

Universidad Autónoma de Madrid
Facultad de Ciencias
Departamento de Química Física Aplicada

DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS
CORRUGADAS DE ACERO INOXIDABLE EN
ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN
AMBIENTES MARINOS

Tesis Doctoral
Alicia Pachón Montaña
2017

Director (CSIC): Dr. Javier Sánchez Montero
Tutora (UAM): Dra. Pilar Herrasti González

A mis padres Isabel y Juan Antonio

Agradecimientos:

Quisiera comenzar agradeciendo principalmente a mis padres Isabel y Juan Antonio que me dieron una enseñanza inmejorable y de una forma sencilla y feliz me inculcaron la humildad, el amor, el trabajo, la constancia, la honradez, la rigurosidad y sobre todo la pasión por aprender. A mi hermana, Montse y mis hermanos Gustavo y Víctor a los que adoro y de los que siempre he aprendido y aprenderé.

A las doctoras, Soledad Fernández y Silvia Jimenez, ambas amigas del alma sevillana con grandes corazones y mentes y por las que he tenido siempre una profunda admiración profesional. Ambas causantes de mi sentimiento incondicional por la investigación, el cual nació en aquellos maravillosos años de tardes sevillanas que perfumaban el aire y lo llenaban todo de alegría. Algún día todo volverá a ser igual, pero con algunos años más.

Un agradecimiento especial a Javier Sánchez Montero, mi director de tesis, por darme la oportunidad de haber culminado este momento por el que todo investigador debe comenzar su camino. Gracias por tu trato impecable, por todo el tiempo que me has regalado enseñándome y por tu enorme paciencia conmigo.

Gracias a M^a Carmen Andrade, por mostrarme todos los días en IETcc, que la investigación se mantiene en las categorías más altas con muchísimo esfuerzo, trabajo, dedicación y una gran pasión por lo que se hace.

Gracias a ACERINOX Europa, por invertir en investigación y por suministrar todos los aceros inoxidables que se estudian. Gracias a Victoria, María y Patricia por todo lo que hemos compartido durante estos años de trabajo.

Gracias al Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) y al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) por permitirme desarrollar este trabajo de investigación.

Gracias a Julio, Quique, Antonio, Marcelo, Filipe y David porque vuestra ayuda fue muy importante para llegar a este momento y siempre fue desinteresada y acompañada de una gran sonrisa. Entre todos habéis sido el motor fundamental de todo el trabajo.

Gracias a Rosa, Pepe Fullea, Leti, Henar, Siaw Foon, Nuria, Fabiano porque de todos he aprendido.

Gracias a muchos más compañeros del Torroja: Cristina Carillo, Marga, Paco, José Lluca, José Alonso, Carmen, M^a Cruz, Bea, Esther, María, Ricardo, Alba, Cristina

Márquez, Virtudes, José García, Arturo, Belén, Pedro, Alfredo, Eva, María Sapiña, “la Astur”, Sara Ramos, Alberto, Cesar, Sergio y Teresa por haber participado en que mi estancia en el Torroja tenga momentos inolvidables.

Gracias a mis compañeros electroquímicos, “mis electroamigos”, por los momentos que pasamos juntos en el inicio de este camino hacia la tesis. Los momentos en Burgos serán inolvidables.

Agradecer el amor y la fuerza que todas mis amigas sevillanas me han entregado para que este momento llegara, ese ramillete de hermosísimas flores; Laura, Ester, Elsa Arroyos, Elsa Arenas, Marta, Mónica, Vanesa, Esperanza, Silvia, Soledad, M^a José.... y que como dice Julio Cortázar, las palabras nunca alcanzan cuando lo que hay que decir desborda el alma.

A Moché, por indicarme el camino tantas y tantas veces, por escucharme, por tu sonrisa, por tu alegría, por tus claras palabras, por traerme cada cierto tiempo un trocito sevillano a esta gran ciudad y sobre todo por tu gran amistad.

A mis sobrinos Celia, Carlos, Ángela y Daniel, por permitirme guardar vuestras sonrisas en mi corazón y mi mente y disculpas por haberme perdido los mejores momentos de vuestra infancia durante los años que en Madrid he estado buscando el camino de la dedicación a la investigación.

A Miriam, la vasca más hermosa y bailarina de todo Madrid. Gracias por ser mi hermana, por no dejarme caer y quedarte siempre firme junto a mí. También a Kim, por cuidarme y aconsejarme y por los momentos tan divertidos que hemos pasado en Madrid.

Por último, gracias a mi amor, porque en este universo, en los multiversos que se generan antes de la acción y en el que pudieran confluír todos los que se crearon, mi amor siempre será para ti. Gracias pajarito por regalarme cada día tu sonrisa reconfortadora.

El hormigón armado es un material compuesto que posee una gran durabilidad. Sin embargo, el ciclo de vida de las estructuras puede reducirse bien por factores que ocurren durante la puesta en obra o fallos de proyecto, o bien por la exposición a agentes agresivos y/o solicitaciones mecánicas no previstas.

En la actualidad existe una tendencia a construir estructuras cuya durabilidad se establezca en 100 años sin necesidad de ser reparadas. Para lograr este objetivo se puede alargar el tiempo de iniciación, mejorando el efecto barrera del hormigón (aditivos inhibidores, revestimientos, hormigones especiales) o se puede incrementar la resistencia a la corrosión de las armaduras (armaduras poliméricas, protección catódica, galvanizadas, con resinas epoxi y aceros inoxidable).

El interior del hormigón es un medio altamente alcalino y esta característica se debe principalmente a las reacciones de hidratación que se producen cuando el cemento se pone en contacto con el agua de amasado. En el caso de los aceros de refuerzo que se encuentran embebidos en el hormigón, la elevada alcalinidad favorece la formación de una capa protectora de óxidos e hidróxidos de hierro, termodinámicamente estables y de unos pocos nanómetros de espesor. Esta fina capa se denomina capa pasiva y puede ser destruida por la entrada de agresivos que reaccionan con los productos de hidratación provocando el descenso del pH. Por otro lado, el ión cloruro es uno de los agresivos más comunes que puede entrar en el hormigón y atacar la capa pasiva dando lugar al desarrollo de la corrosión. Este agresivo es especialmente abundante cuando las estructuras se encuentran en el mar o próximo a él.

En la actualidad, las armaduras de aceros inoxidable como acero de refuerzo comienzan a ser una alternativa para evitar reparaciones costosas y estas se utilizan indistintamente para constituir estructuras completas como de forma parcial en estructuras que ya sufren corrosión. Sin embargo, el precio de algunos elementos de aleación como el Ni y el Mo sufren grandes fluctuaciones en el mercado y ello influye en el precio final del acero inoxidable. Por ello, en los últimos años se han desarrollado diferentes calidades de aceros inoxidable con distintas concentraciones de sus elementos de aleación con estructuras dúplex y bajas concentraciones de Ni y Mo. Al mismo tiempo, los aceros inoxidable austeníticos clásicos continúan comercializándose y por lo tanto se presenta un amplio abanico de distintas calidades de los mismos. La selección óptima de un acero inoxidable de refuerzo para una estructura determinada, discerniendo entre austenítico y dúplex, depende de la agresividad del medio al que se exponga, de las características de la estructura y del precio de los aleantes principales que constituyen los materiales en el momento de la construcción.

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es conocer cuál es el comportamiento de los diferentes grados de aceros inoxidable como armaduras de refuerzo cuando se encuentran en estructuras de hormigón sometidas a la acción de los iones cloruro.

El presente trabajo de investigación se desarrolla en el marco del Proyecto IISIS cuyas siglas significan: Investigación Integrada de Islas Sostenibles. En el proyecto se desarrolla un nuevo sistema basado en componentes constructivos prefabricados, para el diseño arquitectónico de construcciones industrializadas de elementos habitables, autosuficientes energéticamente, adaptados para su implantación en diferentes condiciones climáticas, flexibles y versátiles a lo largo de su vida útil para permitir diversos usos e implantaciones, montables y desmontables fácilmente, y adaptados al medio marino. Siendo este último punto el origen de la investigación y siendo cinco tipos de calidades de aceros inoxidable como acero de refuerzo los que resultan de interés comparativo para el mismo. Se han estudiado dos aceros inoxidable austeníticos clásicos y cuyas nomenclaturas americanas son; AISI 304-L y AISI 3016-L, y tres aceros inoxidable dúplex; 2001, 2304 y 2205 que han sido laminados en frío y con un diámetro de 12 mm. La metodología utilizada se basa principalmente en la utilización de técnicas electroquímicas aplicadas a ensayos acelerados y no acelerados, en una gran variedad de sistemas que simulan el interior de una estructura, bien sea mediante disoluciones, probetas de morteros o grandes bloques situados en el mar. El tipo de muestra utilizada es la barra corrugada directamente y no muestras manipuladas que puedan modificar las condiciones reales que sufren dichas barras en el interior de las estructuras debido a la existencia de corrugas y de rugosidades en la superficie.

Se estudia la susceptibilidad a la corrosión por cloruros de las armaduras de acero inoxidable, su capacidad de repasivación en los distintos ambientes de pH y la pérdida de material que experimentan frente a ensayos acelerados de corrosión. Además, se estudia la capacidad de repasivación de las distintas calidades de aceros inoxidable, característica que no se muestra con el índice PREN.

Los resultados más destacados dentro del presente trabajo de investigación se inician con la superioridad frente a la corrosión por cloruros en el interior del hormigón, del acero dúplex 2205 frente al resto de los aceros estudiados. Este acero es el más adecuado cuando las condiciones del medio son las más agresivas en cuanto a concentraciones de cloruros. No obstante, debido a que presentan un alto contenido en Mo, estos pueden adquirir en determinados momentos un alto precio y por lo tanto podría sustituirse por el dúplex 2304 con menor contenido en Mo y Ni.

Los aceros austeníticos AISI 304-L y dúplex 2001 demuestran ser menos resistentes a la corrosión por cloruros presentando ambos similares comportamientos frente a la corrosión por cloruros. El acero AISI 304-L presenta mayor cantidad de pérdida de material que el dúplex 2001. Sin embargo, desde el punto de vista económico, el dúplex 2001 resulta óptimo por presentar menores concentraciones de Ni y Mo.

El acero austenítico AISI 316-L y el dúplex 2304, se encuentran en un estado intermedio de resistencia a la corrosión por cloruro, por lo que se recomiendan para ambientes intermedios de concentraciones de cloruros. Sin embargo, el acero dúplex 2304 se muestra mucho más resistentes a la corrosión que acero austenítico AISI 316-L cuando se realizan ensayos de laboratorio en disolución, lo cual no concuerda cuando los estudios se realizan en probetas de mortero.

Por último y como uno de los resultados más importante del presente trabajo, se obtienen diferentes límites críticos de cloruros para cada calidad de acero inoxidable embebidos en un mortero constituido por CEM I 42,5 R/SR con una relación agua/cemento de 0.5. Para obtener un límite lo más realista posible y de forma acelerada, se ha realizado una propuesta metodológica modificando el ensayo estándar existente que se describe en la norma UNE- EN 83992-2. La obtención de la concentración crítica de cloruros en mortero es imprescindible para poder obtener la vida útil de una estructura. Si estos cálculos se aplican a los elementos de hormigón expuestos a un ambiente marino de carrera de mareas, es posible predecir su vida útil y comparar estos valores con los valores reales que se obtengan en un futuro.

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Durabilidad de las estructuras.....	1
1.1.1	Factores ambientales que pueden afectar a la durabilidad del hormigón	1
1.2	Corrosión de las armaduras.....	4
1.2.1	Corrosión electroquímica	4
1.2.2	Corrosión en el interior del hormigón	5
1.2.3	Pérdida de la alcalinidad	6
1.2.4	El efecto del oxígeno.....	7
1.2.5	Efecto del ión cloruro.....	8
1.3	Modelo de Tuutti.....	9
1.4	Breve historia del acero inoxidable	10
1.4.1	Historia del uso del acero inoxidable en estructuras	12
1.4.2	El acero inoxidable en el mundo de la construcción. Ejemplos de estructuras	13
1.5	El acero inoxidable en el mercado	16
1.5.1	Factores que afectan al precio del acero inoxidable.....	16
1.5.2	Volatilidad de los precios de los aleantes	17
1.6	Fabricación del acero inoxidable.....	18
1.7	Corrosión del acero inoxidable.....	20
1.7.1	Tipos de corrosión.....	20
1.7.2	Composición y tipos	24
1.7.3	Pasivación, despasivación y formación de picaduras en el acero inoxidable	27
1.7.4	Influencia de los elementos de aleación	31
1.7.5	Índice PREN.....	34
1.8	Antecedentes, Justificación e hipótesis.....	36
1.8.1	Antecedentes y justificación.....	36
1.8.2	Hipótesis.....	38
2.	OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN	41
3.	METODOLOGÍA	45
3.1	Materiales. Análisis químico y microestructural.....	45

3.2	Diagrama de procesos experimentales	49
3.3	Técnicas electroquímicas	50
3.3.1	Voltametrías cíclicas o curvas de polarización cíclicas	51
3.3.2	Resistencia a la polarización lineal	54
3.3.3	Impedancia electroquímica	57
3.4	Ensayos de laboratorio en disolución.....	65
3.4.1	Voltametrías cíclicas o curvas de polarización cíclicas.....	65
3.4.2	Celdas de corrosión	71
3.5	Ensayos de laboratorio en probetas de mortero.....	78
3.5.1	Probetas de mortero con cloruros en su composición y estudio de par galvánico.....	78
3.5.2	Concentración límite de cloruros.....	81
3.6	Ensayos de grandes componentes de hormigón situados en el mar.....	84
3.6.1	Preparación de material para la fabricación de los componentes.....	84
3.6.2	Caracterización del hormigón de los bloques de gran tamaño.....	90
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	99
4.1	Resultados de ensayos de laboratorio en disolución	99
4.1.1	Voltametrías cíclicas	99
4.1.2	Celdas de corrosión	108
4.2	Resultados de ensayos de laboratorio en probetas de mortero.	120
4.2.1	Probetas de mortero con cloruros en su composición.....	120
4.2.2	Probetas de mortero fabricadas para el cálculo de la concentración límite de cloruros.....	123
4.3	Resultados de grandes componentes de hormigón situados en el mar	131
4.3.1	Medidas "in situ"	131
4.3.2	Extracción de testigos de los bloques de gran tamaño	133
4.3.3	Ensayos en laboratorio de probetas del hormigón de correspondiente a los grandes bloques.....	136
5.	DISCUSIÓN	143
5.1	Voltametrías cíclicas.....	143
5.1.1	Evaluación de potenciales críticos.....	143
5.1.2	Evaluación de imágenes mediante lupa binocular.....	150
5.1.3	Evaluación cuantitativa. Pérdida de material	150

5.2	Celdas de corrosión.....	152
5.2.1	Análisis de la evolución de E_{corr} e I_{corr}	152
5.2.2	Evaluación de P_{corr} y de la pérdida de material.....	159
5.2.3	Parámetros de los circuitos equivalentes e interpretación de los resultados.	163
5.3	Probetas de mortero	177
5.3.1	Probetas con cloruros en su interior	177
5.3.2	Límite crítico de cloruros	181
5.4	Bloques situados en el mar.....	186
5.5	Modelo de vida útil de una estructura que contiene los cinco tipos de aceros inoxidables que se estudian.....	188
6.	CONCLUSIONES	195
	TRABAJOS FUTUROS.....	197
	Anexo 1. Celdas de corrosión. Representación de indicadores de corrosión, E_{corr} e I_{corr} de muestras m_1 y m_2	201
	Anexo 2. Celdas de corrosión. Imágenes mediante lupa binocular, transcurridos 953 días.	213
	Anexo 3. Consistencia de las medidas experimentales de EIS.	221
	Anexo 4. Diagramas de Nyquist y Bode (ángulo y fase) para las muestras m_1 de cada celda de corrosión junto con la representación del ajuste al circuito equivalente.	249
	Anexo 5. Parámetros de ajustes a circuito equivalente.....	281
	Anexo 6. Probetas de mortero con distintas concentraciones de cloruros en % en peso de cemento obtenido a partir de CaCl_2 . Representación de valores de E_{corr} e I_{corr} frente al tiempo. Gráficas de m_1 , m_2 y acero al carbono.....	299
	Anexo 7. Bloques de gran tamaño situados en el mar. Representación de E_{corr} e I_{corr} y resistencia para el bloque A y el bloque B por separados.....	307
	Anexo 8. Parámetros obtenidos mediante ajustes al circuito equivalente. Representación de los cinco aceros de estudio juntos.....	317
	DIVULGACIONES CIENTÍFICAS	323
	BIBLIOGRAFÍA.....	324

ABERVIATURAS Y ACRÓNIMOS

B: Constante de Stern. Valores de 26mV para aceros activos y 52 mV para pasivos.

CE: Contraelectrodo

CPC: Curva de Polarización Cíclica

CPE: Elemento de fase constante

C_x : Concentración de cloruros a una profundidad x en un tiempo t en % en peso seco de muestra.

C_s - Concentración de cloruros en el hormigón en % en peso seco de muestra.

D_{ss} : Coeficiente de difusión en estado estacionario

D_{ns} : Coeficiente de difusión en estado no estacionario o coeficientes de difusión aparente.

E_{corr} : Potencial de corrosión.

E_{pr} : Potencial de protección

Erf - Función error de Gauss

E_r : Potencial de ruptura.

GS: Tamaño de grano (Grain Size)

i_{ap} : Corriente anódica de pico

i_{ac} : Corriente catódica de pico

I_{corr} : Densidad de corrosión (i_{corr}). Se utiliza I_{corr} mayúscula en ($\mu A/cm^2$), para indicar que la corrosión que se estudia es localizada.

LME: London Metal Exchange

P_x : Profundidad de penetración del ataque por corrosión en un momento determinado en (mm). También se denomina P_{corr} .

P_{pit} : Profundidad de penetración máxima del ataque por corrosión por picaduras o localizada.

RE: Electrodo de referencia (Reference Electrode)

RPL: Resistencia a la Polarización Lineal

SSE: Standart Silver Electrode

t_p : Tiempo de propagación, dentro del modelo de Tuutti (figura 5)

VC: Voltametría Cíclica

V_{corr} : Radio de corrosión instantáneo [mm/año] o [$\mu m/año$].

WE: Electrodo de trabajo (Working Electrode)

α/γ : Relación de fases

α : Factor de picadura.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Durabilidad de las estructuras

El hormigón armado es un material de construcción del siglo XX y ha sido ampliamente utilizado a temperaturas y condiciones climáticas adversas con éxito [1]. Este posee una gran durabilidad la cual puede perderse bien por factores que ocurren durante la producción del mismo y sus consecuencias prevalecen en el tiempo, o bien por la exposición a la que ha estado sometida la estructura durante su tiempo de vida. Para evitar un envejecimiento prematuro e inesperado del hormigón, es aconsejable trabajarlo mediante unas prácticas correctas. Un factor importante es producirlo por encima de los 5°C y por debajo de los 32°C. Si esto no se cumple y la temperatura supera la indicada en ambientes muy cálidos, la mezcla demandará una mayor cantidad de agua y esto provoca un aumento en la relación agua/cemento, diferente al calculado inicialmente. Las reacciones de hidratación se aceleran y todo ello afectará a la resistencia del hormigón, pudiendo además provocar la retracción en el mismo. Por otro lado, si la producción se realiza a temperaturas demasiado bajas el agua de la mezcla podría congelarse lo que produciría un incremento en el volumen total del hormigón pudiendo retrasar el fraguado y el endurecimiento del mismo [1].

En el caso del hormigón armado, el acero se encuentra rodeado por un ambiente alcalino el cual minimiza los riesgos de corrosión del mismo. Dicho material estructural, puede perder durabilidad por diferentes vías, pudiendo quedar el acero de refuerzo expuesto a posibles ataques por corrosión.

1.1.1 Factores ambientales que pueden afectar a la durabilidad del hormigón

Existen un gran número de factores ambientales que pueden afectar a la durabilidad del hormigón y que se enumeran a continuación.

1.1.1.1 Ciclo de hielo deshielo

Cuando la estructura se somete a temperaturas muy bajas, el agua de los poros y de los capilares se congela causando una expansión del hormigón que se mantendrá en el futuro cuando se produzca el ciclo de deshielo. Se desarrolla una presión de dilatación que, si supera a la resistencia a la tracción del hormigón, puede llegar a causar daños en el mismo [1].

1.1.1.2 Retracción por secado

Ocurre cuando se produce pérdida de agua libre del hormigón debido a ciclos térmicos que causan la contracción del mismo. Se desarrollan tensiones internas que pueden causar la rotura del hormigón. La magnitud de esta retracción por secado aumenta cuando aumenta la sequedad del ambiente al que la estructura está sometida [1].

1.1.1.3 Retracción por carbonatación

El dióxido de carbono se considera un agresivo del hormigón, debido a que este entra a través de él y se produce en su interior la siguiente reacción:



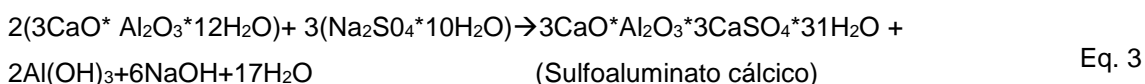
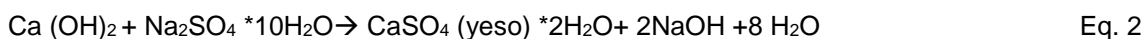
Cuando el dióxido de carbono reacciona con el hidróxido de calcio, se produce una disminución del contenido en agua y de su peso, lo cual puede provocar agrietamientos en la superficie y la barrera física que supone el hormigón para el acero disminuye por la aparición de fisuras, facilitando así, la entrada de otros agresivos.

Otro proceso que provoca la carbonatación del hormigón, es el descenso del pH interno, exponiendo de nuevo al acero a un estado de no pasividad y por lo tanto aumentando su vulnerabilidad ante la corrosión. Si la humedad relativa del ambiente se encuentra al 50% H.R se favorece el proceso de carbonatación a causa de que las moléculas de dióxido de carbono que se disuelven en el agua y que se acumulan en los poros y capilares de interior del hormigón, reaccionan con el hidróxido de calcio que existe en los mismos y por tanto, disminuye la alcalinidad de dichos poros y capilares hasta valores próximos a pH 8 [1].

1.1.1.4 Ataque de sulfatos

Cuando el hormigón se pone en contacto con aguas subterráneas, aguas de mar, o aguas salobres que contengan sales de sulfatos, magnesio, calcio o sodio, puede ser atacado.

Las reacciones más comunes se muestran a continuación:



Ambos productos de reacción, yeso y sulfoaluminato cálcico poseen un volumen superior que los compuestos que reemplazan y por lo tanto, el ataque por sulfatos

conduce a la expansión en el volumen y a cambios en el hormigón. La afinidad del hormigón por sulfatos puede disminuirse introduciendo cementos sulfatoresistentes, con bajos contenidos en aluminato tricálcico (C_3A), utilizando bajas relaciones de agua cemento [1].

1.1.1.5 Agua de mar o ambientes marinos

Cuando las estructuras se encuentran en un ambiente marino o cercano a él, estas sufren un gran riesgo de corrosión de sus armaduras.

El agua de mar posee una gran variación de sólidos disueltos totales (Total dissolved solid, TDS) y este contenido varía de unos océanos a otros. El contenido más habitual del agua de mar se basa en iones como; Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , F^- , H_3BO_3 , Mg^+ , Ca^{2+} , Sr^{2+} , K^+ y Na^+ [1].

El principal peligro que se encuentran las estructuras cuando están situadas en el mar o muy próximo a él es la presencia del ión cloruro, pues además de ser el más abundante, con un valor medio del 3% p/p [1], es el más agresivo y corrosivo de todos por su capacidad de introducirse en el interior de la capa pasiva superficial de los aceros de refuerzo y destruirla catalizando el proceso de corrosión. Dependiendo de dónde se encuentre situada la estructura, el ión cloruro lo tiene más difícil o más fácil para atravesar el hormigón y llegar al refuerzo. Se diferencian zonas como la atmosférica, catalogada de medianamente corrosiva, de salpicadura, considerada un medio altamente corrosivo, de carreras de mareas, como medio-alto, aguas poco profundas, que se catalogan como medio, océano profundo, el cual se considera bajo y finalmente las zonas de lodos o fangos resultando ser altamente corrosivos.

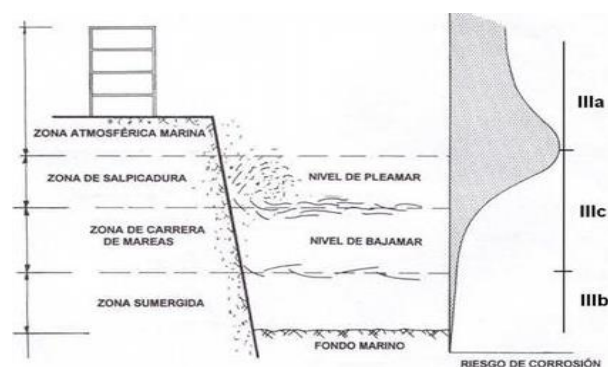


Figura 1. Grados de corrosividad en ambientes marinos.

Unas de las razones que se plantea como causante de estas diferencias de zonas corrosivas es el movimiento del agua y el estancamiento del oxígeno, aunque en la actualidad existen líneas de investigación que comienzan a cuestionar que el oxígeno

sea el factor determinante de los procesos de corrosión introduciendo otras propuestas como la presencia de determinadas reacciones catódicas y otros procesos que se encuentran dentro de una investigación muy actual.

Por último, indicar que el ión cloruro no sólo puede aparecer en zonas de mar o próximas a ella, sino que también pueden aparecer en los agregados del hormigón, como sales de cloruros, en el agua de mezcla o debido a sales de hielo/deshielo.

1.2 Corrosión de las armaduras

1.2.1 Corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica se da cuando el metal se halla en un medio de conductividad electrolítica, en particular con el agua, soluciones salinas, o la simple humedad de la atmósfera o de los suelos. Cuando la superficie del metal se pone en contacto con medios de conductividad electrolítica se produce la formación de pilas electroquímicas sobre la superficie metálica. Se producen reacciones de oxidación y de reducción, además de la circulación de iones a través del electrolito, generándose dos zonas sobre la superficie del metal por un lado un ánodo, donde se produce la oxidación del metal (Eq. 4) y con ello la liberación de electrones que emigran a través del metal hacia otro lugar y por otro lado el cátodo, donde reaccionan a base de producir la reducción de alguna sustancia existente en el electrolito. Estas sustancias serán los iones hidrógeno en medios ácidos (Eq. 5) o el oxígeno disuelto en el agua en medios alcalinos y neutros (Eq. 6).



No es necesaria la presencia de dos metales diferentes en contacto eléctrico para que funcione el mecanismo electroquímico de la corrosión. La presencia de múltiples heterogeneidades en el metal o en su entorno da lugar a la aparición de regiones con distintos potenciales electroquímicos lo que facilita la formación de pilas de corrosión o pilas locales de corrosión.

Dependiendo del medio donde se encuentre localizado el metal los productos de corrosión y las reacciones que se producen son diferentes, así pues, se representa mediante la figura 2, las reacciones redox y productos de corrosión que se producirían en el caso de que el metal fuera hierro y el medio fuera ácido o neutro, por una parte o alcalino, por otra.

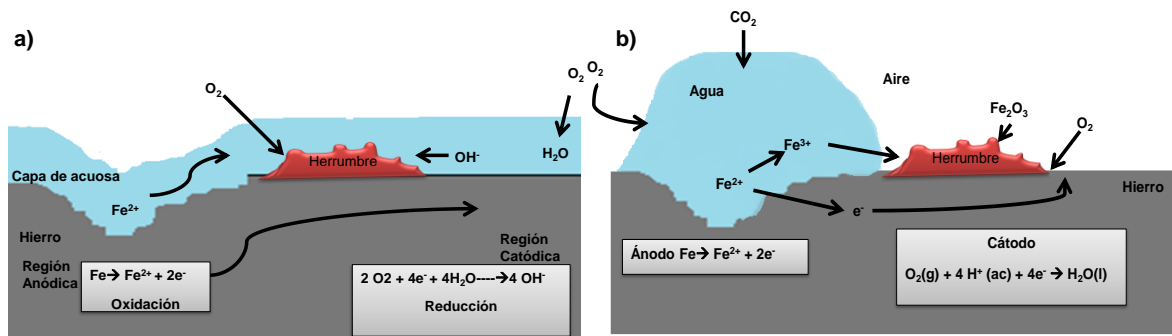


Figura 2. Esquema de corrosión del hierro a) en un medio ácido y b) en un medio neutro o alcalino.

1.2.2 Corrosión en el interior del hormigón

El interior del hormigón es un medio altamente alcalino y esta característica se debe principalmente a las reacciones de hidratación que se producen cuando el cemento se pone en contacto con el agua de amasado. El cemento portland, cemento base de la mayoría de los cementos, está constituido principalmente por silicatos bicálcicos (C_2S) y tricálcicos (C_3S), aluminato tricálcico (C_3A), ferroaluminato tricálcico (C_4AF) y yeso (CS). Estos compuestos reaccionan con el agua generando productos hidratados coloidales poco solubles. Los hidratos de los silicatos dan lugar a la formación de una materia no cristalina de composición variable que se denomina gel C-S-H y portlandita $Ca(OH)_2$, siendo esta última la que reacciona con sulfatos alcalinos que se encuentran en el cemento en menor proporción, dando lugar a los hidróxidos correspondientes de sodio, potasio o magnesio. El pH tan elevado que se genera en el interior de los poros del hormigón se debe principalmente, a la presencia de los iones OH^- procedentes de estas bases alcalinas y al $Ca(OH)_2$ [2].

Cuando un acero de refuerzo, se encuentra embebido dentro del hormigón la elevada alcalinidad favorece la formación de una capa protectora de óxidos e hidróxidos de hierro, termodinámicamente estables y de unos pocos nanómetros de espesor. Esta fina capa se denomina capa pasiva y puede ser destruida por la entrada de dos principales agresivos que han sido nombrados anteriormente. Uno de ellos es el ión cloruros, el cual puede producir una rotura local en cantidades suficientes para superar el umbral crítico que cada tipo de acero tiene la capacidad de soportar sin que se desarrolle la corrosión y el otro sería el agresivo CO_2 , cuya entrada provoca el descenso del pH interno y como consecuencia la desaparición de dicha capa, como se desarrolla en el apartado 1.1.1.3.

Además de estos dos factores de gran intensidad en el camino a la destrucción de la capa pasiva, existen dos factores no menos importantes que pueden ayudar a una aceleración del proceso de corrosión. Estos son la humedad y la presencia de

oxígeno. Ambos son factores fundamentales que pueden darse en un proceso de corrosión electroquímica y que pueden desarrollarse a velocidades apreciables [2].

Los diagramas de Pourbaix representan las regiones de estabilidad termodinámica de las especies de un metal en un medio dado, pudiendo predecir las zonas de inmunidad, corrosión y pasividad de un metal en un medio agresivo determinado. Estos representan gráficamente el potencial en ordenadas y el pH en abscisas y definen el dominio de estabilidad para el electrolito, habitualmente agua a 25°C, el metal y los compuestos relacionados como pueden ser óxidos, hidróxidos e hidruros.

En ellos se definen tres tipos de líneas; horizontales, que indican la dependencia directa con el potencial, verticales, que indican reacciones con dependencia directa con el pH y oblicuas, que indican dependencia con ambos. A continuación, se muestran los diagramas de Pourbaix del hierro en la figura 3, donde se indican las especies termodinámicamente estables, en la figura de la izquierda y las zonas activas, pasivas o inmunes con respecto a la corrosión en la figura de la derecha.

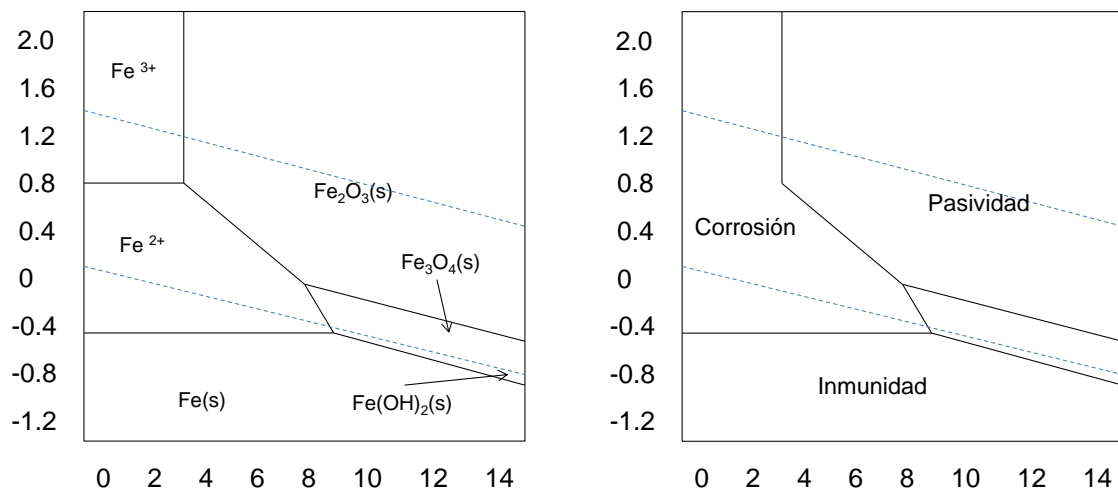


Figura 3. Diagrama de Pourbaix del Fe.

1.2.3 Pérdida de la alcalinidad

Cuando la alcalinidad del medio desaparece por la entrada del agresivo CO₂ (Eq. 1), se inicia la ruptura de la capa pasiva y como consecuencia el inicio de la corrosión como se muestra en la figura 4.

En la superficie del metal, se forma una capa de óxido constituida por Fe₂O₃ y Fe₃O₄ y existe controversia sobre cuál de los dos compuestos es más estable. Así pues, [1] considera que el compuesto más estable en esta capa es el Fe₂O₃ el cual se encuentra con una estructura cristalina que constituye el γ FeOOH y que este compuesto se genera por la interacción del O₂ con Fe(OH)₂ como se muestra en la siguientes reacciones:



Sin embargo existe controversia entre la estabilidad de los óxidos y otras corriente estudian que es el Fe_3O_4 el óxido más estable [3].

El crecimiento de una capa de óxido induce un estrés mecánico en el hormigón y conduce a su deterioro. Una vez se inicia la corrosión resulta muy difícil su control, a menos que se detecte en estados muy iniciales.

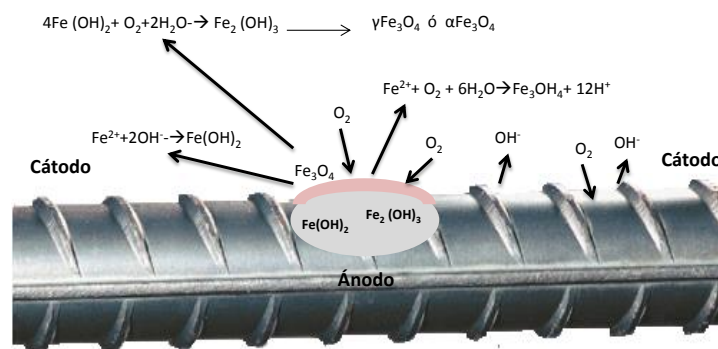


Figura 4. Formación de capas de hidróxido férrico, hidróxido ferroso y magnetita.

1.2.4 El efecto del oxígeno

La presencia de oxígeno participa en numerosas ocasiones, en el inicio de la corrosión. Los poros del hormigón contienen agua, agua vapor y aire. El aire en contacto con el agua se encuentra saturado en oxígeno y este aire puede difundir a distancias considerables a través del hormigón. La cantidad de oxígeno total dependerá de la cantidad de sólidos disueltos en los poros y de la solubilidad del oxígeno que depende, en gran medida, de la temperatura y de la presión. Cuando la temperatura supera los 80°C la solubilidad del oxígeno disminuye y por lo tanto la velocidad de corrosión que depende del mismo también. Las zonas porosas que se encuentren poco saturadas adquirirán una mayor concentración de oxígeno, además de que pueden formarse zonas de aireación diferencial que inicien el proceso de la corrosión. Por lo tanto, y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, la reducción del oxígeno podría ocurrir en las zonas porosas del hormigón actuando esa zona como un cátodo, mientras que en las zonas poco porosas y con poca accesibilidad del mismo se producirá la oxidación del metal actuando como ánodo. Es por tanto que los niveles de oxígeno en el interior del hormigón, en muchas ocasiones

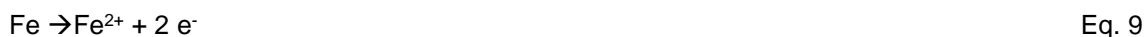
pueden ser los responsables de la aireación diferencial que promueve la corrosión en la superficie del acero [1, 4].

1.2.5 Efecto del ión cloruro

Cuando el ión cloruro entra en el hormigón por las distintas formas que se desarrollaron en el apartado 1.1.1.5, éste produce la ruptura de la capa pasiva catalizando el proceso de corrosión y generando picaduras en la superficie del acero.

Existen dos procesos los cuales suceden simultáneamente, un proceso de reparación de la capa pasiva mediante iones OH^- y un proceso de destrucción por iones cloruros. La concentración de cloruros alcanza una concentración crítica que depende del pH y de la concentración de Fe_2O_3 o Fe_3O_4 antes de que se produzca la rotura de la capa pasiva. La relación cuantitativa entre Cl^-/OH^- o entre el pH y Cl^- no está claramente definida. En general, para el acero al carbono se toma el límite de cloruro desde 0,15% del cloruro soluble en peso de cemento [1], hasta 0.4% [2, 5], modificándose lógicamente a un valor menor, cuando el porcentaje se expresa en relación al peso del hormigón y estableciéndose en 0.05-0.1%.

Un efecto principal que el cloruro produce en contacto con el refuerzo es la adsorción del cloruro en la capa protectora, éste reacciona con el Fe^{2+} y forma un complejo soluble en el ánodo. Posteriormente este complejo reacciona con la humedad formando $\text{Fe}(\text{OH})_2$, como se muestra en las siguientes reacciones:



Cuando esto ocurre, como puede observarse en la Eq.11, el pH desciende y la concentración de cloruros aumenta. Una vez que los cloruros son liberados sobre la superficie metálica, el proceso se convierte en auto-generador y no se requieren iones cloruros adicionales.

El ciclo repetitivo que implica la reacción de Fe^{2+} con Cl^- iones, la formación de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ y la liberación de iones H^+ y Cl^- , continua hasta que la capa protectora de Fe_2O_3 y Fe_3O_4 está completamente destruida [1].

La EHE-08 establece el límite de cloruros, en condiciones normales, en 0.6% con respecto al peso de cemento, para la comprobación del estado límite en relación con la corrosión de las armaduras pasivas. En el caso de armaduras activas pretensas, puede adoptarse un valor límite de cloruros de 0.3% con respecto al peso de cemento.

1.3 Modelo de Tuutti

Se considera que la vida útil de una estructura es el tiempo en el que ésta mantiene unas condiciones adecuadas en cuanto a su funcionalidad, resistencia, seguridad y deterioro de su estética.

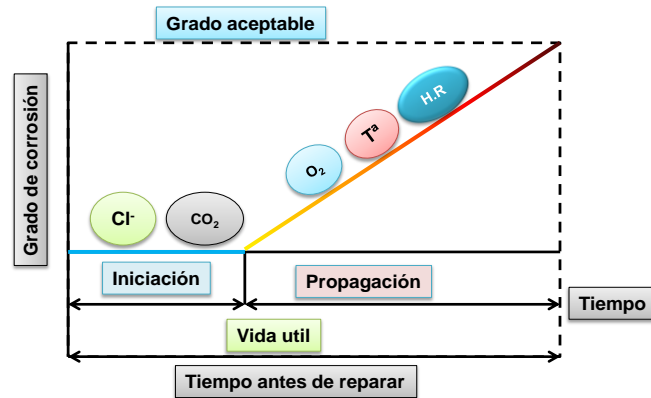


Figura 5. Modelo de vida útil de Tuutti

El modelo de Tuutti [6], esquematiza la vida útil de una estructura en función de la evolución de sus armaduras frente a la corrosión, figura 5.

Este modelo se divide en dos principales etapas que se denominan iniciación y propagación. En la etapa de iniciación, el acero se encuentra pasivo por la alcalinidad que el hormigón le confiere y se considera que el refuerzo se encuentra a tiempo cero en dicha etapa. Durante el período de iniciación se darán algunas razones, deterioros del hormigón y entrada de agresivos, por las que el acero pierda su condición de estar pasivado para encontrarse despasivado. Además, el período de iniciación puede variar en función de numerosos factores que se den en la estructura como pueden ser: la formación de fisuras, la cantidad de agresivos que entren a través del mismo, el umbral crítico de cloruros para cada tipo de acero, el recubrimiento del hormigón, el tipo de exposición de la estructura, o la velocidad de entrada de los agresivos. Con respecto a esta última comentar que depende del tipo de cemento y de su relación agua cemento, que a su vez influye en la porosidad del hormigón. Por lo tanto, cuanto mayor es la porosidad, la entrada de agresivos es más favorable.

Cuando el acero se despasiva comienza el segundo período, el período de propagación. Este puede verse influenciado también por los mismos factores que afectan al primero, de iniciación y por la utilización de distintos tipos de aceros de refuerzos más o menos resistentes a la corrosión. Así mismo, las condiciones de temperatura, humedad y concentración de oxígeno, pueden acelerar la velocidad de corrosión de los refuerzos.

El modelo de Tuutti cuantificado es habitualmente utilizado como índice de deterioro de las estructuras utilizando la disminución de sección del acero. C. Andrade y col., han procedido a cuantificar el modelo de Tuutti introduciendo los valores de velocidad de corrosión que se han detectado en el laboratorio y en estructuras reales. Así pues, se pueden realizar predicciones cuantitativas traduciendo los niveles de corrosión mediante algún parámetro cuantitativo. Este parámetro puede ser la medida de la velocidad de corrosión determinada experimentalmente a partir de las medidas de resistencia a la polarización lineal, que actualmente son posibles realizar directamente en la estructura. A partir de este parámetro, puede calcularse la reducción de sección sobre base real, considerando que $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ equivale, para armaduras de acero al carbono, a penetraciones de la corrosión de $11.6 \mu\text{m}/\text{año}$ [7]. Utilizando el modelo de Tuutti, analizando medidas previas de velocidad de corrosión y suponiendo que se ha iniciado ya el período de propagación se puede calcular la vida residual de una estructura deteriorada por corrosión de armaduras. De este modo puede definirse un nivel inaceptable de deterioro de la misma [2].

En la actualidad, y debido a la reciente introducción del acero inoxidable como acero corrugado de refuerzo, surge un campo de investigación de interés que se desarrolla en el estudio de la durabilidad de las estructuras con aceros inoxidables de distintas calidades en su interior.

1.4 Breve historia del acero inoxidable

Los aceros inoxidables, comenzaron a ser desarrollados a finales del siglo XIX, con algunos intentos, como el de Woods y Clark (1872) [8], con la fabricación de aceros con un 5% de cromo, o de Hadfield (1892), en Sheffield, con sus estudios sobre la mejora sensible de los aceros aleados con cromo [8, 9].

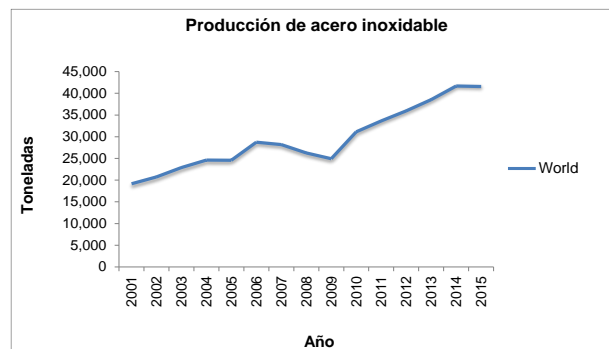
Algunos científicos, como León Guillet y Portevin, entre los años 1904 a 1910, en Francia, comenzaban sus investigaciones con aceros que se aproximaban a las fórmulas del inoxidable [10]. Fue un año después de la guerra mundial cuando los aceros inoxidables comenzaron a desarrollarse y curiosamente, de forma independiente en el Reino Unido y Alemania, entre los años 1904 a 1910. Así, M. Harry Brearly, director de los laboratorios de Investigación de la Thos Firth-John Brown Ltd, de Sheffield, descubrió los aceros inoxidables con un 13% de cromo en masa. En Alemania, los científicos de la firma Krupp, Strauss y Maurer, descubrieron y patentaron en 1912, dos tipos de acero inoxidable al cromo-níquel [9].

Los más aceptados fueron: el acero Krupp VIM con 13% de cromo y 1,75% de níquel y el más celebrado de todos fue el acero Krupp V2A, con 20% de cromo y 7% de níquel,

que con la denominación de acero inoxidable 18-8, ha sido uno de los aceros inoxidables más utilizados hasta el presente [9]. También en Estados Unidos, Elwood Haynes [11], tuvo éxito en sus investigaciones sobre la inoxidabilidad de los aceros, patentando en 1915, unos aceros resistentes a la corrosión formulados con: (20-35) % de cromo, (0-25) % de wolframio y pequeñas cantidades de carbono, silicio, níquel y fósforo.

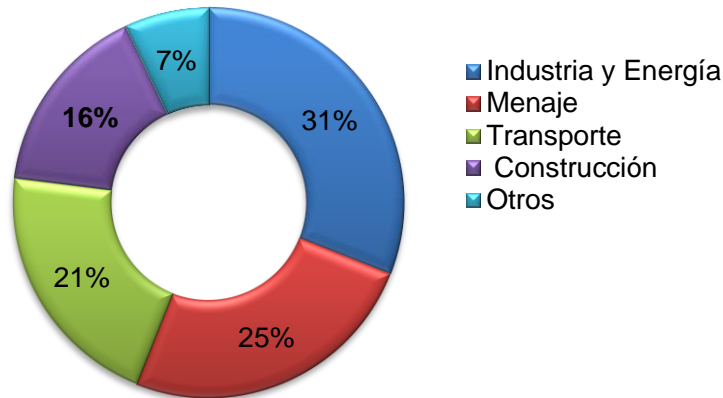
Con esta denominación de aceros inoxidables, se clasifican una serie de aceros que resisten bien la presencia de agentes corrosivos, atmósferas industriales, humedad, ácidos y/o álcalis de diversa naturaleza y con un conjunto de metales de aleación en diferentes concentraciones, adecuándose a diferentes utilidades y siendo su definición más general la de aquellos aceros que poseen un contenido de al menos un 10.5% Cr y un contenido no superior a 1.2% en C, si su resistencia a la corrosión, es un factor predominante [12].

El consumo de acero inoxidable en el mundo ha ido en aumento hasta nuestros días. La siguiente gráfica muestra su evolución desde el año 2001 hasta el 2015.



Gráfica 1. Evolución del consumo de acero inoxidable. Fuente: ISSF, Bruselas.

El acero inoxidable presenta un gran número de utilidades, bien sea para artículos de consumo: utensilios de cocina, fregaderos, lavadoras, lavavajillas y otros, o bien sea para uso como equipamiento industrial: producción de energía, en diferentes industrias como la alimentaria, química, del petróleo, del gas, del transporte o incluso de la textil, el mundo de la construcción y otros usos. Destacar que, dentro de este gran número de utilidades, un 16%.se destina al sector de la construcción.



Gráfica 2. Clasificación en función del consumo. Fuente: Cedinox, 2015.

1.4.1 Historia del uso del acero inoxidable en estructuras

Durante los últimos 80 años, la longevidad y la estética de acero inoxidable han inspirado a arquitectos y diseñadores por igual para utilizar el material en ambas formas prácticas e imaginativas.

Las formas más comunes de productos de acero inoxidable suelen ser secciones estructurales conformadas en frío como placas, hojas, tiras, tubos, barras, laminas en caliente como piezas de fundición, elementos de sujeción y fijaciones.

Los productos más utilizados son secciones conformadas en frío, sobre todo porque requieren relativamente una baja inversión para alcanzar la capacidad de producción y son fáciles de obtener. Además, son adecuados para aplicaciones estructurales ligeras con una gran eficiencia estructural [13].

El acero inoxidable ha sido utilizado durante mucho tiempo como material de cubierta y fachadas por la industria de la construcción. El edificio Chrysler en Nueva York es un epítome. Una de las razones principales por las que se usa este material es que su resistencia a la corrosión en condiciones atmosféricas es sustancialmente mayor en comparación con las de cinc o de cobre.

El uso de acero inoxidable como acero de refuerzo demuestra ser un ahorro a largo plazo. Cuando en una estructura se produce la corrosión del acero de refuerzo existen numerosas metodologías de reparación que, además de costosas, en algunas ocasiones sólo pueden ser útiles a corto plazo. Por otro lado, se puede recurrir a aceros galvanizados que no protegen a tan largo plazo como los inoxidables. Otra opción podría ser el recubrimiento de la armadura con epoxi, pero este último puede degradar la adhesión entre el refuerzo y el hormigón entre otros. Por ello y para evitar todos

estos problemas, el uso del acero inoxidable como acero de refuerzo podría ser una muy buena alternativa.

Se ha de señalar que, a pesar de que el acero inoxidable de refuerzo puede reducir los costos a largo plazo, el coste inicial es alto, principalmente por el contenido de Ni, Mo, u otros elementos de aleación, cuyos precios dependen principalmente del mercado. Por ello, algunas de las investigaciones actuales se centran en el desarrollo de nuevos aceros inoxidables con un menor contenido en los aleantes que fluctúan en mayor medida en el mercado como por ejemplo el níquel [14, 15], pudiendo ser estos una alternativa viable al problema del elevado precio.

