% fin	8,00	-4,42	

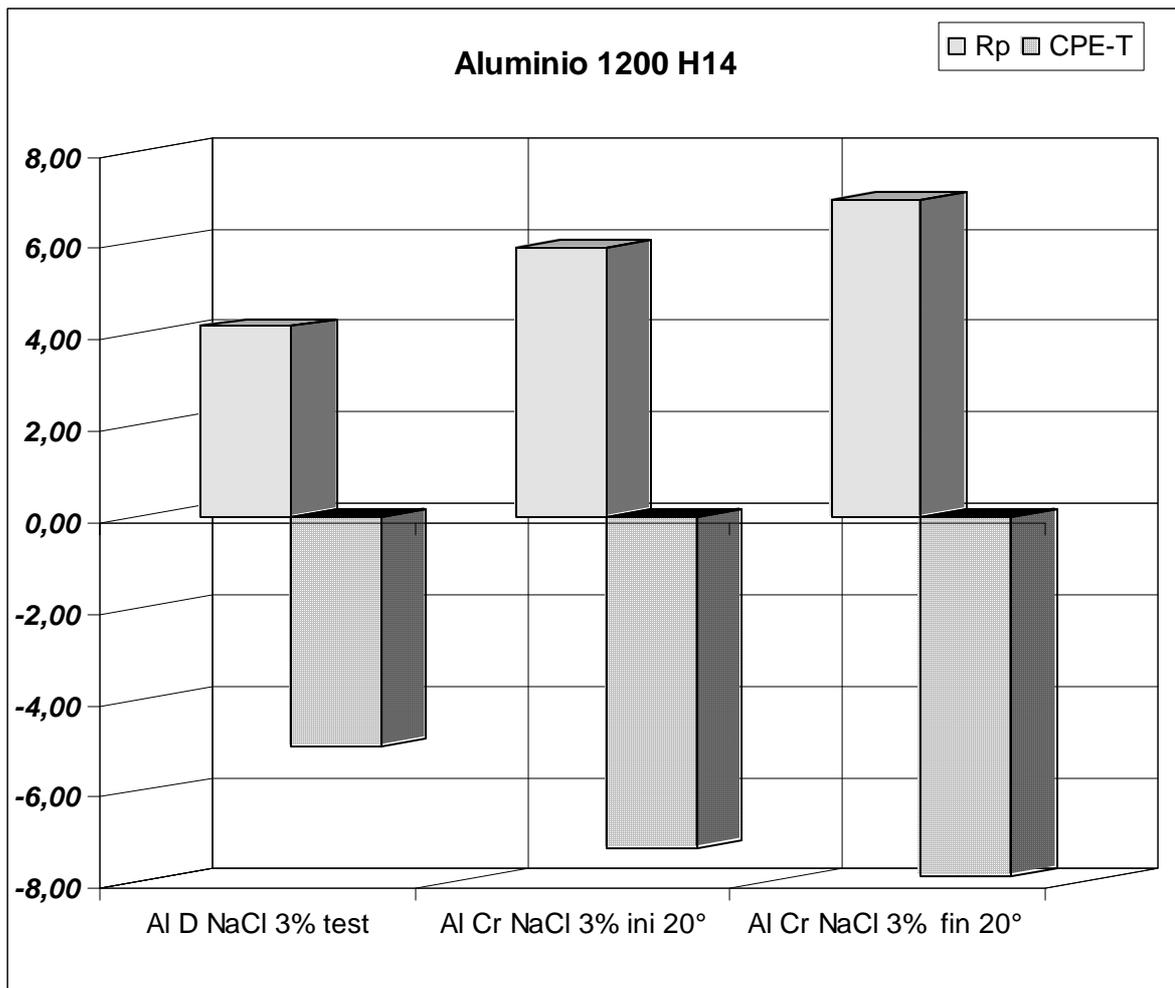
20°

Valores de Rp y CPE-T para aluminio 1200 H14, sin mantener constante a Rs, debido a la magnitud de los valores.