Además de su uso como acero de refuerzo pasivo, también se han sugerido para su uso como elementos estructurales de carga o refuerzo activo. Un buen ejemplo, es un puente de hormigón construido por el Departamento de Transporte de Oregon, donde las barras de refuerzo de este puente son de acero inoxidable dúplex y este puente está diseñado para durar 120 años, "literalmente sin mantenimiento", a pesar de la atmósfera salada y la actividad sísmica en Oregon [16].

Gardner [13] desarrolla un gran artículo sobre el uso del acero inoxidable con fines para la construcción, en el cual se destacan algunas de las ventajas que estos materiales incluyen como pueden ser la resistencia al fuego o una mejor resistencia a la fatiga comparado con el acero al carbono [13, 17]. Por lo tanto, la estructura de acero inoxidable será capaz de mantener mejor la integridad estructural en un accidente de incendio. El buen comportamiento ante la deformación plástica, la capacidad de absorber la energía y su alta tenacidad a la fractura hacen también que los aceros inoxidables destaque en su uso como componentes estructurales [13, 18].

1.4.2 El acero inoxidable en el mundo de la construcción. Ejemplos de estructuras

El acero inoxidable estructural puede tener un gran número de aplicaciones. Puede ser utilizado de forma parcial en las estructuras en uniones de puentes o en zonas específicas de la estructura donde se espera sea una zona con mayor riesgo de corrosión por las condiciones ambientales como son las zonas de salpicadura o bien, para la construcción completa de las mismas.

Un uso habitual suele ser donde el recubrimiento del hormigón es muy pequeño lo cual es habitual en casos de elementos esbeltos.

En el pasado, el uso del acero al carbono combinado con acero inoxidable provocaba un cierto temor, con respecto a la posibilidad del acoplamiento galvánico entre ambos, pero actualmente esta combinación es fomentada y considerada como un uso "inteligente" del acero inoxidable [19].

A pesar de que esto pueda suponer un coste adicional, debe ser comparado con el coste necesario en un futuro que se necesita para la reparación de las estructuras. Varios autores demuestran que al aplicar un análisis de costes en el ciclo de vida de varias estructuras expuestas a ambientes marinos la elección de un tipo adecuado de acero inoxidable, en partes específicas de las estructuras, genera ahorros en los gastos de mantenimiento futuros y que estos puede ser mucho mayores a los que se crean inicialmente cuando se introduce acero inoxidable [\[20-24\]](#).

A continuación, se muestran algunos de los numerosos ejemplos de estructuras que contienen aceros inoxidables en su composición de forma parcial, total, en forma de acero de refuerzo o bien con un papel principalmente estético.



Puente Eiffel. Portugal



El museo de arte contemporáneo. Victoria



Galería de arte de Alberta, Edmonton, Canadá



Puente que conecta Hong Kong y Macao



One World Trade Center, New York, USA



Torre Cepsa. Madrid

Figura 6. Ejemplos de estructuras que contienen acero inoxidable. Acerinox S.A.U.

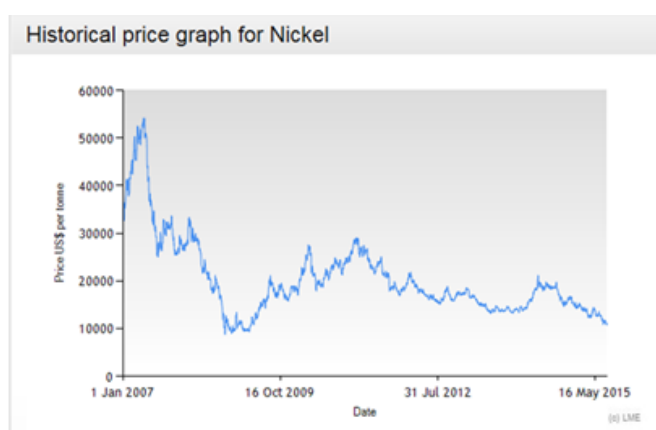
1.5 El acero inoxidable en el mercado

1.5.1 Factores que afectan al precio del acero inoxidable

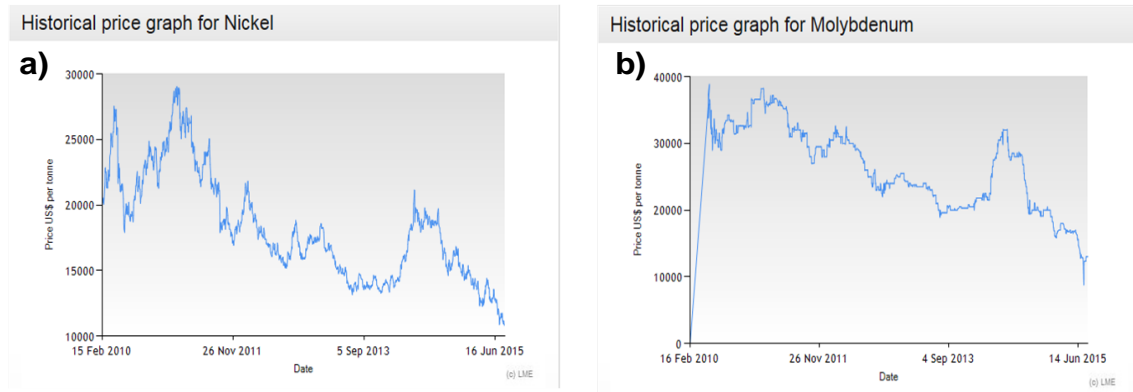
Si se analizan los factores que determinan los precios del acero inoxidable y la forma en que afectan al mercado global, se debe tener en cuenta que al igual que cualquier producto, el precio del acero inoxidable fluctúa dependiendo de varios factores de oferta y demanda [25]. El acero inoxidable se fabrica en todo el mundo y es un producto global que se importa y exporta a varios países. Cuando la demanda en un país aumenta, esta puede cambiar los precios basándose en la oferta de otro. El precio del acero inoxidable, rara vez mantiene su precio mes a mes.

Un factor importante en la fijación de los precios del acero inoxidable es el coste de la aleación utilizada en la producción del mismo. Los aleantes principales de los que depende el coste son el níquel, cromo y también el molibdeno, principalmente para aquellos aceros inoxidables que contienen un alto grado de aleación [26]. Otros factores a tener en cuenta en el precio final de una partida de acero inoxidable son la cantidad de producto adquirido, el tipo de producto y su forma, así como el acabado de la superficie. Es por todo ello que las comparaciones en precios, solo son posibles entre productos con las mismas características.

Otro factor importante, es la energía necesaria en la producción, la cual afecta directamente al coste final de la fabricación y tiene un peso significativo al dictar la fijación de precios. Un fuerte aumento de precio de la energía; gas natural, carbón y electricidad, puede desencadenar en un aumento del coste de producción en general y por lo tanto, un fuerte aumento del acero inoxidable de manera significativa [27].



Gráfica 3. Evolución del precio del níquel desde 2007 a 2015. Fuente: LME.



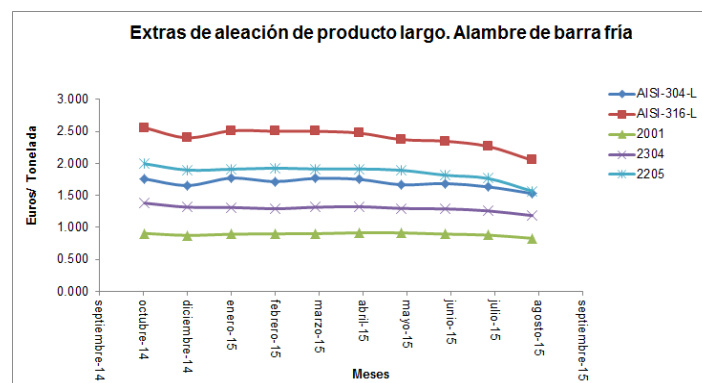
Gráfica 4. Evolución del precio de a) níquel y b) molibdeno. Período 2010 a 2015. Fuente: LME.

1.5.2 Volatilidad de los precios de los aleantes

El problema de la volatilidad de los precios de las materias primas se resuelve por algunas empresas del sector mediante la aplicación, al precio del acero inoxidable de lo que ellos denominan como “extra de aleación”. Ello permite traspasar al cliente las fluctuaciones del níquel en la Bolsa de Metales de Londres en el periodo de fabricación del pedido, así como las fluctuaciones Euro/Dólar [26].

La valoración de las materias primas, material en proceso y productos terminados a precio medio, contribuye a reducir la volatilidad en los costes y por lo tanto a reducir el impacto en márgenes de la fluctuación de precios del níquel. Por otro lado, se mantiene un estricto control de las existencias y se ajustan las producciones a la situación del mercado, de este modo, se palía el riesgo de variación de los precios de las materias primas.

No obstante, las correcciones del níquel en la Bolsa de Metales de Londres (LME), determinan la evolución del consumo aparente en función de las expectativas que genera en los almacenistas y su consecuente realización o acumulación de existencias. El principal riesgo sigue siendo pues, el de la volatilidad del consumo aparente por ser un factor externo a cada organización [26].



Gráfica 5. Variación de los precios del extra de aleación durante los años 2014 y 2015. Acerinox Informe 2014.

El precio de la materia prima está constituido por el material base más el precio del extra de aleación. El metal base es diferente en función de la calidad del acero inoxidable y como se observa en la gráfica 5, el extra de aleación también.

El valor del extra de aleación, varía principalmente en función de la fluctuación de los elementos Mo, Cr, Mn y Ni. Teniendo éste último el doble de importancia que el resto debido a sus continuas fluctuaciones en el mercado y por lo tanto por su dificultad para ser adquirido con respecto al resto de los elemento de aleación [25].

Existen otros factores que pueden influir en el precio final de una partida de este tipo de aceros, factores que influyen en el mercado de cualquier otro producto que se adquiere en grandes cantidades como son: el tipo de cliente (habitual o nuevo) o volúmenes de los pedidos.

A continuación, se muestran precios reales de sólo cuatro de los cinco aceros inoxidables corrugados que se estudian, los cuales fueron vendidos durante el mes de septiembre de 2014. Indicar que ninguno de estos precios son fijos sólo orientativos.

Tabla 1. Precios de barra corrugada en septiembre de 2014. Fuente Acerinox.

Calidad	Nomenclatura americana	Precio (septiembre de 2014) euros / tonelada
1.4482	2001	2.286
1.4362	2304	2.537
1.4462	2205	3.241
1.4301	AISI-304-L	2.300

1.6 Fabricación del acero inoxidable

La fabricación del acero inoxidable está dentro de un ciclo de vida completo de las aleaciones férreas. El primer paso de la fabricación del acero inoxidable es el acopio de la chatarra tanto férrica como inoxidable y distintas ferroaleaciones de diferentes procedencias. Estas aleaciones son 100% reciclable, pudiéndose repetir el proceso de reciclaje una y otra vez para crear nuevos productos de acero en un bucle cerrado del material. Cuando estas aleaciones férreas se reciclan, mantienen sus propiedades inherentes. La propiedad magnética del acero asegura la recuperación fácil y asequible para el reciclaje de casi cualquier tipo de residuos, algunos de ellos incluso siendo previamente descontaminados. Además, el alto valor de la chatarra de acero garantiza la viabilidad económica de reciclaje.

El proceso de fabricación se inicia en la acería, donde se produce el proceso de fusión de las materias primas para obtener palanquillas de acero inoxidable. Para algunos tipos de aceros inoxidables se adicionan elementos como molibdeno, titanio y otros aleantes. Esta materia prima se carga en el horno eléctrico y se crea un arco eléctrico para fundir el material. A continuación, el acero inoxidable fundido se vuelca en la cuchara de trasvase hacia el convertido A.O.D (Argon Oxigen Descarburization).

En el convertidor A.O.D se llevan a cabo los procesos de descarburación y afinado del acero. Por último, en la etapa de colada continua, el acero líquido pasa a estado sólido. Hay una colada continua de palanquilla con 4 cuerdas de sección cuadrada de 200 x 200 mm.

En esta etapa se obtiene la composición química deseada por la que se definirá la calidad del acero inoxidable [28].

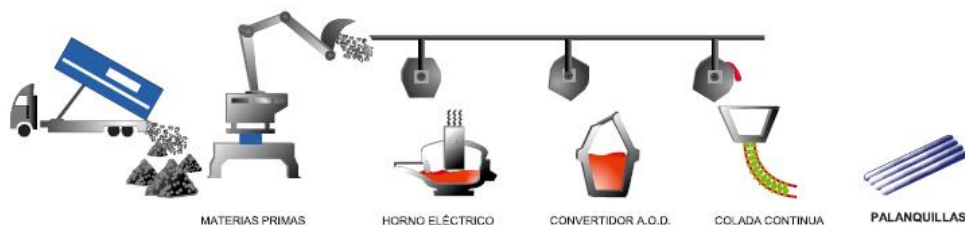


Figura 7. Esquema de la Acería. Roldan, S.A. Esquemas de Producción

Según el diámetro y las características mecánicas requeridas, el material corrugado de acero inoxidable puede ser obtenido mediante laminación en caliente o en frío. La corruga en caliente, se efectúa en la última caja de laminación en caliente, entre 2, 3 o 4 rodillos copian el relieve deseado. Una vez terminada la laminación en caliente el material es decapado por vía mecánica o química, granallado o decapado respectivamente. El corrugado en frío se realiza a partir de alambón decapado. Las corrugas son huellas grabadas por impresión sobre el material [29].

En la laminación en caliente se reduce el espesor o diámetro aprovechando la mayor ductilidad del material a altas temperaturas. La laminación en frío es la etapa en la que se obtiene el espesor o diámetro final y esta reducción se lleva a cabo sin un calentamiento previo.

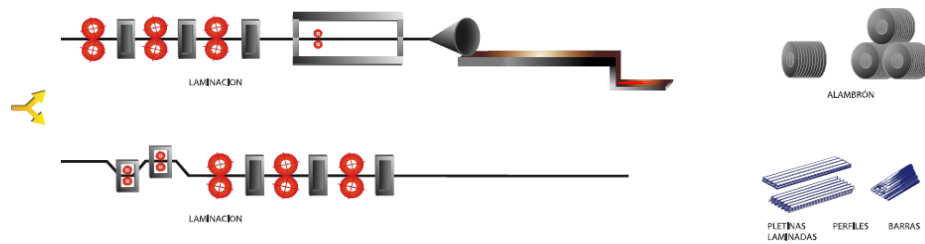


Figura 8. Esquema del laminado en caliente. Roldan, S.A. - Esquemas de Producción

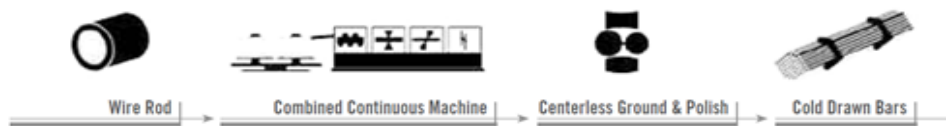


Figura 9. Esquema del laminado en frío. North American Stainless (NAS). Producto largo.

1.7 Corrosión del acero inoxidable

1.7.1 Tipos de corrosión

Existen distintos tipos de corrosión si se atiende a su morfología y a los factores que las desencadenan. Estas son corrosión uniforme, en placas o selectivas, en resquicios, corrosión bajo tensión, por picaduras e intergranular. Los tipos de corrosión que más habitualmente se presentan en los aceros inoxidables son corrosión intergranular y por picaduras, esta última suele predominar en ambientes agresivos donde el ión cloruro es abundante [4].

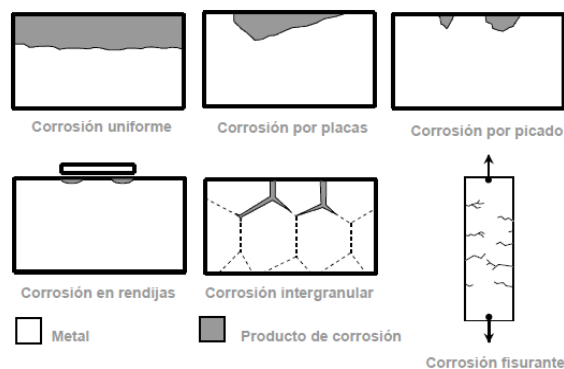


Figura 10. Tipos de corrosión.

1.7.1.1 Corrosión uniforme

Es la forma más benigna en la que se puede presentar la corrosión. El ataque se extiende de forma homogénea sobre toda la superficie metálica, y por lo tanto la penetración media es aproximadamente la misma en todos los puntos. Cuando la

corrosión se presenta de esta forma existe una relación directa entre pérdida de material, reducción de espesor y magnitud o gravedad del fenómeno y por lo tanto es relativamente fácil estimar la vida útil en servicio de los materiales metálicos que lo sufren

1.7.1.2 Corrosión en placas o selectiva

El ataque no se distribuye de forma homogénea, localizándose, por el contrario, en determinadas zonas de la superficie metálica, como se muestra en la figura 10. Uno de los casos más característicos en los que se da esta forma de corrosión es en aleaciones que presentan distintas fases. Estas fases suelen presentar también diferente comportamiento frente a la corrosión en determinados medios agresivos, originándose en ocasiones, el ataque selectivo sobre alguna de ellas permaneciendo inalteradas otras. El ataque en placas puede considerarse un caso intermedio entre la corrosión uniforme y la corrosión por picaduras. En este caso el ataque se extiende más en algunas zonas, pero se presenta aún como ataque general.

1.7.1.3 Corrosión por resquicios

Se presenta en uniones, intersticios, zonas de solape, zonas roscadas y en general en aquellas regiones mal aireadas o en las cuales la renovación del medio corrosivo está condicionada por mecanismos de difusión y es en general difícil. Muy a menudo la corrosión por resquicios se produce por la formación de pilas de aireación diferencial originadas como consecuencia de la presencia de distintas presiones parciales de oxígeno. La formación de producto sólido dificulta, aún más con el tiempo, el acceso de oxígeno y contribuye a favorecer el fenómeno [4].

1.7.1.4 Corrosión bajo tensión

Se conoce también como corrosión fisurante y se produce cuando el acero se encuentra sometido a tensiones, bien sean mecánicas o residuales en combinación con un medio agresivo. Se caracteriza por la aparición de fisuras que se propagan en la dirección de la normal a la aplicación de la tensión. Una vez alcanzado el proceso de incubación se forman fisuras cuya velocidad de propagación puede ser rápida y esta puede ser intergranular (si se propaga a lo largo del límite de grano) o transgranular (si la grieta se propaga a través del grano). La fisura se propaga a través del metal hasta que las tensiones se relajan o el metal se fractura y ello dependerá de las características metalúrgicas del acero.

Cuando la tensión aplicada es cíclica se conoce como “corrosión-fatiga”. En estas condiciones no se requiere de un medio agresivo y el fenómeno se manifiesta de la

misma manera que anteriormente se explica, con la aparición de grietas que pueden originar la rotura del material en poco tiempo. En el mecanismo de este tipo de corrosión participan conjuntamente factores mecánicos y electroquímicos [4].

1.7.1.5 Corrosión por picaduras

Este tipo de ataque, así como el intergranular y el fisurante, son las formas más peligrosas bajo las cuales se puede presentar la corrosión. En estos casos de ataque localizado la cantidad de material corroído no guarda relación con la magnitud de los inconvenientes que puede causar. El ataque se localiza en zonas aisladas de la superficie, afectando a un porcentaje pequeño de esta. Se propaga hacia el interior del metal formando pequeños túneles que avanzan habitualmente con bastante rapidez, ya que, en las zonas afectadas la velocidad de corrosión suele ser alta.

Esta forma de ataque suele ocurrir cuando existen heterogeneidades o la presencia del ión cloruro en la superficie metálica. En general, el fenómeno puede darse en materiales metálicos pasivable debido a que suele iniciarse como consecuencia de la rotura parcial de la capa pasiva. La pérdida de material puede ser pequeña debido a lo reducido de la superficie afectada, pero los inconvenientes que puede causar a menudo son importantes [4].

La teoría de Galvele sobre el mecanismo de las picaduras es la más extendida [30]. En ella se postula que si se tiene una picadura unidimensional, tal como la que se muestra en la figura 11, y que en el fondo de la misma se esté llevando a cabo una reacción de oxidación del metal como la que se muestra en la Eq. 4, además de que en las paredes de la misma no se produzca reacción alguna, dicha reacción ocurre en un medio de una sal de sodio o de potasio de un ácido fuerte no complejante. El pH del seno de la disolución puede tener cualquier valor y es una de las condiciones de contorno del sistema.

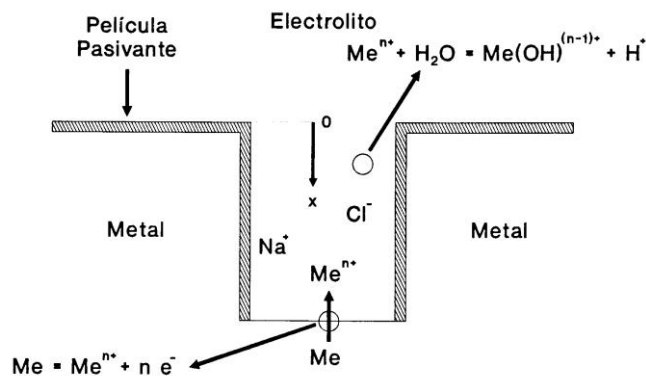


Figura 11. Modelo de picadura unidireccional [30].

El catión procedente de la oxidación del metal, en seguida hidroliza mediante la siguiente ecuación:



De este modo el interior de la picadura se irá acidificando conforme la picadura avance y esto a su vez favorece la velocidad de corrosión dentro de la misma.

Para ciertos metales, se considera que la causa principal del desarrollo de una picadura es la acidificación del medio, sin embargo para los aceros inoxidable, se considera que además de la acidificación se debe producir un proceso de adsorción de iones específicos, como SO_4^{2-} o Cl^- [31].

1.7.1.6 Corrosión intergranular

La corrosión intergranular se define como la disolución preferencial de los límites de grano y regiones próximas. Tienen en común con la corrosión por picaduras que ambas son corrosiones localizadas y que por lo tanto las pérdidas de peso no ofrecen una indicación exclusiva de su peligrosidad. Además, ambas pueden darse sobre materiales pasivos y es precisamente en estos casos, cuando debe ser más temida. Se diferencia de la corrosión por picaduras que esta se debe habitualmente a las heterogeneidades del medio (presencia de cloruros, aireación diferencial...), mientras que la intergranular es una combinación de las heterogeneidades del metal con un medio de ataque adecuado. Tales heterogeneidades, son capaces de crear en ocasiones diferencias de potencial de hasta 100mV, entre el límite de grano y las zonas vecinas. Se admite que la corrosión intergranular es de naturaleza electroquímica, funcionando el límite de grano como regiones anódicas.

Los casos más habituales de corrosión intergranular lo sufren los aceros inoxidable austeníticos, en los cuales el ataque se debe principalmente a: segregación de solutos como el Si, S o el P, o por precipitado de fases ricas en cromo en los límites de grano (carburos o nitruros), con empobrecimiento de las regiones vecinas en este elemento.

En la práctica se lucha contra la corrosión intergranular de varias formas como son; manteniendo el contenido de C de los inoxidable por debajo del 0.02-0.03% para que permanezca en solución sólida, adicionando elementos aleantes estabilizadores como el Ti y el Nb con gran afinidad por el carbono, por lo que se impide la formación de carburos de cromo y por último, mediante tratamientos térmicos de solubilización de carburos a una temperatura cercana a 1050°C, pasando la estructura de la forma del esquema a) en la figura 12, a la forma del esquema c) de la misma figura [32, 33].

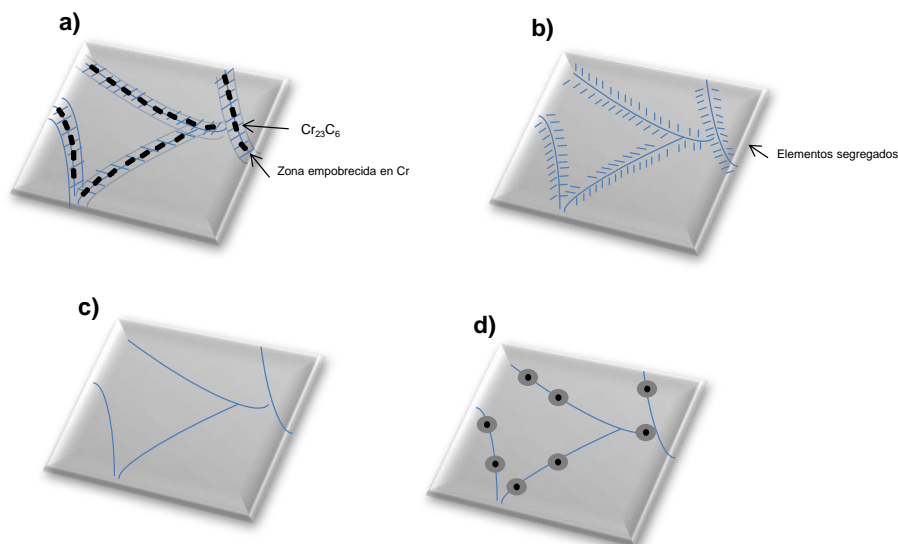


Figura 12. Corrosión intergranular. a) Zona empobrecida en Cr, sensibilización, b) Elementos segregados. Segregación, c) Material de pureza elevada, d) Acero estabilizado.

1.7.2 Composición y tipos

Los aceros inoxidables se clasifican en cinco grandes grupos, según su microestructura predominante:

1.7.2.1 Aceros templados o martensíticos:

Se trata de aceros aleados con estructura austenítica a elevada temperatura y que se transforma a martensita por temple. El contenido en carbono de estos aceros oscila entre 0,15% y 1%, en masa, y su contenido en cromo entre 12% y 18%, en masa. Los contenidos bajos en carbono vienen asociados a bajos contenidos en cromo, debido a que este elemento tiene una fuerte tendencia a estabilizar la austenita a altas temperaturas, por lo que impediría el temple.

Todos los aceros inoxidables martensíticos pueden ser templados y revenidos; de ello dependerá su dureza. Esta puede variar entre los 45 y 60 HRC, según su contenido en carbono.

La resistencia a la corrosión de estos aceros inoxidables está íntimamente relacionada con el contenido en cromo y la microestructura resultante. Los de mayor contenido en carbono son menos resistentes a la corrosión por su tendencia a presentar carburos en su microestructura. En general los inoxidables martensíticos, son los que presentan menor resistencia a la corrosión, respecto a las demás familias de aceros inoxidables [9].

1.7.2.2 Aceros ferríticos:

Este tipo de aceros inoxidable se caracterizan por tener contenidos en cromo que varían entre el 12,5 y el 29% en masa y bajos contenidos en níquel, por debajo del 2% en masa. Su microestructura es completamente ferrítica.

Estos inoxidables son los más asequibles de precio debido a sus bajos contenidos en níquel. Aunque presentan esta ventaja económica, también presentan problemas tecnológicos, a veces importantes como la dificultad de fabricar productos de gran espesor y problemas de soldabilidad. En cambio, presentan una buena resistencia a la corrosión bajo tensión y a la corrosión por picaduras. En medios que contienen cloruros pueden ser una buena alternativa en determinadas situaciones. Los aceros inoxidables ferríticos son magnéticos, dúctiles y resistentes a la corrosión y oxidación a altas temperaturas [9].

1.7.2.3 Aceros inoxidables austeníticos:

Son aceros no magnéticos y susceptibles de endurecimiento por conformado en frío. Su microestructura es austenítica, ya que la presencia estabilizadora de esta fase por parte del níquel está garantizada.

Los aceros inoxidables austeníticos tienen una excelente conformabilidad, muy buena resistencia a la corrosión y son fácilmente soldables.

El tipo AISI 304 es el más utilizado de esta familia de aceros. Tiene una buena resistencia a la corrosión atmosférica y es muy utilizado en industrias como la química, alimentaria y médica. Cuando las exigencias frente a la corrosión por picaduras son mayores, el AISI 316 con un contenido mayor de molibdeno, es netamente superior [9].

1.7.2.4 Aceros inoxidables dúplex:

Como su propio nombre indica estos aceros presentan una microestructura bifásica de austenita y ferrita. Aunque los aceros dúplex tienen una existencia de muchas décadas, es en su segunda generación, con la utilización del nitrógeno como aleante, cuando se han conseguido aceros inoxidables dúplex de gran calidad. Son aceros muy resistentes a la corrosión bajo tensión y a la corrosión por picaduras inducida por la presencia de cloruros.

Estos aceros tienen, además, la ventaja de presentar un elevado límite elástico, que oscila entre 700 y 900 MPa; que es casi el doble que el que presentan los inoxidables austeníticos.

Últimamente, el desarrollo de los aceros dúplex ha dado como resultado aceros con mayores contenidos en cromo, molibdeno y nitrógeno. Esta nueva familia lleva la denominación de aceros inoxidable superdúplex (25% Cr, 7% Ni, 4% Mo, 0.25% N), cuya resistencia a la corrosión por picaduras puede ser equivalente a la de los aceros superausteníticos [9].

1.7.2.5 Aceros inoxidables endurecidos por precipitación:

Son aceros inoxidables cromo-níquel, que contienen otros elementos como cobre, aluminio, nitrógeno y otros estos elementos, después de un recocido de solubilización y temple, o enfriamiento al aire, pueden por revenido (envejecimiento) precipitar compuestos intermetálicos y segundas fases que provocan un fuerte endurecimiento de la matriz.

Las características mecánicas, de resistencia y dureza que se pueden alcanzar con estos aceros, son incluso superiores a las obtenidas con los aceros inoxidables martensíticos; llegándose en muchos casos a los 1480 MPa de resistencia, manteniendo una resistencia a la corrosión más elevada que ellos. Estos aceros inoxidables endurecibles por precipitación pueden ser de varios tipos, según la microestructura de la matriz: martensíticos, semiausteníticos y austeníticos [9].

1.7.2.6 La importancia de los aceros inoxidables austeníticos y dúplex

Hasta el 1930, las tres clases de acero inoxidable fueron los martensíticos, ferríticos y austeníticos. Los grados austeníticos, tales como 18-8, se convirtieron en los más populares por varias razones: su facilidad de producción, fabricación, soldadura y su resistencia a la corrosión en la mayoría de ambientes. Por otra parte, las aleaciones austeníticas eran considerablemente más caras que los grados martensíticos y ferríticos y eran susceptibles a la corrosión intergranular y la fisuración por corrosión bajo tensión [34].

En 1927, Bain y Griffiths en EE. UU, presentan la existencia de la fase "B", y elaboran diagramas de aceros constituidos por aleaciones de hierro-cromo y níquel con el que se describen aleaciones de austenita-ferrita con un 23 a 30% de cromo y con un 1.2 al 9.7% de níquel. Más tarde en Avesta, Suecia, se desarrollan dos aleaciones ferríticoausteníticas con el objetivo principal de reducir el problema de la corrosión intergranular que prevalecía en las aleaciones austeníticas. Se produjo el grado Avesta 453E, que contenía 1.5% de molibdeno. Estas aleaciones tenían aproximadamente el mismo contenido de carbono (0.1%) que los grados austeníticos pero mostraron definitivamente mejorar la resistencia a la corrosión intergranular,

además de presentar una igual o mejor resistencia a la corrosión uniforme que los grados austeníticos [34, 35].

En la actualidad, son aceros ferríticos, austeníticos y dúplex los que se utilizan en mayor medida como acero de refuerzo, aunque se considera que el acero ferrítico es menos resistente a la corrosión que los austeníticos y dúplex [9, 36].

Los aceros de refuerzos austeníticos y dúplex están constituidos por microestructuras diferentes, por ello principalmente presentan diferentes características. Así pues, el grado Avesta 453S, posteriormente llamado AISI 329 y el grado SIS 2324 y ambos los primeros aceros inoxidable austenoferríticos o dúplex, tenían un límite de elasticidad tres veces superior al austenítico tipo 304 y una resistencia a la tracción aproximadamente de 1.4 veces superior.

Dentro de los materiales que presentan una buena resistencia a la corrosión, el acero inoxidable dúplex es el que presenta mayor fortaleza. Así pues, las propiedades mecánicas se mejoran mediante el equilibrio de la estructura a ser aproximadamente la mitad de ferrita y austenita, donde la presencia de la ferrita aporta unas mejoras en las propiedades mecánicas con respecto a los austeníticos. Una gran cantidad de estudios e investigaciones se han desarrollado en los últimos años, todos ellos enfocados en la mejora de este tipo de aceros [34].

1.7.3 Pasivación, despasivación y formación de picaduras en el acero inoxidable

Como se indica en apartados anteriores, el hormigón armado confiere al acero un medio de protección muy alcalina que favorece la formación y el mantenimiento de la capa pasiva y esta a su vez proporciona una alta protección frente a la corrosión. Se considera que la capa pasiva está constituida por una estructura tipo sándwich [37], donde la magnetita (F_3O_2), se intercala entre una capa interna enriquecida en Fe^{2+} , en forma de FeO principalmente y una capa externa enriquecida de Fe^{3+} bien sea en su forma anhidra como (Fe_2O_3) o hidratada en forma de ($FeO(OH)$ ó $Fe(OH)_3$), es decir, que la capa pasiva se basa en la estructura de magnetita, donde la relación Fe^{2+}/Fe^{3+} aumenta desde la interfase capa pasiva/disolución hasta la interfase capa pasiva/metal [36, 38].

El acero inoxidable, además de por la base férrea principal, se constituye de numerosos elementos de aleación que se adicionan en diferentes concentraciones. El cromo es un elemento que en las aleaciones se muestra muy reactivo siendo sin duda el elemento de aleación principal y el que proporcionan esa alta resistencia a la corrosión tan característica de los aceros inoxidables con respecto al acero al carbono común. La reactividad de cromo provoca que no necesite oxígeno para oxidarse [36],

por lo que rápidamente se oxida y se presenta en forma de Cr_2O_3 [39]. Según diversos estudios en la literatura, el óxido de cromo se sitúa en las capas internas de la capa pasiva y las distintas formas en las que constituye el hierro dicha capa, se sitúan en la zona externa de la misma, es decir, en la interfase disolución/capa pasiva [36, 40-43].

Otros autores, estudian la capa pasiva de los aceros inoxidable y muestran que esta está constituida por óxidos de hierro y óxidos de cromo en proporciones que disminuyen el radio Cr/Fe, desde el exterior hacia el interior de la misma y que en función del valor de dicho radio a medida que se profundiza en la capa pasiva, puede llegarse a conocer el espesor de la misma, estableciéndose en un valor aproximado a 5nm, para algunos aceros inoxidable [44].

Cuando la capa pasiva está constituida por elementos que pueden oxidarse a una valencia mayor y dar productos solubles, se muestra un aumento de corriente acompañado por la disolución del metal. Este fenómeno se conoce como transpasividad, y lo presentan elementos tales como el cromo o el manganeso, así como las aleaciones de que forman parte.

El óxido de cromo, es insoluble y sólo se transforma en una especie más soluble, cuando la capa pasiva sufre la aplicación de un elevado potencial donde el cromo pasaría de Cr^{3+} a Cr^{6+} [39], mediante la siguiente reacción:



Es cuando se produce el fenómeno de la transpasividad y la rotura de la capa pasiva.

A pesar de la sospecha de que el cromo pueda formar en algún caso, sales más solubles que el Cr_2O_3 con los cloruros [36]. Sin embargo, existen estudios en la literatura que concluyen con que el cloruro se mantiene en la superficie de la capa pasiva sin atravesarla [43].

Dentro del proceso de formación de una picadura existe una clara separación entre un primer paso constituido por la rotura de la pasividad seguido de la iniciación de la picadura y un segundo paso donde se desarrolla el proceso de propagación de la picadura en términos de Galvele [45].

Los dos primeros procesos son los más diversos y a su vez los menos comprendidos. Fue Burstein el que recientemente argumenta sobre el estado de la pasividad y su continuo proceso de rotura/reparación. En estas condiciones y utilizando la acidificación localizada como criterio, la probabilidad de las picaduras estables es sólo una cuestión de lo bueno que es el proceso de reparación [46].

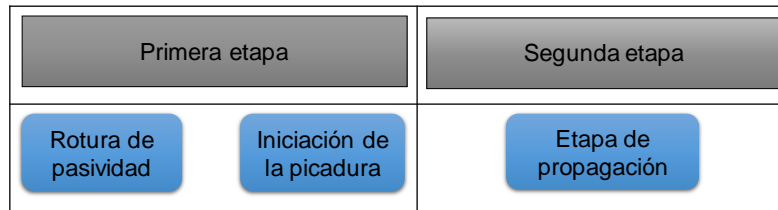


Figura 13. Etapas diferenciadoras entre formación y evolución de la picadura.

La dificultad para predecir y comprender especialmente la primera etapa radica en que se relacionan con procesos muy dinámicos en la naturaleza y que suceden a escala nano. Además, las picaduras son procesos estocásticos que se determinan por un conjunto de procesos predecibles y otros que son completamente aleatorios.

La pérdida de pasividad que conduce a una corrosión localizada o picaduras en los metales pasivos es el resultado de una gran variedad de mecanismos diferentes [47].

Tres mecanismos principales son discutidos por la mayoría de los autores [48]: el mecanismo de penetración, el mecanismo de rotura de la película y el mecanismo de adsorción.

El mecanismo de penetración implica la transferencia de aniones a través de la película de óxido sobre la superficie metálica, en la que comienza su acción específica. Dicho mecanismo se discutió por primera vez por Hoar et al. [49] donde los iones agresivos penetraban la capa de óxido bajo la influencia de un campo eléctrico elevado (10^6 V/cm⁻¹), a continuación, se absorben sobre la capa superficial. Los iones cloruros se muestran más agresivos que los bromuros o ioduros debido a su menor diámetro y posteriormente tienen la capacidad de penetrar la capa de óxidos con mayor facilidad.

La capa pasiva puede romperse por la formación de vacantes que se describe en el considerado "Point defect models" (PDM) [50]. En dicho modelo se describe la generación de vacantes catiónicas que mediante electroemigración se dirigen hacia el metal donde se produce la neutralización de estas debido a la inyección oxidativa de un catión del metal a la capa pasiva. Sin embargo, cuando las velocidades de neutralización de las vacantes catiónicas son menores que el flujo de vacantes que llegan del metal, se produce una acumulación de vacantes catiónicas en la interfase metal-capas pasiva, causando el colapso de la capa pasiva [51].

Evans [52], propuso un modelo similar con iones cloruros que permean a través de la capa de óxido y donde la ruptura de la capa de óxido ocurre una vez que el cloruro alcanza el metal base. Este modelo considera la adsorción de iones cloruros en la capa pasiva protectora como primer paso hacia la ruptura de la pasividad. La naturaleza localizada de las picaduras se explica por una mayor facilidad de penetración en las imperfecciones de la capa pasiva: a) Mecanismo de penetración y

diagrama de fases de una capa pasiva relacionado con procesos de transferencia de iones y electrones dentro de la capa y en los límites de fase. b) Mecanismo de rotura mecánica de la capa y procesos relacionados que compiten. c) Mecanismo de adsorción con el aumento de la transferencia local de los iones metálicos y la densidad de corriente de corrosión i_c relacionada, causada por los complejos de aniones agresivos que provocan un adelgazamiento de la capa pasiva y el aumento de la intensidad de campo y de la densidad de corriente de corrosión libre $i_{c,h}$ final, dentro de la picadura.

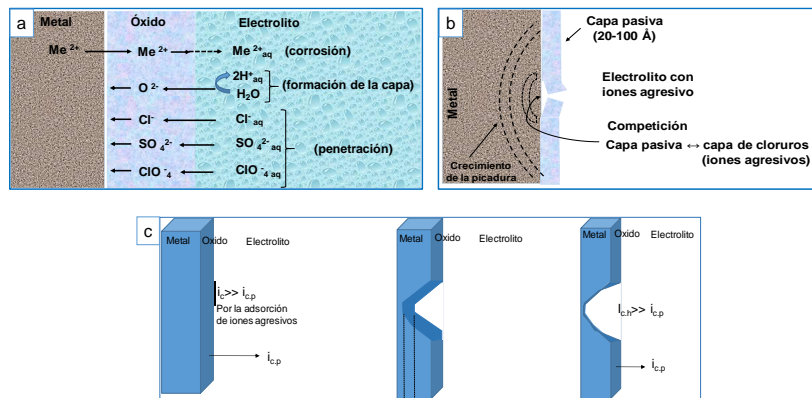


Figura 14. a) Mecanismo de penetración, b) mecanismo de ruptura y c) mecanismo de adsorción [48].

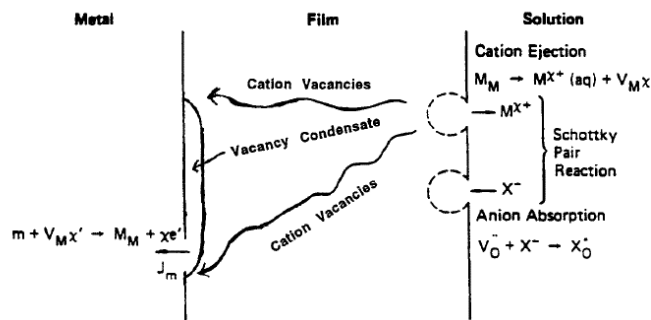


Figura 15. Procesos que conducen a la descomposición de la capa pasiva según el modelo PDM [50].

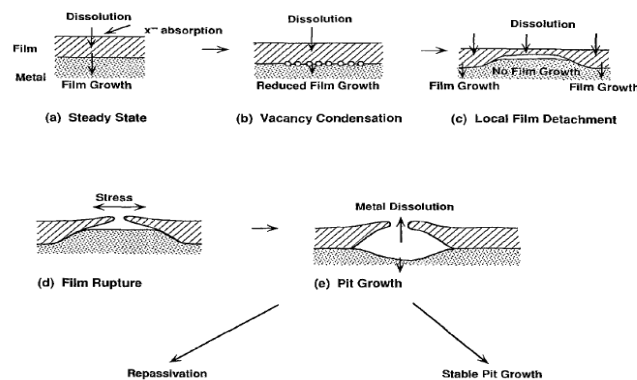


Figura 16. Esquema que describe las etapas de la nucleación de la picadura según el PDM [50].

En ocasiones ocurre que algunas picaduras paralizan su crecimiento debido a un gran número de causas. Es en estos, casos cuando nos referimos a picaduras metaestables, las cuales se inician y crecen por un periodo limitado de tiempo antes de que ocurra la repasivación. Se consideran metaestables a aquellas picaduras que no llegan a superar el tamaño de unas micras y que tienen un tiempo de vida de unos segundos o menos. Las picaduras metaestables pueden desarrollarse bien a un potencial muy por debajo del potencial de picaduras, el cual está relacionado con el potencial a partir del cual se desarrollan las picaduras estables, o bien justo durante el tiempo de inducción, por debajo pero muy próximo al potencial de picadura, junto a la formación de la picadura estable. Cuando una picadura estable se está formando su comportamiento inicial es exactamente igual al de una metaestable, sólo que en estas el proceso de metaestable se traspasa y continúan creciendo sin ser repasivadas [47]. Cuando el proceso de formación de picaduras se estudia mediante un estudio potenciodinámico y con la representación de la densidad de corriente con respecto al tiempo, la formación de una picadura metaestable se muestra prácticamente constante y es justo cuando esta sufre la repasivación, cuando la densidad de corriente aumenta bruscamente, justo cuando se pasa de la ruptura local de la capa pasiva a la formación de una capa de sal que cubre la zona afectada e impide el crecimiento de la misma.

1.7.4 Influencia de los elementos de aleación

Los aceros inoxidable son aleaciones férreas, constituidas por Fe y una proporción no superior al 1.2% de C, a las cuales se le adiciona un gran número de elementos de aleación, entre los que destacan el cromo (Cr), níquel (Ni), molibdeno (Mo), manganeso (Mn), nitrógeno (N), carbón (C) y wolframio (W). Las concentraciones de cada uno de ellos determinan el desarrollo de las diferentes microestructuras y como consecuencia presentan diferentes respuestas frente al fenómeno de la corrosión.

A continuación se muestra una breve descripción de dichas propiedades, relacionadas con los distintos elementos [9, 15, 36, 53-58]:

- El cromo (Cr):

El cromo es el más importante de los elementos de aleación y estabiliza la formación de la microestructura ferrítica en detrimento de la austenítica. Es el principal responsable de la alta resistencia a la corrosión. Todos los aceros inoxidable, poseen al menos un contenido de 10.5% en peso de Cr, aunque es a partir de un 12% cuando en la superficie de la aleación se desarrolla una capa pasiva más resistente a la corrosión la cual se constituye por dos capas, una de ellas más interna y constituida por cromo en forma de diferentes compuestos como: CrOOH, CrO₄²⁻ o Cr₂O₃ y cuyas

concentraciones se verán influidas por las diversas condiciones del medio y por otro lado una capa más externa constituida por Fe y Cr en forma de diversos óxidos e hidróxidos hidratados. Además, la inclusión de cromo a las coladas incrementa la resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

- El níquel (Ni):

Es un elemento ilimitadamente soluble en la austenita y también es soluble en la ferrita, independientemente del contenido en carbono. La principal razón por la que se añade níquel es que es un elemento que promueve la formación de la microestructura austenítica. El níquel aumenta la resistencia mecánica, el límite elástico, la templabilidad y la resistencia a la corrosión electroquímica. Así mismo, evita el crecimiento de grano en los tratamientos térmicos, mejorando así la tenacidad.

- El Molibdeno (Mo):

La adición de molibdeno incrementa significativamente la resistencia a la corrosión tanto uniforme como localizada. Este tiende a aumentar la resistencia mecánica y promueve fuertemente la microestructura ferrítica, sin embargo, este efecto debe ser compensado con una reducción en el contenido de cromo y un incremento en el contenido en níquel. Desafortunadamente un alto contenido en molibdeno promueve la formación de la fase sigma tanto en austeníticos como en ferríticos por lo que el contenido suele estar restringido a una cantidad menor al 3.5%.

Además, este elemento puede aumentar el riesgo de la formación de fases secundarias en los aceros inoxidable ferríticos, austeníticos y dúplex. En aceros martensíticos, este elemento incrementará la dureza a altas temperaturas de revenido debido a sus efectos sobre la precipitación de carburos.

- El Manganeseo (Mn):

Cuando el porcentaje es superior al 11% estabiliza la austenita al tiempo que aumenta su resistencia mecánica y al desgaste sin que por ello se pierda ductilidad. Sin embargo, la estabilización de la austenita va a estar condicionada por la concentración del elemento Ni. El manganeso puede ser utilizado para disminuir la concentración de Ni en aceros inoxidable austeníticos. Aunque el Mn sea utilizado para mejorar la resistencia a la corrosión, tiene una tendencia a formar inclusiones de sulfuro de manganeso MnS, las cuales pueden participar en el inicio de la ruptura de la capa pasiva.

- El nitrógeno (N):

El nitrógeno es un fuerte estabilizador de la austenita e incrementa las propiedades mecánicas. Participa en el aumento de la resistencia a la corrosión localizada y especialmente cuando este se combina con molibdeno. En aceros ferríticos, el nitrógeno disminuye considerablemente la tenacidad y la resistencia a la corrosión, sin embargo, en aceros martensíticos incrementa la dureza y resistencia, pero disminuye la tenacidad.

- El carbono (C):

El carbono incrementa la dureza mecánica y es un fuerte estabilizador de la estructura austenítica. Sin embargo, este disminuye la resistencia a la corrosión intergranular debido a la formación de carburos que resultan un problema en las edades tempranas del acero inoxidable. Las nuevas aleaciones presentan un contenido muy bajo en carbono, causa principal por la que no es habitual que sufran corrosión intergranular. La presencia de carbono en los aceros inoxidables ferríticos, reduce fuertemente la tenacidad y la resistencia a la corrosión. En aceros martensíticos aumenta la dureza y resistencia, pero disminuye la tenacidad.

- El wolframio (W):

El wolframio aparece como impureza en la mayoría de las aleaciones, a pesar de ello, es utilizado para mejorar la resistencia a la corrosión por picaduras en determinados aceros.

- El azufre (S):

El azufre es añadido para mejorar la trabajabilidad de ciertos aceros inoxidables, a la vez que reduce ligeramente la resistencia a la corrosión, ductilidad, soldabilidad y conformabilidad.

- El titanio (Ti) y el niobio (Nb):

Presentan una disolución parcial en la ferrita. Además, tienen una gran tendencia a formar carburos y a combinarse con el nitrógeno. Una de sus utilidades es conseguir la afinación del grano. En algunos aceros inoxidables actúan como estabilizadores de los carburos evitando la corrosión intercrystalina, no obstante para que esto ocurra, el contenido en titanio y niobio debe ser al menos cuatro veces mayor al de carbono.

Los diagramas de Schaeffler, son diagramas desarrollados a partir de los diagramas de Maurer, el cual presenta las estructuras que va a presentar los aceros constituidos por Cr-Ni en función de los porcentajes de cada uno presentes en la aleación. Fue Antón Scheaffler el que introdujo en dichos diagramas de Maurer la influencia de distintos elementos de aleación en la formación de ferrita y austenita. Para ello se definieron dos nuevos conceptos: cromo equivalente y níquel equivalente. El cromo equivalente incorpora elementos que inducen la formación de ferrita, es decir, elementos denominados alfégenos y el níquel equivalente incorpora elementos que induce la formación de la austenita, es decir, elemento denominados gammagenos. Así mismo, cada uno de estos elementos se multiplica por un factor que depende de su grado de influencia en la formación de la ferrita y de la austenita respectivamente.