Material	Rp	CPE-T	Se obtuvo el logaritmo de Rp y CPE-T, para poder simplificar el gráfico: Aluminio
Al D NaCl 3% test	4,17	-5,01	
Al Cr NaCl 3% ini 20°	5,88	-7,25	
Al Cr NaCl 3% fin 20°	6,93	-7,85	



6.7.1. Gráfico de aceros al carbono 1018 en escala logarítmica.



6.7.2. Gráfico de aluminio 1200 H14 en escala logarítmica.

Mediante la técnica de bajo campo, a través de impedancia para la obtención de Rp se puede observar que para el acero al carbono con el tratamiento de cromatado aumenta 1.39 (de 3.58 a 4.97) la resistencia a la polarización (en escala logarítmica), a pesar de que protege al metal también forma una película cristalina sobre la superficie del metal, dando como resultado un excelente perfil de anclaje, ya que cuando se aplica el barnizado prácticamente aumenta al doble de resistencia a la polarización que proporciona el tratamiento de conversión (llegando a un valor de 8).

En el caso de aluminio sucede lo contrario, es decir, con el hecho de llevar a cabo el tratamiento de cromatado aumenta 1.71 y cuando se aplica el barnizado aumenta solo 1.05 unidades (en escala logarítmica), dejando así que es muy importante efectuar un buen tratamiento de cromatado ya que de este depende proteger al metal, y con el barnizado aumenta ligeramente la protección en una solución de NaCl al 3%.

Valores obtenidos, mediante la técnica:		Rp	Impedancia
Condiciones Optimas	Metal	ohms*cm ²	
5 segundos de inmersión a 20°C	Ac D NaCl 3% testigo	682,26	3,76E+03
	Ac Cr NaCl 3% cromatada	1530,75	9,30E+04
	Ac Cr NaCl 3% barnizada		1,00E+08
60 segundos de inmersión a 20°C	Al D NaCl 3% testigo	1405	1,50E+04
	Al Cr NaCl 3% cromatada	949	7,50E+05
	Al Cr NaCl 3% barnizada		8,55E+06

El circuito equivalente que se empleo para llevar a cabo el ajuste del comportamiento se muestra en la figura 20, el cual es una herramienta del programa Zview, el cual permite mantener el valor de la resistencia de la solución (Rs) constante para determinar el valor de Rp.

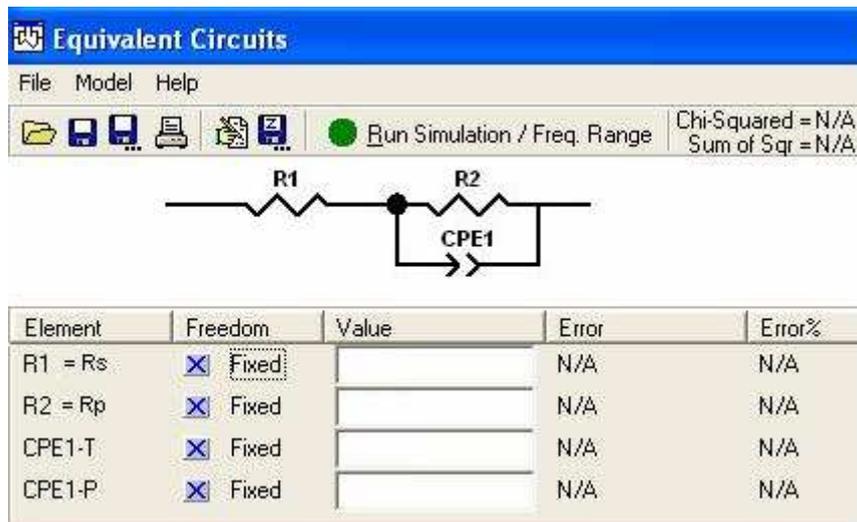


Figura 20. Circuito equivalente, para ajustar el comportamiento de los datos obtenidos de "EIS".