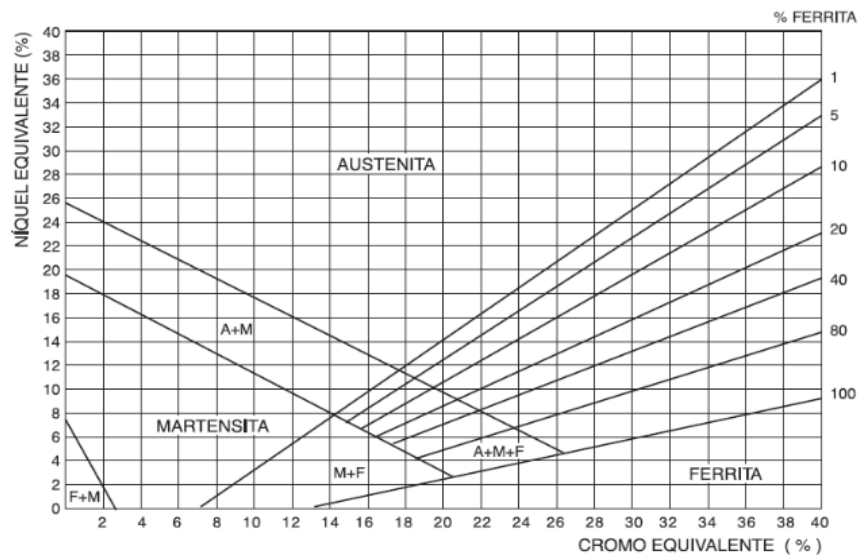


Figura 17. Diagrama de Schaeffler.

Donde se define cromo equivalente y níquel equivalente como:

- Cromo equivalente: $\%Cr + \%Mo + (1,5 * \%Si) + (0,5 * \%Nb)$.
- Níquel Equivalente: $\%Ni + (30 * \%C) + (0,5 * \%Mn)$.

1.7.5 Índice PREN

La resistencia a la corrosión, de aceros de refuerzos está muy relacionada con la resistencia a la corrosión por picaduras en ambientes con presencia de cloruros. Esta resistencia depende en gran medida de la concentración de los elementos aleantes, como el cromo, molibdeno y el nitrógeno. Mientras que el cromo es el elemento

principal, el molibdeno y el nitrógeno están más relacionados con la resistencia a la corrosión localizada [59].

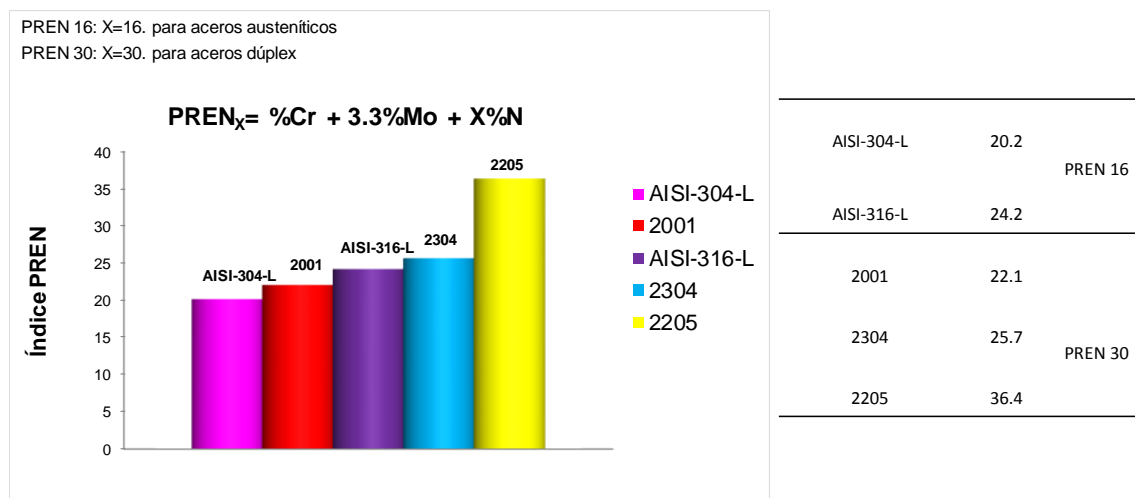
La expresión del índice PREN “Pitting Resistance Equivalent Number” surge con el objetivo de comparar distintas calidades de acero inoxidable, con diferentes concentraciones de los distintos elementos de la aleación. El PREN, es frecuentemente utilizado para cuantificar la resistencia a la corrosión por picaduras.

El uso temprano del PREN se remonta a la década de 1960. A partir de la cual se han realizado numerosos estudios sobre el mismo y se han ido incluyendo diferentes fórmulas empíricas del mismo [36, 60-70]. Fue Merello y col. [60], que encuentran una relación exponencial entre el potencial de picadura de un acero inoxidable dúplex bajo en Ni y alto en Mn-N y el PREN₁₆, a pesar de ello otros autores [61] encuentra una relación lineal entre el potencial de picaduras de numerosas calidades de aceros inoxidables y su PREN₁₆. La fórmula más ampliamente utilizada es la siguiente [68, 69]:

$$PREN_x = \%Cr + 3.3\%Mo + X\%N$$

Donde X puede ser 16, más utilizado para los aceros inoxidables austenítico y 30, utilizado habitualmente para los acero inoxidables dúplex, debido a que el molibdeno y el nitrógeno por separado y también por su acción conjunta, son los aleantes que más contribuyen a esa resistencia [36].

A continuación, se muestra en la siguiente tabla los índices PREN correspondientes a las cinco calidades de estudio.



Gráfica 6. Índice PREN de las cinco calidades de aceros inoxidables que se estudian

1.8 Antecedentes, Justificación e hipótesis

1.8.1 Antecedentes y justificación

A pesar de que el acero inoxidable comienza a utilizarse a mediados del siglo XIX, es aproximadamente hace unos 80 años cuando se introduce en el mundo de la construcción mediante elementos estructurales que proporcionaban fortaleza y estética. Sin embargo, el acero inoxidable es utilizado de forma parcial y por primera vez en el hormigón armado entre los años 1937 y 1940, en la construcción del muelle de Puerto Progreso en el estado mexicano de Yucatán ubicado en las costas del Golfo de México [71, 72]. No se conocen otros usos significativos de armaduras de aceros inoxidables hasta pasados unos 40 años cuando, en 1984, el Departamento de Transporte de Michigan utilizó refuerzos de acero inoxidable en un puente del norte de Detroit. Es en la década de los 90 cuando comienza a aumentar su uso en distintos lugares: la restauración del Sydney Opera House, en algunos puentes de Norteamérica en Oregón y New Jersey, en Ontario, Canadá y en un puerto situado en los Emiratos Árabes Unidos. A partir de este momento, comienza a aumentar de forma gradual el uso del acero inoxidable como acero de refuerzo.

En la actualidad, algunas líneas de investigación se centran en obtener estructuras con una durabilidad mínima de 100 años sin necesidad de ser reparadas. El estudio de esta consecución se basa, por un lado, en el diseño de distintos hormigones menos porosos y con una fuerte resistencia a la entrada de agresivos y por otro lado, el desarrollo de aleaciones cada vez más resistentes a la corrosión que no necesiten reparación o sustitución futura. Numerosos trabajos de investigación se desarrollan en torno a esta última cuestión, avanzando en el estudio de los que, hasta el momento, demuestran ser una de las mejores aleaciones metálicas frente a la resistencia a la corrosión por cloruros dentro y fuera del hormigón. Sin embargo mucho de estos estudios no se realizan directamente sobre muestras en forma de barras de acero corrugado, sino que gran parte de ellos se realizan sobre muestras del acero inoxidable, reducidas a pequeñas dimensiones, en forma de placas, embutidas en resinas y en general con superficies planas poco rugosas y habitualmente pulidas [40, 41, 43, 54, 73-88]. Se piensa que dichas adaptaciones de las muestras a determinados sistemas de medidas pueden generar resultados diferentes a los resultados que se obtendrían sobre barras con elevada rugosidad y corrugas. A pesar de ello, el número de investigadores que estudian directamente sobre las barras corrugadas es cada vez más elevado [5, 51, 72, 89-101] siendo este trabajo de investigación una continuación de los estudios en este sentido. Surge por tanto la

necesidad de estudiar la evolución de los aceros inoxidable corrugados y frente a la corrosión por cloruros, en condiciones experimentales reales y resulta de interés, la comparación de los resultados obtenidos en medidas de campo con la experimentación clásica realizada en un laboratorio.

Por otro lado, se diferencian distintas calidades de aceros inoxidable donde los de microestructura dúplex parecen presentar mejores propiedades mecánicas y alta resistencia a la corrosión intergranular y por picaduras con respecto a los de microestructura austenítica aunque con un mayor coste [13]. Esta propiedad de los dúplex provoca que las recientes investigaciones se centren en el desarrollo de diferentes calidades de dúplex con contenidos menores en los elementos de aleación que presentan una gran fluctuación en los mercados, como son el níquel y el molibdeno. Paralelamente a estos nuevos desarrollos, los aceros inoxidable austeníticos clásicos, se siguen comercializando como aceros de refuerzo. Este tipo de aceros son amagnéticos y esta propiedad resulta de gran interés en determinadas estructuras. Actualmente, los aceros austeníticos más utilizados como acero de refuerzo son el austenítico clásico AISI 304-L, ampliamente introducido en el mercado y el AISI-316-L, con un muy alto contenido en molibdeno y en cromo y cuyas excelentes propiedades frente a la corrosión por cloruros son ampliamente conocidas. Ante este panorama actual que ofrece una gran variedad de aceros inoxidable y frente al elevado coste que supone una estructura cuyo hormigón armado este constituido de acero inoxidable, surge la necesidad de estudiar y comparar aquellas calidades que se encuentran más introducidas en el mercado como acero de refuerzo. Fruto de esta necesidad, surge un proyecto denominado IISIS y cuyas siglas significan: Investigación Integrada de Islas Sostenibles. En este proyecto se desarrolla un nuevo sistema basado en componentes constructivos prefabricados, para el diseño arquitectónico de construcciones industrializadas de elementos habitables, autosuficientes energéticamente, adaptados para su implantación en diferentes condiciones climáticas, flexibles y versátiles a lo largo de su vida útil para permitir diversos usos e implantaciones, montables y desmontables fácilmente, y adaptados al medio marino. Es en este último punto y dentro del marco de este proyecto, donde se desarrolla este trabajo de investigación.

1.8.2 Hipótesis

La hipótesis de trabajo se formula como:

“La selección más óptima de un acero inoxidable de refuerzo para una estructura determinada, discerniendo entre austenítico y dúplex, depende de la agresividad del medio al que se exponga, de las características de la futura estructura y del precio de los aleantes principales que constituyen los materiales en el momento de la construcción”

CAPÍTULO 2.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo principal es:

- Conocer cuál es el comportamiento de los diferentes grados de aceros inoxidables como armaduras de refuerzo cuando se encuentran en estructuras de hormigón sometidas a la acción de los iones cloruro.

Los objetivos secundarios son:

- Estudiar el comportamiento de los aceros inoxidables de refuerzo frente a ensayos de corrosión en disolución, probetas de mortero en laboratorio y grandes bloques de hormigón situados en el mar.
- Estudiar la susceptibilidad a la corrosión por cloruros, su capacidad de repasivación en los distintos ambientes de pH y la pérdida de material que experimentan frente a ensayos acelerados de corrosión.
- Obtener un límite crítico de cloruros de cada una de las calidades.
- Cálculo de la vida útil de una estructura situada en un ambiente marino.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

3.1 Materiales. Análisis químico y microestructural

Se estudian cinco calidades de acero inoxidable en forma de barra corrugada que han sido laminadas en frío y de 12 mm de diámetro. Las distintas calidades de estudio son dos austeníticas y tres dúplex y se muestran en la siguiente tabla 2.

Tabla 2. Nomenclaturas y calidades de acero inoxidable.

Calidad del acero inoxidable		Diámetro (mm)	Laminación
Acero inoxidable austenítico	EN 1.4307 (AISI 304L)	12	Frío
	EN 1.4404 (AISI 316L)	12	Frío
Acero inoxidable dúplex	EN 1.4482 (2001)	12	Frío
	EN 1.4362 (2304)	12	Frío
	EN 1.4462 (2205)	12	Frío

Sus composiciones químicas elementales se muestran en las tablas 3.a) y b).

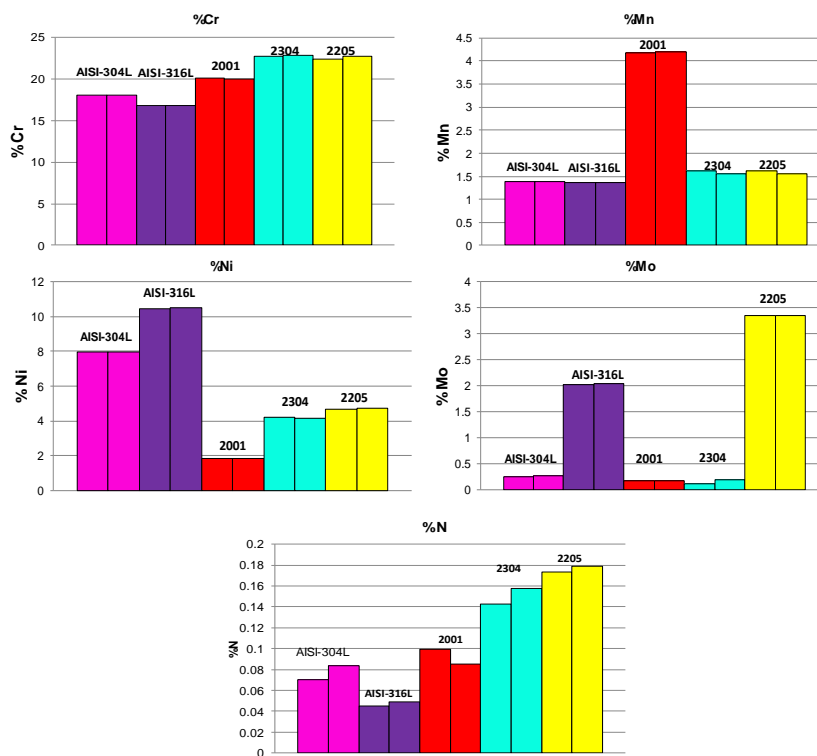
Tabla 3 a. Composición química elemental, en % en masa, de las barras corrugadas de acero inoxidable, de 12 mm de diámetro. Elementos; C, Si, Mn, Cr, Ni, Mo, P, S y N.

Calidad	EN	Colada	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	N
AISI 304-L	1.4307	A4PK	0.028	0.308	1.376	18.099	7.978	0.243	0.033	0.034	0.07
		AGTM	0.022	0.32	1.375	18.074	7.955	0.269	0.035	0.033	0.084
AISI 316L	1.4404	A4JL	0.020	0.291	1.363	16.797	10.481	2.025	0.035	0.03	0.045
		A4JR	0.015	0.307	1.366	16.775	10.536	2.033	0.029	0.036	0.049
2001	1.4482	A4RT	0.018	0.687	4.175	20.124	1.815	0.166	0.029	0.0009	0.099
		A6JR	0.018	0.657	4.205	20.024	1.81	0.164	0.03	0.0006	0.085
2304	1.4362	AGTW	0.016	0.647	1.609	22.730	4.226	0.107	0.034	0.0008	0.143
		A3TK	0.029	0.636	1.556	22.843	4.156	0.194	0.031	0.0014	0.158
2205	1.4462	A1EC	0.032	0.395	1.616	22.408	4.695	3.341	0.03	0.002	0.173
		Z3C2	0.021	0.487	1.558	22.722	4.741	3.348	0.03	0.0031	0.179

Tabla 3. b. Composición química elemental, en % en masa, de las barras corrugadas de acero inoxidable de las barras de 12 mm de diámetro. Elementos; Sn, Cu, Ti, Al, As, Co, Nb y V.

Calidad	EN	Colada	Sn	Cu	Ti	Al	As	Co	Nb	V
AISI 304-L	1.4307	A4PK	0.011	0.305	0.005	0.008	0.028	0.172	0.006	0.067
		AGTM	0.012	0.288	0.005	0.008	0.009	0.157	0.006	0.088
AISI 316-L	1.4404	A4JL	0.005	0.28	0.007	0.008	0.009	0.143	0.048	0.060
		A4JR	0.003	0.157	0.006	0.008	0.017	0.109	0.006	0.057
2001	1.4482	A4RT	0.009	0.066	0.028	0.010	0.005	0.020	0.009	0.070
		A6JR	0.01	0.065	0.031	0.010	0.007	0.022	0.011	0.106
2304	1.4362	AGTW	0.011	0.288	0.024	0.009	0.006	0.060	0.004	0.122
		A3TK	0.011	0.294	0.026	0.010	0.007	0.048	0.015	0.141
2205	1.4462	A1EC	0.003	0.098	0.026	0.009	0.011	0.039	0.013	0.115
		Z3C2	0.001	0.139	0.048	0.009	0.012	0.137	0.016	0.124

A continuación, se representan mediante barras las proporciones de los principales elementos de aleación por separados y se comparan entre las distintas calidades que se estudian.



Gráfica 7. Representación gráfica del porcentaje de elementos aleantes principales; Cr, Mn, Ni, Mo, y N.

Las siguientes tablas, muestran la caracterización microestructural de los distintos tipos de aceros inoxidable de diferente calidad y coladas. En ellas, se informa también del tamaño de grano (GS), para los aceros inoxidable austeníticos, con granos de austenita maclados y la relación de fases (α/γ) para los aceros inoxidable dúplex los cuales presentan una estructura típica con granos de ferrita y austenita.

Tabla 4. Metalografía de aceros inoxidable austeníticos de 12 mm de diámetro. Laboratorio técnico de Acerinox Europa.

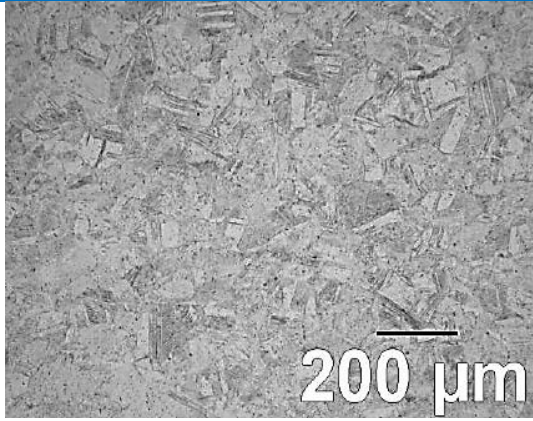
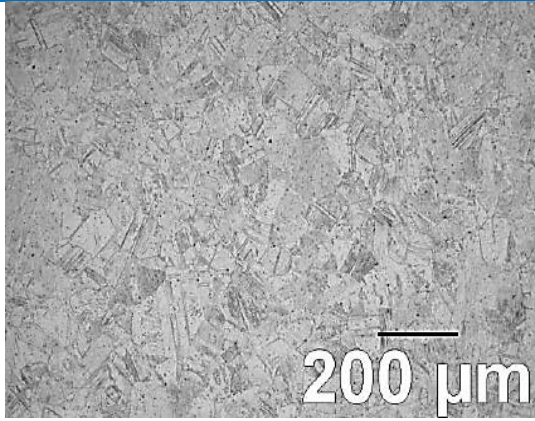
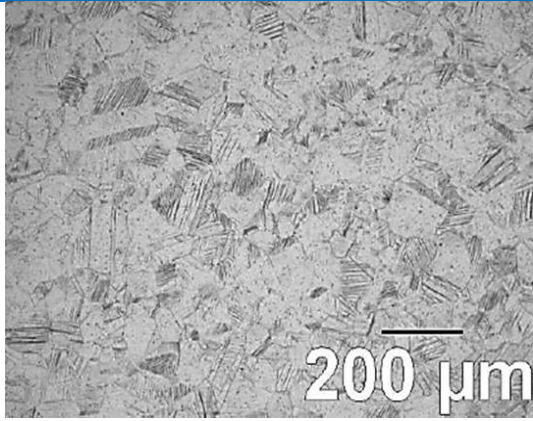
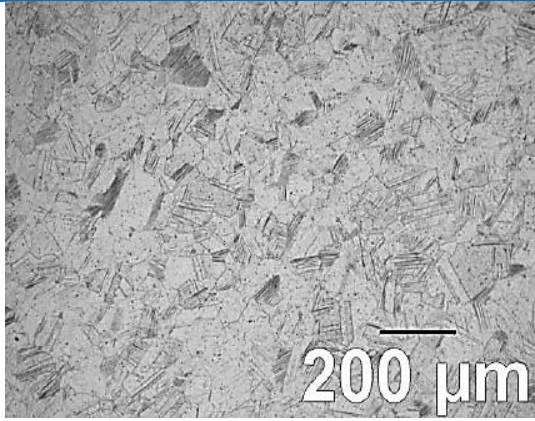
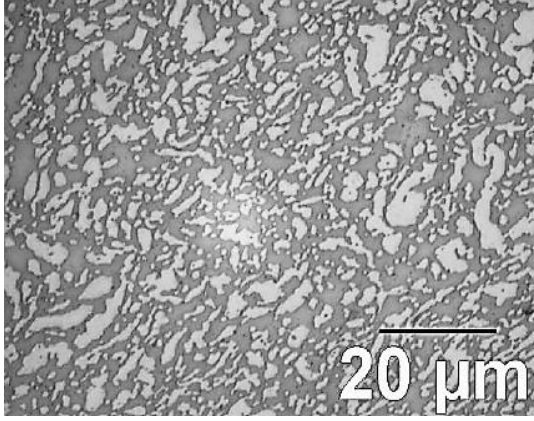
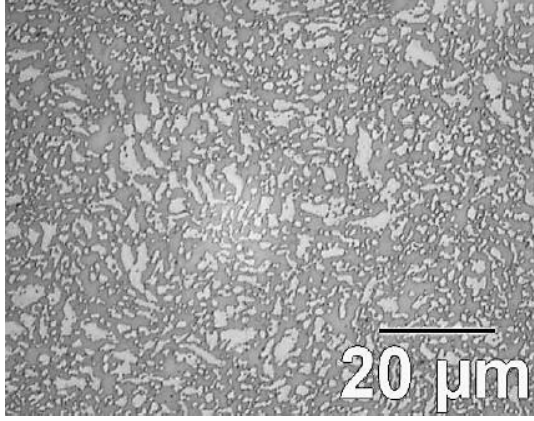
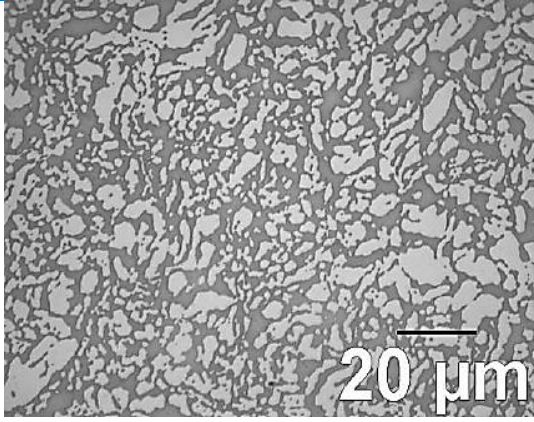
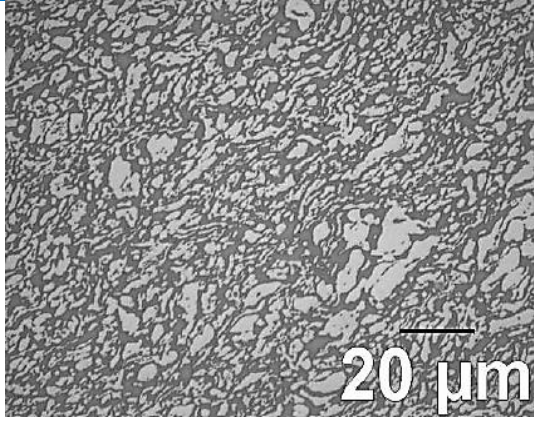
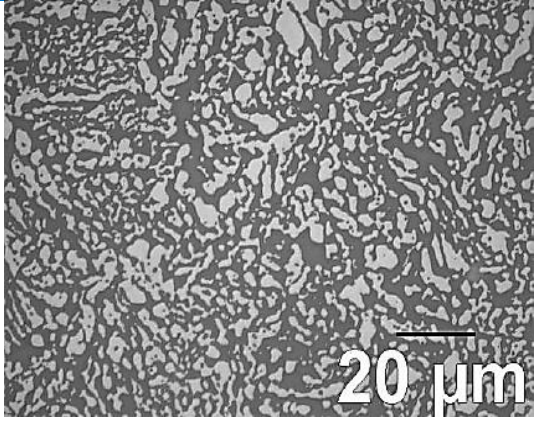
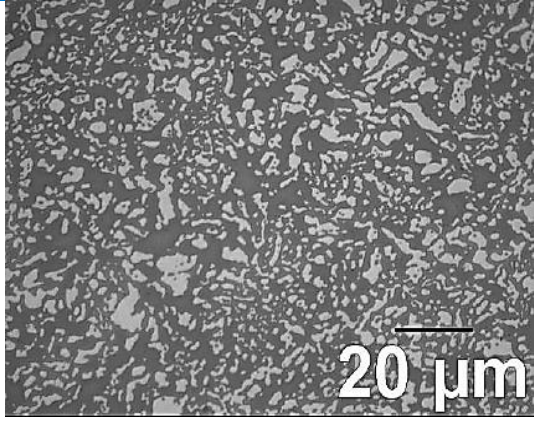
EN 1.4307 (AISI-304-L) 12 mm de diámetro .Metalografía x 100 aumentos	
Colada: A4PK GS= 4.3	Colada: AGTM GS= 4.3
	
EN 1.4404 (AISI-316-L) 12 mm de diámetro Metalografía x 100 aumentos	
Colada: A4JL GS= 5.2	Colada: A4JR GS= 5.2
	

Tabla 5. Metalografía de aceros inoxidables dúplex de 12 mm de diámetro. Laboratorio técnico de Acerinox Europa.

EN 1.4482 (2001) 12 mm de diámetro. Metalografía x 1500 aumentos	
Colada: A4JL $\alpha/\gamma=64.31/35.69$	Colada: A4JR $\alpha/\gamma=69.26/30.64$
	
EN 1.4362 (2304) 12 mm de diámetro Metalografía x 1000 aumentos	
Colada: AGTW $\alpha/\gamma=54.42/45.58$	Colada: A3TK $\alpha/\gamma=57.20/42.80$
	
EN 1.4462 (2205) 12 mm de diámetro Metalografía x 1000 aumentos	
Colada: A1EC $\alpha/\gamma=58.88/41.12$	Colada: Z3C2 $\alpha/\gamma=66.96/33.04$
	

3.2 Diagrama de procesos experimentales

A continuación, se muestra un diagrama de procesos donde se pretenden esquematizar todos los pasos experimentales que se han llevado a cabo en el desarrollo de la investigación. Así pues, estos se dividen en tres grandes grupos. Un primer grupo se constituye de ensayos en disolución, los cuales aparecen en color azul en el diagrama de procesos. Dentro de estos, se estudian disoluciones con un pH dentro del intervalo [6-8] y cuyos resultados se muestran en color rosa en dicho diagrama y a lo largo del documento. El otro intervalo que se estudia es el de pH [12-13], cuyos resultados se muestran en color azul para facilitar la localización de los resultados al lector.

Un segundo grupo de ensayos se realiza sobre probetas de mortero, expuestos en color gris claro en el diagrama. Finalmente, un tercer grupo que se engloba en una experimentación en grandes bloques de hormigón situados en una zona de carrera de mareas en el mar en un color gris más oscuro.

Además, se indican qué tipo de técnica electroquímica se aplica a cada uno de ellos y si es un ensayo destructivo o si por el contrario se mide a lo largo del tiempo permitiendo que los procesos se produzcan en tiempo real.

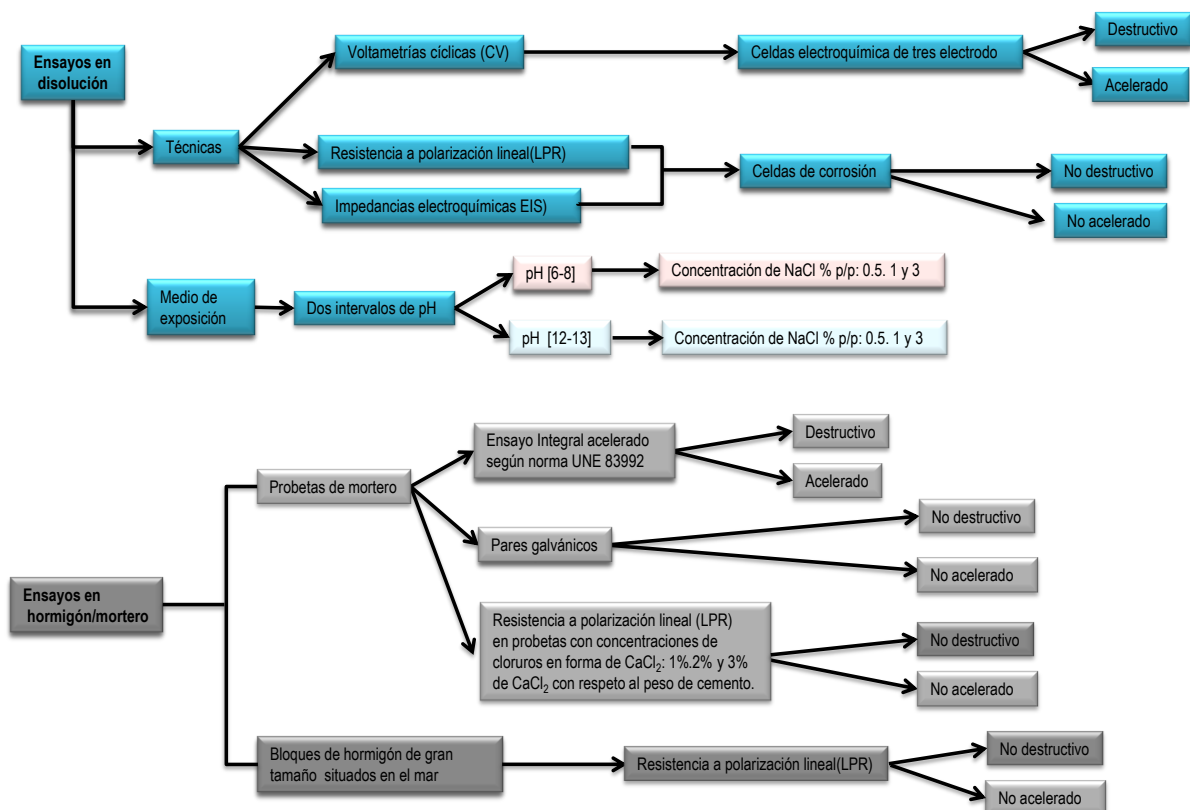


Figura 18. Diagrama de procesos de los ensayos experimentales que se han realizado.

3.3 Técnicas electroquímicas

La gran mayoría de los procesos de corrosión que ocurren a temperatura ambiente o moderada corresponden a procesos de corrosión electroquímica, donde transcurre un mecanismo electroquímico que consta, al menos de dos reacciones parciales, una anódica de oxidación y una catódica de reducción (ecuaciones 4, 5 y 6).

Habitualmente, los equilibrios de las ecuaciones 4 y 5 se suelen encontrar desplazados hacia la derecha en los procesos de corrosión. Cuando no existen perturbaciones externas la materia se corroe a su potencial de corrosión libre E_{corr} , existiendo una estricta equivalencia entre los procesos anódicos y catódicos parciales y se cumple que:

$$I_t = I_a + I_c = 0 \quad \text{Eq. 14}$$

$$I_a = -I_c = I_{\text{corr}} \quad \text{Eq. 15}$$

Donde la I_t es la intensidad total o externa, la I_a es la intensidad de la semirreacción anódica e I_c es la catódica.

La corrosión sucede gracias a la formación y movimiento de partículas con carga eléctrica y a los procesos parciales anódicos y catódicos que le corresponde una intensidad proporcional a la velocidad del fenómeno. Esta situación favorece que sea posible estimar la velocidad de corrosión midiendo magnitudes eléctricas [32].

Existen numerosas técnicas que a menudo se utilizan para el estudio de la corrosión electroquímica. Estas técnicas suelen tener las características de que son de gran utilidad, sencillez, relativamente rápidas y económicas [32].

Todas las técnicas electroquímicas que se desarrollan en este trabajo; curvas de polarización cíclicas, impedancias electroquímicas en celdas de corrosión, medidas de resistencia a la polarización lineal en disolución y en probetas, se aplican en sistemas constituidos por celdas electroquímicas básicas de tres electrodos y que constan de; electrodo de trabajo, electrodo de referencia, contra electrodo y un electrolito. Cada uno de estos elementos se describen a continuación:

- 1) Electrodo de trabajo (WE): Es el electrodo correspondiente al metal sobre el que se pretende efectuar el estudio. En este caso siempre está constituido por una barra corrugada de acero inoxidable, la cual ha sido fuertemente encintada y se ha dejado un área lateral conocida, en contacto con los distintos medios de estudio.
- 2) Electrodo de referencia (RE): Es un electrodo no polarizable, respecto al cual se van a medir las variaciones de potencial en el electrodo de trabajo. El electrodo de

referencia utilizado es el de Ag/AgCl (3M, KCl), (con una diferencia de potencial de 210 mV con respecto al electrodo de referencia de hidrógeno a 25 °C). El electrodo de referencia de Ag/AgCl se denomina con las siglas SSE, correspondiente a sus siglas en inglés, Standart Silver Electrode.

- 3) Electrodo auxiliar o contraelectrodo (CE): Con la ayuda del cual se efectúa la polarización del electrodo de trabajo. Este electrodo suele ser de platino o de otro material inerte, con objeto de que no produzca distorsión en el sistema a estudiar [102]. El material utilizado en todos los ensayos como contraelectrodo es grafito.
- 4) Electrolito: Es la sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que se comporte como un conductor eléctrico. En algunos ensayos el electrolito de la celda electroquímica es una disolución y en otras ocasiones el electrolito es hormigón o mortero.

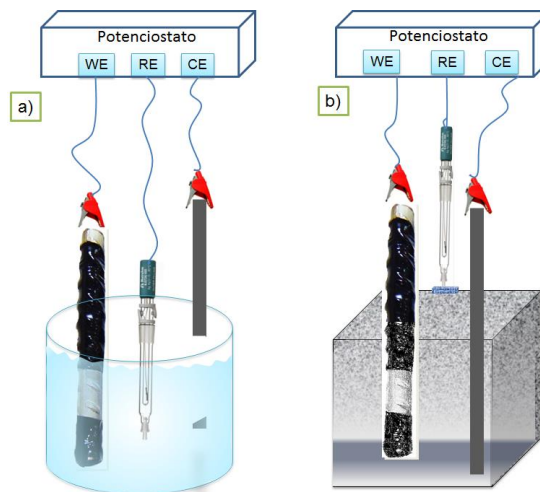


Figura 19. a) Celda electroquímica en disolución. b) Celda electroquímica en probeta de mortero.

3.3.1 Voltametrías cíclicas o curvas de polarización cíclicas

3.3.1.1 Generalidades

La voltametría cíclica (VC) es una técnica amperométrica en régimen de difusión pura. Se basa en variar de manera continua el potencial que se aplica a través de la interfase electrodo/disolución y medir la corriente resultante. El registro de la respuesta a la perturbación se denomina voltagrama, voltamograma o voltamperograma.

Las voltametrías en disolución no agitada, donde el modo predominante de transporte de masa se limita a la difusión, es una de las metodologías más útiles y fáciles de aplicar para el estudio de los procesos electroquímicos [103].

En esta técnica, generalmente se comienza el barrido de potencial a un valor de E_i al cual no hay electrolisis, es decir, donde sólo se detecta la corriente residual realizándose dicho barrido en la dirección adecuada (barrido positivo o barrido negativo) para obtener la respuesta electroanalítica (oxidación/reducción) de la especie electroactiva deseada.

La voltametría cíclica, es probablemente la técnica electroanalítica más eficiente y versátil para el estudio mecanístico de las reacciones electródicas y suele ser el primer experimento que se lleva a cabo en un estudio electroquímico. Constituyen una extensión lógica de la voltametría lineal, realizándose una inversión en el sentido del barrido de potencial. De este modo, se aplica una señal de excitación triangular como la que se muestra en la siguiente figura 20.

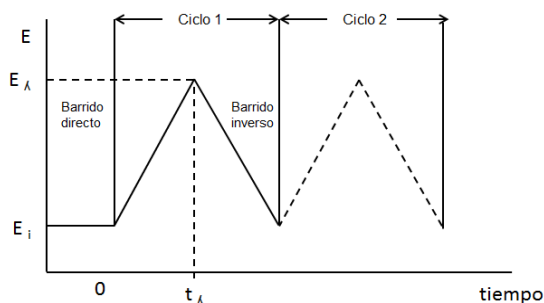


Figura 20. Señal de excitación potencial-tiempo triangular utilizada en voltametría cíclica [103].

Suponiendo el voltamperograma cíclico del Fe^{2+} , durante el barrido directo (en el sentido positivo en este caso) se alcanza un valor de potencial suficientemente positivo como para provocar la oxidación del Fe^{2+} . Esta oxidación da lugar a una corriente anódica que aumenta rápidamente hasta que la concentración del Fe^{2+} , en la superficie del electrodo se aproxima a cero. A continuación, la corriente decae a medida que la especie oxidada, Fe^{2+} , se agota en las cercanías del electrodo debido a su conversión en Fe^{3+} . Este agotamiento de Fe^{2+} y acumulación de Fe^{3+} , cerca del electrodo, se ilustra por medio de los perfiles de concentración en la figura 21.

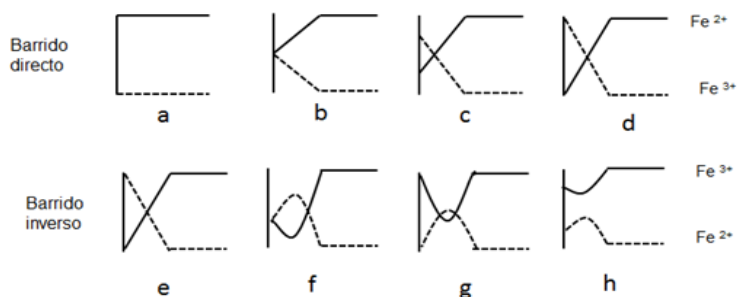


Figura 21. Perfiles de concentración-distancia durante el barrido de potencial característico del voltamperograma de la Figura 20 [103].

Del mismo modo cuando el sentido del barrido se hace inverso desaparece de nuevo Fe^{3+} , para dar lugar a la aparición del Fe^{2+} . Ambos fenómenos se manifiestan mediante la aparición de un pico de corriente en el sentido de la oxidación (barrido directo) y un pico en el sentido de la reducción (barrido inverso), como se observa en la figura 22.

Los parámetros de interés en una voltametría cíclica son las magnitudes de las corrientes de pico i_p (i_{pa} o i_{pc}) o, mejor aún, su relación i_{pa}/i_{pc} y el potencial de pico E_p junto con la separación entre los potenciales de pico, $E_{pa} - E_{pc}$.

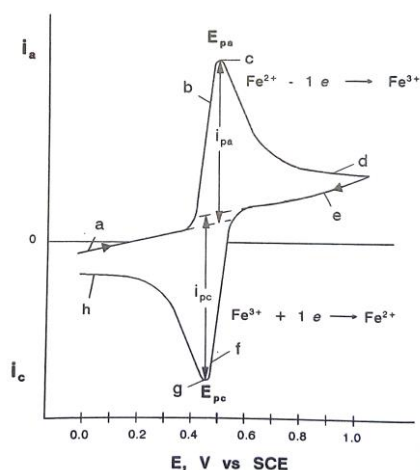


Figura 22. Voltamperograma cíclico del Fe^{2+} [103].

El ejemplo de la figura 22 corresponde a un sistema reversible. Para los sistemas irreversibles o cuasi reversibles la separación entre pico es mayor y depende de la velocidad de barrido. Incluso para los sistemas completamente irreversibles puede no observarse ningún pico en el barrido inverso. Cuanto más irreversible sea un sistema más pequeño será el valor de i_p en el barrido inverso.

Existen en términos generales una serie de diferencias y similitudes entre los procesos reversibles e irreversibles. Una de las diferencias que nos interesa en el desarrollo de nuestro trabajo es tener en cuenta que el potencial de pico de un proceso reversible es independiente de la velocidad de barrido. En cambio, para un proceso irreversible la velocidad de barrido influye en el potencial de pico.

Por tanto, resaltar que la voltametría es una técnica cada vez más utilizada en todos los campos de la química para el estudio de los estados redox, ya que permite barrer rápidamente un amplio intervalo de potenciales tanto para especies oxidables como reducibles. Este hecho junto a la escala de tiempo variable de la técnica y su buena sensibilidad, hacen de ella una de las técnicas electroanalítica más versátiles de las

que se dispone. Su mayor utilidad es como herramienta de diagnóstico para obtener información cualitativa.

Cuando una voltametría cíclica se utiliza para el estudio de la corrosión de metales se denomina curva de polarización cíclica o curvas de polarización potenciodinámica, debido a que el potencial va variando de forma constante dentro del intervalo establecido.

3.3.2 Resistencia a la polarización lineal

Existen distintos métodos electroquímicos para la estimación de velocidades de corrosión. En los procesos de corrosión, donde toman parte las reacciones de las especies cargadas, es necesario vencer una barrera de energía en la transferencia de carga que es afectada por el campo eléctrico. Esto puede demostrarse mediante la teoría de la cinética electroquímica, que las densidades de corriente de los procesos parciales (ecuaciones 4, 5 y 6), se ajustan a las siguientes expresiones [32].

$$i_a = i_{corr} \exp \frac{\alpha n F}{RT} \eta \quad \text{Eq. 16}$$

$$i_c = -i_{corr} \exp \frac{\beta n F}{RT} \eta \quad \text{Eq. 17}$$

Donde T es la temperatura absoluta, R la constante de los gases perfectos, F es la constante de Faraday (96500culombios), n el cambio de valencia en los procesos redox, α y β coeficientes relacionados con la caída de potencial a través de la doble capa que rodea al electrodo (normalmente $\frac{1}{2}$), η la polarización aplicada e i_{corr} la densidad de corriente de corrosión buscada, que puede transformarse en peso o penetración a partir de la ley de Faraday.

El equilibrio eléctrico existente en el potencial de corrosión libre, que se expresa en la ecuación 14, impide la determinación directa de i_{corr} . Por lo que cuando se rompe dicho equilibrio mediante la imposición de una polarización al electrodo, se aprecia instrumentalmente una corriente externa que es resultante de la suma algebraica de los correspondientes procesos parciales:

$$i_t = i_a + i_c = i_{corr} \left[\exp \left(\frac{\alpha n F}{RT} \eta \right) - \exp \left(-\frac{\beta n F}{RT} \eta \right) \right] \quad \text{Eq. 18}$$

Partiendo de esta ecuación se consigue, a través de dos casos límites, que se corresponden con las pendientes de Tafel y el llamado método de resistencia a la polarización una estimación de i_{corr} , es decir, de la velocidad de corrosión [32].

3.3.2.1 Método de la intersección

Antes de explicar el método de la polarización lineal, es necesario explicar otro método denominado método de la intersección.

En este método se entiende que, para polarizaciones suficientemente grandes, donde $\eta \gg RT/\alpha nF$ o bien $-\eta \gg RT/\beta nF$, la ecuación 18, se reduce a las ecuaciones 16 y 17 de las semirreacciones anódica y catódica, que se corresponden con las rectas de Tafel respectivas con pendiente $b_a = 2,3RT/\alpha nF$ y $b_c = -2,3 RT/\beta nF$.

Esto se podría comprobar tomando logaritmos en cualquiera de las citadas ecuaciones, elegimos la ecuación 19.

$$\log i_a = \log i_{corr} + \frac{\alpha nF}{2.3 RT} \eta \quad \text{Eq. 19}$$

Dónde:

$$\eta = \frac{-2.3 RT}{\alpha nF} \log i_{corr} + \frac{2.3 RT}{\alpha nF} \log i_a = a + b_a * \log i_a \quad \text{Eq. 20}$$

Debido a que para un sistema metal/medio dado, i_{corr} tiene un valor determinado y el primer término del segundo miembro puede englobarse en la constante a de la ley de Tafel.

En las proximidades de E_{corr} , para polarizaciones pequeñas, los procesos anódicos y catódicos se influyen mutuamente y las curvas de polarización experimentales se apartan del curso semilogarítmico previsto por la ley de Tafel. Sin embargo. Como para $\eta=0$ (para E_{corr}) de cualquiera de las ecuaciones 16 y 17 resulta:

$$i_a = |i_c| = i_{corr} \quad \text{Eq. 21}$$

Se llega a la i_{corr} buscada extrapolando cualquiera de estas rectas de Tafel obtenidas a polarizaciones grandes hasta la línea de $E = E_{corr}$, tal como se muestra en la siguiente figura [32].

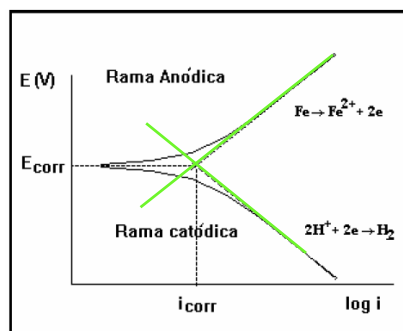


Figura 23. Representación esquemática del log de la densidad de corriente frente al potencial. El punto de corte determina el E_{corr} y la i_{corr} .

Una de las desventajas principales de este método es la necesidad de trazar por completo las curvas de polarización, que por una parte posibilita el análisis electroquímico de la cinética del proceso y, por otro lado, puede dar lugar a modificaciones en la superficie del electrodo debido a las elevadas polarizaciones. [32].

3.3.2.2 Método de resistencia a la polarización lineal (Rp):

Fueron Stern and Geray los que en 1957 dieron forma a este método. La medida de la resistencia a la polarización lineal denominada también como LPR, por sus siglas en inglés; (Linear Polarization Resistance), o comúnmente conocido como R_p . Fue Andrade C, quién perfeccionó dicho método para el estudio específico de la corrosión del acero al carbono como acero de refuerzo [104, 105].

El método de Resistencia a la Polarización Lineal (R_p) se basa en que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entorno del E_{corr} y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión.

Teniendo en cuenta que en el límite, para $x \rightarrow 0$, $e^x = 1+X$ y $e^{-x} = 1-X$, de la expresión general (Eq. 18), se deduce:

$$i_t = i_{corr} \left(\frac{\alpha n F}{RT} \eta + \frac{\beta n F}{RT} \eta \right) \quad \text{Eq. 22}$$

y considerando los valores anteriormente mencionados de la pendiente de Tafel:

$$i_t = i_{corr} * \eta * 2.3 \left(\frac{1}{ba} + \frac{1}{bc} \right) \quad \text{Eq. 23}$$

y para $\eta \rightarrow 0$

$$i_{corr} = \frac{1}{2.3 \left(\frac{1}{ba} + \frac{1}{bc} \right)} * \frac{di_t}{d\eta} = - \frac{ba * bc}{2.3 * (ba + bc)} \frac{di_t}{dn} \quad \text{Eq. 24}$$

A partir de la medida del cociente $\frac{di_t}{dn} = \frac{\Delta i}{\Delta E}$ se llega a la determinación de la i_{corr} . Para un sistema dado, las pendientes de Tafel pueden considerarse constantes y la fórmula de Stern y Geray adopta la forma más simple:

$$i_{corr} = B \frac{\Delta i}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \quad \text{Eq. 25}$$

En la práctica se aplica una pequeña polarización o ΔE , de +/- 10 ó +/- 20 mV generalmente y se mide el Δi correspondiente, dando nombre al método el hecho de que las dimensiones del cociente $\frac{\Delta E}{\Delta i}$ sean las de una resistencia.

El valor de la constante $B = \frac{b_a * b_c}{2.3 (b_a + b_c)}$ de la fórmula, varía entre límites estrechos, pues tampoco es amplio el margen de variabilidad de las pendientes de Tafel que, en la mayoría de los casos, están comprendidas entre 60 y 120 mV. Estos parámetros b_a y b_c se encuentran en el numerador y en el denominador, de modo que aun desconociendo tales valores es posible la estimación aproximada de la i_{corr} si se parte de un valor intermedio de la B. Estableciendo a parte el valor de la B y la decisión de calcularla para cada sistema, la ventaja de este método reside en que sólo se requiere la aplicación de polarizaciones tan pequeñas que, en la mayoría de los casos, la muestra permanece inalterada, así pues una misma muestra, probeta, disolución etc... puede ser medida de forma indefinida sin que por ello se vea afectada y puede ser estudiado la evolución de la i_{corr} conforme pasa el tiempo.

El método de resistencia a la polarización es más general que el de la intersección, pues si se supone que la reacción parcial catódica alcance una intensidad límite de difusión, o que la anódica se vea controlada por un fenómeno de pasivación, entonces b_c o b_a se hacen infinitamente grandes y de la eq. 24 se deduce:

$$i_{corr} = \frac{b_a}{2.3 R_p} \quad \text{o bien} \quad i_{corr} = \frac{b_c}{2.3 R_p} \quad \text{Eq. 26}$$

Pudiéndose aplicar este procedimiento incluso cuando el de la intersección no es posible aplicarlo [32].

3.3.3 Impedancia electroquímica

La impedancia electroquímica (EIS) por sus siglas inglesas; Electrochemical Impedance Spectroscopy, se define sencillamente como la oposición total de aparatos o circuitos al paso de una corriente eléctrica alterna a una frecuencia determinada. No obstante, no sería correcto entenderlo como un concepto de oposición simple pues esta tiene en cuenta la existencia de diferentes fases.

En la actualidad la EIS es un método muy utilizado para la investigación de las propiedades eléctricas de los materiales y las interfaces de electrodos conductores, por lo que resulta una técnica ampliamente utilizada en corrosión para el estudio de los procesos que suceden entre el electrolito, la capa de óxido superficial (capa pasiva) y el metal base.