Donde:

R1 = Rs = Resistencia de la solución.

R2 = Rp = Resistencia a la polarización.

CPE1-T = Elemento de fase constante - T = Tiempo constante o capacitancia

CPE1-P = Elemento de fase constante - P = Exponente

Los valores de T y P son parámetros libres que se usan por convención para poder llevar a cabo el ajuste del comportamiento, para poder determinar el valor de Rs y Rp.

8. CONCLUSIONES.

Para ambas aleaciones la película formada por la solución de cromo era muy delgada y no se pudo realizar el análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB). En estudios colaterales se está analizando este espesor mediante mediciones por Elipsometría.

8.1 Acero al Carbono AISI 1018.

- Las condiciones apropiadas para la formación de una película protectora anticorrosiva es a un tiempo de inmersión de 5 segundos a 20°C.
- El tiempo aproximado para que el potencial llegue al estado estacionario es de 10 minutos, alcanzando un valor de potencial de corrosión de -655mV vs ECS en NaCl al 3%.
- Las condiciones óptimas para los ensayos de adherencia son a 20°C y a un tiempo de inmersión de 5 segundos.

8.2 Aluminio 1024 H14.

- Las condiciones apropiadas para la formación de una película protectora anticorrosiva es a un tiempo de inmersión de 60 segundos a 20°C.
- El tiempo aproximado para que el potencial llegue al estado estacionario es de 20 minutos, alcanzando un valor de potencial de corrosión aproximado de -770mV vs ECS en NaCl al 3%..
- Las condiciones óptimas para los ensayos de adherencia son a 20°C y a un tiempo de inmersión de 60 segundos.

8.3 Para acero y aluminio.

- La técnica de impedancia, así como la de resistencia a la polarización muestran claramente que al llevar a cabo el tratamiento de cromatado y barnizado sobre el metal, aumenta el valor de R_p y esto implica que la velocidad de corrosión disminuya.
- El mecanismo que controla a este tipo de proceso de cromatado es por activación.

En general, con base en los resultados, se establece lo siguiente.

Condiciones óptimas para Acero 1018:

Tiempo de baño (inmersión) 5 segundos a una temperatura de 20°C.

Condiciones óptimas para Aluminio 1200 H14:

Tiempo de baño (inmersión) 60 segundos a una temperatura de 20°C.

BIBLIOGRAFÍA:

- 1.- Rodríguez Urbina, R.(1989) "Cromatado de acero galvanizado", Tesis UNAM, Facultad de Química.
- 2.- ASM Handbook, Metals Handbook, Volume 13 Corrosion, 9^a edition, 1992.
- 3.- Buchheit R. G., Leggat R. B., Taylor S. R., Zhang W. (2002) Corrosion performance of field-applied chromate conversion coatings. NACE International. Corrosion., 58, 283-291.
- 4.- Bonora P. L., Deflorian F., Fedrizzi L. (1995) EIS study of organic coating performance. Materials Science., 3, 267-276.
- 5.- ASM Specialty Handbook, Aluminium and Aluminium Alloys, 1994.
- 6.- Van OOIJ, W. J. R. A. Edwards, A. Sabata and J. Zappia. Testing the adhesion of paint films to metals by swelling in N-methyl pyrrolidone, 1993.
- 7.- Walter, G.W., "A review of impedance plot methods used for corrosion performance analysis of painted metals", *Corrosion Science*, 26 (1986).
- 8.- Dobbelaar, J. A. L. Ph-D thesis TU-Delft. The Use of Impedance Measurements in Corrosion Research; The Corrosion Behaviour of Chromium and Iron Chromium Alloys, 1990.
- 9.- NORMA ASTM D 4541.
- 10.- NORMA ASTM D3359.
- 11.- ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating, 1991.
- 12.- ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams, 1992.
- 13.- www.mtas.es/insht/ipcsnspn/nspn0513
- 14.- Burns R. M y Bradley W. W. Recubrimientos protectores de los metales, traducción Dr. José María Bermúdez de Castro y Mosqueda (1979).
- 15.- Patente E. U, 2.035.380 (mar. 24, 1936), Wilhelm E. J. (To New Jersey Zinc Co).