Del mismo modo que cuando nos referimos a corriente continua, la aplicación de un potencial E, registra una intensidad I y se puede calcular la resistencia R, siguiendo la ley de Ohm, tal como se muestra e la ecuación 27.

$$E = I \times R \quad \text{Eq. 27}$$

Se puede realizar una similitud a la ley de Ohm, pero con corriente alterna mediante la ecuación 28.

$$E = I \times Z \quad \text{Eq. 28}$$

Donde E, es el potencial que se aplica a un circuito eléctrico, I es la intensidad que se mide cuando se aplica E y Z es la impedancia del sistema y que puede calcularse.

Por tanto, la impedancia total en un sistema electroquímico como el de una celda básica de tres electrodos, es el impedimento al paso de la corriente que se produce por la existencia combinada de elementos como resistencias, condensadores e inductores.

La impedancia electroquímica se inicia con la aplicación de una perturbación de potencial o corriente sinusoidal de una amplitud muy pequeña, esto último, con el objetivo de conseguir respuestas lineales y que el sistema no se altere irreversiblemente con la medida. En las EIS que se aplican en este trabajo de investigación, la perturbación es una señal de potencial E de entrada que se aplica sobre el potencial de equilibrio del electrodo y su amplitud E_0 es muy baja, del orden de 10mV, en un intervalo amplio de frecuencias.

$$E = E_0(\sin \omega t) \quad \text{Eq. 29}$$

Variando la frecuencia de ω , de esta señal de potencial E, desde cero a infinito, se obtiene la respuesta del sistema en forma de corriente, i. La respuesta en régimen permanente de un sistema lineal a una señal de excitación de tipo sinusoidal es otra señal sinusoidal, de la misma frecuencia que la primera, pero que difiere de ella en los valores de su amplitud y ángulo de fase:

$$I = i_0 \sin(\omega t + \phi) \quad \text{Eq. 30}$$

E_0 e i_0 corresponden a las amplitudes máximas de la señal de entrada y de su respuesta. Sin embargo, ϕ es la diferencia de fases de dichas señales.

La respuesta es proporcional a la perturbación, con igual frecuencia que la señal incidente, más una serie de armónicos secundarios. La respuesta es lineal si sólo se considera el armónico fundamental.

La perturbación se superpone a un potencial estacionario, E_{est} , de un electrodo.

$$\Delta E = E - E_{est} = |\Delta E| \sin(\omega t) \quad \text{Eq. 31}$$

Donde $\omega = 2\pi f$, ω = pulsación (rad/s) y f= frecuencia.

La respuesta también se superpone al potencial estacionario.

$$\Delta I = |\Delta I| \sin(\omega t') = |\Delta I| \sin(\omega t - \phi) \quad \text{Eq. 32}$$

Siendo $\phi = \omega (t - t')$.

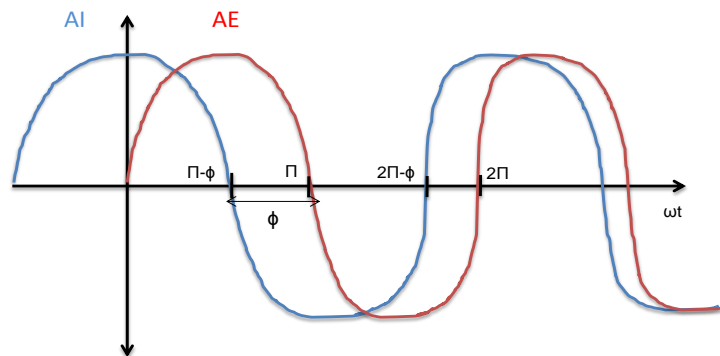


Figura 24. Representación de ΔE y ΔI , normalizadas, frente a ωt [106].

Considerando el plano complejo, tanto la perturbación como la respuesta se constituyen de una parte real y otra imaginaria:

$$\Delta E = \Delta E_{real} + i\Delta E_{im} \quad \text{Eq. 33}$$

$$\Delta I = \Delta I_{real} + i\Delta I_{im} \quad \text{Eq. 34}$$

Cuando se representan en coordenadas polares, mediante vectores de longitudes $|\Delta E|$ y $|\Delta I|$, respectivamente, girando a una velocidad angular (ω), en sentido antihorario.

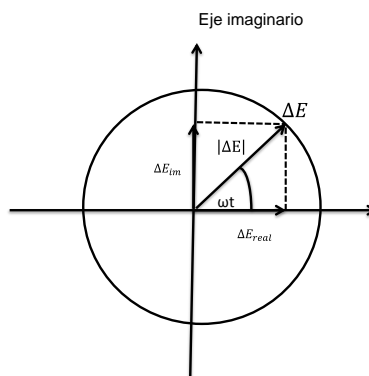


Figura 25. Representación de $|\Delta E|$ y $|\Delta I|$, en coordenadas polares [106].

$$\Delta E_{real} = |\Delta E| \cos \omega t \quad \text{Eq. 35}$$

$$\Delta E_{im} = |\Delta E| \sin \omega t \quad \text{Eq. 36}$$

Empleando la ecuación 33 se obtiene:

$$\Delta E = |\Delta E| e^{i\omega t} \quad \text{Eq. 37}$$

$$\Delta I = |\Delta I| e^{i(\omega t - \phi)} \quad \text{Eq. 38}$$

Y si se dividen las dos expresiones anteriores obteniéndose la impedancia:

$$Z = \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{|\Delta E| e^{i\omega t}}{|\Delta I| e^{i(\omega t - \phi)}} \quad \text{Eq. 39}$$

$$Z = |Z|e^{i\phi} \quad \text{Eq. 40}$$

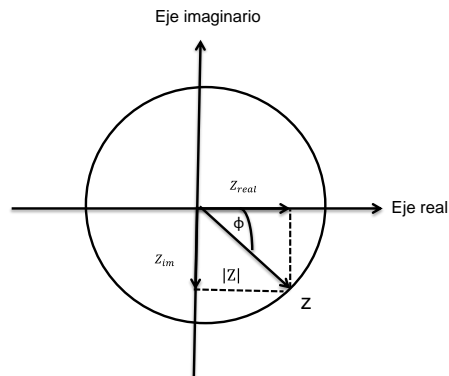


Figura 26. Z_{real} y $Z_{\text{imaginaria}}$, en coordenadas polares.

Por lo tanto, la impedancia de un sistema electroquímico es una magnitud vectorial compleja que se define mediante un módulo $|Z|$, y un ángulo de fase o argumento ϕ . La magnitud y la dirección de dicho vector plano en un sistema de ejes ortogonal puede ser definido por el vector suma de dos componentes a y b a lo largo de los ejes x e y , por lo que el número complejo Z estará definido por:

$$Z = a + jb \quad \text{Eq. 41}$$

Donde el número imaginario $j = (-1)^{1/2}$

La parte real de Z que se representa como a en la ecuación 41, está en la dirección del eje real x , y la parte imaginaria, b en la ecuación 41, está a lo largo del eje y . por lo tanto utilizando notación compleja, el vector impedancia se expresa por:

$$Z(\omega) = Z'(\omega) + j Z''(\omega) \quad \text{Eq. 42}$$

Donde $\omega = 2\pi f$, siendo f la frecuencia impuesta.

En una celda electroquímica, pueden desarrollarse fenómenos que impidan el paso de la corriente como; cinéticas lentas o fenómenos de difusión y estos pueden ser considerados análogos a los elementos que impiden el paso de corriente eléctrica en un circuito de corriente alterna.

La impedancia de una resistencia, de un condensador o de una bobina inductiva se puede representar de varias formas. Una representación muy útil es la que utiliza notación compleja. De esta forma:

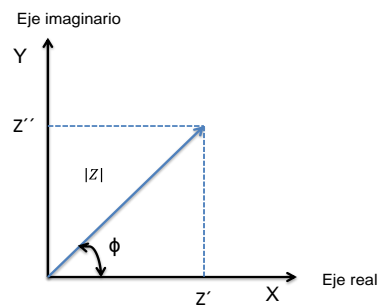
$$Z_R = R \quad \text{Eq. 43}$$

$$Z_c = \frac{-1}{j\omega C} \quad \text{Eq. 44}$$

$$Z_L = j\omega L \quad \text{Eq. 45}$$

Donde j es el número imaginario $(-1)^{1/2}$, ω la frecuencia angular, R la resistencia, C la capacidad del condensador y L la autoinducción de la bobina [106].

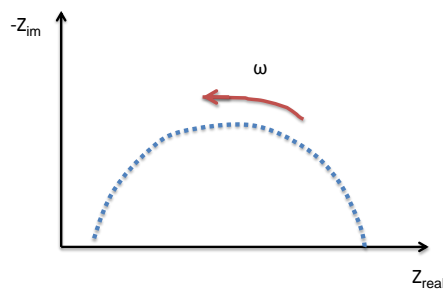
Cuando el vector impedancia se representa en coordenadas polares, mediante el módulo $|Z|$ y el ángulo de fase ϕ , o en coordenadas cartesianas, por medio de las componentes Z' y Z'' , se obtienen lo que se denominan los diagramas de Argand.



Gráfica 8. Diagrama de Argand.

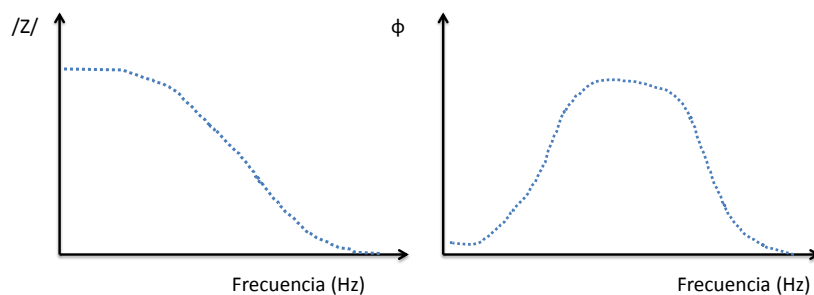
Donde la parte real es $R_e(Z) = Z' = |Z| \cos \phi$, la parte imaginaria es $I_m(Z) = Z'' = |Z| \text{sen } \phi$, el ángulo de fase; $\phi = \tan^{-1}(Z''/Z')$ y el módulo $|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2}$.

Por otro lado, existen otros tipos de diagramas mediante los cuales se estudian las impedancias que son los diagramas de Nyquist, en cuya ordenada en el origen, se representa la parte imaginaria de la impedancia y en el eje de abscisas la parte real de la misma, ambas a distintas frecuencias.



Gráfica 9. Ejemplo de diagrama de Nyquist.

Por último, están los diagramas de Bode, en los cuales se representa el módulo de la impedancia o el ángulo en ordenada y el rango de frecuencias aplicadas en abscisas.



Gráfica 10. Diagramas de Bode del módulo (gráfica izquierda) y de ángulo (gráfica de la derecha).

3.3.3.1 Simulación interface metal-electrolito

La corrosión es un fenómeno de superficies que tiene lugar en la interface metal /electrolito por la acción que este último tiene sobre el metal, como consecuencia del movimiento y formación de partículas con carga eléctrica y en cantidad proporcional al flujo de corriente o de cargas suscitado por el fenómeno. En consecuencia, la corrosión se puede medir y controlar a través de parámetros eléctricos. La electroneutralidad de la materia que, ante una disposición de cargas eléctricas sobre una superficie, fuerza la imagen de signo contrario en la otra cara de la misma interfase, hace que la doble capa en torno a los electrodos, las películas pasivantes y otras capas superficiales, se comporten como condensadores, o circuitos eléctricos más complejos que contienen condensadores. La transferencia de carga con formación y desaparición de iones y el transporte de los mismos, son procesos que limitan el flujo de corriente o intensidad y actúan como si de resistencia eléctrica se trataran [32].

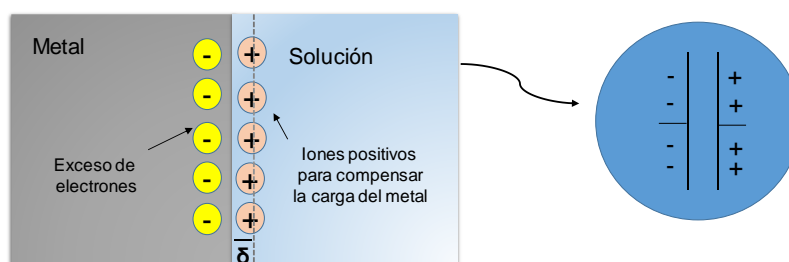


Figura 27. Esquema de la doble capa iónica en la interface de un metal e disolución.

3.3.3.2 Análisis del comportamiento de un sistema. Elección de un modelo o circuito equivalente.

Los sistemas electroquímicos se pueden simular por una combinación de resistencias, condensadores y bobinas que, ante una señal eléctrica, reproducen su respuesta con una aproximación aceptable. Es el concepto de circuito equivalente del sistema metal/medio.

El circuito equivalente es un modelo integrado por componentes ideales que deben describir con gran aproximación el comportamiento de aquél en cuanto a sus relaciones causa efecto.

En general la elección del tipo de modelo más adecuado para representar un sistema no es un problema simple, pues entraña un compromiso importante entre la complejidad del modelo seleccionado y la rigurosidad con que éste representa el comportamiento del sistema real. Si el modelo es demasiado simple, los resultados obtenidos de su tratamiento no coinciden exactamente con la realidad física; por el contrario, si es demasiado complicado, su estudio podrá resultar, si no imposible sí al menos de gran dificultad.

Seleccionando el modelo y comprobando que existe suficiente coincidencia entre los resultados calculados y el comportamiento real del sistema, puede ser utilizado aquél para sustituir a este en la realización de estudios de tipo teórico. De todas formas, debe tenerse siempre muy en cuenta que cualquier modelo no es más que una representación simplificada y abstracta del sistema para una aplicación específica, y que su validez está únicamente justificada por la comparación entre el comportamiento previsto para el sistema y la realidad física del mismo [32].

3.3.3.3 Consistencia de las medidas de impedancia mediante las relaciones de Kramers-Kroning (K-K)

Cuando se realizan una serie de medidas de impedancias electroquímicas (EIS), con la finalidad de ajustar dichas medidas a un circuito equivalente (EEC), se requiere de una interpretación física justificada, que relacione los parámetros del EEC con los procesos que se presuponen que ocurren. Todo ello puede realizarse mediante la observación de los distintos diagramas, interpretación de otros autores etc.... No obstante, previo a esta interpretación de los datos, es necesario plantearse si las medidas de EIS que se adquieren, tienen consistencia o no. Por ello, para comprobar la consistencia de los mismos se recurre a las relaciones de Kramers-Kroning (K-K) [107]. Las partes reales e imaginarias (dependientes de la frecuencia) de ciertas cantidades físicas complejas muestran una relación entre sí mediante lo que actualmente se denomina relaciones de Kramers-Kroning, las cuales no son más que relaciones puramente matemáticas, basadas en las transformadas de Hilbert [108-120].

La aplicabilidad de las transformadas de K-K requiere que el sistema objeto de estudio, invariante en el tiempo, cumpla cuatro condiciones: causalidad, linealidad, estabilidad, y valor finito [109, 118].

Un sistema es causal si su respuesta no precede a la perturbación [108]. Si a un sistema en reposo se le aplica una perturbación en $t = 0$, la respuesta del sistema debe ser 0 para $t < 0$. Físicamente esto quiere decir que el sistema no genera ruido independiente de la señal aplicada para $t > 0$.

Un sistema es lineal si la relación entre la perturbación introducida y la respuesta se puede describir mediante ecuaciones diferenciales [107]. Esto significa que es válido el principio de superposición: la respuesta a una suma de entradas individuales es igual a la suma de respuestas individuales. En los sistemas electroquímicos la relación tensión/corriente es de naturaleza exponencial, ecuación de Butler-Volmer [117], y para asegurar la linealidad es necesario considerar un régimen de pequeña señal.

Un sistema electroquímico es estable si cuando cesa la perturbación impuesta vuelve al estado original [121].

La impedancia debe tener un valor finito en todo el espectro de frecuencia analizado, incluyendo $\omega \rightarrow 0$ y $\omega \rightarrow \infty$. Desde un punto de vista práctico, la condición de valor finito no es crítica. Sin embargo, en estudios de corrosión la falta de consistencia de los datos electroquímicos al aplicar las relaciones de K-K se debe a menudo a un fallo en la condición de estabilidad [122]. Las integrales de las transformadas de K-K se pueden expresar como [109]:

$$Z'(\omega) = Z'(\infty) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{xZ''(x) - \omega Z''(\omega)}{x^2 - \omega^2} dx \quad \text{Eq. 46}$$

$$Z'(\omega) = Z'(\infty) + \frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{\omega}{x} Z''(x) - Z''(\omega) \right) \right] \frac{dx}{x^2 - \omega^2} \quad \text{Eq. 47}$$

$$Z''(\omega) = - \frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Z'(x) - Z'(\omega)}{x^2 - \omega^2} dx \quad \text{Eq. 48}$$

$$\phi(\omega) = \left(\frac{2\omega}{\pi} \right) \int_0^{\infty} \frac{\text{Ln } |Z(x)|}{x^2 - \omega^2} \quad \text{Eq. 49}$$

Donde $Z'(x)$ y $Z''(x)$ son funciones continuas que proporcionan las partes real e imaginaria de la impedancia, respectivamente en función de la frecuencia angular (x) en rad/s con $0 < x < \infty$, $Z'(\omega)$ y $Z''(\omega)$ son las partes real e imaginaria de la impedancia respectivamente, para la frecuencia angular $x = \omega$, $\phi(\omega)$ es el ángulo de fase para la frecuencia angular $x = \omega$, $|Z(x)|$ es el módulo de la impedancia, $|Z(x)| = \sqrt{Z'(x)^2 + Z''(x)^2}$ y finalmente, $Z'(\infty)$ y $Z'(0)$ son los valores de la parte real de la impedancia para $\omega \rightarrow \infty$ y para $\omega \rightarrow 0$, respectivamente.

Mediante las ecuaciones (46-49), es posible transformar la parte real de la impedancia en la parte imaginaria y al contrario. El procedimiento habitual para utilizar las relaciones de K-K es calcular la parte imaginaria de la impedancia a partir de los

valores de la parte real obtenidos experimentalmente utilizando, por ejemplo, la ecuación 48 y comparar de esta manera los obtenidos con los medidos experimentalmente de la parte imaginaria. Igualmente, es posible calcular la parte real de la impedancia desde los valores de la parte imaginaria obtenidos experimentalmente utilizando, por ejemplo, la ecuación 46 [110],[118].

3.4 Ensayos de laboratorio en disolución

3.4.1 Voltametrías cíclicas o curvas de polarización cíclicas.

La investigación se inicia con la realización de curvas de polarización cíclica para las cinco calidades de aceros inoxidable en forma de barra corrugada de refuerzo.

Estas curvas de polarización se realizan en una celda electroquímica de tres electrodos, como se indica en el apartado 3.3 de “Técnicas electroquímicas” y cada una de ellas se repite para obtener una duplicidad de las mismas.

Los entornos donde se estudian los distintos aceros inoxidable son dos intervalos de pH, con la intención de aproximarnos a dos situaciones hipotéticas. El primer intervalo de pH es [6-8] que abarcaría una primera situación hipotética donde la estructura sufriera una bajada del pH interno debido a diversos factores como carbonatación, generación de fracturas etc., o bien, que estos aceros de refuerzo se encontraran directamente en contacto con el agua de mar. Por otro lado, y con la intención de simular las condiciones internas de pH que existe en el interior de los poros del hormigón, se estudia un intervalo de pH [12-13]. Cada uno de estos intervalos de pH se estudia en tres concentraciones de cloruros, las cuales son; 0.5%, 1% y 3% p/p de NaCl. Por lo que se realizan un total de 60 curvas de polarización, no incluyendo en este número aquellas que se realizan inicialmente como control, para cada una de las calidades, en los diferentes intervalos de pH y cuando la concentración de cloruros no existe y que constituyen un número total de 10 curvas adicionales.

Las curvas de polarización cíclicas se realizan con una velocidad de barrido de 0.6V/h, la cual viene establecida en la norma ASTM G 61-86, con una duración de cinco horas y media, de forma que les dé tiempo a las picaduras a nuclearse y también tenga tiempo suficiente para su repasivación. La ventana de potencial establecida ha sido desde -0.8 V a 0.8V, iniciándose todas ellas en el sentido anódico del barrido.

Inicialmente se realizan curvas de polarización que denominamos de control, con un porcentaje del 0% p/p de NaCl para ambos intervalos de pH. Ocurre que cuando el intervalo de pH es el [6-8], durante toda la venta de potencial, no se observa ninguna de las reacciones de oxidación ni de reducción del agua. Sin embargo, cuando el intervalo es de pH [12-13], se observa cómo se produce la reacción de oxidación del

agua con el correspondiente desprendimiento de oxígeno. Esto es debido a que la disolución acuosa se encuentra saturada en iones OH^- , que dan lugar a que se forme con anterioridad la reacción de oxidación del agua, eq 51.

3.4.1.1 Estudio de susceptibilidad a la corrosión por picaduras

Fue S. Brenner el primero en estudiar la susceptibilidad a la corrosión por picaduras de materiales metálicos, en medios en los que se sospechara, pudieran desencadenarse esta forma de ataques, mediante curvas de polarización potenciodinámicas, a partir de descubrir que dicha susceptibilidad podía expresarse por el valor del potencial del electrodo a la que se manifiesta [32].

Si se realiza el estudio de un metal pasivable, mediante una curva potenciodinámica cíclica en el sentido anódico del barrido y en un medio electrolítico, se deben tener en cuenta los procesos que ocurren y una serie de potenciales críticos que informan sobre la susceptibilidad de ese metal en dicho medio, a lo largo del barrido de potencial.

A continuación, se representa un esquema de una curva de polarización cíclica, potenciodinámica, con un sentido del barrido anódico. En ella se representa el logaritmo de la intensidad de corriente en ordenadas y el potencial aplicado en abscisas, como se observa en la figura 28.

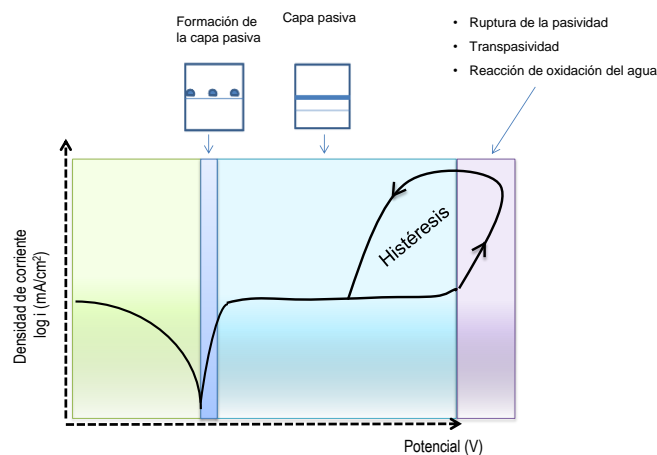


Figura 28. Desarrollo de una curva de polarización cíclica. Sentido del barrido anódico y parte del cátodo de vuelta.

El barrido comienza con una zona de inmunidad justo antes del inicio de la formación de la capa pasiva. Cuando esta se ha formado por completo la curva presenta una meseta en los valores de la densidad de corriente. Si se continúa avanzando en el sentido anódico de la polarización, el valor de la densidad de corriente aumenta bruscamente por diversas razones que pueden ser; el inicio de la formación de picaduras, la reacción de oxidación del agua, o por un proceso denominando de

transpasividad y que se desarrolla cuando, en la capa pasiva de los aceros inoxidable, el Cr(III) que se encuentra como un óxido insoluble en forma de Cr_2O_3 se oxida a Cr(VI), mediante la formación del óxido soluble CrO_4^{3-} , según la siguiente ecuación.



Esta reacción produce un aumento importante de la densidad de corriente y al fenómeno se le denomina transpasividad [120].

Cuando se realiza una curva de polarización en un medio acuoso, hay que tener en cuenta las reacciones que se producen dentro del agua. Se producen reacciones de reducción con el consecuente desprendimiento de hidrógeno, y de oxidación donde se desprende oxígeno, ecuaciones 51 y 52.

Reacción de reducción del agua:



Reacción de oxidación del agua:



Son las reacciones de oxidación del agua las que se reflejan en la curva de polarización cíclica con un aumento brusco de la densidad de corriente, pudiéndose confundir o apantallar el valor del potencial crítico a partir del cual se ha podido iniciar una picadura.

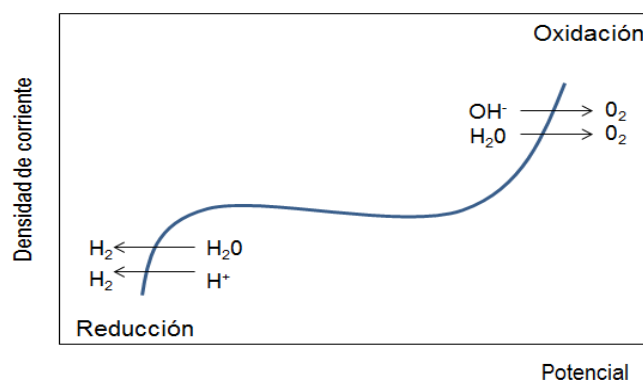


Figura 29. Reacciones de oxidación y de reducción del agua.

Cuando el valor de la densidad de corriente se eleva bruscamente en la zona donde se ha producido la reacción de oxidación del agua y este no permite determinar el potencial de picaduras, se observa si se forma un bucle de histéresis en el barrido inverso, en el sentido catódico. Si se produce histéresis es que se han nucleado picaduras, de lo contrario, si no hay histéresis y la curva de polarización vuelve por

donde ya se había trazado en el barrido con sentido anódico, nos indica que no se ha producido nucleación de picaduras y por lo tanto la capa pasiva no se ha destruido [73, 89, 95].

El estudio de la susceptibilidad a la corrosión por picaduras de un material se completa con la evaluación de los valores de potenciales críticos que se describen a continuación:

- Potencial de corrosión (E_{corr}): Es un potencial, al cual se produce una corriente crítica, $i=0$ ($i_{anódica}=i_{catódica}$), en el sentido anódico del barrido. Es el potencial al cual el material se corroe en ausencia de perturbación.
- Potencial de ruptura o de nucleación de picaduras, al cual nosotros haremos referencia como (E_r): Representa el límite de potencial por encima del cual se inician o nuclean las picaduras. El potencial de ruptura, en las curvas de polarización, se ha calculado cuando la intensidad de corriente ha superado los $100\mu A/cm^2$ en las mismas [123-125].
- Potencial de protección (E_{pr}): Se obtiene después de la inversión del barrido de potencial. Indica el límite por debajo del cual, el metal permanece pasivo, marcando el límite entre la pasividad estable e inestable. Valores intermedios entre el E_r y E_{pr} no permiten la formación de nuevas picaduras, pero sí el desarrollo de las ya existentes.

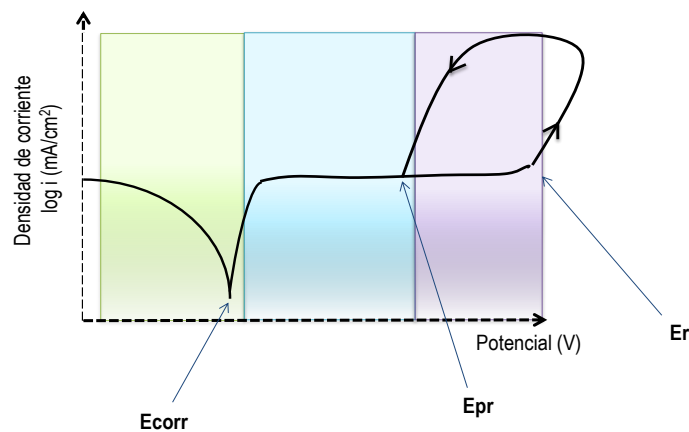


Figura 30. Potenciales críticos; Potencial de corrosión (E_{corr}), potencial de nucleación de picaduras o de ruptura (E_r) y Potencial de protección (E_{pr}).

Cuanto mayor sea la diferencia entre ($E_r - E_{corr}$), mayor será la resistencia a la corrosión por picaduras y menos probable será su aparición. Por otro lado, si ($E_{pr} > E_{corr}$) el metal tendrá la capacidad de regenerar la capa pasiva ante una eventual ruptura de la misma y la repasivación será tanto más fácil cuanto mayor sea la diferencia.

Si el ($E_{pr} < E_{corr}$), el metal o aleación permanecerán en el estado activo una vez destruida la pasividad y las picaduras crecerán sin interrupción.

El material será menos susceptible a la corrosión por picaduras, cuando E_r y E_{pr} sean mucho mayores que el E_{corr} y con una pequeña histéresis anódica ($E_r - E_{pr}$) [32].

Por lo tanto, existe la posibilidad de regeneración de la capa pasiva cuando, teniendo en cuenta el sentido anódico del barrido dentro de la curva de polarización, el potencial de protección aparezca a valores mayores que el potencial de corrosión. Por otro lado, cuando la distancia entre el E_r y el E_{corr} aumenta en la curva de polarización, mayor será la resistencia de ese acero a la formación de picaduras.

3.4.1.2 Cálculo de la pérdida de material mediante la ley de Faraday.

El cálculo de la pérdida de material en gramos se realiza como indica F.J. Recio en su tesis doctoral [51] y donde muestra que se puede calcular la pérdida de material en cada una de las curvas de polarización mediante el cálculo de la carga electroquímica (Q) ocasionada por la formación de la picadura. A partir de esta carga Q y mediante la ley de Faraday, se obtiene la pérdida de masa en gramos cuyo valor se aproxima a la que se calcula mediante gravimetría, es decir, mediante el cálculo de las diferencias de pesadas que presentan las barras que se estudian, antes de ser sometidas a la curva de polarización cíclica y una vez que esta finaliza y se les ha extraído el óxido provocado por las mismas [51, 126]. Según F.J. Recio, si el potencial de picaduras, llamado por nosotros potencial de ruptura E_r , es menor que el potencial de oxidación del agua, la carga que se debe calcular es $Q = Q_1 + Q_2$, sin embargo, si el potencial de picaduras E_r es mayor, la carga que debe calcularse es $Q = Q_2$ solamente, como se indica en la siguiente figura 31.

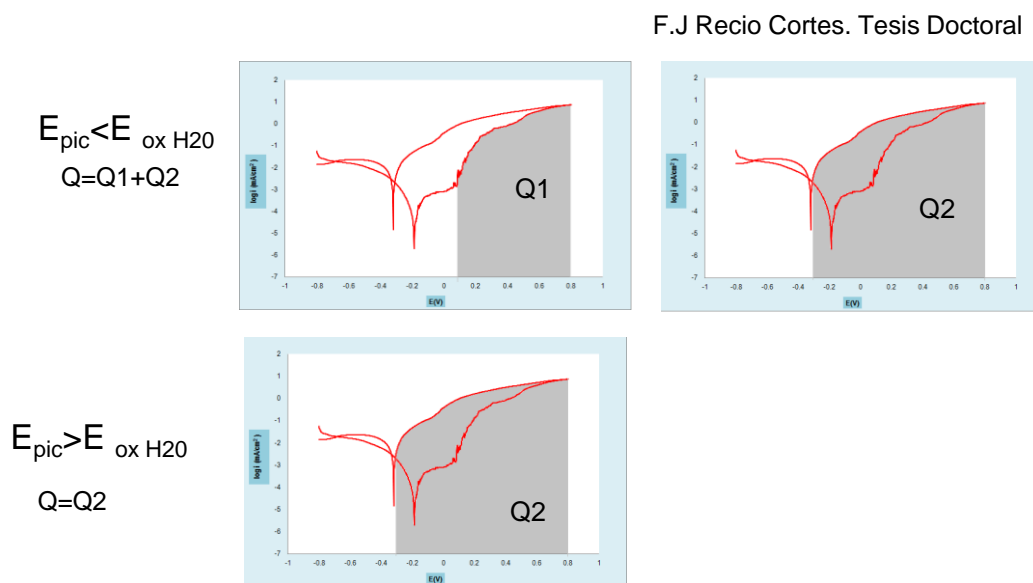


Figura 31. Cálculo de la carga Q [51].

Una vez que se ha calculado la carga Q se procede al cálculo de la pérdida de material en gramos mediante la ley de Faraday como se indica en la Ley de Faraday:

$$m = \frac{Q \cdot M}{F \cdot n} = \int \frac{I \cdot M}{96584 \cdot n} dt \quad \text{Eq. 53}$$

Dónde M corresponde al peso molecular del material (calculado en función de las proporciones que los aleantes presentan en los distintos aceros inoxidable), m corresponde a la masa perdida en gramos (g), I es la intensidad de corriente que atraviesa durante el tiempo que dura la curva de polarización cíclica, en Amperios (A), t es el tiempo durante el cual pasa la corriente por la celda medido en segundos (s), F es la constante de Faraday en Culombios y correspondiente a 96493 (C* mol), n es el número de electrones transferidos en cada reacción. En este caso se toma dos electrones de forma general, por ser la reacción de oxidación del $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ la que más abunda cuando se produce un proceso de corrosión por picadura y finalmente, Q es la carga generada durante el proceso electroquímico, en Culombios(C).

Tomando como base la metodología anteriormente desarrollada, se obtiene la pérdida de material mediante el cálculo del área bajo la curva que se obtiene al representar la Intensidad en amperios (A), frente al tiempo en segundos (s) y se omiten los valores de intensidad de corriente negativos para tener en cuenta exclusivamente las intensidades de corriente faradaicas. De este modo, no sólo se tiene en cuenta la pérdida de material producida por la formación de las picaduras, como indica F.J. Recio, sino incluso un paso previo, donde pudieran existir casos en los que la pérdida de material pudiera haberse iniciado previa a la formación de picadura o a causa de otro tipo de corrosión como la intergranular, muy típica en aceros inoxidable, generalizada etc ...

Una variación

pH[6-8] $E_{\text{pic}}(E_r) < E_{\text{ox H}_2\text{O}}$

pH[12-13] $E_{\text{pic}}(E_r) > E_{\text{ox H}_2\text{O}}$

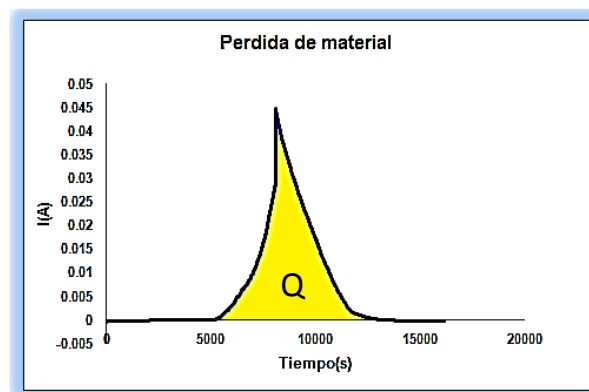


Figura 32. Cálculo de la carga Q, modificado.

3.4.2 Celdas de corrosión

Los estudios de larga duración realizados en disolución se han llevado a cabo en celdas de corrosión, las cuales están constituidas por duquesas de polietileno de 500 ml de volumen. A cada una de ellas se le inserta en la tapa un contraelectrodo de grafito permanente, dos muestras de una misma calidad de acero inoxidable, aunque de diferentes coladas y con el mismo diámetro y un electrodo de referencia de Ag/AgCl.

Las muestras previamente se limpian, se pesan y se encintan, dejando un área lateral de ataque de la barra de 7.5 cm².

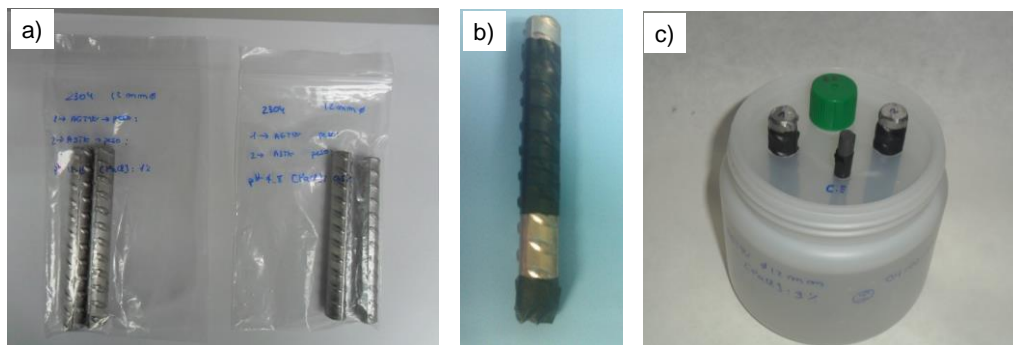


Figura 33. a) acero limpio y pesado. b) acero encintado con área lateral expuesta y c) celda de corrosión completa.

Al igual que en anteriores ensayos en disolución, como son las voltametrías cíclicas, se estudian dos intervalos distintos de pH; neutro o ligeramente ácido, pH [6-8] y alcalino pH [12-13]. Estas disoluciones con distintos intervalos de pH, se estudian a distintas concentraciones de cloruros, utilizando NaCl para ello. Las concentraciones estudiadas son; 0.5%, 1% y 3% p/p en NaCl. Intentando con esta última aproximarnos a la concentración media existente de NaCl en el agua de mar.

Se fabrican un total de 30 celdas de corrosión, quince para el intervalo de pH [6-8] y quince para el intervalo de pH [12-13].

Las disoluciones acuosas utilizadas para las celdas de estudio que se encuentran dentro del intervalo de pH [6-8], se realizan con agua destilada.

Las celdas de corrosión cuyo pH se encuentra en el intervalo de [12-13], se fabrican del mismo modo que las del otro intervalo de pH, con la salvedad de que los medios acuosos de estas se descarbonatan mediante ebullición. Luego se fabrican las disoluciones saturándolas en Ca(OH)₂ para obtener el pH alcalino y se les añade las correspondientes concentraciones de 0.5, 1 y 3% en NaCl p/p.

La descarbonatación del medio acuoso se realiza para evitar que, en el transcurso del tiempo de medida, el pH descienda por carbonatación. Esta situación se evita además

inyectando un aceite mineral sobre la superficie de la disolución, quedando una fina capa del mismo y aislando la disolución del medio externo.[104, 127, 128].

Las celdas se fabrican con la intención de estudiar la evolución en el tiempo de las distintas calidades de aceros inoxidable en los distintos medios, de una forma natural a lo largo del tiempo y sin forzar su corrosión. Por ello, las técnicas electroquímicas a las que se someten dichas celdas son todas técnicas de tipo no destructivo, como son; la resistencia a la polarización lineal (LPR o R_p), espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y medida del potencial libre de corrosión (E_{corr}).

3.4.2.1 Medias de E_{corr} e I_{corr} en el tiempo.

Durante el transcurso de 953 días, la frecuencia de medidas se establece en una vez cada mes, a excepción del primer mes, durante el cual se realizan medidas transcurridos cuarenta minutos, 24 horas, 7, 15 y 31 días. Otra excepción se produce a partir de los dos años, que dejan de realizarse medidas mensuales y pasan a ser semestrales.

Con la medida de la resistencia a la polarización lineal, se obtiene el valor de E_{corr} , el cual se obtiene de forma directa al detectar el potencial libre en la R_p y el valor de la I_{corr} , que se obtiene a partir de la ley de Stern y Geray, como se indica en la ecuación 25.

El valor de la constante B que se utiliza es la del acero al carbono, siendo dicho valor de 26 mV [32, 104, 127-129].

La validez de dicha constante para el acero inoxidable se comprueba mediante gravimetría a partir de la ley de Faraday como se muestra en resultados en la gráfica 18, donde el cálculo de la pérdida de material de los aceros mediante gravimetría se enfrenta a lo calculado mediante la ley de Faraday y se representan en la recta $x=y$. La validez de esta constante B, se demuestra si todos los puntos se encuentran en el intervalo del doble o la mitad de dicha recta [32, 130]. Los valores de I_{corr} en $\mu A/cm^2$ y de E_{corr} en mV, son representados frente al tiempo en días para todas las celdas de corrosión. Al mismo tiempo la observación de estas gráficas nos indican la posible actividad o pasividad de las mismas en cada momento, tomando como referencia los valores de I_{corr} que se muestran en la tabla 6 y que han sido extraídos de la RILEM TC 154 [131].

Tabla 6. Niveles de corrosión según el valor de la I_{corr} .

I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Nivel de corrosión
$< \acute{o} = 0.1$	Despreciable
0.1-0.5	Bajo
0.5-1	Moderado
>1	Alto

Todas las barras de acero inoxidable han sido pesadas antes de la fabricación de las celdas de corrosión, y una vez finalizado el período de medida. Este seguimiento se realiza con la intención de calcular la pérdida de material gravimétrica por una diferencia de valor final menos valor inicial, todo ello expresado en gramos. El valor de la pesada final se obtiene tras la limpieza de dichos aceros bajo las indicaciones de una norma específica para ello, la norma es la ASTM G1 03 [132]. En ella se describe cómo se debe realizar la limpieza electrolítica más adecuada de los productos de corrosión, evitando de este modo que la pérdida de material sea producida por el ataque del mismo proceso de limpieza. Para el acero inoxidable se especifica el uso de disoluciones de un 10% de HNO_3 (con una pureza del 70%). El material a limpiar debe ser introducido en esta disolución a $60^\circ C$ durante 20 minutos, a los cuales se les ha restado dos minutos que hemos empleado en introducir el sistema dentro de un ultrasonido, previos a la extracción de la muestra fuera de la disolución. Una vez finalizado el paso por el ultrasonido, el ciclo de limpieza concluye introduciendo las barras en un vaso con agua destilada, y posterior secado rápido con un secador. El número de ciclos debe ser en función de la pérdida de material que se vaya produciendo en cada ciclo de lavado, siendo la tendencia ideal de lavado la que se indica en la siguiente figura

y donde será el punto B, correspondiente al que se tome como valor de pesada final del acero y con ello poder calcular la pérdida de material gravimétrica.

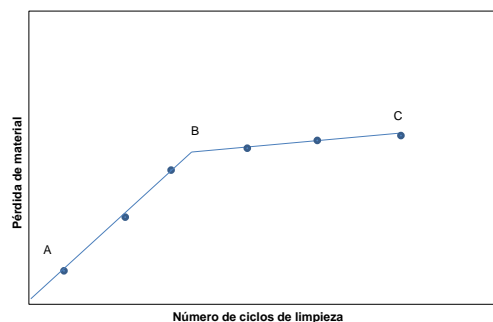


Figura 34. Seguimiento ideal de ciclos de limpieza.

La corrosión que se produce en las barras corrugadas que estudiamos, es debida principalmente a la presencia del ión cloruro. La presencia de dicho ión desemboca mayoritariamente en la formación de un tipo de corrosión localizada y específicamente por picaduras.

A lo largo del estudio de las celdas de corrosión se obtienen valores de I_{corr} ($\mu A/cm^2$) con respecto al tiempo en días. Con esta representación se puede calcular la I_{corr} acumulada, es decir el área bajo la curva que existe cuando se representa I_{corr} vs tiempo, calculada mediante la siguiente integral:

$$I_{corr\ acumulada} = \int_0^t I_{corr}(t) * dt \quad \text{Eq. 54}$$

Siendo t = tiempo en días y n el número de medidas de I_{corr} realizadas. El cálculo de la I_{corr} acumulada se obtiene mediante el método de Simpson a partir del sumatorio siguiente:

$$\sum_{n=0}^n \left(\left(\frac{icorr_{n+1} + icorr_n}{2} \right) (t_{n+1} - t_n) \right) \quad \text{Eq. 55}$$

Una vez que se tiene el valor de I_{corr} acumulada, durante el tiempo de medida, se puede pasar éste parámetro a otro que se denomina velocidad de corrosión o V_{corr} . Dicho parámetro representa la pérdida volumétrica de metal por unidad de área y unidad de tiempo y habitualmente se expresa en milímetro por año (mm/año).

La V_{corr} se obtiene a partir de la corriente de corrosión I_{corr} , en $\mu A/cm^2$, a través de la ley de Faraday y la densidad del metal. Para el acero al carbono, $1 \mu A/cm^2$ es equivalente a una velocidad de corrosión de 0.0116 mm/año para un ataque uniforme.

$$V_{corr} \text{ (mm/año)} = 0.0116 I_{corr} \text{ (}\mu A/cm^2\text{)} \quad \text{Eq. 56}$$

Se define la penetración del ataque P_x , como la pérdida de radio de la barra en un cierto momento del período de propagación (t_p) [131].

La representación de los valores de I_{corr} frente al tiempo, nos permite el estudio de la penetración del ataque P_x , como se encuentran desarrollado en la RILEM TC 154-EMC "Electrochemical Techniques for measuring Metallic Corrosion" [131].

$$P_x \text{ (mm)} = 0.0116 * I_{corr\ acumulada} * t_p = V_{corr} * t_p \quad \text{Eq. 57}$$

Por otro lado, y para el caso de corrosión localizada, se debe tener en cuenta el denominado factor de picadura que se representa por α y que se utiliza para compensar el error cometido por la existencia de una corrosión de tipo localizada en lugar de una uniforme u homogénea.

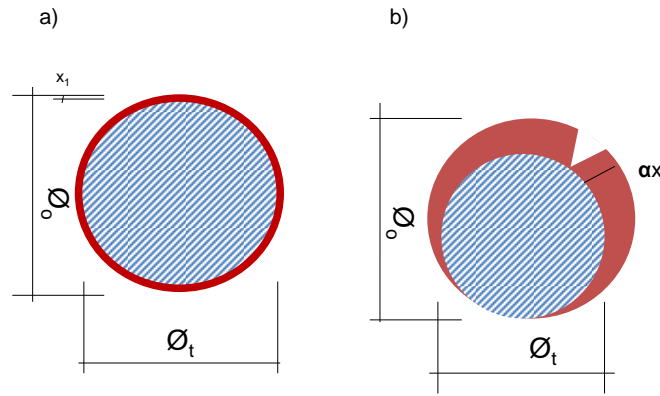


Figura 35. Penetración del ataque. a) Corrosión uniforme. b) sección residual en el caso de la formación de un ataque localizado mediante picadura.

$$\alpha = P_{pit} / P_x \quad \text{Eq. 58}$$

Donde P_{pit} es la profundidad máxima producida por una picadura, la cual se calcula mediante la ecuación 59, multiplicada por el factor α .

$$P_{pit} = P_x * \alpha = V_{corr} * t_p * \alpha = V_{pit} * t_p \quad \text{Eq. 59}$$

Por lo tanto, cuando la corrosión es localizada, puede calcularse también mediante el producto de V_{corr} , de una corrosión uniforme por un factor α de corrosión localizada.

Cuando el acero se encuentra embebido dentro del hormigón, el valor de α puede variar desde el valor de 3 hasta un número mayor a 10 [133-135].

Para el caso de corrosión uniforme el utilizado suele ser $\alpha=2$, sin embargo, se utiliza $\alpha>3$ para el caso de varias picaduras dispersas y no profundas y el valor de diez o más, se utiliza cuando la corrosión es muy localizada formada por picaduras profundas.

Por otro lado la pérdida de diámetro de la barra puede ser calculada según la siguiente ecuación [131].

$$\Delta\varnothing_x \text{ (mm)} = \varnothing_o - \varnothing_t = P_x * \alpha \quad \text{Eq. 60}$$

Donde \varnothing_o , corresponde al diámetro inicial de la barra, y $\Delta\varnothing_x$ es la pérdida de diámetro después de un cierto período t de corrosión.

Con la intención de situarnos del lado de la seguridad y sabiendo que la corrosión que predomina en nuestro trabajo de investigación es la corrosión por cloruros que principalmente degenera en la formación de picaduras, se utiliza el valor de $\alpha=10$.

3.4.2.2 Medidas de impedancias

Se realizan medidas de impedancia con el objeto de obtener información sobre la evolución de la superficie de los aceros en los distintos medios de estudio, la evolución

de la rugosidad, la interfase disolución/capa pasiva, así como la interfase capa pasiva/metal base, todo ello, a lo largo del tiempo puesto que es una técnica no destructiva que permite adquirir información, sin que por ellos se vea afectado el electrodo de trabajo. La frecuencia temporal de medida es; inicialmente, 1, 12 y 24 meses y se aplican a ambas muestras que constituyen las celdas m_1 y m_2 .

Las medidas de EIS se aplican en un rango de frecuencias que va desde 10 kHz a 10 mHz. De cada medida de impedancia se obtienen diagramas de Nyquist, representando Z' vs $-Z''$, diagramas de Bode, representando $|Z|$ frente a la frecuencia en Hz, y $|\varphi|$ frente a la frecuencia en Hz, donde $|Z| = \sqrt{(\text{Re}^2(Z')) + (\text{Im}^2(-Z''))}$ y $|\varphi| = \text{atan}(\text{Im}/\text{Re})$.

Para el estudio de la consistencia de los resultados adquiridos mediante EIS, se utilizan las relaciones de Kramer-Kroning. Dichos ajustes se realizan mediante el software NOVA 1.11, que se utiliza simultáneamente para los ajustes de los datos a un circuito equivalente.

Además, la consistencia de los datos se complementa con una ecuación estadística que se muestra a continuación y donde, para demostrar dicha consistencia, ningún valor de ΔZ debe superar el 3% [119, 120]:

$$\Delta Z = \frac{100 * \sum_{x=1}^N |Z_{exp}(x) - Z_{K-K}(x)|}{N * Z_{max}} \quad \text{Eq. 61}$$

Donde $|Z_{exp}(x) - Z_{K-K}(x)|$ representa la diferencia en valor absoluto entre el valor experimental de impedancia ($Z_{exp}(x)$) y el calculado mediante las transformadas de K-K ($Z_{K-K}(x)$). Finalmente, Z_{max} representa el valor máximo de la impedancia obtenida.