- 16.- Fontana M, Corrosión Engineering EE. UU: Mc Graw Hill Book Company, Mar 1985.
- 17.- M. Morcillo en Corrosión y Protección Metálicas, Vol. 2, S. Feliu y M. C. Andrade (editores), Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, 1991.
- 18.- Keddam M., Mattos O.R., Takenouti H. (1981) Reaction model for iron dissolution studied by electrode impedance. II. Determination of the reaction model. J. Electrochem. Soc, 128.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

ACERO AL CABONO AISI 1018

Program: FE-10

06/27/2005 05:41:43 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM ACEROS BAJA ALEACION

Single spark(s)

Elements: Concentration

Muestra No: ACERO

Quality:

Usuario: SERGIO CONTRERAS GARCIA

Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentario: TESIS (27-JUNIO-2005)

No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0722	0.0254	0.1883	0.0098	0.0026	0.0062	0.0325	0.0091	0.0398
2	0.0718	0.0260	0.1890	0.0096	0.0028	0.0066	0.0329	0.0092	0.0403
3	0.0699	0.0268	0.1894	0.0099	0.0026	0.0062	0.0326	0.0092	0.0406

No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Fe
	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0001	0.0150	<0.0000	0.0025	<0.0000	0.0054	99.6
2	0.0003	0.0151	<0.0000	0.0025	<0.0000	0.0055	99.6
3	0.0003	0.0151	<0.0000	0.0025	<0.0000	0.0054	99.6

Program: FE-10

06/27/2005 05:41:43 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM ACEROS BAJA ALEACION

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No: ACERO

Quality:

Usuario: SERGIO CONTRERAS GARCIA

Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentario: TESIS (27-JUNIO-2005)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	0.0713	0.0261	0.1889	0.0098	0.0027	0.0064	0.0327	0.0092	0.0402

	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Fe
	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	0.0003	0.0151	<0.0000	0.0025	<0.0000	0.0054	99.6

COMPOSICIÓN QUÍMICA

ALUMINIO 1200 H 14

Program: AL-011

06/27/2005 06:29:05 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM ALUMINIOS

Single spark(s)

Elements: Concentration

Muestra No.: ALUMINIO

Quality:

Usuario: SERGIO CONTRERAS GARCIA

Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentarios: TESIS (27-06-05)

No	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
1	0.0858	0.3415	0.0630	0.0106	<0.0050	0.0083	0.0016	<0.0010	0.0020
2	0.0843	0.3369	0.0621	0.0105	<0.0050	0.0058	0.0017	<0.0010	<0.0020
3	0.0839	0.3370	0.0623	0.0105	<0.0050	0.0058	0.0016	<0.0010	<0.0020

No	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
1	0.0214	0.0060	<0.0020	0.0002	99.5
2	0.0218	0.0060	<0.0020	0.0002	99.5
3	0.0211	0.0060	<0.0020	0.0002	99.5

Program: AL-011

06/27/2005 06:29:05 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM ALUMINIOS

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: ALUMINIO

Quality:

Usuario: SERGIO CONTRERAS GARCIA

Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA

Comentarios: TESIS (27-06-05)

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
\bar{x}	0.0847	0.3385	0.0625	0.0105	<0.0050	0.0066	0.0017	<0.0010	<0.0020

	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
\bar{x}	0.0214	0.0060	<0.0020	0.0002	99.5