Tras la demostración de la consistencia de los datos experimentales, se simula un sistema eléctricamente y con una visión simplista por la combinación de distintas resistencias y condensadores, que intentan reproducir el comportamiento del mismo ante la señal de entrada o perturbación. Todas las medidas de EIS, tanto las que se realizan en el intervalo de pH [6-8] como las que se realizan en el intervalo pH [12-13] se ajustan al mismo circuito equivalente, como el que aparece en la figura 36.

El significado físico del circuito equivalente elegido viene dado por la constitución a altas frecuencias de la constante de tiempo (R_1 , CPE_1), asignados a las zonas cubiertas con la capa pasiva (capa de óxido) y representado por la admitancia de la capa pasiva en CPE_1 y la resistencia de la misma R_1 . Por otro lado, la constante de tiempo a bajas frecuencias se relaciona con las zonas de picaduras activas o defectos en la capa pasiva y se representa por la resistencia a la transferencia de carga R_2 y

por la admitancia asociada con la capacidad de la doble capa en las áreas activas CPE_2 [43, 80, 81, 84, 85, 120, 136].

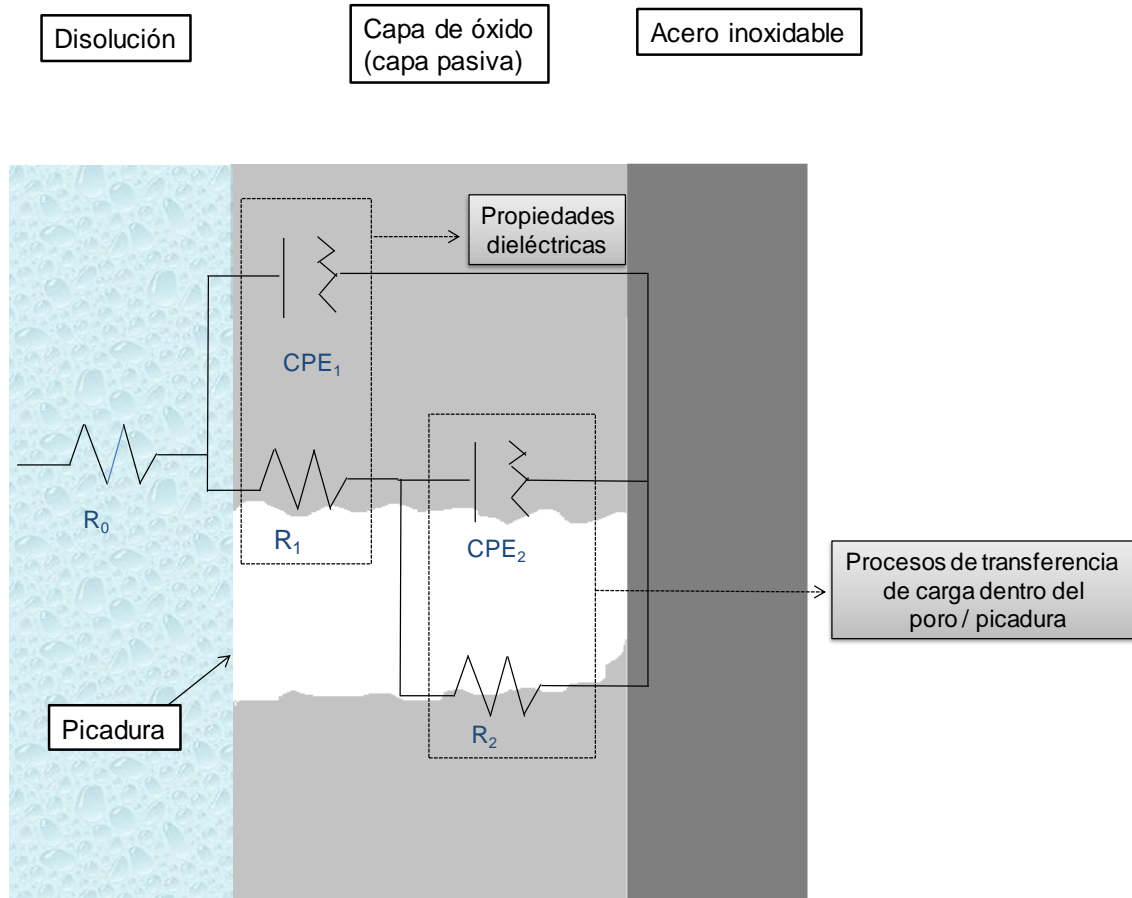


Figura 36: Circuito equivalente al que se ajusta todas las medidas de EIS.

Dicho circuito equivalente está constituido por tres resistencias (R_0 , R_1 y R_2) y dos elementos de fase constante (CPE_1 y CPE_2). La figura del elemento de fase constante (CPE) es un elemento del circuito no convencional que surge como respuesta a la desviación con respecto al comportamiento capacitivo ideal, de los sistemas reales. Existen varias explicaciones físicas para el comportamiento del elemento CPE, la principal es que compensa la rugosidad del electrodo que modifica la distribución de carga de la doble capa y por tanto su impedancia.

El CPE es una función empírica de admitancia y la expresión que representa su impedancia viene dada por la ecuación 62.

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0 (j\omega)^n} \quad \text{Eq. 62}$$

Donde Y_0 es una constante que representa un número real y es independiente de la frecuencia. Se representa en $(\Omega^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^n)$ o bien en $(\mu\text{Fcm}^{-2}\text{s}^{1-n})$. El parámetro n es adimensional y se encuentra entre el intervalo de valores $0 \leq n \leq 1$ y está relacionado

con la amplitud de la distribución del tiempo de relajación [137]. Cuando n es igual a uno, el CPE se convierte en un capacitador ideal.

3.5 Ensayos de laboratorio en probetas de mortero.

3.5.1 Probetas de mortero con cloruros en su composición y estudio de par galvánico.

Por cada calidad de acero inoxidable se realizan tres probetas de mortero con dimensiones $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$. Cada una de estas probetas se fabrica con un mortero normalizado y diferentes concentraciones de cloruros y se obtienen un total de 15 probetas, 3 por cada calidad de acero inoxidable. Cada una de estas amasadas se realiza con una relación agua cemento de 0.5. El cemento utilizado es un CEM I 52.5 R y la arena utilizada es una arena normalizada del IETcc. Por último, el cloruro que se añade es en forma de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en las amasadas y cuyas concentraciones son de 1, 2 y 3% en p/p de cloruro con respecto al peso de cemento.

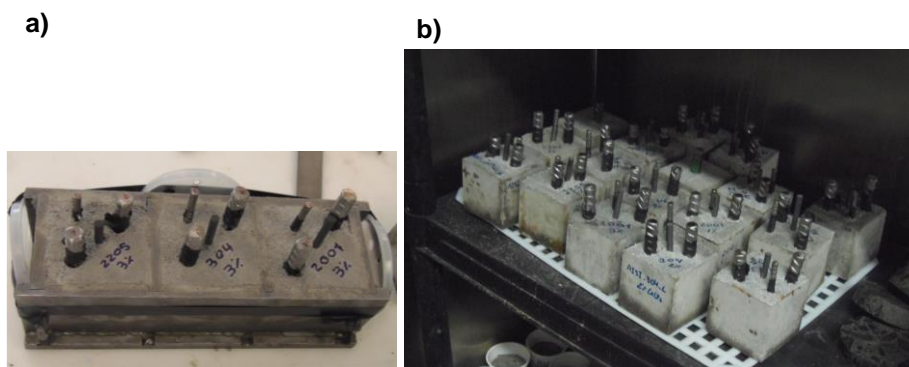


Figura 37. a) Imagen de probetas de mortero dentro del molde, justo antes de ser desmoldadas tras 24 horas. b) imagen de probetas de mortero desmoldadas en cámara húmeda durante 28 días de curado.

Cada probeta está constituida por dos barras de acero inoxidable de 10 cm de longitud y 12 mm de diámetro de la misma calidad y distinta colada, además se le inserta una barra de acero al carbono de la misma longitud y una barra de grafito, con la intención de que esta última, actúe como contraelectrodo cuando, a lo largo de su estudio, se apliquen técnicas electroquímicas. En el caso de estudios de probetas, hay que tener en cuenta que el mortero es el medio electrolítico, debido a que se considera al mortero como un material amorfo pero poroso y dentro de los mismos se encuentra agua e iones. Las barras corrugadas son el electrodo de trabajo y que junto al electrodo de referencia de Ag/AgCl constituyen una celda electroquímica básica de tres electrodos.

Todas las barras se limpian y pesan previamente, pensando en una futura pesada y cálculo de pérdida de material por gravimetría. Antes de introducirse en el mortero se

encintan fuertemente, dejando al descubierto un área lateral conocida de 27.4 cm^2 para la barra de acero inoxidable y de 13.2 cm^2 para la barra de acero al carbono. Una barra es designada como muestra (m_1) y otra como muestra (m_2).

Las probetas se fabrican y se introducen en una cámara húmeda de un 95 % de HR. Transcurridas 24 horas, estas se desmoldan y se vuelven a introducir de nuevo en cámara húmeda, pero esta vez durante un período continuo de 28 días con la intención de llegar a un máximo de endurecimiento de dicho mortero.

Trascurridos los 28 días de curado, las probetas se extraen de la cámara húmeda y se encuentran dispuestas para aplicarles técnicas electroquímicas no destructivas como son la medida del potencial libre de corrosión (E_{corr}), la resistencia a la polarización lineal (R_p) y a partir de ella, obtener los valores de I_{corr} a lo largo del tiempo.

Desde este momento y hasta el final de sus medidas, las probetas se colocan en una cámara húmeda fabricada en el laboratorio, donde las probetas no se encuentran sumergidas en agua, pero la humedad relativa suele encontrarse por encima del 60% H.R.

Todas las medidas se realizan de forma natural y sin acelerar ningún proceso, durante un período de 887 días.

Paralelamente, se estudia la posibilidad de generarse un par galvánico entre la barra de acero al carbono y la barra m_1 de acero inoxidable dentro de cada una de las probetas. Ambas se encuentran en una disposición paralela una con respecto de la otra.

La corrosión galvánica ocurre cuando dos metales diferentes se encuentran conectados eléctricamente y a su vez, conectados mediante un electrolito. Se produce el flujo de una corriente desde el metal más anódico hacia el metal más catódico o más noble a través del electrolito. Este tipo de corrosión ocurre en ocasiones, cuando se combinan aceros inoxidables con aceros al carbono en determinadas uniones, por lo que resulta importante la selección de dichos metales, seleccionando metales igual de nobles o lo más parecido al metal base. Aunque este tipo de corrosión no resulta ser un problema muy habitual en los aceros inoxidables, se intenta evitar impidiendo el flujo de corriente y la conexión electrolítica entre ambos, por ejemplo cubriendo el más noble con pinturas u otros recubrimientos [33].

Para el estudio de la existencia o no de par galvánico, en cada probeta se conectan la barra de acero al carbono y la barra m_1 de acero inoxidable entre si. Para ello, cada barra lleva pinzada un cocodrilo metálico con un cable que conecta a una resistencia en paralelo de 1 ohmio, la misma para ambos. Esta resistencia se encuentra alojada en el interior de la tarjeta de un equipo de lectura continua, denominado “data logger”,

el cual mide el potencial entre los extremos de la resistencia y que existe entre ambas barras. La frecuencia de medida es de una medida cada quince minutos.

A partir de los valores de potencial registrados, el valor de la resistencia (1Ω) y utilizando la ley de Ohm, se obtienen los valores de intensidades registrados a lo largo del tiempo en Amperios, obteniendo un registro en continuo de intensidad que existe entre ambos aceros. El objetivo de este sistema es conectar la barra de acero al carbono con la barra de acero inoxidable para de este modo, en el hipotético caso que el acero al carbono ceda electrones actuando como ánodo, lleguen a la barra de acero inoxidable y este actuara como cátodo. Con esta conexión, se puede observar si la barra de inoxidable que está conectada se corroe o no se corroe con respecto a la otra barra que no se encuentra conectada a nada y se cuantifica la I_{corr} . Por otro lado, la barra de acero al carbono debería corroerse por la presencia de cloruro en el medio, además de por el supuesto par galvánico. Estas medidas se realizan en continuo durante el mismo tiempo que se estudian las probetas, es decir, 887 días.

El sistema estudiado se muestra en la figura 39, suponiendo que es el acero al carbono sea el que se comporte como ánodo y el acero inoxidable de refuerzo como cátodo que sería el caso de la formación de un supuesto par galvánico.

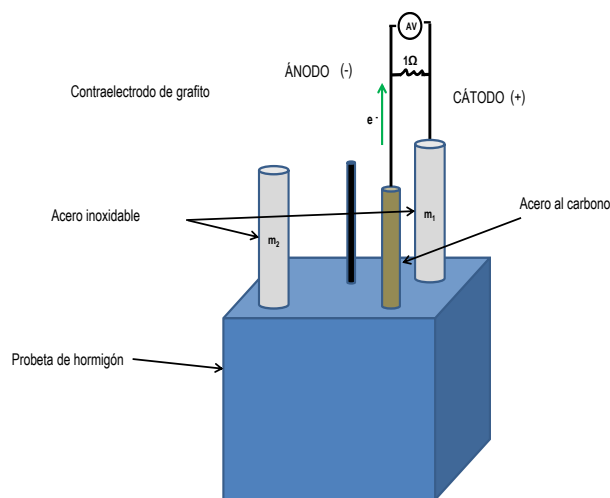


Figura 38. Sistema de estudio de par galvánico

Se obtienen gráficas de intensidad versus tiempo para todas las probetas a lo largo del tiempo.

$$I = \frac{E}{R} \quad \text{Eq. 63}$$

Donde, E es el potencial en voltios que registra el equipo datalogger, R es la resistencia en Ohmios y finalmente I es la intensidad de corriente en Amperios que se calcula y que se representa frente al tiempo de medida.

3.5.2 Concentración límite de cloruros

Se realizan otros ensayos sobre probetas de mortero, independientes a las del apartado anterior, con la intención de obtener una concentración crítica de cloruros a partir de la cual se consiga la despasivación total de las distintas calidades de aceros inoxidables de refuerzo.

La metodología elegida se basa en un ensayo electroquímico acelerado de penetración de cloruros, el cual se encuentra descrito en la norma UNE 83992-2 EX, titulada “Ensayo de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 2: Método del Integral acelerado”.

3.5.2.1 Generalidades del método

La norma que se toma como referencia, tiene por objeto describir un método de ensayo para determinar los efectos de la composición de la mezcla del hormigón (tipo de cemento, adiciones minerales, aditivos, etc...) sobre la resistencia a la penetración de los iones cloruros, definida por el coeficiente de difusión en estado estacionario y el tiempo hasta la despasivación, la concentración crítica de estos iones que provocan la corrosión de la armadura y el progreso de la corrosión de la armadura, mediante la medida de la velocidad de corrosión.

El ensayo consiste en exponer una probeta de hormigón, en la que se ha embebido transversalmente una barra de acero, a una corriente eléctrica por medio de dos electrodos, uno colocado en una disolución con cloruro sódico que se ha introducido en un recipiente cilíndrico que se pega en una cara de la probeta cúbica de hormigón, y el otro electrodo colocado en la cara opuesta. Los iones cloruro penetran de forma acelerada debido a la acción del campo eléctrico y migran desde el recipiente hasta el electrodo en la cara opuesta, encontrando en su camino al acero inoxidable y desencadenando la corrosión [138].

3.5.2.2 Modificaciones para evitar la polarización

El sistema utilizado es el mismo que se describe en la norma, debido a que este favorece la entrada de cloruros de forma acelerada y a través de la probeta, pero se realiza una pequeña modificación en el mismo. Esta consiste simplemente en cubrir completamente la barra de refuerzo que se pretende estudiar con resina epoxi, dejando al descubierto un pequeño rectángulo de 2 x 1 cm² el cual, al introducir la barra dentro de la probeta, nos aseguramos que la ventana queda justo debajo de la cara por donde el cloruro entra en la probeta. Si la barra no se encuentra cubierta a lo largo del ensayo podría sufrir polarización [94] y con esta modificación se pretende

evitar que durante el ensayo, la corrosión se produzca mediante polarización y consiguiendo que la razón principal por la que las barras se despasiven sea mayoritariamente debido a la concentración de cloruros existentes en las proximidades de la misma. A continuación, se muestra un esquema general del ensayo.

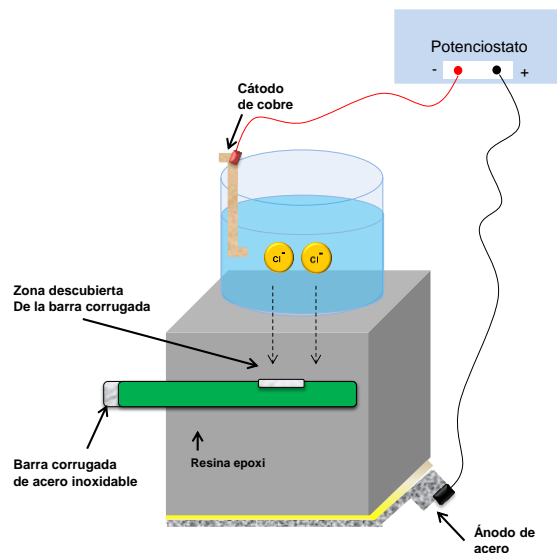


Figura 39. Esquema general del sistema de ensayo.

Cada probeta tiene un tamaño de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ y están constituidas por un mortero con una relación agua/ cemento de 0.5 y un cemento del tipo CEM I 42.5 R/SR.

Se realizan tres lotes de ensayos. Cada lote está constituido por una probeta de cada calidad de acero inoxidable, que son cinco tipos, más una gemela, por lo que se ensayan un total de 10 probetas por cada lote y se dispone de un total de 6 probetas de cada calidad de acero inoxidable si se tienen en cuenta los tres lotes.

Cada día las probetas se desconectan y una hora después, mediante el método no destructivo de la resistencia a la polarización lineal, se obtienen E_{corr} e I_{corr} . De este modo se puede obtener un seguimiento diario de la probeta sin afectarla.

Esta norma que habitualmente se aplica al estudio de barras de aceros al carbono, indica que el ensayo finaliza cuando la E_{corr} alcanza -300 mV . Esta directriz se sigue para algunas probetas del lote 1, sin embargo, se concluye que no tiene sentido romper la probeta cuando se alcanza este valor de E_{corr} , debido a que no se observa ningún indicio de corrosión cuando se alcanza este valor. Esta consecuencia esperada, aunque comprobada experimentalmente, se debe a la gran resistencia que los aceros inoxidables presentan junto con el medio alcalino y bajas concentraciones de cloruros como puede demostrarse a lo largo del desarrollo de este ensayo.

El voltaje aplicado en el sistema es el que la norma indica, 12 V . Para cada calidad de acero inoxidable se obtienen valores de I_{corr} frente al número de horas de aplicación de dicho potencial. A medida que transcurre el tiempo el nivel de cloruros cerca de la

barra va aumentando y el valor de la I_{corr} también. Cuando el valor de la I_{corr} supera por primera vez $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, una de las probetas gemelas se rompe para ver si la barra de refuerzo se ha corroído. Sin embargo, la otra probeta no se rompe y se sigue midiendo cada día, pero sin aplicarle potencial. Si la I_{corr} se mantiene por encima o próxima a $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, durante un mínimo de 10 días, el ensayo y seguimiento de esta segunda probeta finaliza y se rompe. Sin embargo, si la I_{corr} durante estos diez días de apagado, adquiere valores por debajo de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, significa que a pesar de la concentración de cloruros existentes en las proximidades de la barra el acero inoxidable ha podido repasivarse. Si esto ocurre la probeta vuelve a conectarse y se continúa el proceso anteriormente descrito.

Una vez que la I_{corr} se mantiene en valores que indican despasivación permanente durante diez días al menos, la probeta se rompe y se toman muestras del mortero. Una primera muestra, se toma de la zona de la superficie, en la cara por donde se ha forzado la entrada de los cloruros y una segunda y la más importante, en la cuna de la barra de acero, es decir, la zona cercana que rodea la barra. Con esta última muestra se pretende obtener un valor límite de cloruros totales, en % en peso de cemento, necesarios para despasivar cada una de las calidades de acero inoxidable.

La cantidad de cloruros totales se determina mediante un método potenciométrico de determinación de cloruros que se describe en la norma UNE 80213 y se determinan cloruros totales y no libres, debido a que la metodología de ensayo de esta última requiere de una gran cantidad de muestra, la cual no es posible extraer del lugar de interés como es la cuna de la barra.

Finalmente, las barras corroídas se observan mediante lupa binocular, antes y después de ser decapadas.

Los parámetros de interés para el estudio son en un primer lugar la I_{corr} que se aproxima o supera los $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ que denominaremos I_{corr} de despasivación ($I_{\text{corr des p}}$), el tiempo en horas de aplicación de potencial para que esta I_{corr} se alcance, que se denominará tiempo de despasivación (t_{desp}), la I_{corr} que se mantiene en el tiempo, cuando el sistema se mantiene apagado que se denominará I_{corr} de despasivación permanente ($I_{\text{corr des perm}}$) y las concentraciones críticas de cloruros totales, en tanto por ciento en peso de cemento, que se encuentran en la zona de la cuna de la barra que es el objetivo principal de este ensayo y se denomina concentración crítica de despasivación [$\text{Cl}^-_{\text{crit desp}}$].

Además, cuando la probeta se rompe, una de las mitades es sometida al ensayo colorimétrico del AgNO_3 el cual consiste en pulverizar en la zona interna de la mitad dicho compuesto y el cambio de color del mortero indica hasta donde ha llegado el frente de cloruros, es decir, si justo llegó a la superficie de la barra, si la traspaso e

incluso si llega hasta el final de la probeta y la traspasa por la gran resistencia a la corrosión por cloruros que presente la barra de acero inoxidable.

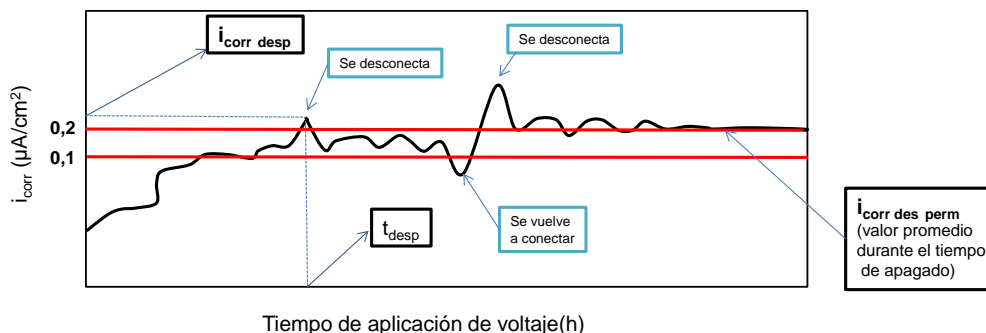


Figura 40. $i_{corr\ des}$, t_{desp} , e $i_{corr\ des\ perm}$, para una probeta.

3.6 Ensayos de grandes componentes de hormigón situados en el mar.

La experiencia demuestra la necesidad de realizar ensayos reales en estructuras ya que la extrapolación de los ensayos acelerados de laboratorio o en condiciones reales, puede en algunos casos marcar diferencias debido a la aparición de factores como la generación de fisuras, la complejidad del propio hormigón frente al uso de un mortero en laboratorio, condiciones ambientales, etc...

3.6.1 Preparación de material para la fabricación de los componentes.

Se diseñan dos probetas de hormigón de gran tamaño con una base cuadrada de 50 x 50 cm², una altura de 200 cm y se les denomina bloque A y B.

Los bloques se realizan con un hormigón que permita un rápido ingreso de los cloruros (alta relación agua/cemento) con el fin de ver diferencias a corto plazo.

Para la fabricación de estos grandes bloques se utiliza un cemento CEM I 42.5R/SR y las características y composición del hormigón que los constituye se adjuntan en la siguiente tabla:

Tabla 7. Dosificación de los bloques de gran tamaño.

Dosificación real (para una amasada de 1 m ³)							
Cemento (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Grava ₁ (kg)	Grava ₂ (kg)	Aditivo (%)	Adición (kg)	a/c
350	153	856	440	592	1.5	-	0.44

Tabla 8. Resultados de ensayo de hormigón fresco.

Ensayos de hormigón fresco				
Cono (cm)	Densidad (kg/m ³)	A.O. (%)	T _{AMBIENTE} (°C)	T _{HORMIGÓN} (°C)
16	2361	3.2	14.0	17.6

La fabricación y el hormigonado se realizan en la planta que Cementos Portland Valderrivas tiene situada en Sevilla.

Dentro de cada bloque de hormigón se introducen, además de una armadura de acero al carbono, barras de 1.60 cm de longitud de los distintos aceros inoxidables austenítico y dúplex. Con la intención de medir exclusivamente la evolución de las distintas barras de acero inoxidable, estas y la armadura de acero al carbono se encuentran separadas entre ellas por un material aislante.

A continuación, se describe brevemente el proceso de su preparación en el IETcc y su posterior fabricación en Cementos Portland Valderrivas.

Se adquieren unos cables resistentes al agua de mar, en cuyo extremo se encuentra una conexión macho para evitar que los pines se encuentren exteriores y un tapón especialmente diseñado para aislar la conexión del agua del mar. De este modo, se impide la entrada de los cloruros en la armadura a partir del cable. Estos cables se sueldan a los extremos de cada una de las barras de acero inoxidable.

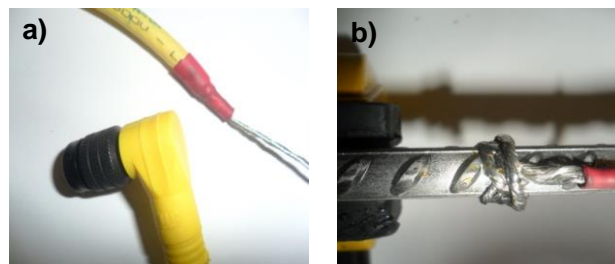


Figura 41. a) Cable resistente al agua de mar. b) Soldadura cable barra de acero inoxidable.

El siguiente paso consiste en pintar con resina epoxi la zona soldadura/cable y un poco más de cada extremo. Esta resina es aplicada con una doble función, por una parte; proteger el cable del agua de mar para impedir la entrada de los cloruros a través del cable y por otra, proporcionar consistencia a la zona de soldadura. Finalmente, cada una de estas uniones se cubre fuertemente con cinta aislante desde el cable hasta la barra de acero inoxidable.

Una vez realizado los pasos anteriores, las barras se encuentran preparadas para ser introducidas dentro de los moldes que se rellenan de hormigón para constituir los bloques.

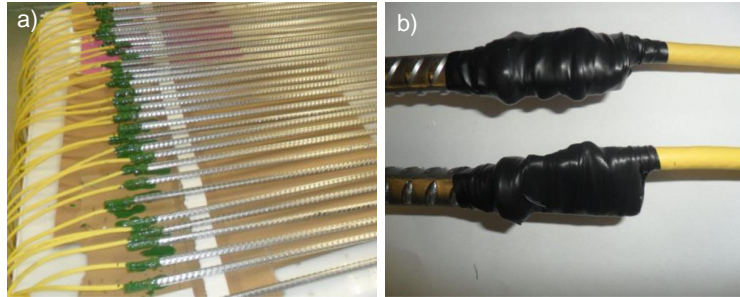


Figura 42. a) Zonas de intersección cable/barra pintadas con resina epoxi. b) Intersección encintada.

Como se indica en el inicio de este apartado, el montaje de la ferralla de acero al carbono que constituye el esqueleto de los bloques, la amasada de hormigón junto con el curado del mismo y el traslado de los bloques, se realiza en la planta que Cementos Portland Valderrivas tiene en Sevilla.

Las barras de acero inoxidable se sostienen a la armadura de acero al carbono mediante bridas y se aíslan eléctricamente colocando tubos aislantes justo en las zonas donde la armadura de acero al carbono toca con las barras de acero inoxidable. Las barras de aceros inoxidables, se disponen en las distintas caras de la armadura de acero al carbono que serán las futuras caras de los bloques. Cada cara tiene una calidad distinta de acero inoxidable, excepto una de ellas que contiene las dos calidades de austeníticos de forma alterna. A continuación, se muestra una figura con la disposición de las barras en las caras de los bloques de gran tamaño.

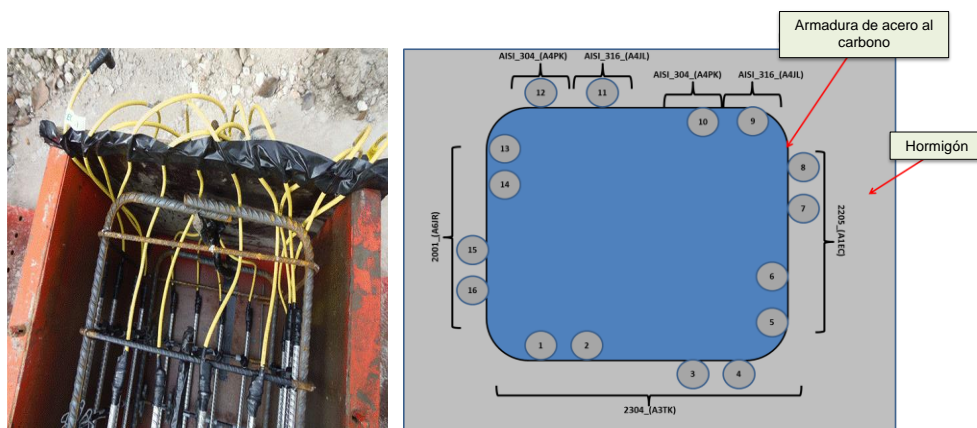


Figura 43. Disposición de los aceros inoxidables dentro de los bloques de gran tamaño.

Todo el sistema, se introduce dentro de los moldes o encofrados y estos se rellenan con hormigón. Previo al hormigonado se sacan los cables fuera del molde. De este

modo se hace posible realizar un seguimiento futuro de la corrosión de estas armaduras de acero inoxidable mediante medidas electroquímicas.

Transcurrido todo el proceso anterior, los bloques se mantienen en la planta un mínimo de 28 días para llegar a un endurecimiento y curado del mismo. Trascurrido este período, los bloques se desmoldan y se trasladan al mar. Estos se sitúan en la zona de carreras de mareas de una playa ubicada en la zona del puerto de Huelva.

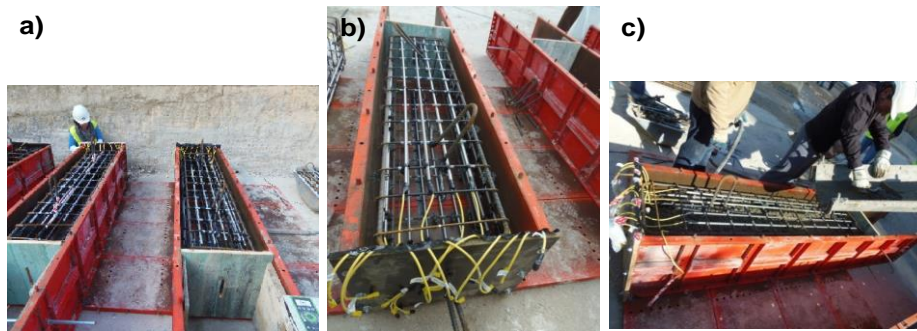


Figura 44. a) y b) Colocación de barras y cableado exterior antes de hormigonar. c) Hormigonado.

Tras la colocación de los bloques en el mar se realizan medidas electroquímicas que nos permiten obtener valores de resistividad del hormigón, densidad de corrosión (I_{corr}) y potencial libre de corrosión (E_{corr}). Estas medidas “in situ” se realizan, mediante un equipo denominado GECOR, equipo patentado por el Departamento de Seguridad y Durabilidad Estructural del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.



Figura 45. Situación de los bloques de gran tamaño en Huelva.

Este equipo se utiliza para determinar distintas medidas electroquímicas en estructuras reales. El método por el cual GECOR realiza dichas medidas es un método galvanostático [139, 140]. Este equipo calcula la R_p , mediante el confinamiento de una corriente de polarización aplicada cuando el área de estudio no es específica. La corriente se confina a partir de un contraelectrodo secundario que rodea todo el sensor

denominado “anillo de guarda” y que establece un área específica y conocida. El anillo de guarda se modula por dos electrodos de referencia gemelos, S_1 y S_2 , localizados entre un contraelectrodo central (CE) y el anillo de guarda. Estos electrodos se utilizan para contrarrestar el campo eléctrico requerido y controlan permanentemente el anillo externo a partir de la detección de las líneas de corriente que llegan del contraelectrodo (CE), con el fin de ajustarlos con el área predeterminada de diámetro D .

El método promueve una delimitación eléctrica del área en sustitución de la indeterminación de un área en una estructura. El cálculo de la R_p se realiza de forma directa a partir del radio AE/AI , multiplicado por el área de la superficie del acero.

Este método es muy utilizado para el estudio de ataques localizados en estructuras, debido a que tiene la capacidad de delimitar el área y por lo tanto es posible reducir el error inherente que se produce en el estudio de estructuras con corrosión muy localizada, donde debido a esto, las corrientes del campo eléctrico aplicado no son homogéneas y por lo tanto inducen a error en la medida de la I_{corr} . Sin embargo, este error no se produce con el GECOR precisamente por su capacidad para confinar el campo eléctrico aplicado, siendo capaz de indicar la transición de una región activa a una pasiva [141].

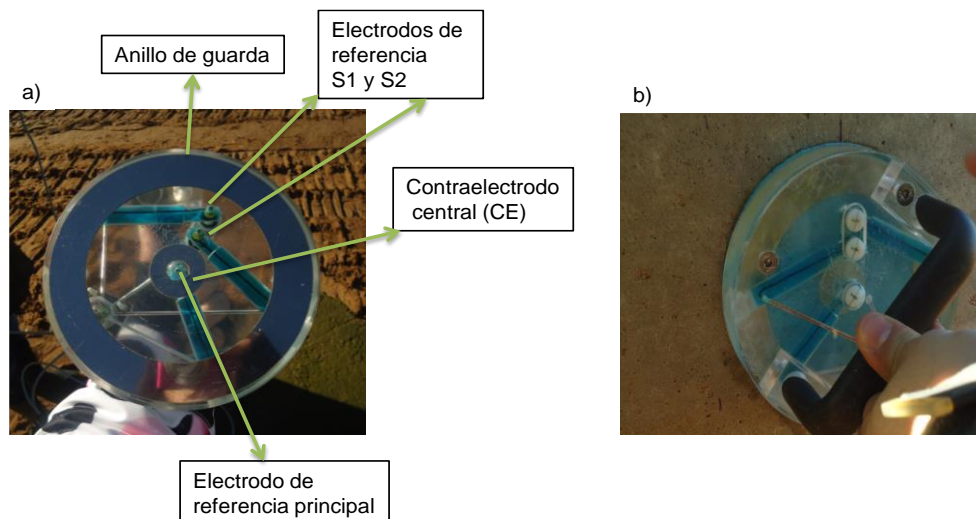


Figura 46.a) Sensor del GECOR. b) Sensor de GECORR midiendo “in situ”

Para la evaluación de los valores de las medidas electroquímicas hay que tener en cuenta que el electrodo de referencia del GECOR es un electrodo de $Cu/CuSO_4$, que con respecto al electrodo de referencia de hidrógeno existe una diferencia de $E=0.318V$, cuando el electrodo es saturado con un coeficiente de temperatura de $-0.9mV/^\circ C$. Las medidas electroquímicas se realizan a lo largo de casi tres años, exactamente durante 907 días, con espacios de medidas entre 4 y 3 meses, con la excepción de la

última que fue realizada trascurridos 8 meses desde la última medida. En la actualidad y en un futuro se continuarán midiendo.

Otro parámetro que se mide, junto la E_{corr} y la I_{corr} es la resistividad del hormigón de los bloques. Esta variable se relaciona con la durabilidad de una estructura respecto a la corrosión de las armaduras y proporciona información sobre la microestructura, porosidad y humedad del hormigón. La resistividad es una propiedad del material que indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas por lo que la porosidad se puede evaluar por la resistencia al movimiento de las cargas eléctricas (iones) de la fase acuosa de los poros del hormigón [142]. Cuando la humedad es muy baja se obtienen valores de la variable muy elevados.

La resistividad se mide mediante ensayos no destructivos. Existen diversos métodos de medida entre los que se encuentra el método directo [143] y el método de Wenner [144].

Existen dispositivos de medidas portátiles como el resistímetro que se indica en la siguiente figura, cuyo sistema interno se estructura según la medida de dicha variable por el método de Wenner.



Figura 47. Resistímetro portátil. Método de Wenner.

La resistividad que se mide en los bloques de gran tamaño que se sitúan en el mar se realiza mediante un dispositivo portátil similar al de la figura 47, cuando la marea se encuentra tan baja que los deja al descubierto. Estas medidas se realizan con la misma frecuencia que se realizan las medidas de los indicadores de corrosión. Para evaluar dichas medidas se toma de referencia una tabla que establece rangos de resistividad relacionados con el riesgo de corrosión y que se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Rangos de resistividades.

Resistividad del hormigón ($K\Omega \cdot cm$)	Riesgo de corrosión
> 100	Despreciable
-100	Bajo
10-50	Moderado
< 10	Alto

Por otro lado, y aprovechando las visitas a la playa, se extraen testigos de ambos bloques en dos de las visitas. Estos se llevan al laboratorio y se les calcula la cantidad de cloruros totales que presentan a distintas profundidades.

Por último, se fabrican probetas de laboratorio con el hormigón procedente de los bloques de gran tamaño. Estas probetas son utilizadas para realizar diversos ensayos de caracterización del material en el laboratorio. Los ensayos realizados se muestran en el siguiente apartado.

3.6.2 Caracterización del hormigón de los bloques de gran tamaño.

3.6.2.1 Medidas “in situ”

Se extraen testigos de los grandes bloques para estudiar el perfil de concentración de cloruros que existe en el momento de la extracción. Se obtiene una probeta del bloque 1.A transcurridos 94 días, coincidiendo con la segunda visita que se realiza para realizar medidas electroquímicas in situ y se vuelven a extraer testigos coincidiendo con la cuarta visita, obteniendo una probeta del bloque 1.A y otra del bloque 1.B, transcurridos 409 días.

3.6.2.2 Ensayos en el laboratorio del hormigón que constituye los grandes bloques.

- a) Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido. Método multirrégimen.

La velocidad de penetración de los cloruros en el interior del hormigón y consecuentemente, el tiempo que tardan estos en llegar a la armadura embebida, están directamente relacionados con el parámetro denominado coeficiente de difusión, D . Existe el coeficiente de difusión estacionario o D_s que se define como el transporte de cloruros en el hormigón que se produce en condiciones de flujo constante. Por otro lado, también existe el coeficiente de difusión no estacionario o D_{ns} , el cual es un parámetro global que considera simultáneamente el transporte de iones cloruros a través del hormigón, así como la retención de los mismos por las fases sólidas de la pasta de cemento [145]. El ensayo de multirrégimen, mediante el cual se calculan los coeficientes de difusión estacionario y no estacionario de los cloruros cuando atraviesan el hormigón de estudio, es un ensayo acelerado y se realiza según la norma UNE- 83987.

A partir de una probeta de 30 cm x 15 cm de diámetro, se saca un testigo y se obtienen 2 rodajas de 2 cm de grosor por 7.5 cm de ancho para el ensayo de multirrégimen.

El sistema que se utiliza para dicho ensayo está constituido por dos compartimentos entre los cuales se coloca una rodaja de hormigón. En uno de estos se añade una disolución 1M de NaCl y en el otro un volumen medido de agua destilada. El ensayo consiste en aplicar una diferencia de potencial para acelerar el paso de los iones a través de la muestra de hormigón entre los electrodos que se introducen en cada compartimento. La medida consiste en el registro de la conductividad en el compartimento con agua destilada (anolito), ya que la conductividad del agua destilada aumenta debido a la progresiva llegada de cloruros.



Figura 48. Sistema de ensayo para el método acelerado "multirrégimen".

Se calculan los coeficientes de difusión en estado estacionario y no estacionario basándose en el ajuste empírico entre la conductividad y la concentración de cloruros en el compartimento con agua destilada (anolito) que se obtiene conociendo la temperatura.

El coeficiente de difusión en estado estacionario, D_s , se calcula a través de la ecuación modificada de Nerst Plank como se muestra en la siguiente ecuación.

$$D_s = \frac{A * R * T * e}{z * S * F * Cl^- * \gamma * \Delta\phi_{ss}} \quad \text{Eq. 64}$$

Donde D_s es el coeficiente de difusión de cloruros en estado estacionario en cm^2/s , A es la pendiente de la ecuación de regresión lineal del tramo del período de estado estacionario (mol/s), R es la constante de los gases perfectos, en $\text{cal}/\text{mol} * \text{K}$ (1.9872), e es el espesor de la probeta en cm, Z es la valencia del ión cloruro ($z=1$), S es el área superficial de la probeta expuesta a la disolución de cloruros en cm^2 , F es la constante de Faraday en cal/V_{eq} (23060), T es la temperatura media del anolito durante el ensayo en Kelvin, Cl^- es la concentración inicial del cloruro en el catolito en mol/cm^3 , γ es el coeficiente de actividad del ión cloruro de la disolución del catolito ($\gamma=0.657$), $\Delta\phi_{ss}$ es la media de los voltajes efectivos medidos durante el período de estado estacionario en V. Finalizar indicando que el anolito es la disolución en contacto con

una de las caras de la probeta y en la que se sumerge el polo positivo o ánodo. En este método el anolito inicialmente es agua destilada y el catolito es una disolución que toma contacto con la otra cara de la probeta, en la que se sumerge el electrodo negativo o cátodo y en este método de ensayo, el catolito es una disolución de NaCl 1M.

El coeficiente de difusión aparente, o de estado no estacionario D_{ns} , se calcula a través de la ecuación 65, donde t_{paso} es la intersección de la recta de ajuste del tramo de estado estacionario con el eje X según se muestra en la figura 49, e es espesor de la probeta (cm), F es la constante de Faraday en cal/V_{eq} (23060), R es la constante de los gases perfectos, en cal/ mol *K (1.9872), Z es la valencia del ión cloruro ($z=1$), T es la temperatura media del anolito durante el ensayo en Kelvin y $\Delta\phi$ es el campo eléctrico normalizado en (V/cm) cuando se ha medido la caída de potencial entre las dos caras de la muestra durante el ensayo.

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 * t_{paso} * \phi} [cm^2 * s] \quad \text{Eq. 65}$$

$$\phi = \frac{z * F}{R * T} \Delta\phi \quad \text{Eq. 66}$$

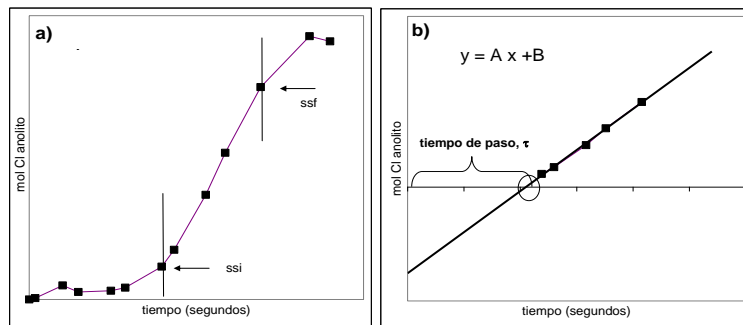


Figura 49. a) Evolución del contenido de cloruros en el anolito (mol) con el tiempo (segundos); b) regresión lineal del periodo correspondiente al estado estacionario y la representación del tiempo de paso (τ).

b) Determinación del coeficiente de difusión de los iones cloruro. Método natural Ponding.

El ensayo de Pounding, se realiza según la norma ASTM-C 1543–02. Con él se obtiene la concentración de cloruros que penetra a distintas profundidades en probetas de hormigón de forma natural, sin provocar la entrada de los mismos.

A partir de una probeta de 30 x 15 cm, se cortan tres lochas de 10 x 15 cm. A cada una de las lochas se les coloca en la cara superior, un tubo de PVC de unos 10 cm de diámetro y se sella con silicona a una de las caras.

Cuando el sistema se encuentra totalmente seco se añade dentro del tubo una disolución de 500 ml que posee una concentración del 3% p/p de NaCl.

Considerándose que esta concentración se aproxima al valor medio de la salinidad existente en el agua de mar. Finalmente, se cubre el sistema completo con una película termoplástica para evitar la evaporación de la disolución y de las paredes laterales de las probetas, según se muestra en la siguiente figura.



Figura 50. Preparación de las probetas para el método natural Ponding.

Se realizan tres ensayos de ponding y se denominan; 1-A1, 1-A2, y 1-A3. Transcurridos 90 días se considera que el ensayo ha finalizado y se procede a la extracción de muestras a distintas profundidades desde la superficie al interior para obtener el perfil de cloruros totales. Por otro lado y como se describe en la norma ISO -1920-11:2013 [146], se calcula el coeficiente de difusión no estacionario (D_{ns}) y la concentración superficial de cloruros en el hormigón mediante la aplicación de la ecuación de la solución de la segunda ley de Fick para un medio semi-infinito.

$$C_x = C_s \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_{ns} \cdot t}} \right] \right) \quad \text{Eq. 67}$$

Donde C_x es la concentración de cloruros a una profundidad x en un tiempo t en % en peso seco de muestra, C_s es la concentración de cloruros en la superficie del hormigón en % en peso seco de muestra, D_{ns} es el coeficiente de difusión en estado no estacionario, erf es la función error de Gauss y t es el tiempo del ensayo.

El cálculo del contenido de cloruros en la superficie de exposición C_s y el coeficiente de difusión en estado no estacionario D_{ns} , ambos se determinan por un ajuste a la ecuación 67, mediante un análisis de regresión no lineal de mínimos cuadrados. Los resultados se representan en una gráfica en cuya ordenada se encuentran las distancias en mm de las distintas profundidades a las cuales se han extraído las muestras y en abscisas las concentraciones correspondientes de cloruros totales, expresadas en % de peso del hormigón.

El ajuste sería del tipo como se muestra en la siguiente figura, no teniendo en cuenta ni el primer punto ni los sucesivos a partir del primer valor que sea cero.

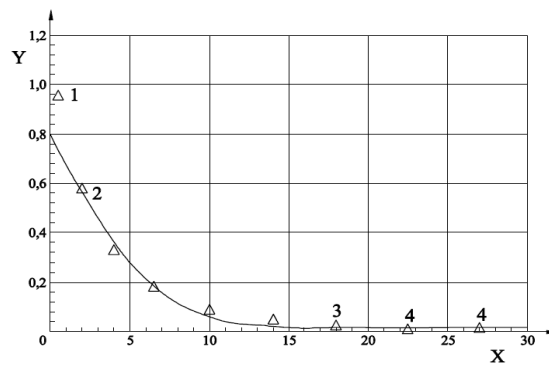


Figura 51. Ajuste para el cálculo de C_s y D_{ns} . Excluyendo el punto 1 y el segundo punto 4 [141].

c) Determinación de la resistividad eléctrica: Método directo

Se disponen de cuatro pequeños testigos de $5 \times 7.5 \text{ cm}^2$, procedentes de la segunda probeta de $30 \times 15 \text{ cm}^2$, estas se observan en la figura 53. Dos de estos testigos se introducen en una cámara húmeda y los otros dos se sumergen en una disolución salina de 3% p/p en NaCl y se les realizan medidas de resistividades a lo largo del tiempo. Las medidas de resistividad se realizan de acuerdo a la norma UNE 83988-1. A continuación se muestra en la figura 52, un esquema del sistema de medida mediante el método directo.

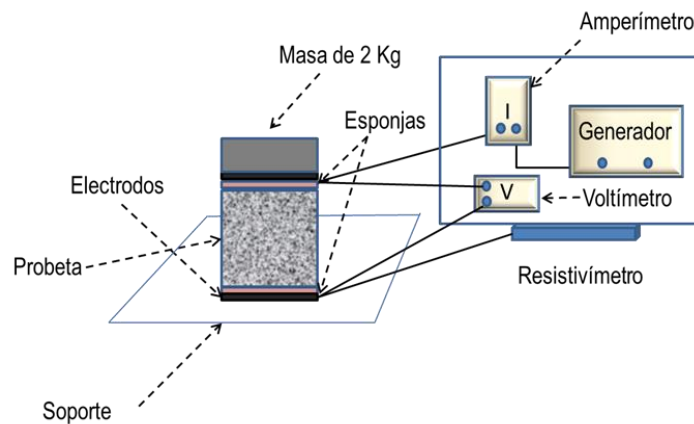


Figura 52. Medidas de resistividad mediante el método directo

El cálculo de la resistencia eléctrica del hormigón se realiza de la siguiente forma: La resistencia eléctrica según la ley de Ohm se calcula por medio de la siguiente ecuación.

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Eq. 68}$$

Donde R es la resistencia eléctrica del hormigón, en ohmios (Ω), I es la intensidad eléctrica que circula por el circuito en amperios (A), V es la diferencia de potencial

entre los electrodos, en voltios (V). La resistencia eléctrica del hormigón se obtendrá a su vez de a partir de la ecuación 69.

$$R_e = R_{(e+sp)} - R_{sp} \quad \text{Eq. 69}$$

Donde R_e es la resistencia eléctrica del hormigón, $R_{(e+sp)}$ es la resistencia eléctrica del hormigón más la de las esponjas, R_{sp} es la resistencia eléctrica de las esponjas.

Por otro lado, el cálculo de la constante de la celda se calcula por medio de la siguiente ecuación 70.

$$K = \frac{S}{L} \quad \text{Eq. 70}$$

Donde S es el área de la sección de la probeta en la que se sitúa la esponja, en metros cuadrados (m^2), L es la altura de las probetas, en metros (m).

Por último, una vez determinada la resistencia eléctrica de la probeta y la constante de celda del método de ensayo, se calculará la resistividad eléctrica por medio de la siguiente ecuación 71.

$$\rho_e = K * R_e \quad \text{Eq. 71}$$

Donde ρ_e es la resistividad eléctrica, en ohmios por metros ($\Omega \cdot m$), K es la constante de celda en metros (m) y R_e es la resistencia eléctrica en ohmios (Ω).

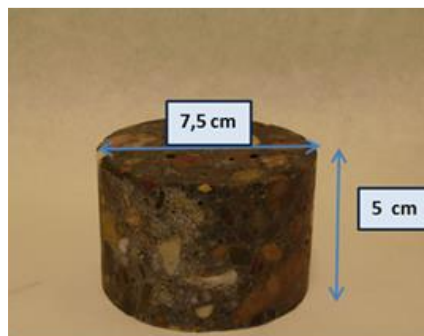


Figura 53. Imagen de testigos sometidos a medidas de resistividad.

CAPÍTULO 4.

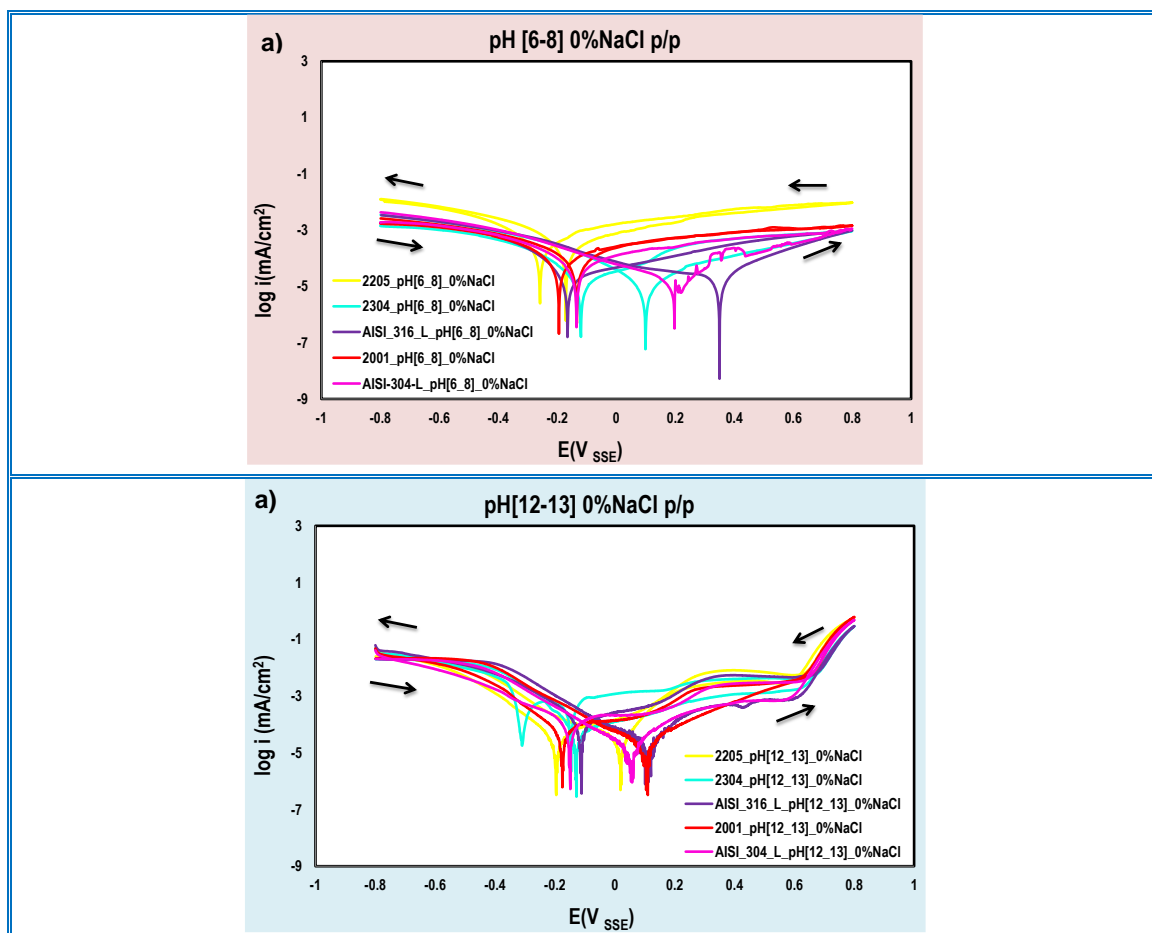
RESULTADOS EXPERIMENTALES

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Resultados de ensayos de laboratorio en disolución

4.1.1 Voltametrías cíclicas

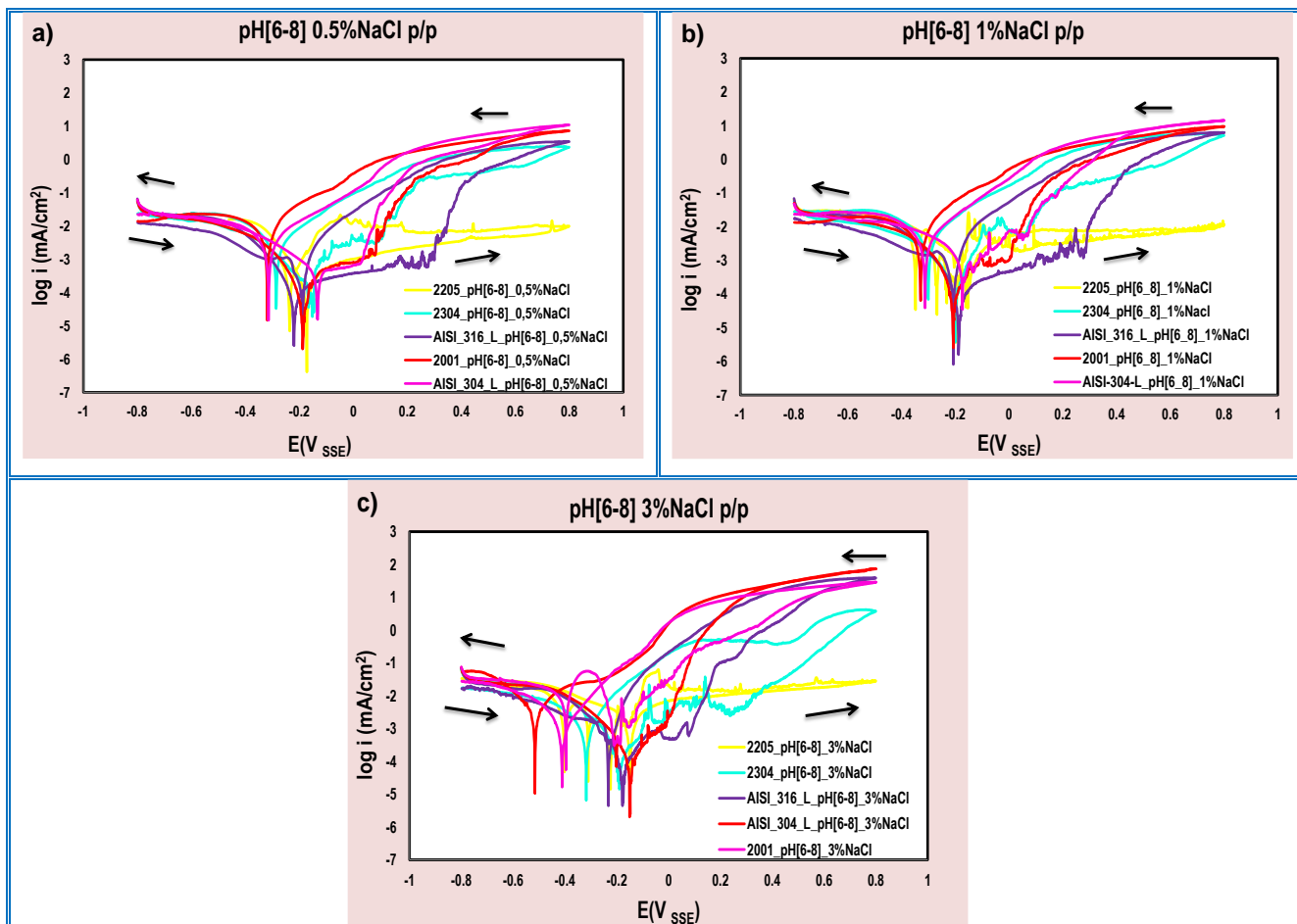
A continuación, se muestran cinco voltametrías cíclicas correspondientes a las cinco calidades de acero inoxidable, en los dos intervalos de pH [6-8] y [12-13]. Cuando el porcentaje en peso/peso de iones cloruros en la disolución es de 0%. A pesar de que siempre se realizan dos muestras gemelas m_1 y m_2 , las gráficas 11, 12 y 13 sólo muestran las correspondientes a m_1 .



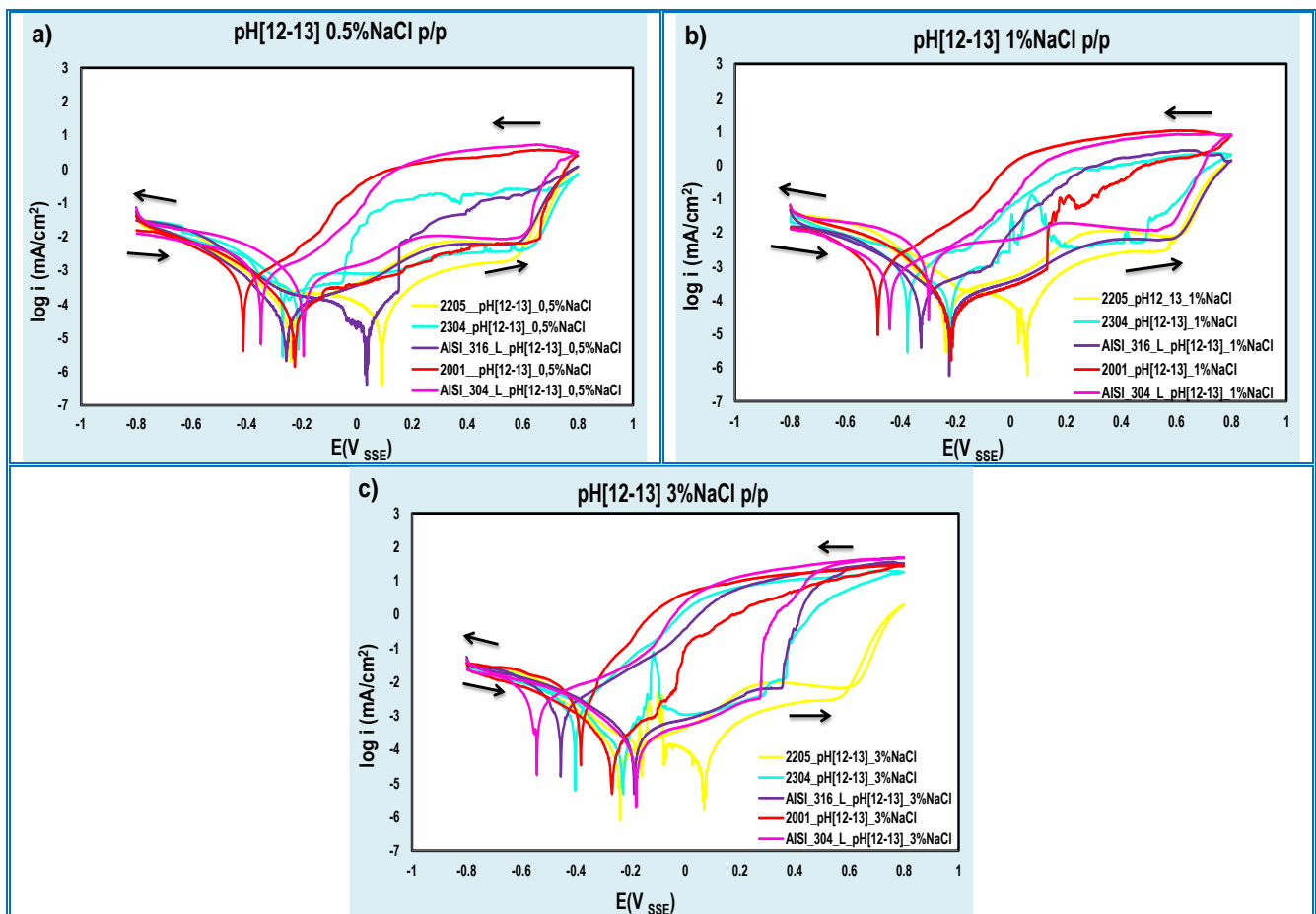
Gráfica 11. Curvas de polarización con 0%NaCl p/p en disolución. Cinco calidades de aceros inoxidables corrugados de 12 mm de diámetro. a) Intervalo de pH [6-8]. b) Intervalo de pH [12-13]

Se observa cómo, para el medio alcalino, las reacciones de oxidación del agua aparecen a potenciales menos anódicos que para las curvas de polarización realizadas en medio cercano al neutro es decir, dentro del intervalo de pH [6-8].

A continuación, se muestran las curvas de polarización cíclicas de las muestras m_1 , que se realizan en los distintos medios de pH y diferentes concentraciones de cloruros.



Gráfica 12. Curvas de polarización con 0,5, 1 y 3% de NaCl p/p en disolución y con un intervalo de pH [6-8]. Cinco calidades de aceros inoxidables corrugados de 12 mm de diámetro.



Gráfica 13. Curvas de polarización con 0,5, 1 y 3% de NaCl p/p en disolución y con un intervalo de pH [12-13]. Cinco calidades de aceros inoxidable corrugados de 12 mm de diámetro.

Para evaluar de forma cualitativa la susceptibilidad a la corrosión de cada una de las cinco calidades de aceros inoxidable en presencia de distintas concentraciones de cloruros y en distintos intervalos de pH, se toman directamente de las curvas de polarización los valores de E_{corr} , E_r y E_{pr} , como se indica en el apartado 3.4.1.1. Los valores de dichos parámetros se muestran mediante las siguientes tablas donde hay que tener en cuenta que para aceros inoxidable muy resistentes a la corrosión por cloruros en los cuales no se han producido picaduras o al menos no muestran indicios, se les asigna de forma simbólica y como potencial de ruptura 0.8 V es decir, el máximo valor de potencial que alcanza la curva de polarización, a pesar de que no se hay producido la formación de picaduras. Como se indica en el apartado de metodología, se sabe si se ha formado o no picadura cuando la curva muestra un bucle de histéresis en la vuelta o el sentido catódico de la curva de polarización cíclica. Por ello, cuando no existe este bucle se indica entre paréntesis (no picadura). Como para cada valor de potencial crítico se obtienen dos, uno correspondientes a m_1 y otro correspondiente a m_2 , se incluye en las tablas el valor promedio de ambos y debido a

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

que dos valores son pocos como para realizar con exactitud el cálculo de un parámetro estadístico de dispersión como podría ser la desviación estándar o el coeficiente de variación, se decide calcular el rango o recorrido cuyo valor se obtiene por diferencia del valor mayor menos el menor. Con el recorrido se intenta mostrar la dispersión que muestran cada par de valores m_1 y m_2 .

Tabla 10. Potenciales críticos; E_{corr} , E_r y E_{pr} , para el intervalo de pH [6-8], en todas las concentraciones de NaCl en % p/p.

pH[6-8] 0%NaCl p/p												
	E_{corr} (V)				E_r (V)				E_{pr} (V)			
	Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)	
	m_1	m_2			m_1	m_2			m_1	m_2		
2001	-0.19	0.01	-0.09	0.2	0.80 (no picadura)	0.80 (no picadura)	0.8	0	-0.16	0.05	-0.06	0.21
2304	-0.12	-0.01	-0.07	0.11	0.80 (no picadura)	0.80 (no picadura)	0.8	0	0.10	0.01	0.06	0.09
2205	-0.26	-0.05	-0.16	0.21	0.80 (no picadura)	0.80 (no picadura)	0.8	0	-0.21	-0.03	-0.12	0.18
AISI-316-L	-0.17	0.12	-0.03	0.29	0.80 (no picadura)	0.80 (no picadura)	0.8	0	0.04	0.20	0.12	0.16
AISI-304-L	-0.30	-0.03	-0.17	0.27	0.80 (no picadura)	0.80 (no picadura)	0.8	0	-0.04	0.12	0.04	0.16
pH[6-8] 0.5%NaCl p/p												
	E_{corr} (V)				E_r (V)				E_{pr} (V)			
	Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)	
	m_1	m_2			m_1	m_2			m_1	m_2		
2001	-0.19	-0.31	-0.25	0.12	0.19	0.14	0.17	-0.05	-0.32	-0.37	-0.35	0.05
2304	-0.15	-0.27	-0.21	0.12	0.21	0.69	0.45	0.48	-0.29	-0.17	-0.23	0.12
2205	-0.24	-0.30	-0.27	0.06	0.80 (no picadura)	0.80 (no picadura)	0.80	0	-0.17	0.20	0.02	0.37
AISI-316-L	-0.09	-0.02	-0.06	0.07	0.46	0.36	0.41	0.1	-0.29	-0.26	-0.28	0.03
AISI-304-L	-0.13	-0.12	-0.13	0.01	0.14	0.14	0.14	0	-0.31	-0.34	-0.33	0.03
pH[6-8] 1%NaCl p/p												
	E_{corr} (V)				E_r (V)				E_{pr} (V)			
	Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)	
	m_1	m_2			m_1	m_2			m_1	m_2		
2001	-0.21	-0.31	-0.26	0.1	0.11	0.07	0.09	0.04	-0.33	-0.37	-0.35	0.04
2304	-0.20	-0.37	-0.29	0.17	0.17	0.34	0.26	0.17	-0.30	-0.24	-0.27	0.06
2205	-0.35	-0.40	-0.38	0.05	0.80 (no picadura)	0.80 (no picadura)	0.80	0	-0.16	-0.10	-0.13	0.06
AISI-316-L	-0.19	-0.03	-0.11	0.16	0.38	0.33	0.36	0.05	-0.21	-0.35	-0.28	0.14
AISI-304-L	-0.17	-0.17	-0.17	0	0.18	0.24	0.21	0.06	-0.31	-0.29	-0.30	0.02
pH[6-8] 3%NaCl p/p												
	E_{corr} (V)				E_r (V)				E_{pr} (V)			
	Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)	
	m_1	m_2			m_1	m_2			m_1	m_2		
2001	-0.33	-0.40	-0.37	0.07	0.13	0.05	0.09	0.08	-0.33	-0.41	-0.37	0.08
2304	-0.27	-0.19	-0.23	0.08	0.07	0.53	0.30	0.46	-0.33	-0.32	-0.33	0.01
2205	-0.29	-0.40	-0.35	0.11	0.80 (no picadura)	0.80 (no picadura)	0.80	0	-0.18	-0.15	-0.17	0.03
AISI-316-L	-0.12	-0.18	-0.15	0.06	0.18	0.20	0.19	0.02	-0.34	-0.23	-0.29	0.11
AISI-304-L	-0.13	-0.15	-0.14	0.02	0.06	0.08	0.07	0.02	-0.32	-0.52	-0.42	0.2

Tabla 11. Potenciales críticos; E_{corr} , E_r y E_{pr} , para el intervalo de pH [12-13], en todas las concentraciones de NaCl en % p/p.

pH[12-13] 0%NaCl p/p												
	E_{corr} (V)				E_r (V)				E_{pr} (V)			
	Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)	
	m_1	m_2			m_1	m_2			m_1	m_2		
2001	-0.22	-0.18	-0.20	0.04	0.70 (no picadura)	0.70 (no picadura)	0.7	0	0.55	0.63	0.59	0.08
2304	-0.18	-0.31	-0.25	0.13	0.70 (no picadura)	0.70 (no picadura)	0.7	0	-0.02	-0.13	-0.08	0.11
2205	-0.39	-0.20	-0.30	0.19	0.70 (no picadura)	0.70 (no picadura)	0.7	0	0.59	0.60	0.60	0.01
AISI-316-L	-0.22	-0.11	-0.17	0.11	0.70 (no picadura)	0.70 (no picadura)	0.7	0	0.59	0.66	0.63	0.07
AISI-304-L	-0.23	-0.15	-0.19	0.08	0.70 (no picadura)	0.70 (no picadura)	0.7	0	0.58	0.63	0.61	0.05
pH[12-13] 0.5%NaCl p/p												
	E_{corr} (V)				E_r (V)				E_{pr} (V)			
	Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)	
	m_1	m_2			m_1	m_2			m_1	m_2		
2001	-0.23	-0.23	-0.23	0	0.68	0.66	0.67	0.02	-0.41	-0.32	-0.37	0.09
2304	-0.21	-0.25	-0.23	0.04	0.7	0.70 (no picadura)	0.7	0	-0.27	0.07	-0.10	0.34
2205	-0.24	-0.22	-0.23	0.02	0.70 (no picadura)	0.70 (no picadura)	0.7	0	0.09	-0.34	-0.13	0.43
AISI-316-L	-0.18	-0.10	-0.14	0.08	0.69	0.7	0.70	0.01	-0.29	-0.18	-0.24	0.11
AISI-304-L	-0.20	-0.19	-0.20	0.01	0.49	0.64	0.57	0.15	-0.37	-0.35	-0.36	0.02
pH[12-13] 1%NaCl p/p												
	E_{corr} (V)				E_r (V)				E_{pr} (V)			
	Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)	
	m_1	m_2			m_1	m_2			m_1	m_2		
2001	-0.25	-0.22	-0.24	0.03	0.12	0.18	0.15	0.06	-0.47	-0.48	-0.48	0.01
2304	-0.22	-0.19	-0.21	0.03	0.61	0.70 (no picadura)	0.38	0.09	-0.37	-0.18	-0.28	0.19
2205	-0.21	-0.23	-0.22	0.02	0.70 (no picadura)	0.70 (no picadura)	0.7	0	-0.20	0.06	-0.07	0.26
AISI-316-L	-0.21	-0.22	-0.22	0.01	0.28	0.68	0.48	0.4	-0.36	-0.32	-0.34	0.04
AISI-304-L	-0.19	-0.25	-0.22	0.06	0.38	0.66	0.52	0.28	-0.46	-0.53	-0.50	0.07
pH[12-13] 3%NaCl p/p												
	E_{corr} (V)				E_r (V)				E_{pr} (V)			
	Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)		Promedio (V)		Recorrido (V)	
	m_1	m_2			m_1	m_2			m_1	m_2		
2001	-0.27	-0.21	-0.24	0.06	0.00	0.46	0.23	0.46	-0.38	-0.46	-0.42	0.08
2304	-0.23	-0.25	-0.24	0.02	0.38	0.70 (no picadura)	0.54	0.32	-0.40	-0.11	-0.26	0.29
2205	-0.24	-0.22	-0.23	0.02	0.70 (no picadura)	0.70 (no picadura)	0.7	0	0.07	-0.07	0.00	0
AISI-316-L	-0.19	-0.25	-0.22	0.06	0.37	0.66	0.52	0.29	-0.46	-0.53	-0.50	0.07
AISI-304-L	-0.18	-0.19	-0.19	0.01	0.29	0.37	0.33	0.08	-0.54	-0.43	-0.49	0.11

Después de cada curva de polarización cíclica los aceros se decapan. Con ello se pretende eliminar el óxido formado y poder observar mediante lupa binocular, cómo se encuentra la superficie de cada barra. En las siguientes tablas se muestran las imágenes más características que presentan dichas superficies y se observa cómo evolucionan de forma diferente según la calidad de acero inoxidable expuesta a los distintos medios. Así pues, aunque todas las barras que se muestran afectadas presentan corrosión localizada, se observa como las calidades austeníticas AISI 304-L y AISI 316-L, presenta picaduras que crecen en profundidad y con formas claramente redondeadas, sin embargo el acero dúplex 2001, presenta corrosión localizada pero esta se extiende en la superficie más que en profundidad.















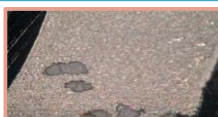
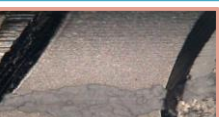
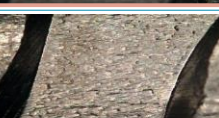



De los aceros dúplex que se estudian sólo el de calidad 2001 presenta corrosión localizada visible mediante la lupa binocular. La corrosión localizada que se observa se muestra con mayor intensidad en las disoluciones con elevadas concentraciones de cloruro para ambos intervalos de pH, aunque en menor medida para el intervalo de pH alcalino.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 12. Imágenes mediante lupa binocular de las barras corrugadas tras la aplicación mediante el ensayo poteciodinámico de la curva de polarización cíclica. Intervalo de pH [6-8].

Calidad de acero inoxidable	pH [6-8] IMAGEN EN LUPA BINOCULAR X 2			
	0% NaCl p/p	0,5% NaCl p/p	1%NaCl p/p	3%NaCl p/p
2205				
2304				
AISI-316-L				
2001				
AISI-304-L				

Tabla 13. Imágenes mediante lupa binocular de las barras corrugadas tras la aplicación mediante el ensayo poteciodinámico de la curva de polarización cíclica. Intervalo de pH [12-13].

Calidad de acero inoxidable	pH [12-13] IMAGEN EN LUPA BINOCULAR X 2			
	0% NaCl p/p	0,5% NaCl p/p	1%NaCl p/p	3%NaCl p/p
2205				
2304				
AISI-316-L				
2001				
AISI-304-L				

Por otro lado se realiza el cálculo de la pérdida de material que llamaremos electroquímica y que se calcula mediante la ley de Faraday, como se indica en el

apartado 3.4.1.2. Este cálculo se realiza por cada una de las calidades de acero inoxidable, en los dos intervalos de pH y para las diferentes concentraciones de cloruro sódico en % p/p.

A continuación, se muestran los valores obtenidos mediante tablas con el cálculo del valor promedio y del recorrido, como en tablas anteriores donde sólo se dispone de dos valores de cada parámetro, m_1 y m_2 .

Tabla 14. Valores medios calculados, de pérdida electroquímica de material en gramos. Cinco calidades de acero inoxidable, en los dos intervalos de pH y para las distintas concentraciones de NaCl.

2001								
%NaCl p/p	pH [6-8]				pH[12-13]			
	m_1	m_2	Promedio (g)	Recorrido (g)	m_1	m_2	Promedio (g)	Recorrido (g)
	0.50%	0.0606	0.0270	0.0438	0.0336	0.0246	0.0052	0.0149
1%	0.0798	0.0763	0.07805	0.0035	0.0811	0.0527	0.0669	0.0284
3%	0.2461	0.3236	0.28485	0.0775	0.2054	0.2552	0.2303	0.0498

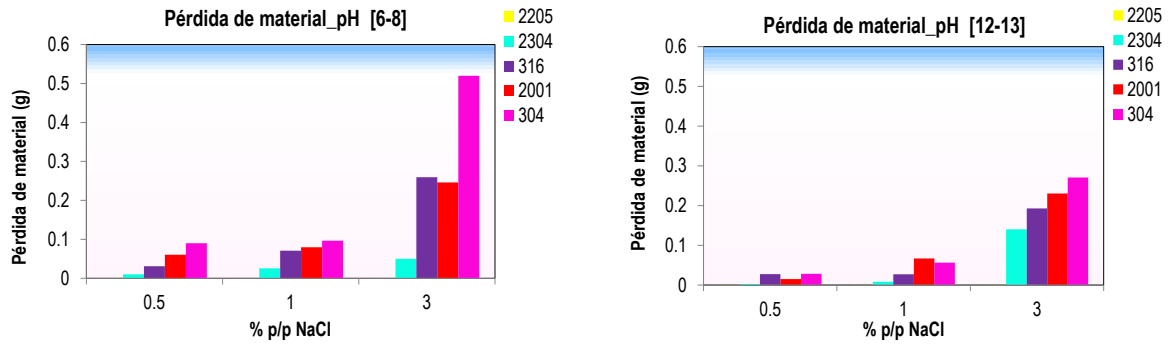
AISI-316-L								
%NaCl p/p	pH [6-8]				pH[12-13]			
	m_1	m_2	Promedio (g)	Recorrido (g)	m_1	m_2	Promedio (g)	Recorrido (g)
	0.50%	0.0387	0.0233	0.031	0.0154	0.0177	0.0372	0.02745
1%	0.0989	0.1159	0.1074	0.017	0.0385	0.0149	0.0267	0.0236
3%	0.2481	0.2710	0.25955	0.0229	0.2704	0.1153	0.19285	0.1551

2205								
%NaCl p/p	pH [6-8]				pH[12-13]			
	m_1	m_2	Promedio (g)	Recorrido (g)	m_1	m_2	Promedio (g)	Recorrido (g)
	0.50%	0.0002	0.0001	0.00015	0.0001	0.0000	0.0001	0.00005
1%	0.0002	0.0005	0.00035	0.0003	0.0001	0.0001	0.0001	0
3%	0.0003	0.0004	0.00035	0.0001	0.0000	0.0001	0.00005	0.0001

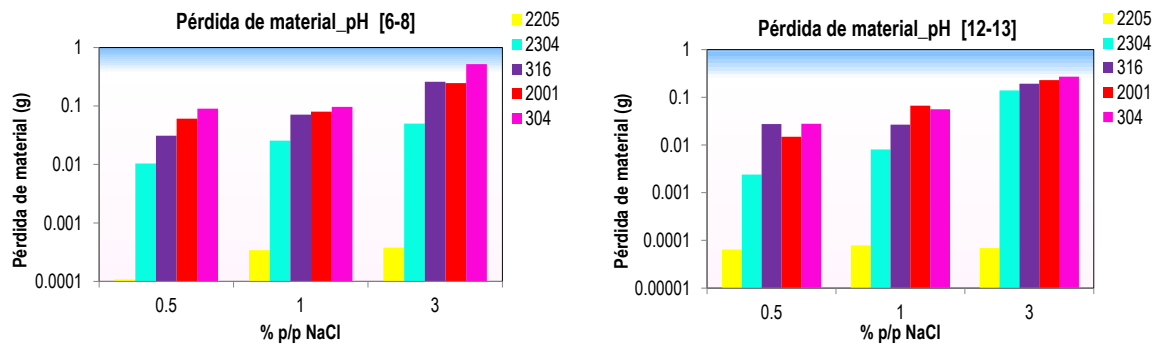
AISI-304-L								
%NaCl p/p	pH [6-8]				pH[12-13]			
	m_1	m_2	Promedio (g)	Recorrido (g)	m_1	m_2	Promedio (g)	Recorrido (g)
	0.50%	0.0392	0.0392	0.0392	0	0.0475	0.0084	0.02795
1%	0.0967	0.1005	0.0986	0.0038	0.0668	0.0460	0.0564	0.0208
3%	0.5197	0.3641	0.4419	0.1556	0.3390	0.2020	0.2705	0.137

2304								
%NaCl p/p	pH [6-8]				pH[12-13]			
	m_1	m_2	Promedio (g)	Recorrido (g)	m_1	m_2	Promedio (g)	Recorrido (g)
	0.50%	0.0192	0.0016	0.0104	0.0176	0.0024	0.0024	0.0024
1%	0.0426	0.0085	0.02555	0.0341	0.0141	0.0021	0.0081	0.012
3%	0.0821	0.0181	0.0501	0.064	0.2761	0.0041	0.1401	0.272

Con el objetivo de comparar la pérdida de material de todas las calidades de acero inoxidable en las distintas concentraciones de NaCl en % p/p, Se representan los siguientes valores mediante gráficas.

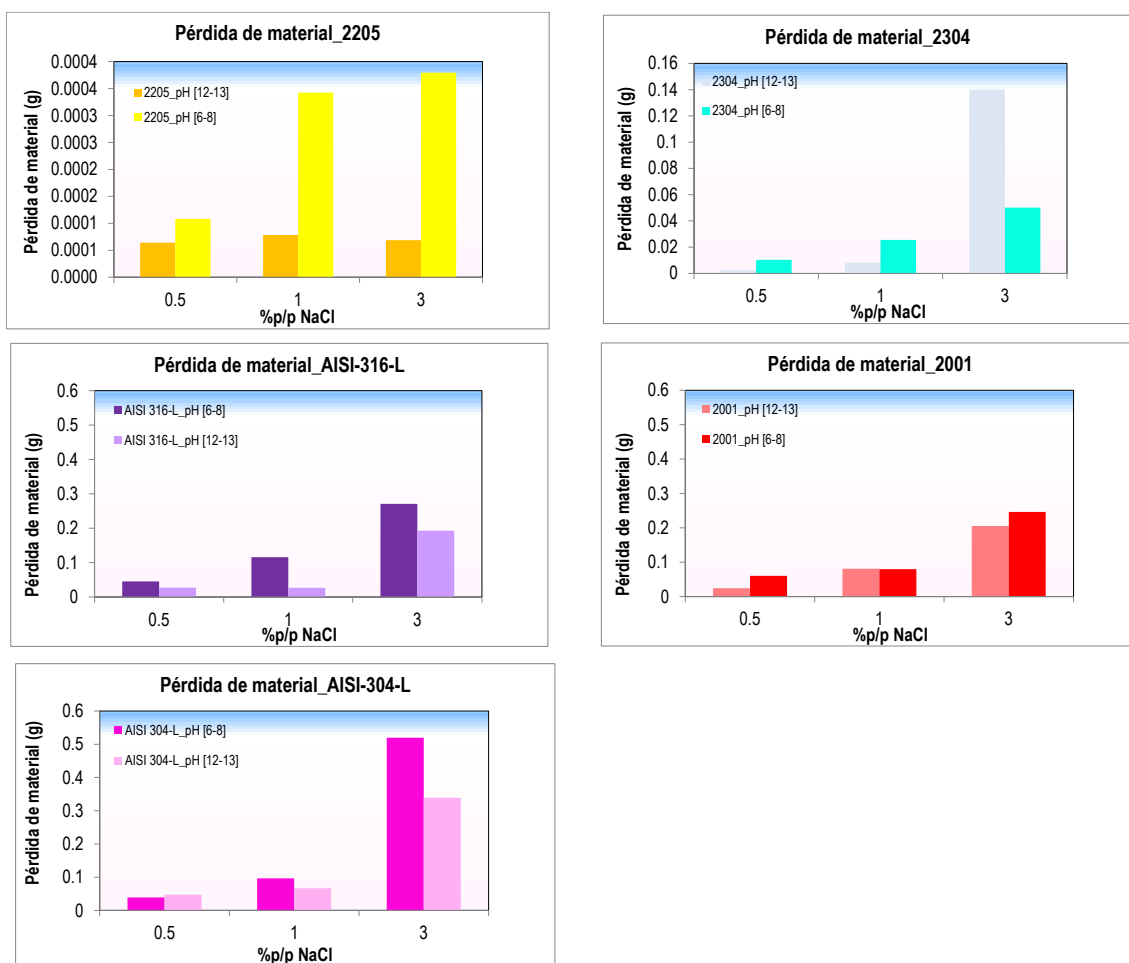


Gráfica 14. Pérdida de material electroquímica, para todas las calidades de aceros inoxidable y en todas las concentraciones de NaCl, a) en un intervalo de pH [6-8] y b) en un intervalo de pH [12-3].



Gráfica 15. Igual que gráfica 14, pero en escala logarítmica

Debido a que la capa pasiva se regenera por la alcalinidad del medio, se observa que en la mayoría de los casos, los medios alcalinos son más resistentes a la corrosión por cloruros que los medios neutros o ligeramente ácidos. Sólo se produce una excepción para el caso del acero dúplex 2304 el cual, en sólo una de las muestras presenta una pérdida de material mayor incluso que en medio no alcalino. Lo cual resulta ser fuera de lo normal con respecto a la evolución que presentan el resto de las calidades de aceros inoxidable.



Gráfica 16. Comparación de la pérdida de material para ambos intervalos de pH.

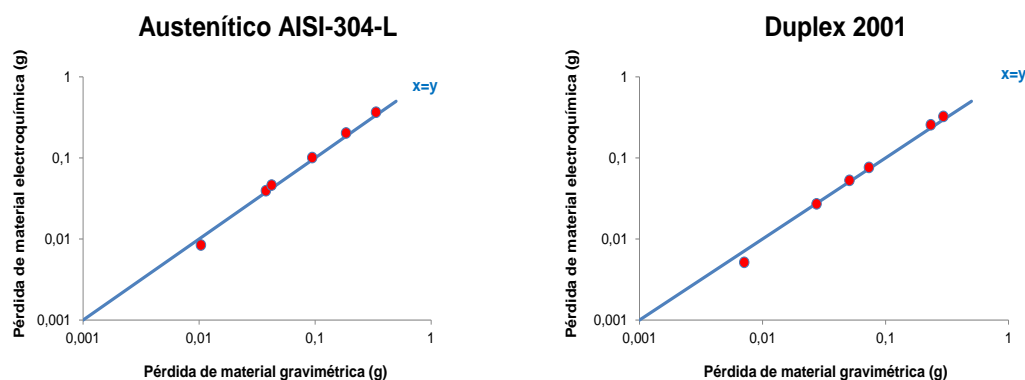
Con el objetivo de comprobar que la metodología del cálculo de la pérdida de material en curvas de polarización o pérdida de material electroquímica obtenida mediante la utilización de la ley de Faraday es correcta, se obtiene experimentalmente la pérdida de material gravimétrica para posteriormente poder comparar ambas cantidades obtenidas por diferentes metodologías. La pérdida de material gravimétrica se realiza a partir de la diferencia de pesada antes y después de la aplicación de la curva de polarización cíclica. Antes de la segunda pesada las barras se decapan según la norma ASTM G1-03 de preparación, limpieza y evaluación de ensayos de corrosión con el objetivo de retirar todo el exceso de óxido que haya sido formado durante la curva de polarización cíclica. Finalmente indicar que este cálculo sólo se ha realizado para las dos calidades de aceros inoxidable, el austenítico AISI-304-L y el dúplex con bajo contenido en níquel 2001, coincidiendo que son las dos calidades de acero inoxidable, dentro de las estudiadas en el presente trabajo, que suelen perder mayor cantidad de material frente a la corrosión por cloruros según nuestros resultados. A continuación, se representan mediante gráficas la cantidad de material perdido, calculado mediante la ley de Faraday, frente a la cantidad de material perdido obtenido

por gravimetría, todo ello en gramos. Con el objetivo de mostrar el grado de dispersión que presentan ambas cantidades se calcula el valor absoluto del error relativo en tanto por ciento que existe entre ambos valores según la siguiente ecuación:

$$\text{Error relativo} = \left| \frac{\text{Pérdida gravimétrica (g)} - \text{Pérdida electroquímica (g)}}{\text{Pérdida gravimétrica (g)}} * 100 \right| \quad \text{Eq. 72}$$

Tabla 15. Valores de pérdida de material en gramos para el AISI-304-L y el 2001.

			Pérdida de material electroquímica (g)	Pérdida de material gravimétrica (g)	Error relativo (%)
304	pH [6-8]	0.5	0.0392	0.0378	3.7
		1	0.1005	0.0949	5.9
		3	0.3641	0.3368	8.1
	pH [12-13]	0.5	0.0084	0.0104	19.2
		1	0.0460	0.0423	8.7
		3	0.2020	0.186	8.6
2001	pH [6-8]	0.5	0.0270	0.0275	1.8
		1	0.0763	0.0734	3.9
		3	0.3236	0.2952	9.6
	pH [12-13]	0.5	0.0052	0.0071	26.8
		1	0.0527	0.051	3.3
		3	0.2552	0.2336	9.2



Gráfica 17. Correspondencia de ambas metodologías mediante las que se pueden calcular la pérdida de material en gramos. a) Acero dúplex 2001 y b) Acero austenítico AISI-304-L.

4.1.2 Celdas de corrosión

Con el objetivo de controlar que el sistema establecido de “celdas de corrosión” permite mantener las condiciones de pH en el tiempo, se realizan diversas medidas de del pH de todas las disoluciones durante el periodo de estudio. A continuación, se muestran estos valores mediante las tablas 16 y 17.

Tabla 16. Medidas de pH de las celdas de corrosión. Intervalo de pH [6-8].

Celda de corrosión	Concentración de cloruros	Intervalo de pH [6-8]. Cero días	Intervalo de pH [6-8]. 1 días	Intervalo de pH [6-8]. 7 días	Intervalo de pH [6-8]. 15 días	Intervalo de pH [6-8]. 729 días	Intervalo de pH [6-8]. 953 días
Acero duplex 2001	0.5	5.76	6.18	6.33	6.23	7.35	7.35
	1	5.93	5.88	6.07	6.6	7.32	7.32
	3	6.14	6.01	6.1	6.15	7.25	7.25
Acero duplex 2205	0.5	7.7	6.61	6.77	6.69	6.77	6.77
	1	8.08	6.57	7.75	6.67	6.31	6.31
	3	7.81	6.6	6.96	6.58	6.34	6.34
Acero austenítico AISI 316-L	0.5	7.01	6.58	6.53	6.66	6.47	6.47
	1	7.02	6.86	6.73	6.6	6.66	6.66
	3	7.5	6.62	7.05	6.57	6.51	6.51
Acero austenítico AISI 304-L	0.5	6.27	6.48	8.34	6.25	7.26	7.26
	1	6.46	6.13	7.5	6.18	6.77	6.77
	3	6.56	6.15	7.64	6.47	7.84	7.84
Acero duplex 2304	0.5	6.38	6.41	6.78	6.67	7.57	7.57
	1	6.6	6.19	6.9	6.49	6.88	6.88
	3	6.62	6.41	6.95	6.44	6.72	6.72

Tabla 17. Medidas de pH de las celdas de corrosión. Intervalo de pH [12-13].

Celda de corrosión	Concentración de cloruros	Intervalo de pH [6-8]. Cero días	Intervalo de pH [6-8]. 1 días	Intervalo de pH [6-8]. 7 días	Intervalo de pH [6-8]. 15 días	Intervalo de pH [6-8]. 729 días	Intervalo de pH [6-8]. 953 días
Acero duplex 2001	0.5	12.3	12.52	12.56	12.41	12.58	12.58
	1	12.3	12.56	12.49	12.43	12.6	12.6
	3	12.23	12.52	12.42	12.44	12.2	12.2
Acero duplex 2205	0.5	12.2	12.52	12.65	12.74	12.57	12.57
	1	12.25	12.5	12.66	12.71	12.3	12.3
	3	12.2	12.46	12.6	12.67	12.64	12.64
Acero austenítico AISI 316-L	0.5	12.45	12.59	12.63	12.78	12.61	12.61
	1	12.42	12.6	12.63	12.71	12.5	12.55
	3	12.43	12.58	12.6	12.72	12.61	12.61
Acero austenítico AISI 304-L	0.5	12.44	12.61	12.68	12.79	12.61	12.61
	1	12.42	12.6	12.71	12.72	12.64	12.64
	3	12.34	12.59	12.66	12.68	12.63	12.63
Acero duplex 2304	0.5	12.5	12.5	12.64	12.68	12.59	12.59
	1	12.49	12.5	12.67	12.65	12.59	12.59
	3	12.47	12.49	12.54	12.62	12.63	12.63

A partir del seguimiento del pH se observa como este se mantiene estable en los dos intervalos [6-8] y [12-13] durante todo el tiempo de medida.

El estudio de las celdas de corrosión se fundamenta en el análisis de cuatro grupos diferenciados de resultados cuyo primer grupo se constituye de los valores registrados durante el seguimiento de los indicadores de corrosión, E_{corr} e I_{corr} , para las muestras m_1 y m_2 que se encuentran insertadas para su estudio en cada una de las treinta

celdas de corrosión que se miden durante 953 días. Ambos parámetros se obtienen mediante la técnica la resistencia a la polarización lineal. A continuación, se muestran los valores de E_{corr} en (mV) e I_{corr} en ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) mediante tablas y en ellas, además de los parámetros de cinética de corrosión, se muestra el valor promedio entre m_1 y m_2 y el rango o recorrido que existe entre los valores obtenidos para ambas muestras. Además, todos estos parámetros se encuentran representados gráficamente en el ANEXO 1.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 18. E_{corr} e I_{corr} , correspondientes a m_1 y m_2 de cada celda de corrosión. Acero dúplex 2001 para el intervalo pH [6-8], tablas situadas a la izquierda y pH [12-13], tablas situadas a la derecha.

2001 0.5%NaCl p/p y pH [6-8]									2001 0.5%NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2			m_1	m_2		
0	-392	-332	-362	60	4.24	2.30	3.27	1.94	0	-203	-228	-216	25	0.05	0.07	0.06	0.02
1	-40	9	-16	49	0.08	0.04	0.06	0.04	1	-158	-207	-183	49	0.04	0.06	0.05	0.02
7	6	-92	-43	98	0.06	0.13	0.10	0.07	7	-120	-141	-131	21	0.03	0.04	0.04	0.01
15	-106	-97	-102	9	0.14	0.12	0.13	0.02	15	-103	-120	-112	17	0.02	0.03	0.03	0.01
42	-134	16	-59	150	0.19	0.03	0.11	0.16	42	-140	-122	-131	18	0.01	0.03	0.02	0.02
92	-115	-139	-127	24	0.23	0.23	0.23	0.00	92	-130	-135	-133	5	0.02	0.02	0.02	0.00
134	-150	-175	-163	25	0.31	0.21	0.26	0.10	134	-138	-140	-139	2	0.02	0.02	0.02	0.00
192	-110	-113	-112	3	0.27	0.19	0.23	0.08	192	-153	-152	-153	1	0.03	0.02	0.03	0.01
224	-108	-144	-126	36	0.30	0.20	0.25	0.10	224	-154	-152	-153	2	0.02	0.02	0.02	0.00
267	-156	-148	-152	8	0.33	0.15	0.24	0.18	267	-150	-145	-148	5	0.01	0.01	0.01	0.00
298	-149	-121	-135	28	0.28	0.13	0.21	0.15	298	-150	-167	-159	17	0.01	0.01	0.01	0.00
370	-187	-206	-197	19	0.35	0.21	0.28	0.14	370	-152	-143	-148	9	0.01	0.01	0.01	0.00
406	-175	-210	-193	35	0.30	0.33	0.32	0.03	406	-153	-146	-150	7	0.01	0.01	0.01	0.00
441	-191	-216	-204	25	0.40	0.34	0.37	0.06	441	-151	-143	-147	8	0.01	0.01	0.01	0.00
471	-179	-245	-212	66	0.35	0.43	0.39	0.08	471	-149	-139	-144	10	0.01	0.01	0.01	0.00
525	-150	-148	-149	2	0.28	0.21	0.25	0.07	525	-149	-145	-147	4	0.01	0.01	0.01	0.00
588	-104	-107	-106	3	0.23	0.10	0.17	0.13	588	-149	-145	-147	4	0.01	0.01	0.01	0.00
729	-204	-194	-199	10	0.22	0.14	0.18	0.08	729	-138	-134	-136	4	0.01	0.01	0.01	0.00
953	-67	-130	-99	63	0.13	0.12	0.13	0.01	953	-64	-43	-54	21	0.07	0.01	0.04	0.06

2001 1%NaCl p/p y pH [6-8]									2001 1%NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2			m_1	m_2		
0	-181	-293	-237	112	0.05	3.08	1.57	3.03	0	-409	-178	-294	231	1.07	0.03	0.55	1.04
1	-162	18	-72	180	0.12	0.02	0.07	0.10	1	-231	-191	-211	40	0.05	0.03	0.04	0.02
7	-190	43	-74	233	0.24	0.04	0.14	0.20	7	-217	-20	-119	197	0.05	0.05	0.05	0.00
15	-184	10	-87	194	0.25	0.02	0.14	0.23	15	-161	-168	-165	7	0.12	0.05	0.09	0.07
42	-167	6	-81	173	0.27	0.03	0.15	0.24	42	-220	-113	-167	107	0.04	0.02	0.03	0.02
92	-142	-147	-145	5	0.15	0.22	0.19	0.12	92	-134	-132	-133	2	0.02	0.02	0.02	0.00
134	-106	-191	-149	85	0.28	0.40	0.34	0.18	134	-144	-144	-144	0	0.01	0.03	0.02	0.02
192	-108	-133	-121	25	0.42	0.24	0.33	0.18	192	-159	-159	-159	0	0.02	0.03	0.03	0.01
224	-114	-114	-114	0	0.37	0.06	0.22	0.31	224	-158	-160	-159	2	0.03	0.03	0.03	0.00
267	-135	-139	-137	4	0.48	0.31	0.40	0.12	267	-152	-153	-153	1	0.01	0.01	0.01	0.00
298	-125	-168	-147	43	0.33	0.21	0.27	0.12	298	-153	-153	-153	0	0.01	0.01	0.01	0.00
370	-180	-198	-189	18	0.50	0.25	0.38	0.25	370	-162	-152	-157	10	0.01	0.01	0.01	0.00
406	-130	-209	-170	79	0.27	0.27	0.27	0.00	406	-157	-155	-156	2	0.01	0.01	0.01	0.00
441	-149	-184	-167	35	0.38	0.24	0.31	0.14	441	-156	-154	-155	2	0.01	0.01	0.01	0.00
471	-134	-168	-151	34	0.36	0.21	0.29	0.15	471	-154	-149	-152	5	0.01	0.01	0.01	0.00
525	-130	-151	-141	21	0.31	0.18	0.25	0.13	525	-154	-150	-152	4	0.01	0.01	0.01	0.00
588	-144	-209	-177	65	0.35	0.24	0.30	0.11	588	-155	-151	-153	4	0.01	0.01	0.01	0.00
729	-172	-231	-202	59	0.20	0.17	0.19	0.03	729	-136	-131	-134	5	0.01	0.01	0.01	0.00
953	-123	-156	-140	33	0.09	0.15	0.12	0.06	953	-67	-66	-67	1	0.02	0.01	0.02	0.01

2001 3%NaCl p/p y pH [6-8]									2001 3 %NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2			m_1	m_2		
0	-217	-153	-185	64	0.16	0.02	0.09	0.14	0	-202	-325	-264	123	0.04	0.23	0.14	0.19
1	4	24	14	20	0.03	0.01	0.02	0.02	1	-166	-212	-189	46	0.02	0.04	0.03	0.02
7	-36	-49	-43	13	0.20	0.12	0.16	0.08	7	-196	-239	-218	43	0.04	0.10	0.07	0.06
15	-188	-174	-181	14	0.22	0.33	0.28	0.11	15	-176	-192	-184	16	0.09	0.05	0.07	0.04
42	-201	-144	-173	57	0.27	0.21	0.24	0.06	42	-134	-206	-170	72	0.01	0.01	0.01	0.00
92	-184	-224	-204	40	0.22	0.26	0.24	0.04	92	-146	-206	-176	60	0.02	0.04	0.03	0.02
134	-205	-233	-219	28	0.33	0.45	0.39	0.12	134	-145	-248	-197	103	0.01	0.07	0.04	0.06
192	-273	-218	-246	55	0.55	0.41	0.48	0.14	192	-159	-219	-189	60	0.01	0.05	0.03	0.04
224	-199	-163	-181	36	0.30	0.17	0.24	0.13	224	-164	-210	-187	46	0.01	0.04	0.03	0.03
267	-204	-235	-220	31	0.30	0.25	0.28	0.05	267	-167	-224	-196	57	0.01	0.03	0.02	0.02
298	-203	-191	-197	12	0.32	0.15	0.24	0.17	298	-170	-214	-192	44	0.01	0.03	0.02	0.02
370	-180	-177	-179	3	0.25	0.14	0.20	0.11	370	-159	-181	-170	22	0.01	0.02	0.02	0.01
406	-199	-223	-211	24	0.26	0.27	0.27	0.01	406	-136	-155	-146	19	0.00	0.03	0.02	0.03
441	-226	-189	-208	37	0.30	0.13	0.22	0.17	441	-231	-117	-174	114	0.01	0.02	0.02	0.01
471	-197	-206	-202	9	0.24	0.17	0.21	0.07	471	-244	-155	-200	89	0.15	0.03	0.09	0.12
525	-186	-199	-193	13	0.26	0.17	0.22	0.09	525	-204	-199	-202	5	0.10	0.08	0.09	0.02
588	-206	-180	-193	26	0.28	0.14	0.21	0.14	588	-204	-162	-183	42	0.08	0.03	0.06	0.05
729	-194	-164	-179	30	0.17	0.08	0.13	0.09	729	-239	-102	-171	137	0.03	0.01	0.02	0.02
953	-140	-101	-121	39	0.69	0.12	0.41	0.57	953	-206	-92	-149	114	0.10	0.04	0.07	0.06

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 19. E_{corr} e I_{corr} , correspondientes a m_1 y m_2 de cada celda de corrosión. Acero dúplex 2205 para el intervalo pH [6-8], tablas situadas a la izquierda y pH [12-13], tablas situadas a la derecha.