FICHA TÉCNICA: N-METIL-PIRROLIDONA

1-METIL-2-PIRROLIDONA

ICSC: 0513

1-METIL-2-PIRROLIDONA, N-Metil-2-pirrolidona
NMP, C₅H₉NO
Masa molecular: 99.1

Fichas Internacionales de Seguridad Química

1-METIL-2-PIRROLIDONA

ICSC: 0513

I M P O R T A N T E S	<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO Líquido higroscópico, entre incoloro y amarillo claro, de olor característico.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS La sustancia se descompone al calentarla intensamente por encima de 315°C produciendo humos tóxicos. Reacciona con ácidos fuertes. Ataca al aluminio.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV no establecido.</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación y a través de la piel.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Por evaporación de esta sustancia a 20°C no se alcanza, o se alcanza sólo muy lentamente, una concentración nociva en el aire, mucho más rápidamente por pulverización.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia irrita el tracto respiratorio.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA La sustancia puede tener efectos sobre los pulmones, médula ósea y sistema linfático, a muy elevadas concentraciones.</p>
PROPIEDADES FÍSICAS	<p>Punto de ebullición: 202°C Punto de fusión: -24°C Densidad relativa (agua = 1): 1.027 Solubilidad en agua: muy elevada Presión de vapor, Pa a 25°C: 66</p>	<p>Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3.42 Punto de inflamación: 91°C Temperatura de autoignición: 270°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 0.99%-3.9%</p>

NOTAS

La 1-Metil-2-pirrolidona facilita la absorción cutánea para otras sustancias. Los datos disponibles sobre efectos de esta sustancia en la salud humana son insuficientes, por consiguiente debe procederse con sumo cuidado.

Producto:
BARNIZ TRANSPARENTE 11000



PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS

DENSIDAD RELATIVA

0.93 – 1.05 g/cc a 20°C

DENSIDAD DE VAPOR (Aire = 1)

N.A.

PESO MOLECULAR

N.A.

ESTADO FISICO, COLOR Y OLOR

Líquido viscoso con apariencia lechosa y olor característico

VELOCIDAD DE EVAPORACION

(Butil acetato = 1)

4.1 (Acetato de Etilo)

SOLUBILIDAD EN AGUA

Inmiscible

PRESION DE VAPOR mmHg 20°C

75mmHg (Acetato de Etilo) a 20°C

% DE VOTALIDAD

55-70%

LIMITES DE INFLAMABILIDAD

Inferior: 2.00% (Acetato de Etilo)

Superior: 11.50% (Acetato de Etilo)

OTROS DATOS

N.D

RIESGOS DE FUEGO O EXPLOSIÓN

MEDIO DE EXTINCIÓN

Niebla de agua: Espuma: **X** CO₂ : **X** Polvo químico seco: **X** otros(especificar):

EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL:

Use equipo de protección especial con equipo autónomo de respiración

PROCEDIMIENTOS Y PRECAUCIONES EN INCENDIO

Utilice equipo de respiración autónomo y combata el fuego a distancia segura.

CONDICIONES QUE CONDUCEN A OTRO RIESGO ESPECIAL

Los vapores generados son más pesados que el aire y pueden viajar distancias considerables y encontrar una fuente de ignición, evite que se acumule electricidad estática en los equipos conectándolos a tierra física.

PRODUCTOS DE LA COMBUSTION NOCIVOS PARA LA SALUD

Dióxido de carbono, monóxido de carbono.

DATOS DE REACTIVIDAD

PRODUCTO

Estable **X** Inestable

INCOMPATIBILIDAD (EVITAR)

Ácidos y álcalis.

POLIMERIZACION ESPONTANEA

Puede ocurrir:

No puede ocurrir: **X**

CONDICIONES A EVITAR

Temperaturas superiores a 50°C

Flama abierta, chispas.

PRODUCTOS PELIGROSOS DE LA DESCOMPOSICION:

Dióxido de carbono.

CONDICIONES A EVITAR

N.D.