2205 0.5%NaCl p/p y pH [6-8]									2205 0.5%NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2			m_1	m_2		
0	-353	-316	-335	37	1.87	1.30	1.59	0.57	0	-225	-218	-222	7	0.05	0.05	0.05	0.00
1	53	-4	25	57	0.03	0.04	0.04	0.01	1	-332	-229	-281	103	0.18	0.05	0.12	0.13
7	-118	-128	-123	10	0.03	0.03	0.03	0.00	7	-316	-128	-222	188	0.15	0.06	0.11	0.09
15	125	126	126	1	0.03	0.02	0.03	0.01	15	-340	-148	-244	192	0.17	0.03	0.10	0.14
42	86	26	56	60	0.01	0.02	0.02	0.01	42	-153	-155	-154	2	0.03	0.01	0.02	0.02
92	-10	-4	-7	6	0.02	0.02	0.02	0.00	92	-113	-81	-97	32	0.03	0.03	0.03	0.00
134	-16	-6	-11	10	0.03	0.02	0.03	0.01	134	-123	-161	-142	38	0.04	0.02	0.03	0.02
192	-27	-13	-20	14	0.03	0.03	0.03	0.00	192	-152	-165	-159	13	0.02	0.02	0.02	0.00
224	-27	-13	-20	14	0.03	0.03	0.03	0.00	224	-151	-160	-156	9	0.02	0.02	0.02	0.00
267	-6	-1	-4	5	0.01	0.01	0.01	0.00	267	-146	-156	-151	10	0.01	0.01	0.01	0.00
298	-3	-2	-3	1	0.01	0.01	0.01	0.00	298	-134	-147	-141	13	0.01	0.01	0.01	0.00
370	-2	-2	-2	0	0.01	0.02	0.02	0.01	370	-143	-152	-148	9	0.01	0.01	0.01	0.00
406	-8	-4	-6	4	0.01	0.01	0.01	0.00	406	-140	-152	-146	12	0.01	0.01	0.01	0.00
441	-9	-3	-6	6	0.01	0.01	0.01	0.00	441	-140	-152	-146	12	0.01	0.01	0.01	0.00
471	-8	-3	-6	5	0.01	0.01	0.01	0.00	471	-142	-152	-147	10	0.00	0.01	0.01	0.01
525	-10	-7	-9	3	0.01	0.01	0.01	0.00	525	-142	-151	-147	9	0.01	0.01	0.01	0.00
588	-25	-21	-23	4	0.02	0.01	0.02	0.01	588	-148	-159	-154	11	0.01	0.01	0.01	0.00
729	-9	-7	-8	2	0.01	0.01	0.01	0.00	729	-118	-130	-124	12	0.00	0.01	0.01	0.01
953	25	52	39	27	0.01	0.05	0.03	0.04	953	-97	-77	-87	20	0.02	0.02	0.02	0.00

2205 1 %NaCl p/p y pH [6-8]									2205 1%NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2			m_1	m_2		
0	-297	-270	-284	27	2.08	2.19	2.14	0.11	0	-214	-223	-219	9	0.04	0.11	0.08	0.07
1	41	-118	-39	159	0.03	0.13	0.08	0.10	1	-186	-194	-190	8	0.04	0.04	0.04	0.00
7	94	68	81	26	0.02	0.04	0.03	0.02	7	-152	-241	-197	89	0.03	0.08	0.06	0.05
15	142	144	143	2	0.02	0.03	0.03	0.01	15	-142	-136	-139	6	0.08	0.02	0.05	0.06
42	8	67	38	59	0.00	0.02	0.01	0.02	42	-154	-149	-152	5	0.01	0.02	0.02	0.01
92	-5	7	1	12	0.02	0.02	0.02	0.00	92	-165	-149	-157	16	0.02	0.01	0.02	0.01
134	-8	1	-4	9	0.02	0.03	0.03	0.01	134	-162	-155	-159	7	0.01	0.02	0.02	0.01
192	-10	-2	-6	8	0.04	0.03	0.04	0.01	192	-164	-160	-162	4	0.01	0.01	0.01	0.00
224	-7	0	-4	7	0.02	0.03	0.03	0.01	224	-160	-157	-159	3	0.02	0.01	0.02	0.01
267	17	8	13	9	0.01	0.01	0.01	0.00	267	-157	-152	-155	5	0.01	0.01	0.01	0.00
298	6	10	8	4	0.02	0.01	0.02	0.01	298	-149	-145	-147	4	0.01	0.01	0.01	0.00
370	7	24	16	17	0.01	0.01	0.01	0.00	370	-152	-147	-150	5	0.01	0.01	0.01	0.00
406	6	20	13	14	0.01	0.01	0.01	0.00	406	-151	-147	-149	4	0.01	0.00	0.01	0.01
441	5	23	14	18	0.01	0.01	0.01	0.00	441	-150	-146	-148	4	0.01	0.01	0.01	0.00
471	4	26	15	22	0.01	0.01	0.01	0.00	471	-149	-144	-147	5	0.01	0.01	0.01	0.00
525	2	28	15	26	0.01	0.01	0.01	0.00	525	-148	-145	-147	3	0.01	0.01	0.01	0.00
588	1	21	11	20	0.01	0.01	0.01	0.00	588	-156	-148	-152	8	0.01	0.01	0.01	0.00
729	18	45	32	27	0.01	0.02	0.02	0.01	729	-130	-124	-127	6	0.00	0.01	0.01	0.01
953	6	53	30	47	0.15	0.04	0.10	0.11	953	-19	-85	-52	66	0.04	0.06	0.05	0.02

2205 3 %NaCl p/p y pH [6-8]									2205 3 %NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2			m_1	m_2		
0	-309	-259	-284	50	2.88	0.55	1.72	2.33	0	-312	-220	-266	92	0.15	0.06	0.11	0.09
1	-24	3	-11	27	0.09	0.03	0.06	0.06	1	-234	-204	-219	30	0.04	0.05	0.05	0.01
7	109	45	77	64	0.03	0.03	0.03	0.00	7	-153	-188	-171	35	0.02	0.21	0.12	0.19
15	108	78	93	30	0.02	0.02	0.02	0.00	15	-231	-168	-200	63	0.05	0.11	0.08	0.06
42	11	11	11	0	0.01	0.02	0.02	0.01	42	-159	-286	-223	127	0.00	0.15	0.08	0.15
92	7	3	5	4	0.03	0.02	0.03	0.01	92	-156	-141	-149	15	0.02	0.02	0.02	0.00
134	1	29	15	28	0.03	0.03	0.03	0.00	134	-158	-146	-152	12	0.02	0.02	0.02	0.00
192	-17	-3	-10	14	0.03	0.03	0.03	0.00	192	-164	-154	-159	10	0.01	0.01	0.01	0.00
224	13	4	9	9	0.03	0.03	0.03	0.00	224	-163	-152	-158	11	0.02	0.02	0.02	0.00
267	22	18	20	4	0.02	0.02	0.02	0.00	267	-160	-147	-154	13	0.01	0.01	0.01	0.00
298	47	-26	11	73	0.02	0.03	0.03	0.01	298	-155	-144	-150	11	0.01	0.01	0.01	0.00
370	30	35	33	5	0.03	0.02	0.03	0.01	370	-160	-140	-150	20	0.01	0.01	0.01	0.00
406	39	35	37	4	0.02	0.02	0.02	0.00	406	-155	-143	-149	12	0.00	0.01	0.01	0.01
441	40	36	38	40	0.02	0.02	0.02	0.00	441	-160	-149	-155	11	0.00	0.01	0.01	0.01
471	39	23	31	16	0.02	0.01	0.02	0.01	471	-159	-147	-153	12	0.01	0.01	0.01	0.00
525	62	37	50	25	0.02	0.02	0.02	0.00	525	-160	-148	-154	12	0.01	0.01	0.01	0.00
588	19	18	19	1	0.02	0.02	0.02	0.00	588	-161	-152	-157	9	0.00	0.01	0.01	0.01
729	20	-10	5	30	0.02	0.08	0.05	0.06	729	-144	-137	-141	7	0.01	0.01	0.01	0.00
953	30	10	20	20	0.34	0.20	0.27	0.14	953	-93	-112	-103	19	0.04	0.15	0.10	0.11

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 20. E_{corr} e I_{corr} , correspondientes a m_1 y m_2 de cada celda de corrosión. Acero austenítico AISI 316-L para el intervalo pH [6-8], tablas situadas a la izquierda y pH [12-13], tablas situadas a la derecha.

AISI 316-L 0.5 %NaCl p/p y pH [6-8]									AISI 316-L 0.5 %NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2						
0	-28	-73	-51	45	0.03	0.05	0.04	0.02	0	-140	-213	-177	73	0.07	0.04	0.06	0.03
1	9	63	36	54	0.06	0.05	0.06	0.01	1	-127	-199	-163	72	0.04	0.04	0.04	0.00
7	89	91	90	2	0.03	0.03	0.03	0.00	7	-95	-158	-127	63	0.02	0.02	0.02	0.00
15	74	63	69	11	0.03	0.03	0.03	0.00	15	-93	-110	-102	17	0.03	0.01	0.02	0.02
42	59	36	48	23	0.01	0.02	0.02	0.01	42	-85	-131	-108	46	0.01	0.01	0.01	0.00
92	-89	24	-33	113	0.12	0.03	0.08	0.09	92	-81	-107	-94	26	0.02	0.01	0.02	0.01
134	-15	50	18	65	0.08	0.02	0.05	0.06	134	-75	-96	-86	21	0.02	0.01	0.02	0.01
192	-95	37	-29	132	0.12	0.03	0.08	0.09	192	-73	-96	-85	23	0.02	0.01	0.02	0.01
224	-107	17	-45	124	0.11	0.03	0.07	0.08	224	-68	-90	-79	22	0.02	0.01	0.02	0.01
267	95	56	76	39	0.03	0.01	0.02	0.02	267	-62	-85	-74	23	0.01	0.01	0.01	0.00
298	101	51	76	50	0.02	0.02	0.02	0.00	298	-55	-77	-66	22	0.01	0.01	0.01	0.00
370	100	71	86	29	0.02	0.01	0.02	0.01	370	-60	-79	-70	19	0.01	0.01	0.01	0.00
406	80	65	73	15	0.01	0.01	0.01	0.00	406	-62	-82	-72	20	0.01	0.00	0.01	0.01
441	86	67	77	19	0.01	0.01	0.01	0.00	441	-63	-83	-73	20	0.01	0.01	0.01	0.00
471	85	64	75	21	0.01	0.01	0.01	0.00	471	-63	-81	-72	18	0.01	0.00	0.01	0.01
525	67	61	64	6	0.02	0.01	0.02	0.01	525	-61	-83	-72	22	0.01	0.01	0.01	0.00
588	71	40	56	31	0.01	0.01	0.01	0.00	588	-65	-84	-75	19	0.01	0.01	0.01	0.00
729	118	97	108	21	0.01	0.00	0.01	0.01	729	-47	-60	-54	13	0.01	0.00	0.01	0.01
953	147	161	154	14	0.02	0.00	0.01	0.02	953	27	29	28	2	0.01	0.10	0.06	0.09

AISI 316-L 1 %NaCl p/p y pH [6-8]									AISI 316-L 1 %NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2						
0	-66	-52	-59	14	0.10	0.05	0.08	0.05	0	-160	-205	-183	45	0.05	0.03	0.04	0.02
1	44	49	47	5	0.04	0.05	0.05	0.01	1	-150	-200	-175	50	0.05	0.03	0.04	0.02
7	65	-70	-3	135	0.02	0.10	0.06	0.08	7	-128	-154	-141	26	0.03	0.03	0.03	0.00
15	-89	-93	-91	4	0.08	0.09	0.09	0.01	15	-260	-229	-245	31	0.06	0.05	0.06	0.01
42	-92	-47	-70	45	0.13	0.04	0.09	0.09	42	-106	-132	-119	26	0.01	0.01	0.01	0.00
92	-94	39	-28	133	0.12	0.02	0.07	0.10	92	-93	-121	-107	28	0.02	0.01	0.02	0.01
134	-127	48	-40	175	0.14	0.02	0.08	0.12	134	-82	-99	-91	17	0.01	0.01	0.01	0.00
192	-144	41	-52	185	0.17	0.01	0.09	0.16	192	-78	-43	-61	35	0.01	0.01	0.01	0.00
224	-152	41	-56	193	0.16	0.01	0.09	0.15	224	-71	-80	-76	9	0.01	0.01	0.01	0.00
267	-151	55	-48	206	0.14	0.01	0.08	0.13	267	-47	-55	-51	8	0.01	0.01	0.01	0.00
298	-157	66	-46	223	0.11	0.01	0.06	0.10	298	47	13	30	34	0.01	0.01	0.01	0.00
370	-132	64	-34	196	0.12	0.01	0.07	0.11	370	61	22	42	39	0.01	0.00	0.01	0.01
406	-137	57	-40	194	0.10	0.01	0.06	0.09	406	59	10	35	49	0.00	0.00	0.00	0.00
441	-119	-37	-78	82	0.09	0.03	0.06	0.06	441	61	7	34	54	0.00	0.00	0.00	0.00
471	-148	-53	-101	95	0.11	0.01	0.06	0.10	471	60	5	33	55	0.00	0.00	0.00	0.00
525	-115	61	-27	176	0.14	0.01	0.08	0.13	525	58	32	45	26	0.01	0.01	0.01	0.00
588	-134	65	-35	199	0.14	0.01	0.08	0.13	588	54	-16	19	70	0.00	0.00	0.00	0.00
729	-53	73	10	126	0.03	0.01	0.02	0.02	729	-74	-1	-38	73	0.01	0.00	0.01	0.01
953	-100	100	0	200	0.04	0.04	0.04	0.00	953	133	44	89	89	0.03	0.00	0.02	0.03

AISI 316-L 3 %NaCl p/p y pH [6-8]									AISI 316-L 3 %NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2						
0	-47	-107	-77	60	0.03	0.04	0.04	0.01	0	-130	-156	-143	26	0.04	0.04	0.04	0.00
1	-148	18	-65	166	0.30	0.05	0.18	0.25	1	-151	-150	-151	1	0.04	0.04	0.04	0.00
7	-88	24	-32	112	0.19	0.04	0.12	0.15	7	-110	-125	-118	15	0.04	0.04	0.04	0.00
15	-96	-71	-84	25	0.18	0.06	0.12	0.12	15	-167	-182	-175	15	0.05	0.16	0.11	0.11
42	-102	66	-18	168	0.14	0.01	0.08	0.13	42	-102	-114	-108	12	0.02	0.02	0.02	0.00
92	-103	49	-27	152	0.15	0.02	0.09	0.13	92	-90	-106	-98	16	0.02	0.03	0.03	0.01
134	-88	-130	-109	42	0.05	0.22	0.14	0.17	134	-85	-97	-91	12	0.02	0.02	0.02	0.00
192	-97	85	-6	182	0.07	0.06	0.07	0.01	192	-81	-96	-89	15	0.02	0.02	0.02	0.00
224	-51	118	34	169	0.01	0.03	0.02	0.02	224	-76	-90	-83	14	0.02	0.02	0.02	0.00
267	-55	-135	-95	80	0.02	0.16	0.09	0.14	267	-70	-83	-77	13	0.01	0.01	0.01	0.00
298	-60	62	1	122	0.03	0.02	0.03	0.01	298	-61	-75	-68	14	0.01	0.01	0.01	0.00
370	-23	-20	-22	3	0.03	0.02	0.03	0.01	370	-70	-93	-82	23	0.01	0.01	0.01	0.00
406	-76	-126	-101	50	0.03	0.17	0.10	0.14	406	-74	-81	-78	7	0.01	0.01	0.01	0.00
441	-66	151	43	217	0.02	0.02	0.02	0.00	441	-73	-82	-78	9	0.01	0.01	0.01	0.00
471	-96	153	29	249	0.05	0.02	0.04	0.03	471	-68	-81	-75	13	0.01	0.01	0.01	0.00
525	75	63	69	12	0.02	0.01	0.02	0.01	525	-68	-86	-77	18	0.01	0.01	0.01	0.00
588	-54	-115	-85	61	0.02	0.05	0.04	0.03	588	-71	-86	-79	15	0.01	0.01	0.01	0.00
729	-34	-24	-29	10	0.02	0.02	0.02	0.00	729	-53	-60	-57	7	0.01	0.01	0.01	0.00
953	-144	-221	-183	77	0.11	2.00	1.06	1.89	953	2	11	7	9	0.04	0.12	0.08	0.08

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 21. E_{corr} e I_{corr} , correspondientes a m_1 y m_2 de cada celda de corrosión. Acero austenítico AISI-304-L para el intervalo pH [6-8], tablas situadas a la izquierda y pH [12-13], tablas situadas a la derecha.

AISI 304-L 0.5%NaCl p/p y pH [6-8]										AISI 304-L 0.5%NaCl p/p y pH [12-13]														
Días	$E_{corr}(mV)$			Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$			Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$			Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$			Promedio	Recorrido			
	m_1	m_2				m_1	m_2					m_1	m_2				m_1	m_2				m_1	m_2	
	0	-88	-102			-95	14	0.16				0.10	0.13	0.06				0	-142			-180	-161	38
1	-30	-66	-48	36	0.08	0.14	0.11	0.06		1	-109	-141	-125	32	0.03	0.05	0.04	0.02						
7	-77	112	18	189	0.10	0.06	0.08	0.04		7	-79	-100	-90	21	0.03	0.04	0.04	0.01						
15	-44	132	44	176	0.09	0.05	0.07	0.04		15	-79	-99	-89	20	0.02	0.04	0.03	0.02						
42	-77	-64	-71	13	0.05	0.06	0.06	0.01		42	-212	-94	-153	118	0.03	0.01	0.02	0.02						
92	-97	-84	-91	13	0.04	0.09	0.07	0.05		92	-63	-79	-71	16	0.02	0.02	0.02	0.00						
134	-119	-103	-111	16	0.03	0.10	0.07	0.07		134	-64	-81	-73	17	0.01	0.02	0.02	0.01						
192	-169	-113	-141	56	0.11	0.09	0.10	0.02		192	-59	-74	-67	15	0.02	0.03	0.03	0.01						
224	-131	-110	-121	21	0.06	0.06	0.06	0.00		224	-54	-73	-64	19	0.01	0.02	0.02	0.01						
267	-141	-83	-112	58	0.09	0.03	0.06	0.06		267	-54	-72	-63	18	0.01	0.01	0.01	0.00						
298	-167	-91	-129	76	0.13	0.02	0.08	0.11		298	-50	-64	-57	14	0.01	0.01	0.01	0.00						
370	-122	-106	-114	16	0.10	0.04	0.07	0.06		370	-54	-72	-63	18	0.01	0.01	0.01	0.00						
406	89	-64	13	153	0.03	0.03	0.03	0.00		406	-56	-69	-63	13	0.01	0.01	0.01	0.00						
441	57	-90	-17	147	0.02	0.03	0.03	0.01		441	-57	-70	-64	13	0.01	0.01	0.01	0.00						
471	-103	67	-18	170	0.04	0.02	0.03	0.02		471	-51	-61	-56	10	0.00	0.01	0.01	0.01						
525	91	82	87	9	0.04	0.03	0.04	0.01		525	-58	-69	-64	11	0.01	0.01	0.01	0.00						
588	86	-105	-10	191	0.01	0.03	0.02	0.02		588	-59	-67	-63	8	0.00	0.01	0.01	0.01						
729	113	-168	-28	281	0.01	0.09	0.05	0.08		729	-51	-59	-55	8	0.01	0.01	0.01	0.00						
953	-79	-53	-66	26	0.08	0.08	0.08	0.00		953	28	19	24	9	0.27	0.02	0.15	0.25						

AISI 304-L 1%NaCl p/p y pH [6-8]										AISI 304-L 1%NaCl p/p y pH [12-13]														
Días	$E_{corr}(mV)$			Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$			Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$			Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$			Promedio	Recorrido			
	m_1	m_2				m_1	m_2					m_1	m_2				m_1	m_2				m_1	m_2	
	0	-86	-65			-76	21	0.14				0.09	0.12	0.05				0	-150			-161	-156	11
1	-132	32	-50	164	0.24	0.04	0.14	0.20		1	-116	-137	-127	21	0.03	0.05	0.04	0.02						
7	-133	-74	-104	59	0.14	0.12	0.13	0.02		7	-174	-166	-170	8	0.06	0.06	0.06	0.00						
15	-106	55	-26	161	0.13	0.03	0.08	0.10		15	-82	-101	-92	19	0.03	0.04	0.04	0.01						
42	-72	63	-5	135	0.07	0.02	0.05	0.05		42	-79	-99	-89	20	0.01	0.02	0.02	0.01						
92	-137	57	-40	194	0.17	0.03	0.10	0.14		92	-62	-82	-72	20	0.02	0.02	0.02	0.00						
134	-110	-117	-114	7	0.17	0.20	0.19	0.03		134	-66	-85	-76	19	0.02	0.02	0.02	0.00						
192	-113	-130	-122	17	0.23	0.25	0.24	0.02		192	-64	-82	-73	18	0.02	0.03	0.03	0.01						
224	-169	49	-60	218	0.22	0.04	0.13	0.18		224	-61	-78	-70	17	0.02	0.02	0.02	0.00						
267	-170	18	-76	188	0.16	0.02	0.09	0.14		267	-58	-74	-66	16	0.01	0.01	0.01	0.00						
298	-144	-38	-91	106	0.10	0.03	0.07	0.07		298	-52	-69	-61	17	0.01	0.01	0.01	0.00						
370	-156	75	-41	231	0.12	0.01	0.07	0.11		370	-59	-74	-67	15	0.01	0.01	0.01	0.00						
406	-133	68	-33	201	0.10	0.00	0.05	0.10		406	-58	-73	-66	15	0.01	0.01	0.01	0.00						
441	-105	64	-21	169	0.05	0.02	0.04	0.03		441	-59	-73	-66	14	0.01	0.01	0.01	0.00						
471	-260	69	-96	329	0.29	0.01	0.15	0.28		471	-51	-60	-56	9	0.01	0.01	0.01	0.00						
525	-212	68	-72	280	0.35	0.00	0.18	0.35		525	-58	-73	-66	15	0.01	0.01	0.01	0.00						
588	-138	-102	-120	36	0.12	0.03	0.08	0.09		588	-58	-71	-65	13	0.01	0.01	0.01	0.00						
729	-152	-77	-115	75	0.06	0.01	0.04	0.05		729	-51	-63	-57	12	0.01	0.01	0.01	0.00						
953	-76	-108	-92	32	0.00	0.42	0.21	0.42		953	17	4	11	13	0.06	0.13	0.10	0.07						

AISI 304-L 3%NaCl p/p y pH [6-8]										AISI 304-L 3%NaCl p/p y pH [12-13]														
Días	$E_{corr}(mV)$			Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$			Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$			Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$			Promedio	Recorrido			
	m_1	m_2				m_1	m_2					m_1	m_2				m_1	m_2				m_1	m_2	
	0	-206	-152			-179	54	2.47				0.14	1.31	2.33				0	-198			-149	-174	49
1	-154	-10	-82	144	0.81	0.05	0.43	0.76		1	-152	-162	-157	10	0.04	0.04	0.04	0.00						
7	-115	-45	-80	70	0.42	0.08	0.25	0.34		7	-157	-157	-157	0	0.04	0.06	0.05	0.02						
15	-126	-114	-120	12	0.32	0.19	0.26	0.13		15	-79	-94	-87	15	0.02	0.03	0.03	0.01						
42	-159	-129	-144	30	0.33	0.10	0.22	0.23		42	-76	-91	-84	15	0.00	0.02	0.01	0.02						
92	-184	-174	-179	10	0.31	0.19	0.25	0.12		92	-58	-87	-73	29	0.02	0.03	0.03	0.01						
134	-160	-148	-154	12	0.35	0.15	0.25	0.20		134	-63	-82	-73	19	0.01	0.02	0.02	0.01						
192	-198	-148	-173	50	0.36	0.12	0.24	0.24		192	-56	-87	-72	31	0.02	0.02	0.02	0.00						
224	-193	-53	-123	140	0.19	0.04	0.12	0.15		224	-54	-64	-59	10	0.00	0.01	0.01	0.01						
267	-209	-141	-175	68	0.26	0.09	0.18	0.17		267	-50	-66	-58	16	0.01	0.01	0.01	0.00						
298	-227	-152	-190	75	0.21	0.09	0.15	0.12		298	-46	-61	-54	15	0.01	0.02	0.02	0.01						
370	-233	-218	-226	15	0.13	0.16	0.15	0.03		370	-50	-64	-57	14	0.01	0.01	0.01	0.00						
406	-227	-222	-225	5	0.18	0.15	0.17	0.03		406	-43	-65	-54	22	0.00	0.01	0.01	0.01						
441	-234	-281	-258	47	0.15	0.49	0.32	0.34		441	-38	-64	-51	26	0.00	0.01	0.01	0.01						
471	-254	-266	-260	12	0.29	0.29	0.29	0.00		471	-27	-56	-42	29	0.01	0.01	0.01	0.00						
525	-240	-219	-230	21	0.19	0.34	0.27	0.15		525	-34	-59	-47	25	0.01	0.02	0.02	0.01						
588	-229	-220	-225	9	0.02	0.19	0.11	0.17		588	-32	-59	-46	27	0.01	0.01	0.01	0.00						
729	-184	-196	-190	12	0.18	0.13	0.16	0.05		729	-22	-48	-35	26	0.01	0.01	0.01	0.00						
953	-190	-195	-193	5	0.50	0.23	0.37	0.27		953	34	13	24	21	1.16	0.18	0.67	0.98						

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 22. E_{corr} e I_{corr} , correspondientes a m_1 y m_2 de cada celda de corrosión. Acero dúplex 2304 para el intervalo pH [6-8], tablas situadas a la izquierda y pH [12-13], tablas situadas a la derecha.

2304 0.5%NaCl p/p y pH [6-8]									2304 0.5%NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2						
0	-107	-335	-221	228	0.10	3.26	1.68	3.16	0	-304	-227	-266	77	0.42	0.05	0.24	0.37
1	-67	-94	-81	27	0.17	0.48	0.33	0.31	1	-174	-185	-180	11	0.04	0.03	0.04	0.01
7	133	-50	42	183	0.04	0.04	0.04	0.00	7	-125	-145	-135	20	0.02	0.02	0.02	0.00
15	-94	-31	-63	63	0.08	0.07	0.08	0.01	15	-123	-146	-135	23	0.02	0.03	0.03	0.01
42	80	-99	-10	179	0.02	0.09	0.06	0.07	42	-133	-171	-152	38	0.02	0.05	0.04	0.03
92	-146	-62	-104	84	0.13	0.06	0.10	0.07	92	-126	-135	-131	9	0.02	0.02	0.02	0.00
134	-183	21	-81	204	0.16	0.04	0.10	0.12	134	-134	-142	-138	8	0.02	0.02	0.02	0.00
192	-109	-122	-116	13	0.06	0.10	0.08	0.04	192	-138	-145	-142	7	0.02	0.02	0.02	0.00
224	-2	-78	-40	76	0.03	0.04	0.04	0.01	224	-137	-141	-139	4	0.02	0.01	0.02	0.01
267	-70	-15	-43	55	0.03	0.02	0.03	0.01	267	-137	-139	-138	2	0.01	0.01	0.01	0.00
298	22	19	21	3	0.02	0.01	0.02	0.01	298	-131	-134	-133	3	0.01	0.01	0.01	0.00
370	-100	20	-40	120	0.03	0.02	0.03	0.01	370	-134	-130	-132	4	0.00	0.01	0.01	0.01
406	-23	12	-6	35	0.01	0.01	0.01	0.00	406	-133	-138	-136	5	0.01	0.01	0.01	0.00
441	-152	25	-64	177	0.06	0.02	0.04	0.04	441	-136	-141	-139	5	0.01	0.01	0.01	0.00
471	-148	46	-51	194	0.04	0.01	0.03	0.03	471	-129	-130	-130	1	0.00	0.00	0.00	0.00
525	-98	34	-32	132	0.03	0.03	0.03	0.00	525	-142	-137	-140	5	0.01	0.01	0.01	0.00
588	-207	28	-90	235	0.09	0.02	0.06	0.07	588	-141	-140	-141	1	0.00	0.00	0.00	0.00
729	57	74	66	17	0.01	0.01	0.01	0.00	729	-125	-127	-126	2	0.00	0.00	0.00	0.00
953	-78	123	23	201	0.06	0.05	0.06	0.01	953	-55	-48	-52	7	0.01	0.06	0.04	0.05

2304 1%NaCl p/p y pH [6-8]									2304 1%NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2						
0	-226	-132	-179	94	1.42	0.28	0.85	1.14	0	-266	-228	-247	38	0.22	0.06	0.14	0.16
1	-60	-105	-83	45	0.16	0.31	0.24	0.15	1	-205	-229	-217	24	0.12	0.06	0.09	0.06
7	142	121	132	21	0.04	0.05	0.05	0.01	7	-217	-200	-209	17	0.10	0.05	0.08	0.05
15	-163	157	-3	320	0.04	0.03	0.04	0.01	15	-181	-165	-173	16	0.10	0.03	0.07	0.07
42	175	-66	55	241	0.03	0.07	0.05	0.04	42	-141	-131	-136	10	0.01	0.01	0.01	0.00
92	136	117	127	19	0.01	0.03	0.02	0.02	92	-146	-134	-140	12	0.02	0.02	0.02	0.00
134	40	-86	-23	126	0.02	0.17	0.10	0.15	134	-125	-140	-133	15	0.02	0.02	0.02	0.00
192	-95	-147	-121	52	0.14	0.21	0.18	0.07	192	-142	-140	-141	2	0.02	0.02	0.02	0.00
224	-140	-124	-132	16	0.13	0.17	0.15	0.04	224	-138	-136	-137	2	0.02	0.01	0.02	0.01
267	-118	-114	-116	4	0.11	0.12	0.12	0.01	267	-135	-135	-135	0	0.01	0.01	0.01	0.00
298	-125	-142	-134	17	0.09	0.13	0.11	0.04	298	-129	-131	-130	2	0.01	0.01	0.01	0.00
370	-13	-160	-87	147	0.02	0.18	0.10	0.16	370	-123	-121	-122	2	0.01	0.01	0.01	0.00
406	-150	-142	-146	8	0.06	0.09	0.08	0.03	406	-132	-131	-132	1	0.01	0.01	0.01	0.00
441	-94	-130	-112	36	0.05	0.21	0.13	0.16	441	-133	-130	-132	3	0.01	0.01	0.01	0.00
471	-95	-168	-132	73	0.04	0.04	0.04	0.00	471	-126	-125	-126	1	0.01	0.01	0.01	0.00
525	-91	-91	-91	0	0.05	0.08	0.07	0.03	525	-119	-123	-121	4	0.01	0.01	0.01	0.00
588	-80	43	-19	123	0.04	0.02	0.03	0.02	588	-106	-138	-122	32	0.01	0.01	0.01	0.00
729	-154	-67	-111	87	0.13	0.04	0.09	0.09	729	-103	-120	-112	17	0.01	0.01	0.01	0.00
953	50	60	55	10	0.11	0.11	0.11	0.00	953	-46	85	20	131	0.08	0.03	0.06	0.05

2304 3%NaCl p/p y pH [6-8]									2304 3 %NaCl p/p y pH [12-13]								
Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido	Días	$E_{corr}(mV)$		Promedio	Recorrido	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$		Promedio	Recorrido
	m_1	m_2			m_1	m_2				m_1	m_2						
0	-158	-218	-188	60	0.96	0.11	0.54	0.85	0	-235	-217	-226	18	0.07	0.07	0.07	0.00
1	-135	-133	-134	2	0.31	0.19	0.25	0.12	1	-208	-220	-214	12	0.05	0.07	0.06	0.02
7	-158	-191	-175	33	0.49	0.87	0.68	0.38	7	-211	-188	-200	23	0.04	0.09	0.07	0.05
15	-170	-141	-156	29	0.19	0.21	0.20	0.02	15	-143	-137	-140	6	0.01	0.02	0.02	0.01
42	-112	-158	-135	46	0.15	0.24	0.20	0.09	42	-136	-203	-170	67	0.03	0.23	0.13	0.20
92	-191	-158	-175	33	0.20	0.22	0.21	0.02	92	-145	-140	-143	5	0.02	0.03	0.03	0.01
134	-169	-160	-165	9	0.17	0.19	0.18	0.02	134	-152	-141	-147	11	0.02	0.03	0.03	0.01
192	22	-202	-90	224	0.03	0.18	0.11	0.15	192	-152	-138	-145	14	0.01	0.03	0.02	0.02
224	-215	-190	-203	25	0.20	0.14	0.17	0.06	224	-147	-134	-141	13	0.01	0.01	0.01	0.00
267	-28	-177	-103	149	0.01	0.10	0.06	0.09	267	-146	-130	-138	16	0.01	0.01	0.01	0.00
298	-22	-78	-50	56	0.02	0.04	0.03	0.02	298	-140	-129	-135	11	0.01	0.01	0.01	0.00
370	-22	-20	-21	2	0.01	0.04	0.03	0.03	370	-140	-126	-133	14	0.01	0.01	0.01	0.00
406	-6	-11	-9	5	0.01	0.02	0.02	0.01	406	-137	-126	-132	11	0.01	0.01	0.01	0.00
441	-28	-207	-118	179	0.01	0.19	0.10	0.18	441	-133	-120	-127	13	0.01	0.01	0.01	0.00
471	22	-100	-39	122	0.10	0.02	0.06	0.08	471	-122	-114	-118	8	0.01	0.01	0.01	0.00
525	-220	-190	-205	30	0.21	0.11	0.16	0.10	525	-125	-120	-123	5	0.01	0.01	0.01	0.00
588	-182	-237	-210	55	0.13	0.13	0.13	0.00	588	-131	-113	-122	18	0.01	0.01	0.01	0.00
729	230	-215	8	445	0.03	0.09	0.06	0.06	729	-97	-110	-104	13	0.01	0.01	0.01	0.00
953	-100	-110	-105	10	0.17	0.34	0.26	0.17	953	-11	-65	-38	54	0.08	0.08	0.08	0.00

En un segundo lugar y tras haber finalizado el período de medidas se procede al desmontaje de las celdas con el objetivo de pesar las barras y calcular la pérdida de material gravimétrica, por diferencia de pesada inicial y final.

Además, en el ANEXO 2 se muestran fotografías de cada una de las barras una vez se les ha retirado el encintado y a su lado otras fotografías que se han tomado mediante lupa binocular, tras el limpiado de acero para la retirada de óxidos. Estas segundas imágenes se realizan con el objetivo de observar posibles defectos, inicios de picaduras o corrosiones localizadas que no se detecte de forma clara mediante el ojo humano.

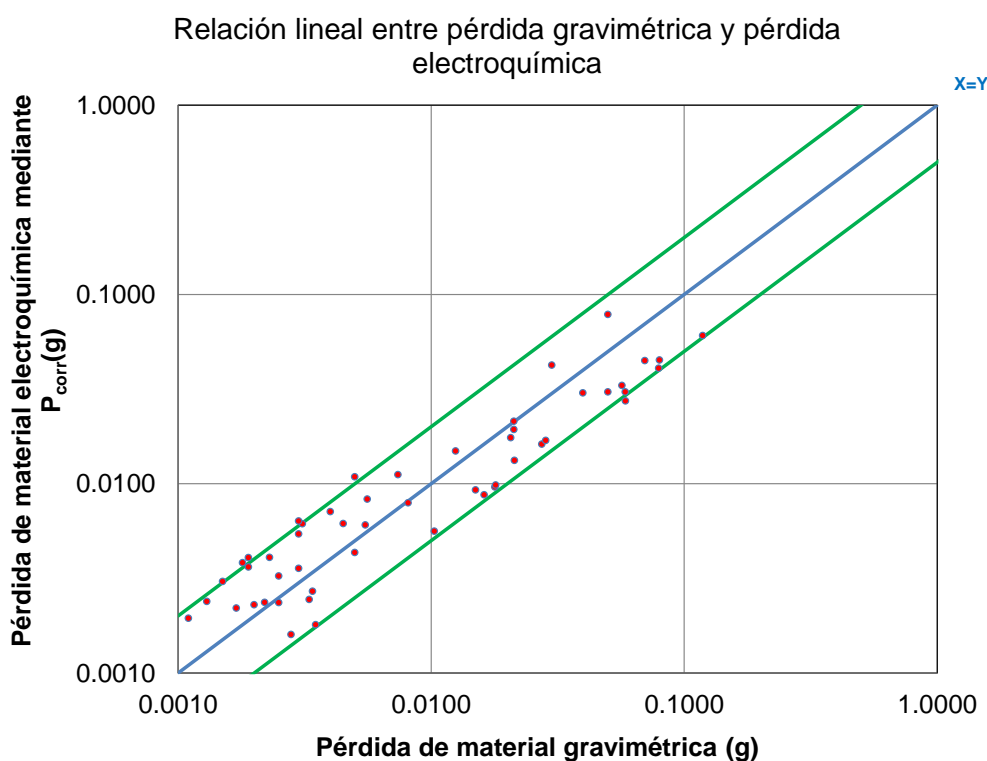
A continuación, se muestra una tabla con los valores de diferencias de pesadas obtenidas por gravimetrías para las muestras m_1 y m_2 de cada celda. Además, en la columna contigua se muestran los valores de pérdida de material en gramos que se han calculado mediante la integración de las gráficas donde se representan los valores de I_{corr} frente al tiempo para obtener a partir de ellas y de la ecuación 54, la I_{corr} acumulada. Este valor de acumulada se introduce en la ley de Faraday y se obtiene la pérdida de material que denominamos como electroquímica y de este modo se diferencia de la pérdida de material gravimétrica que se ha obtenido por diferencia de pesada, tras sucesivos ciclos de limpieza de las barras.

Tabla 23. Pérdida de material gravimétrica y electroquímica durante los 953 días.

Calidad de acero ϕ (12mm)	Intervalo de pH	Concentración de cloruros	Perdida de material gravimétrica después de 953 días (g)	Perdida de material electroquímica después de 953 días (g)	Error relativo (%)	Perdida de material gravimétrica después de 953 días (g)	Perdida de material electroquímica después de 953 días (g)	Error relativo (%)
			m_1	m_1		m_2	m_2	
2001	pH [6-8]	0.5%NaCl p/p	0.0794	0.0407	48.74	0.0398	0.0302	24.12
		1%NaCl p/p	0.0700	0.0446	36.29	0.0568	0.0330	41.90
		3%NaCl p/p	0.1185	0.0605	48.95	0.0586	0.0305	47.95
2001	pH [12-13]	0.5%NaCl p/p	0.0023	0.0041	78.26	0.0028	0.0016	42.86
		1%NaCl p/p	0.0020	0.0023	15.00	0.0002	0.0023	1050.00
		3%NaCl p/p	0.0081	0.0079	2.47	0.0055	0.0060	9.09
2205	pH [6-8]	0.5%NaCl p/p	0.0025	0.0024	4.00	0.0018	0.0038	111.11
		1%NaCl p/p	0.0040	0.0071	77.50	0.0008	0.0038	375.00
		3%NaCl p/p	0.0125	0.0149	19.20	0.0074	0.0112	51.35
2205	pH [12-13]	0.5%NaCl p/p	0.0034	0.0027	20.59	0.0001	0.0021	2000.00
		1%NaCl p/p	0.0033	0.0024	27.27	0.0015	0.0030	100.00
		3%NaCl p/p	0.0002	0.0024	1100.00	0.0002	0.0072	3500.00
AISI 316-L	pH [6-8]	0.5%NaCl p/p	0.0031	0.0061	96.77	0.0011	0.0019	72.73
		1%NaCl p/p	0.0274	0.0162	40.88	0.0030	0.0036	20.00
		3%NaCl p/p	0.0179	0.0096	46.37	0.0500	0.0784	56.80
AISI 316-L	pH [12-13]	0.5%NaCl p/p	0.0035	0.0018	48.57	0.0002	0.0046	2200.00
		1%NaCl p/p	0.0022	0.0024	9.09	0.0012	0.0010	16.67
		3%NaCl p/p	0.0025	0.0033	32.00	0.0045	0.0062	37.78
AISI 304-L	pH [6-8]	0.5%NaCl p/p	0.0150	0.0093	38.00	0.0180	0.0098	45.56
		1%NaCl p/p	0.0212	0.0193	8.96	0.0212	0.0214	0.94
		3%NaCl p/p	0.0800	0.0450	43.75	0.0500	0.0305	39.00
AISI 304-L	pH [12-13]	0.5%NaCl p/p	0.0050	0.0109	118.00	0.0013	0.0024	84.62
		1%NaCl p/p	0.0019	0.0036	89.47	0.0030	0.0063	110.00
		3%NaCl p/p	0.0300	0.0423	41.00	0.0056	0.0083	48.21
2304	pH [6-8]	0.5%NaCl p/p	0.0162	0.0087	46.30	0.0103	0.0056	45.63
		1%NaCl p/p	0.0214	0.0133	37.85	0.0207	0.0175	15.46
		3%NaCl p/p	0.0284	0.0169	40.49	0.0587	0.0274	53.32
2304	pH [12-13]	0.5%NaCl p/p	0.0000	0.0014	1300.00	0.0000	0.0035	3400.00
		1%NaCl p/p	0.0050	0.0043	72.00	0.0017	0.0022	29.41
		3%NaCl p/p	0.0019	0.0041	26.32	0.0030	0.0054	80.00

Ambas pérdidas de material, gravimétrica y electroquímica, se representan gráficamente una frente a otra y se sitúan las relaciones con respecto a una recta lineal de pendiente igual a uno, donde $y=x$.

Las líneas paralelas a la recta $y=x$ de pendiente 1 y que se muestran de color verde en la gráfica 18, delimitan el rango de precisión que se obtiene mediante un factor de dos. La línea verde superior corresponde a dos veces el valor real y la inferior corresponde a la mitad del valor real. Este control es esencial para validar cualquier medición de valores de I_{corr} , permitiendo que dichos valores se encuentren dentro de un factor de error de dos [7, 32, 127].



Gráfica 18. Pérdida de material gravimétrica frente a la pérdida de material electroquímica.

Como puede observarse en la gráfica 18, la mayoría de los puntos se encuentran entre ambas líneas de color verde por lo que con esta representación se consideran válidos los valores de I_{corr} obtenidos mediante medidas de resistencia a la polarización lineal y con ello la validación del parámetro B utilizado.

El tercer estudio que se realiza a partir de las celdas de corrosión, es el cálculo de la profundidad de la corrosión o P_{corr} que se calcula como un valor teórico, tal como se describe en el apartado de metodología y no es medido directamente. A partir de los valores de P_{corr} se estudia la profundidad de corrosión en cada una de las calidades de acero inoxidable y en cada medio. Los valores de P_{corr} para las muestras m_1 y m_2 ,

además de sus valores medio y sus rango o recorrido, se muestran en la siguiente tabla 24.

Tabla 24. Valores de P_{corr} para m_1 y m_2 . Valores medios y recorrido.

	Intervalo de pH	Concentración de cloruros	P_{corr} (μm), transcurridos 953 días	P_{corr} (μm), transcurridos 953 días	Valor medio de P_{corr} (μm), transcurridos 953 días	Recorrido (μm)
			m_1	m_2		
2001	pH [6-8]	0.5%NaCl p/p	66.6	49.4	57.9	17.2
		1%NaCl p/p	73.0	54.1	63.5	18.9
		3%NaCl p/p	99.0	49.9	74.5	49.1
2001	pH [12-13]	0.5%NaCl p/p	6.7	2.6	4.6	4.1
		1%NaCl p/p	3.7	3.8	3.7	0.01
		3%NaCl p/p	12.9	9.9	11.4	3.0
2205	pH [6-8]	0.5%NaCl p/p	3.8	6.2	5.0	2.4
		1%NaCl p/p	11.6	6.1	8.9	5.5
		3%NaCl p/p	24.4	18.3	21.3	6.1
2205	pH [12-13]	0.5%NaCl p/p	4.4	3.5	3.9	0.9
		1%NaCl p/p	4.0	4.9	4.5	0.9
		3%NaCl p/p	4.0	11.8	7.9	7.8
AISI 316-L	pH [6-8]	0.5%NaCl p/p	10.0	3.2	6.6	6.8
		1%NaCl p/p	26.5	5.8	16.1	20.6
		3%NaCl p/p	15.7	128.3	71.9	112.6
AISI 316-L	pH [12-13]	0.5%NaCl p/p	2.9	7.5	5.2	4.5
		1%NaCl p/p	3.8	1.6	2.7	2.2
		3%NaCl p/p	5.3	10.1	7.7	4.7
AISI 304-L	pH [6-8]	0.5%NaCl p/p	15.1	16.1	15.6	0.9
		1%NaCl p/p	31.6	34.9	33.3	3.3
		3%NaCl p/p	73.6	49.9	61.8	23.6
AISI 304-L	pH [12-13]	0.5%NaCl p/p	17.8	3.9	10.8	13.8
		1%NaCl p/p	5.9	10.4	8.2	4.4
		3%NaCl p/p	69.2	13.5	41.4	55.6
2304	pH [6-8]	0.5%NaCl p/p	14.3	9.2	11.7	5.1
		1%NaCl p/p	21.7	28.6	25.2	6.9
		3%NaCl p/p	27.7	44.8	36.2	17.1
2304	pH [12-13]	0.5%NaCl p/p	2.2	5.8	4.0	3.5
		1%NaCl p/p	7.1	3.6	5.3	3.5
		3%NaCl p/p	6.6	8.9	7.8	2.2

Los valores medios correspondientes a m_1 y m_2 de la tabla 24, se discuten mediante representaciones graficas en el apartado de discusión.

Finalmente, el cuarto y último estudio que se extrae a partir de las celdas de corrosión, se basa en la aplicación de impedancias electroquímicas (EIS), tal como se indica en el apartado de metodología.

En primer lugar, se comprueba la consistencia de las medidas de EIS, donde se comparan los datos experimentales de la parte real e imaginaria de la impedancia frente a la frecuencia aplicada y los mismos valores obtenidos mediante las transformadas de Kramers-Kroning o (K-K). Adicionalmente se reafirma la consistencia de todas las medidas experimentales de EIS, mediante la evaluación de estos resultados que son analizados mediante una función estadística que expresa la

dispersión entre los datos experimentales y los datos transformados, AZ % a partir de la ecuación 61 en el apartado de metodología. Se observa como tanto para la transformación de la parte real en imaginaria, como la imaginaria en real, ninguno de los valores de error medio calculados, superan el valor del 3% y por lo tanto satisfacen las transformadas de K-K. Todos estos resultados descritos se muestran en el ANEXO 3 y con todo ello se confirma la consistencia de las medidas experimentales de EIS pudiéndose pasar a la fase de interpretación de dichas medidas.

Las medidas experimentales de EIS, se ajustan al circuito equivalente constituido por dos constantes de tiempo y cuya interpretación física se muestra en el apartado de metodología, en la figura 36.

El análisis de los diagramas de impedancias obtenidos (Nyquist y Bode (módulo; $|Z|$ y ángulo, ϕ)), se utilizan como herramienta para la selección y confirmación del circuito equivalente que se ha seleccionado para interpretar físicamente lo que ocurre en la superficie de las barras corrugadas de aceros inoxidable cuando estas se ponen en contacto con los distintos medios de estudio.

La mayor parte de los diagramas de Nyquist, muestran un semicírculo pequeño que sólo se aprecia sólo cuando el diagrama se amplía y un segundo que indica un comportamiento capacitivo. Sin embargo, son los diagramas de Bode los que confirman que el circuito equivalente es adecuado, pues en ellos se observa, para la representación del ángulo \emptyset , dos hombros a veces solapados que pueden corresponder a dos constantes de tiempo [120]. Tras la observación y estudio de todos los diagramas de Nyquist y Bode de todas las calidades de aceros inoxidables y para ambas muestras m_1 y m_2 , se decide utilizar el mismo circuito, pues se deduce que aunque con ciertas diferencias, la gran mayoría de ellos presentan características del tipo de las que se han descrito.

Debido al gran número de diagramas, sólo se representan los diagramas de Nyquist y Bode, para la muestra m_1 , de cada uno de los aceros inoxidables, para los distintos intervalos de pH y para las distintas concentraciones de cloruros. El ANEXO 4 muestra dichos diagramas junto con los que se obtienen tras realizar el ajuste al circuito equivalente.

Por otro último, es en el ANEXO 5 donde se muestran los valores de cada parámetro que constituye el circuito equivalente (R_0 , CPE_1 , R_1 , CPE_2 y R_2) tras la realización de los ajustes, así como los errores en % que cada uno de ellos presentan de forma individual y el error cometido en el ajuste global del circuito y que se denomina X^2 .

4.2 Resultados de ensayos de laboratorio en probetas de mortero.

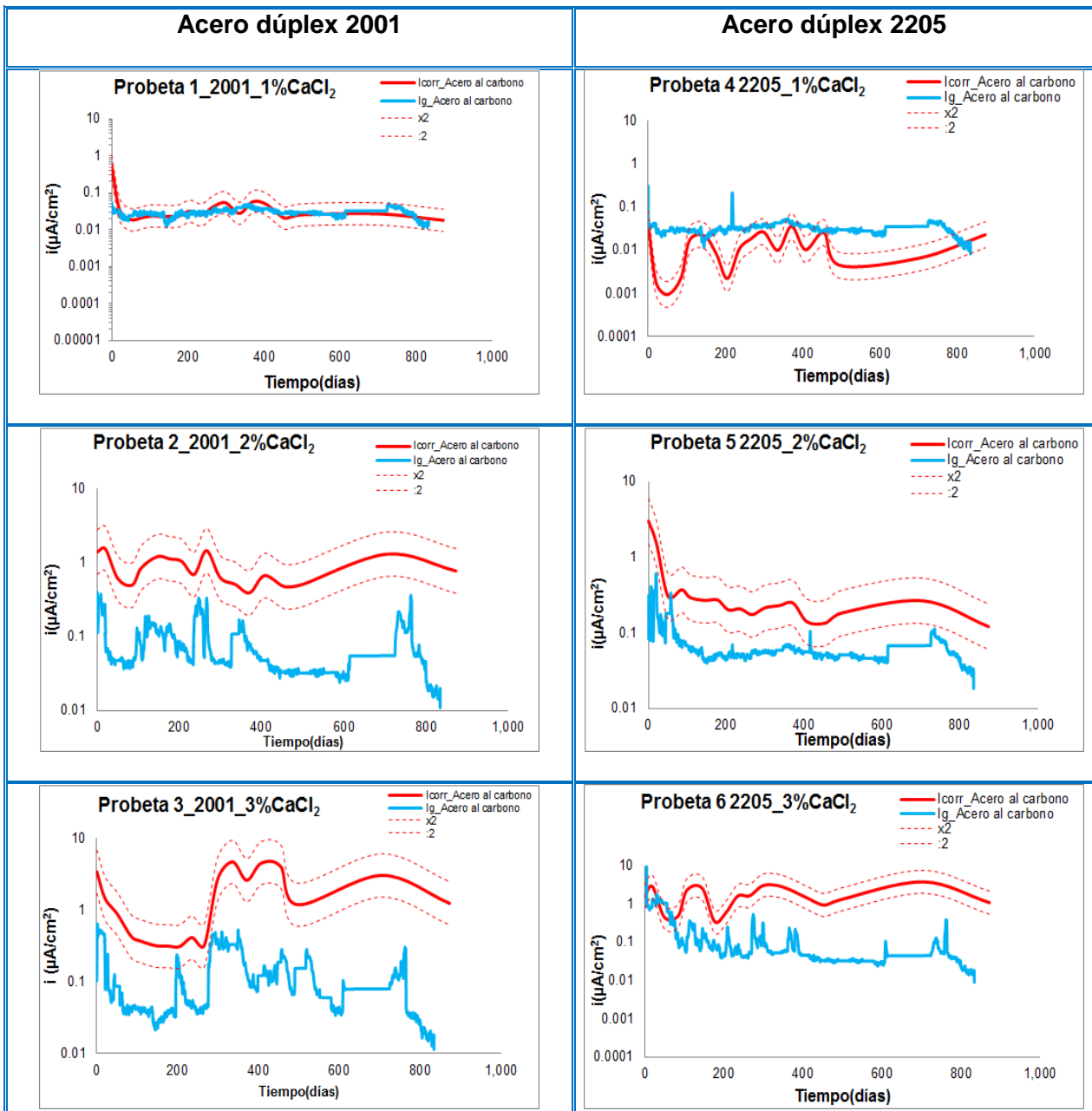
4.2.1 Probetas de mortero con cloruros en su composición.

4.2.1.1 Seguimiento de los parámetros de corrosión E_{corr} e I_{corr} .

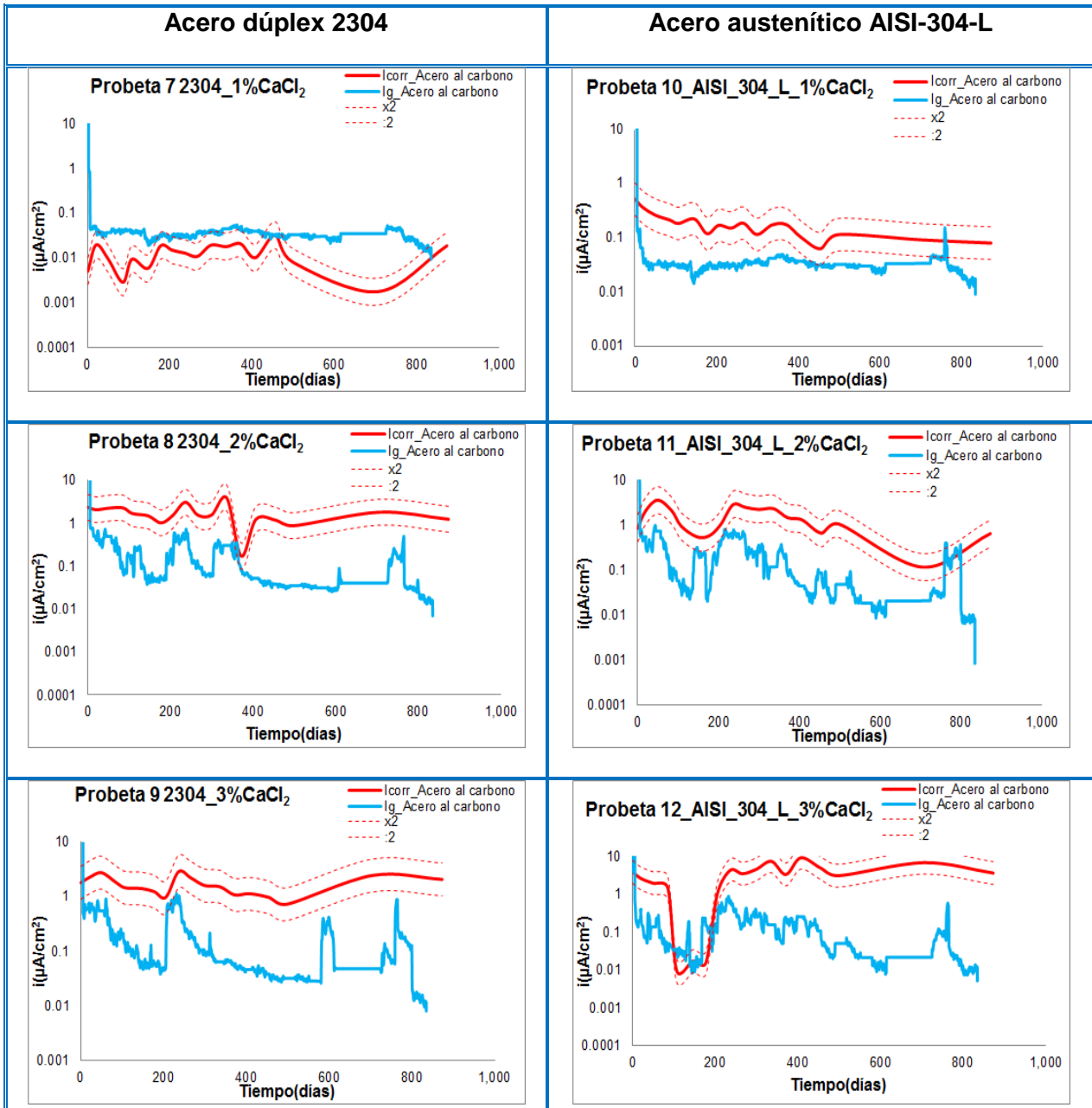
Se muestran los resultados obtenidos a partir de las probetas de mortero que se han fabricado con distintas concentraciones de cloruros en las amasadas lo cuales se recuerdan que son de 1, 2 y 3% p/p añadido en forma de $CaCl_2$. Debido al gran número de gráficas que se generan, la representación de los valores de E_{corr} e I_{corr} a lo largo del tiempo de medida, se adjuntan en el ANEXO 6. En estas gráficas se representa la evolución de dichos indicadores de corrosión para las muestras m_1 , m_2 y una barra de acero al carbono, todos ellos insertados en cada una de las quince probetas. Se observa como todos los aceros inoxidable se encuentran pasivos a pesar de que la concentración de cloruros que se añade a las amasadas es elevada, sin embargo, esto no ocurre con las barras de acero al carbono que se muestran activas principalmente en las probetas cuya concentración de cloruros es muy alta.

4.2.1.2 Estudio del par galvánico

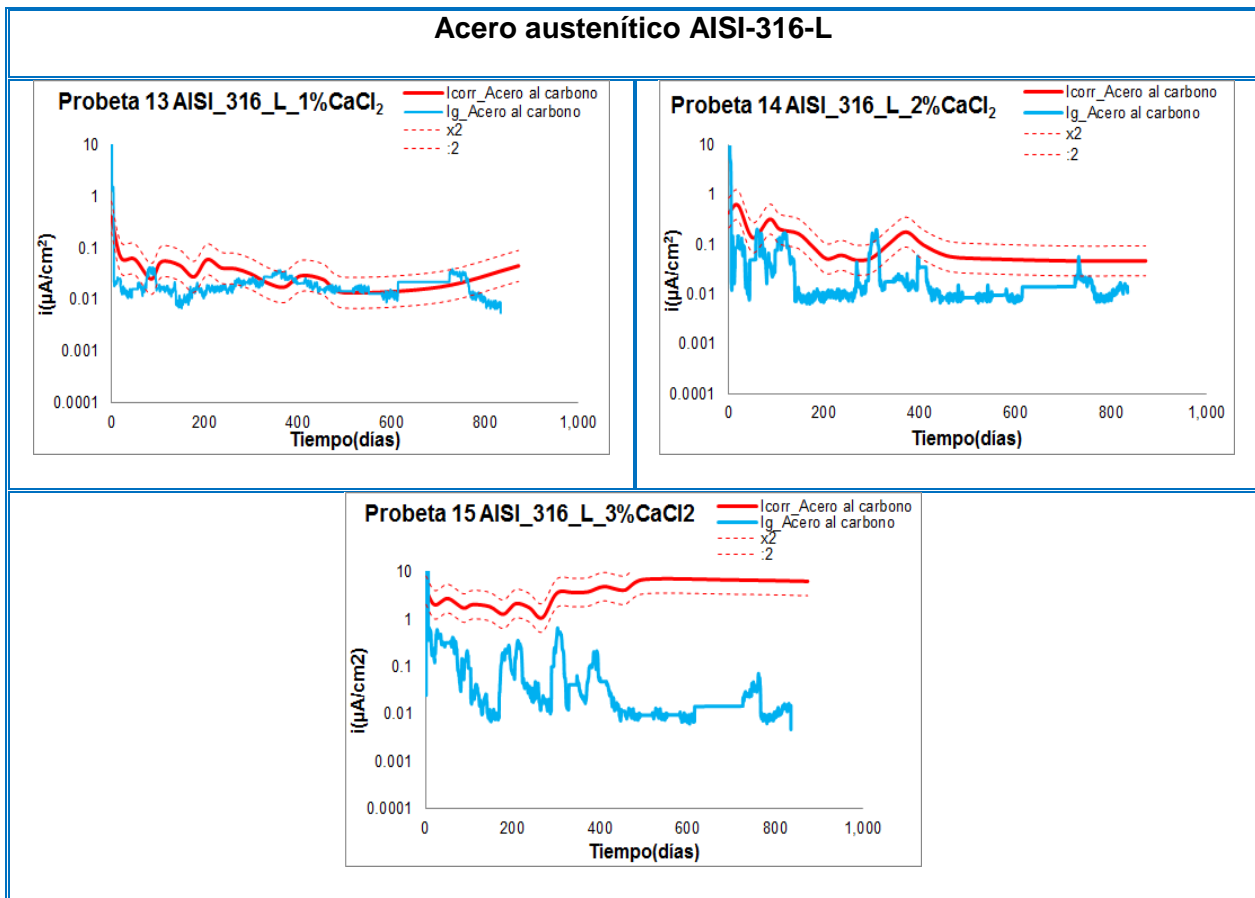
En las siguientes gráficas se representan la intensidad de corriente en $\mu A/cm^2$, que se obtiene mediante el equipo de registro continuo y que se denomina I_g . Junto a ella se representa la densidad de corrosión I_{corr} que se le ha ido midiendo a la barra de acero al carbono durante el mismo período de tiempo. Además, se trazan gráficas punteadas que muestran el límite que multiplica por dos y a la vez divide por dos a esta última representación, para comprobar si la representación de la intensidad que muestra el resultado para la evolución de par galvánico o no I_g , se encuentran dentro de estos límites.



Gráfica 19. I_{corr} vs tiempo e I_{g} para estudio del par galvánico. Aceros dúplex 2001 y 2205.



Gráfica 20. I_{corr} vs tiempo e I_g para estudio del par galvánico. Aceros dúplex 2304 y austenítico AISI 304-L.

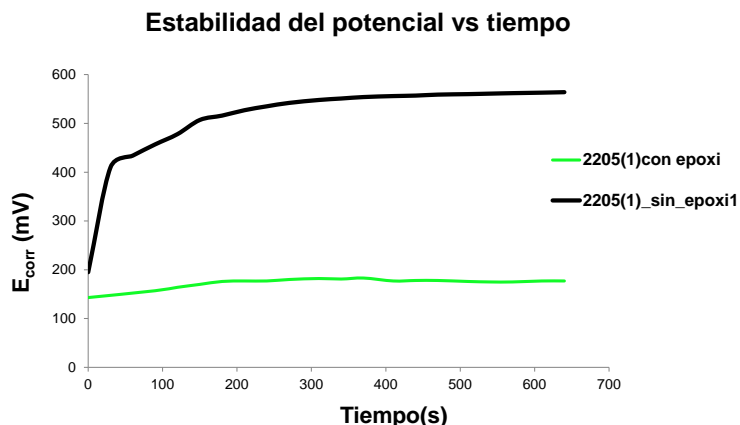


Gráfica 21. i_{corr} vs tiempo e i_g para estudio del par galvánico. Acero austenítico AISI 316-L.

4.2.2 Probetas de mortero fabricadas para el cálculo de la concentración límite de cloruros.

Con la intención de comprobar que los refuerzos pintados con resina epoxi no se polarizan y por lo tanto, la corrosión de las mismas durante el ensayo es debido exclusivamente a la llegada de los cloruros, se realiza una medida de la E_{corr} de uno de los lotes de probetas. Justo después de apagar la fuente de potencial se introduce un electrodo de Ag/AgCl en el interior de la disolución de la probeta y se conecta un voltímetro al electrodo de referencia y a la barra de refuerzo.

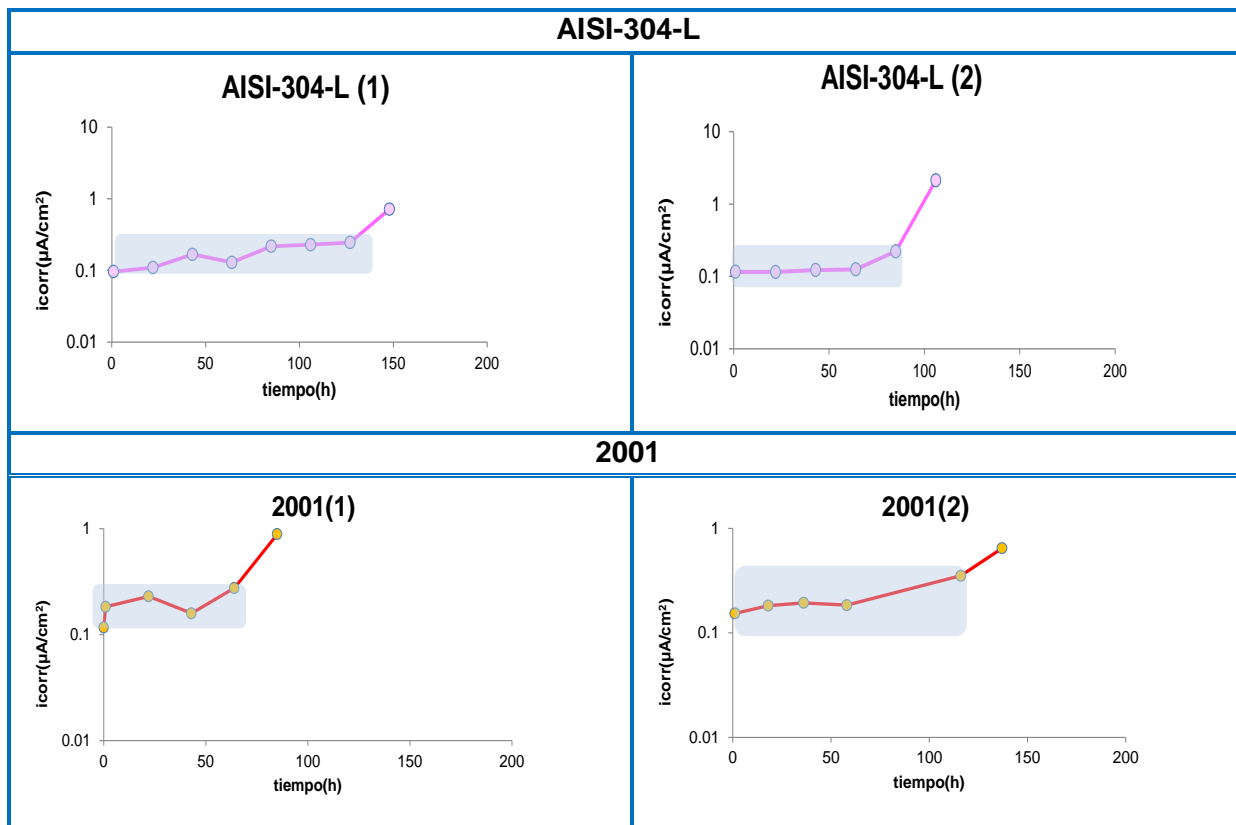
Se realizan medidas de la E_{corr} cada 30 segundos durante un período de diez minutos. Se observa que la variación de la E_{corr} en este período es muy pequeña, por lo que estos resultados nos demuestran que la polarización no es un motivo predominante debido al cual, se produzca la corrosión de los refuerzos de acero inoxidable.

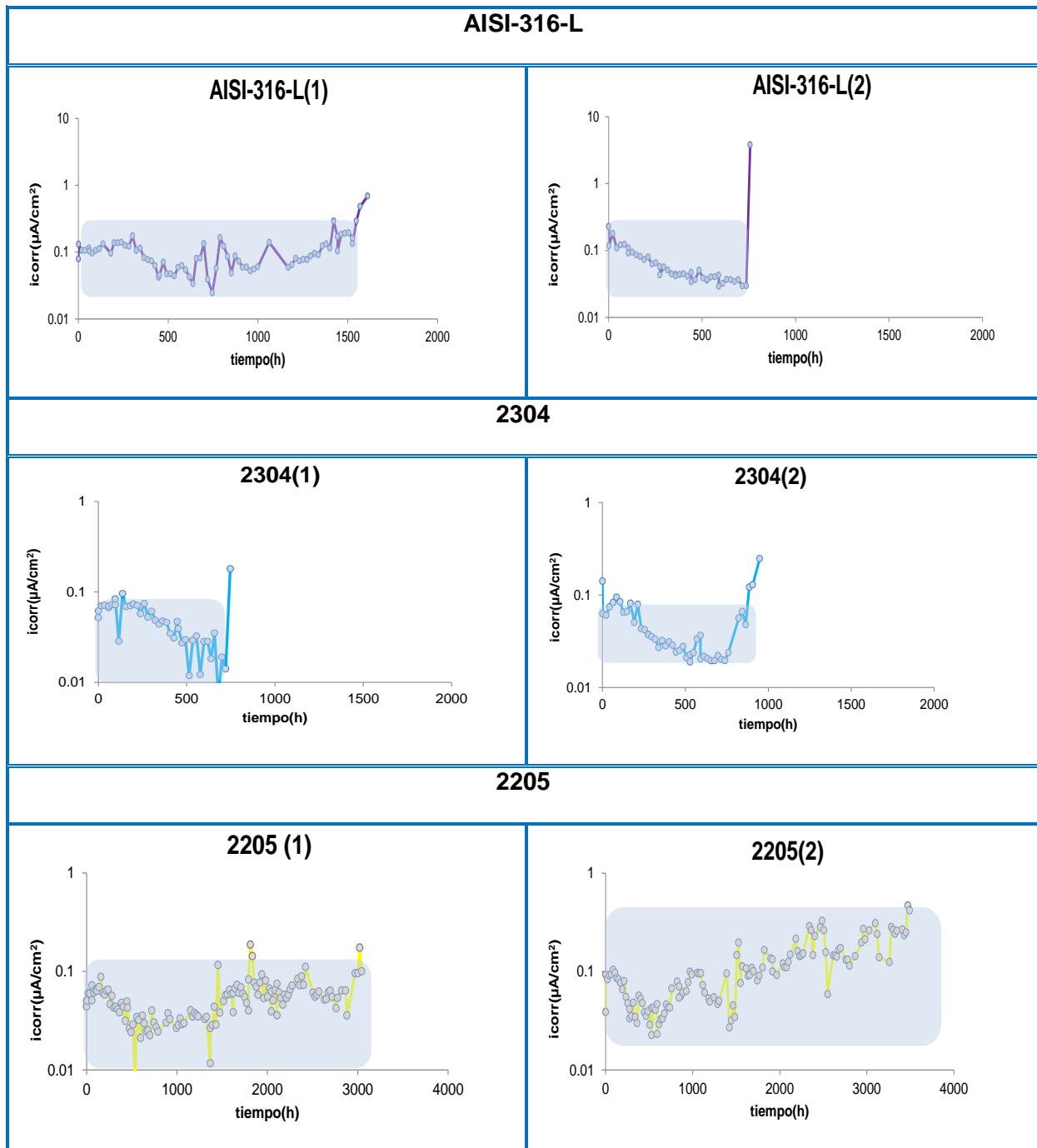


Gráfica 22. Estabilidad de los aceros embebidos, durante 10 minutos, tras la aplicación de 12 V de potencial al sistema.

Como se comenta en el apartado de metodología, se realizan tres lotes de probetas. En cada lote se fabrican dos probetas gemelas por cada una de las calidades de acero que se estudian, por lo que, en total se obtienen seis resultados para cada calidad de acero inoxidable de refuerzo. Debido al gran número de gráficas que se generan, se presentan sólo dos de estas por cada calidad de acero, con la intención de mostrar gráficamente algunos de los valores de I_{corr} de despasivación y el tiempo necesario para llegar a este estado como se indicó en la figura 40 en el apartado de metodología.

Tabla 25. Gráficas donde se muestra la $I_{corr\ desp}$ y t_{des} en ensayos reales de un lote de probetas.





A continuación se muestran mediante la tabla 26 los seis valores obtenidos correspondientes a los tres lotes que se ensayan, de las horas que cada probeta necesita de aplicación de potencial para que el cloruro llegue a la misma y muestre el primer indicio de despasivación. Debido a que se obtienen seis valores de cada uno de ellos se calcula la desviación estándar (σ) tal y como se muestra en la ecuación 73 y con la intención de mostrar una mejor interpretación porcentual del grado de variabilidad se calcula el coeficiente de variación (C.V) como se indica en la ecuación 74, además se aproximan el número de horas de aplicación de potencial a días.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x - \bar{x}}{n - 1}} \quad \text{Eq. 73}$$

$$\text{C.V} = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100 \quad \text{Eq. 74}$$

Tabla 26. Tiempos de despasivación en horas de potencial aplicado. Valores promedios, σ , C.V y aproximación en días.

Calidad del acero inoxidable	Horas de aplicación de potencial para la despasivación						Promedio	σ	C.V	Aproximación en días
	Lote 1		Lote 2		Lote 3					
	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2				
2001	96	116	85	85	105	63	92	18	0.20	≈4 días
AISI-304-L	137	98	148	106	126	84	117	25	0.21	≈5 días
AISI-316-L	514	1042	757	64	1146	126	608	455	0.75	≈20 días
2304	260	769	948	444	315	147	481	313	0.65	≈54 días
2205	x	1412	843	3471	x	x	1909	1383	0.72	≈79 días

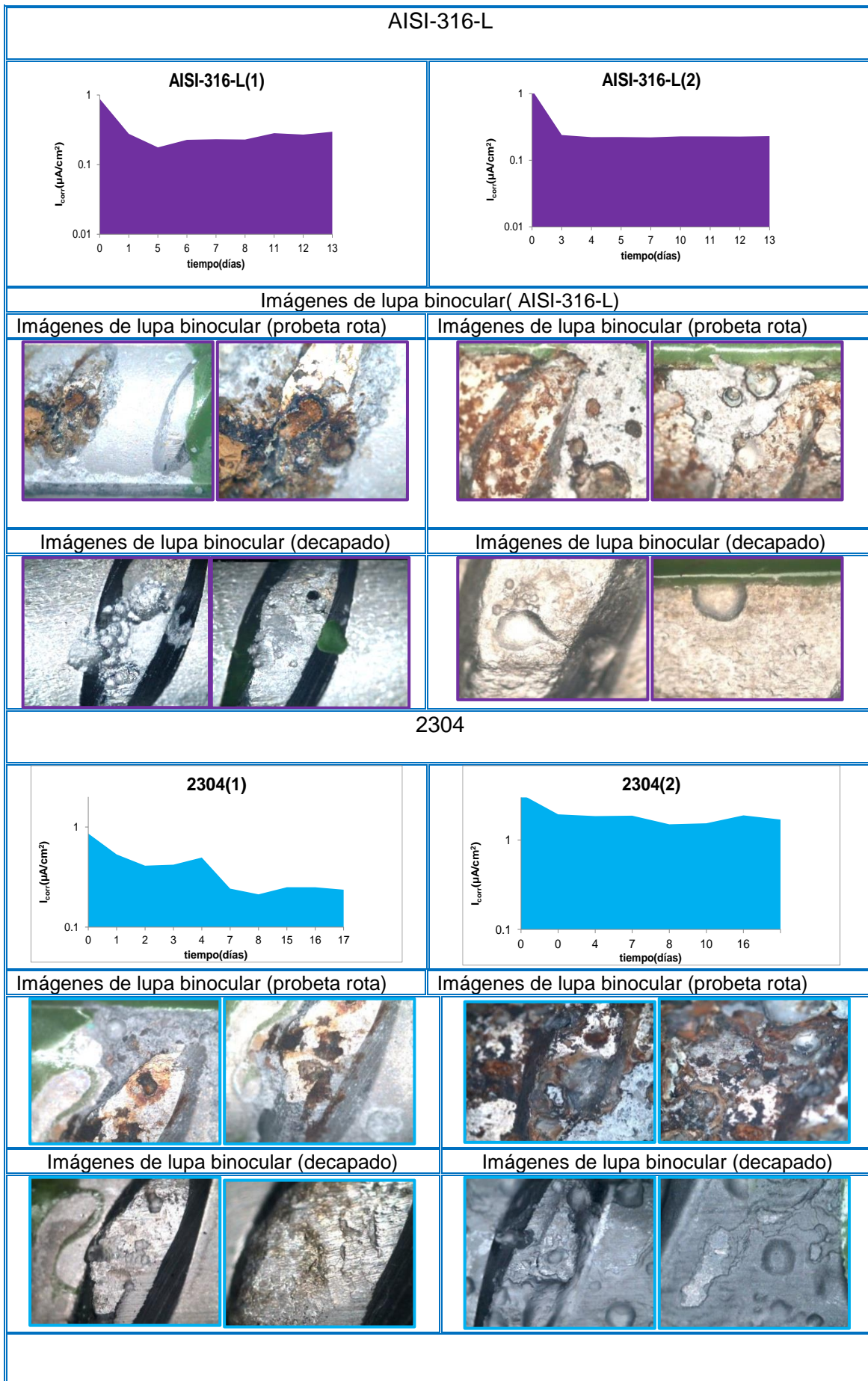
A pesar de la dispersión existente entre los resultados, se presenta una marcada diferencia en tiempo, que nos permite realizar una clasificación entre los cinco aceros inoxidables que se estudian. Así pues, el acero dúplex 2001 y el austenítico AISI 304-L presentan tiempos mucho menores de despasivación entre 4 y 5 días, seguido del austenítico AISI 316-L y el dúplex 2304 cuyo primer indicador de despasivación lo muestran a partir de los 20 días y con un máximo de 54. Finalmente, con mucha diferencia se encuentra el dúplex 2205 con un tiempo de aproximadamente 79 días, llegando incluso en ocasiones a no despasivarse.

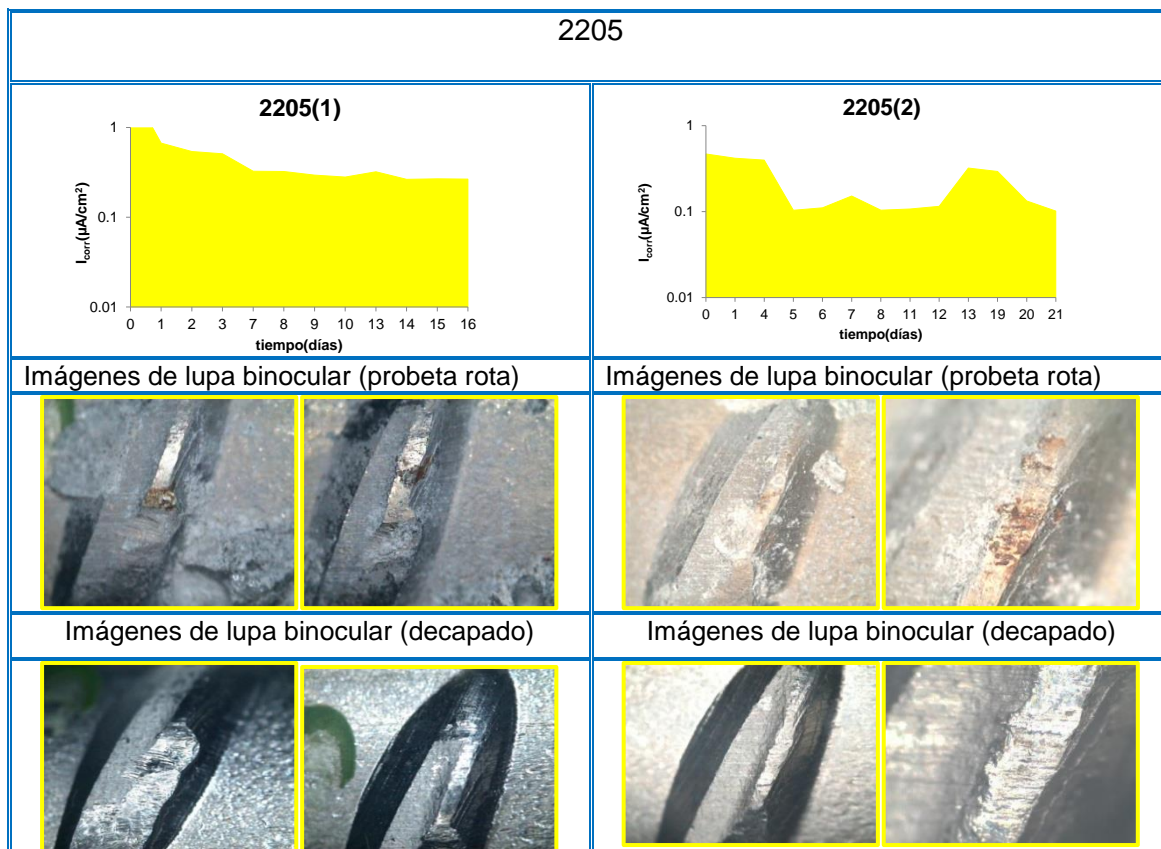
En la siguiente tabla 27, se muestra del mismo modo que en las anteriores una representación de I_{corr} pero de despasivación permanente ($I_{\text{corr des, perm}}$), es decir cuando se muestran durante un largo período de tiempo que se han despasivado por completo y su valor no se encuentra por debajo de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y como se indica en la figura 40.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 27. Gráficas de $i_{corr\ perm}$ e imágenes de lupa binocular.

AISI-304-L			
<p>AISI-304-L(1)</p>	<p>AISI-304-L(2)</p>		
Imágenes de lupa binocular(AISI-304-L)			
Probeta rota		Probeta rota	
Barra decapada		Barra decapada	
2001			
<p>2001(1)</p>	<p>2001(2)</p>		
Imágenes de lupa binocular (2001)			
Probeta rota		Probeta rota	
Barra decapada		Barra decapada	





A continuación, se muestra una tabla con los valores de I_{corr} de despasivación permanente ($I_{\text{corr des, perm}}$) con sus correspondientes valores de concentración de cloruros totales que se extraen de la zona de la de la cuna y concretamente, de la zona de la ventana donde el acero se encuentra en contacto con el mortero y por lo tanto con los cloruros que llegan. También se muestran algunos valores de $I_{\text{corr des}}$ con los valores de concentración de cloruros totales que se encuentran en la zona de la ventana descubierta de la barra, correspondientes a algunas probetas que en el lote 1 fueron rotas prematuramente. Por ultimo también se incluyen valores de I_{corr} que presentan algunas probetas, que contienen en su interior calidades de acero inoxidable muy resistentes a la corrosión por cloruros, que nunca llegan a despasivarse y la concentración de cloruros totales que presentan en el momento de la rotura en la zona de la ventana de la barra.

Tabla 28. Concentraciones de cloruros totales críticas en la zona próxima a la barra y valores de I_{corr} correspondientes.

Calidad de acero inoxidable	Concentración crítica de Cl en % en peso de cemento	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$
2001	1.82	0.62*
	2.11	0.64*
	1.09	0.25**
	2.91	0.35**
	3.17	0.46**
AISI-304-L	3.13	0.19**
	3.54	0.13*
	1.20	0.27*
	2.72	1.75**
	1.55	0.11**
AISI-316-L	2.49	0.25**
	3.28	0.29**
	3.14	0.12*
	5.13	0.25**
	4.12	0.22**
2304	1.62	0.18**
	0.38	0.03 ¥
	0.40	0.08 ¥
	2.76	0.40*
	3.25	0.18*
2205	3.72	0.23**
	3.52	1.78**
	2.41	0.31**
	0.61	0.09 ¥
	1.69	0.08**
2001	6.49	0.10*
	4.92	0.35**
	4.43	0.23**
	0.20	0.03 ¥
	0.19	0.03 ¥

* Valores de I_{corr} de despasivación.

**Valores promedio de I_{corr} de despasivación permanente.

¥ Valores obtenidos por probetas que nunca llegan a superar $0.2\mu A/cm^2$.

Por otro lado, una vez que se rompe la probeta se utiliza una de las mitades para conocer hasta donde ha llegado el frente de cloruros. Todas las probetas muestran que el frente de cloruros ha traspasado la barra y la mayoría llegan al final de la probeta. La figura 54, muestra los resultados de algunas de las que inicialmente se rompieron a partir de valores de indicadores de corrosión con una E_{corr} de $-330mV$ e I_{corr} de $0.1\mu A/cm^2$. Una vez rota se observó que no presentaba indicios de corrosión a pesar de que el cloruro había llegado a la barra.



Figura 54. Frente de cloruros. Lote 1 y acero dúplex 2001.

El resto de probetas muestran que el frente de cloruro ha traspasado la probeta. Y como no se aprecia la diferencia no se han mostrado.

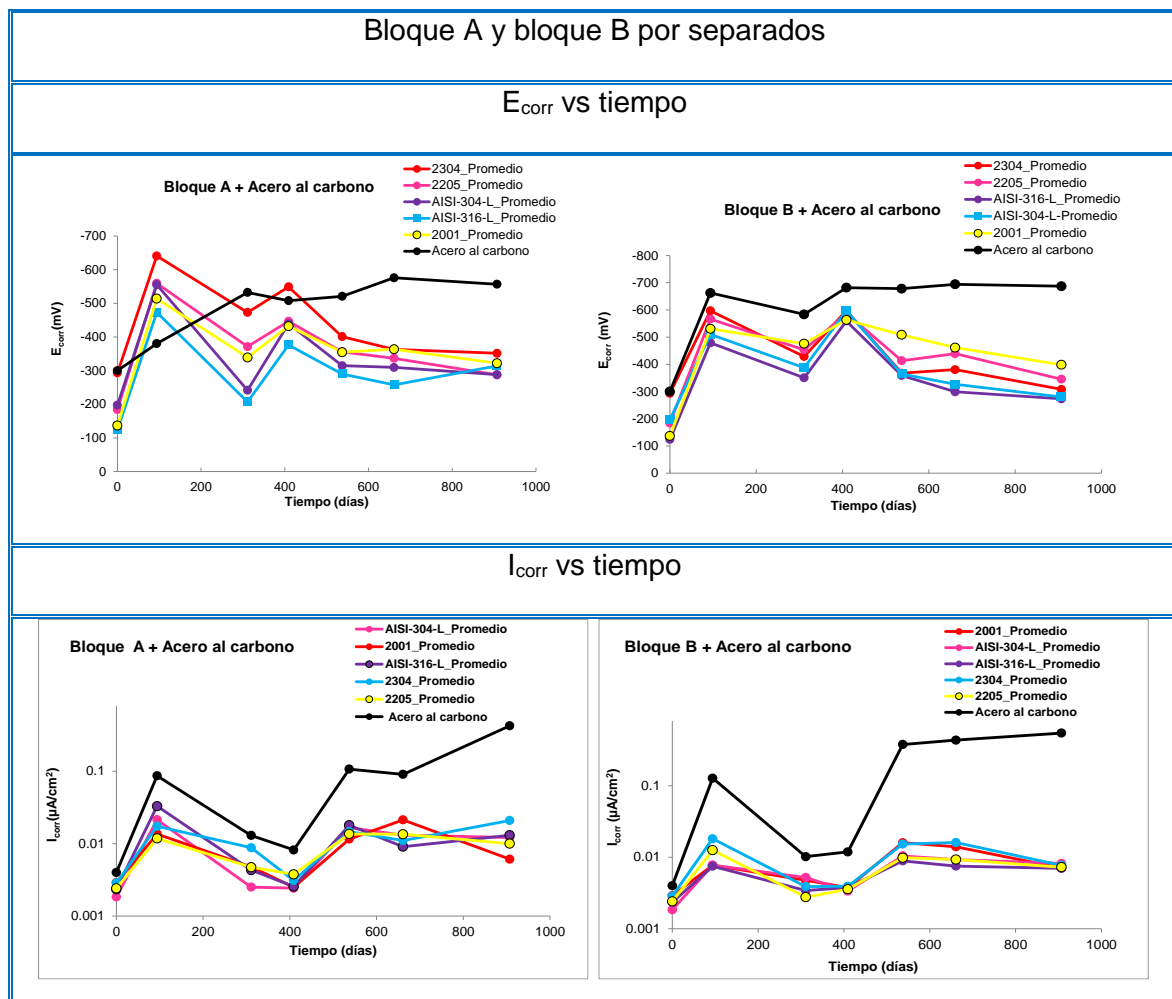
4.3 Resultados de grandes componentes de hormigón situados en el mar

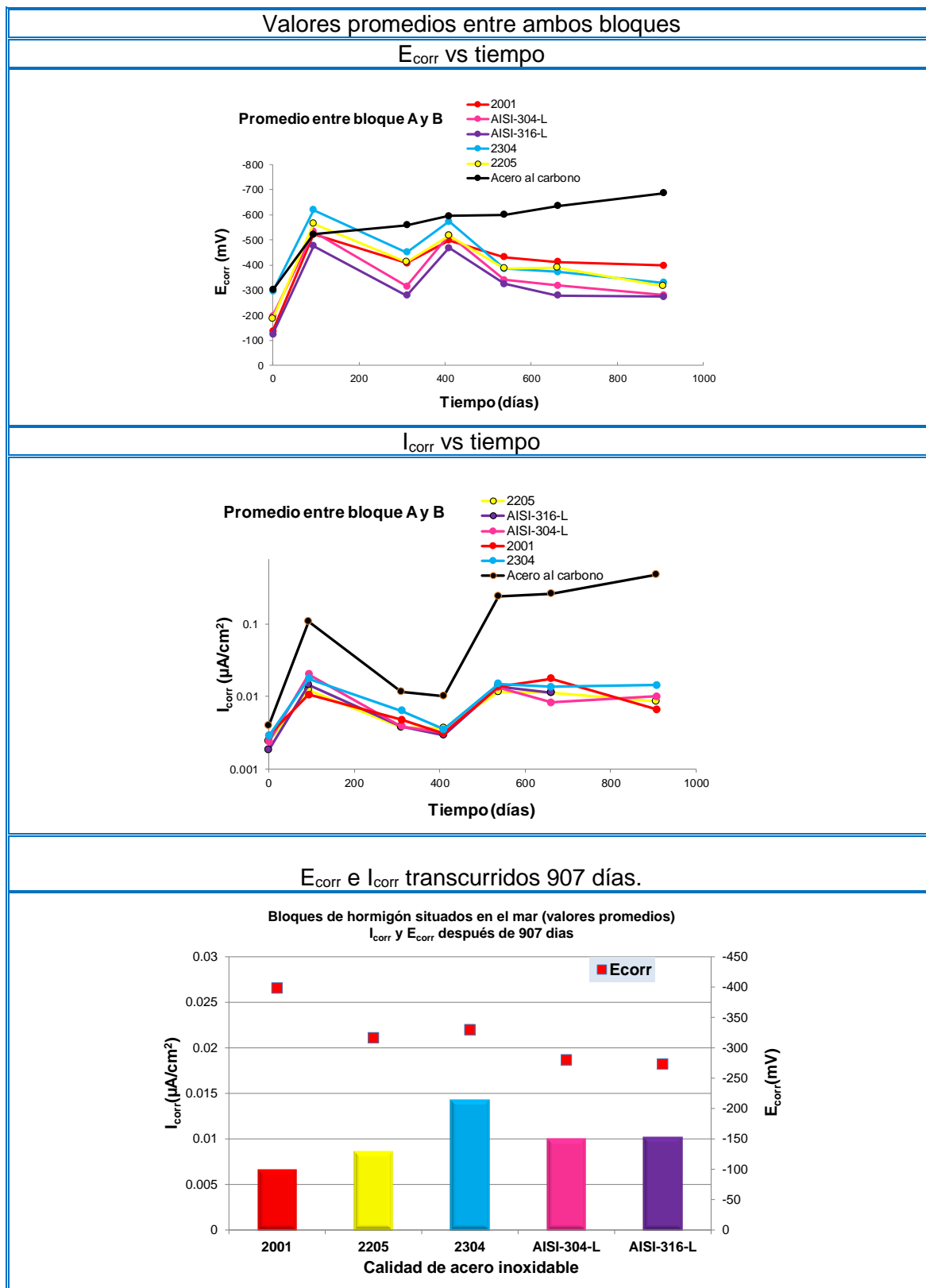
4.3.1 Medidas “in situ”.

Se miden la E_{corr} e I_{corr} en el tiempo durante un período de 907 días.

En el ANEXO 7 se muestra la evolución de estos parámetros para cada una de las barras de acero inoxidable por separado, donde se indica el bloque A o B y el lugar que ocupa cada barra dentro del mismo.

En las siguientes gráficas se muestra la evolución, para cada una de las calidades de acero inoxidable de los valores de E_{corr} e I_{corr} promedios en cada uno de los bloques A o B y también el valor promedio englobando ambos bloques. Además, se incluyen los valores que presentan las armaduras de acero al carbono que constituyen cada uno de los bloques.



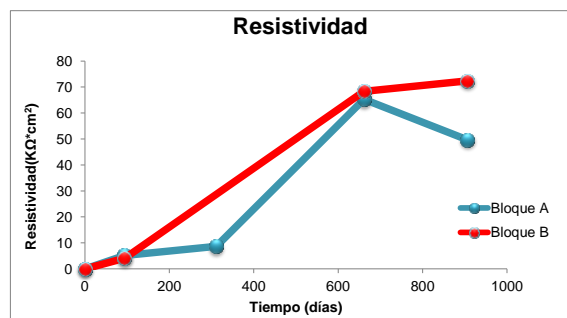


Gráfica 23. Representaciones gráficas de E_{corr} e I_{corr} vs tiempo. Valores promedios entre ambos bloques A y B.

En cada visita y coincidiendo con las medidas de E_{corr} e I_{corr} , se realizan medidas “in situ” de la resistividad que presenta el hormigón que constituyen los grandes bloques A y B. La resistividad eléctrica es una magnitud inversa a la conductividad-difusividad y

es una propiedad del hormigón que permite ser medida sin afectar al mismo, siendo esta una medida no destructiva. La resistividad a su vez es un indicador del fraguado y de la resistencia mecánica, del grado de saturación y de la impermeabilidad o resistencia al ingreso de sustancias agresivas en el hormigón [147].

Los valores de resistividad que presenta el hormigón pueden influir en la corrosión de los aceros según los valores que presenten. Cuando la resistividad de un hormigón es muy alta, este impide en gran medida que se produzca la llegada de los cloruros y por lo tanto dicho parámetro tiene mucha influencia en la ruptura de la pasividad. Los valores que presentan los bloques en sus últimas medidas de resistividad se encuentran por encima de $50 \text{ K}\Omega/\text{cm}^2$, lo cual nos indican que el riesgo de corrosión es de moderado a bajo, según la tabla 9 donde se muestran los intervalos de resistividad y riesgos de corrosión.



Gráfica 24. Resistividad “in situ” de los bloques de gran tamaño.

A continuación, se muestran los valores de resistividades clasificadas en resistividad en la zona alta, media y baja del bloque, transcurridos 907 días.

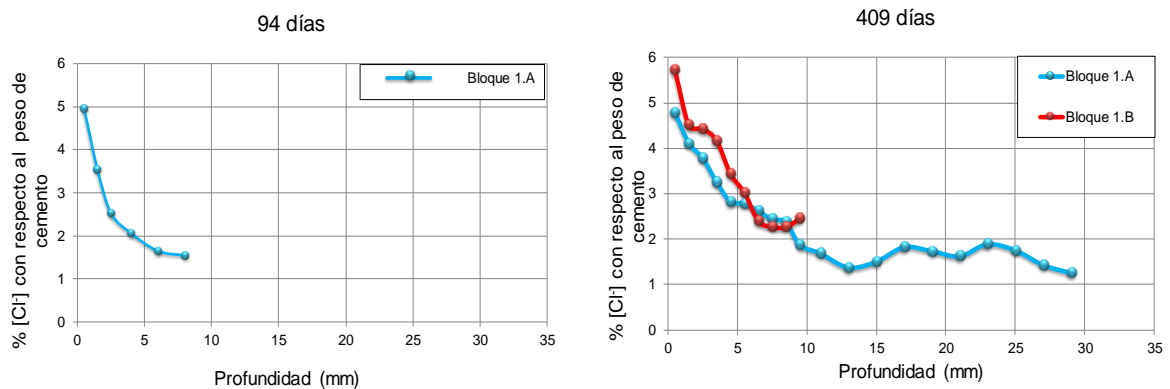
Tabla 29. Resistividad de los grandes bloques transcurridos 907 días.

	Bloque A	Bloque B
	Resistividad en $\text{K}\Omega \cdot \text{cm}$	
Zona alta	40	52
Zona media	61	78
Zona baja	22	77

4.3.2 Extracción de testigos de los bloques de gran tamaño

Como se indica en la metodología, durante dos de las visitas se produce la extracción de testigos de los bloques de gran tamaño. El primer testigo se extrae transcurridos 94 días y éste corresponde al bloque A. Este testigo se traslada al laboratorio para que se le calcule la concentración de cloruros totales a distintas profundidades, desde la superficie al interior del mismo. Un tiempo después, en la visita que se realiza a los

409 días, se extraen dos testigos. Uno corresponde al bloque 1.A y otro corresponde al bloque 1.B. Se muestran los resultados en las siguientes gráficas.

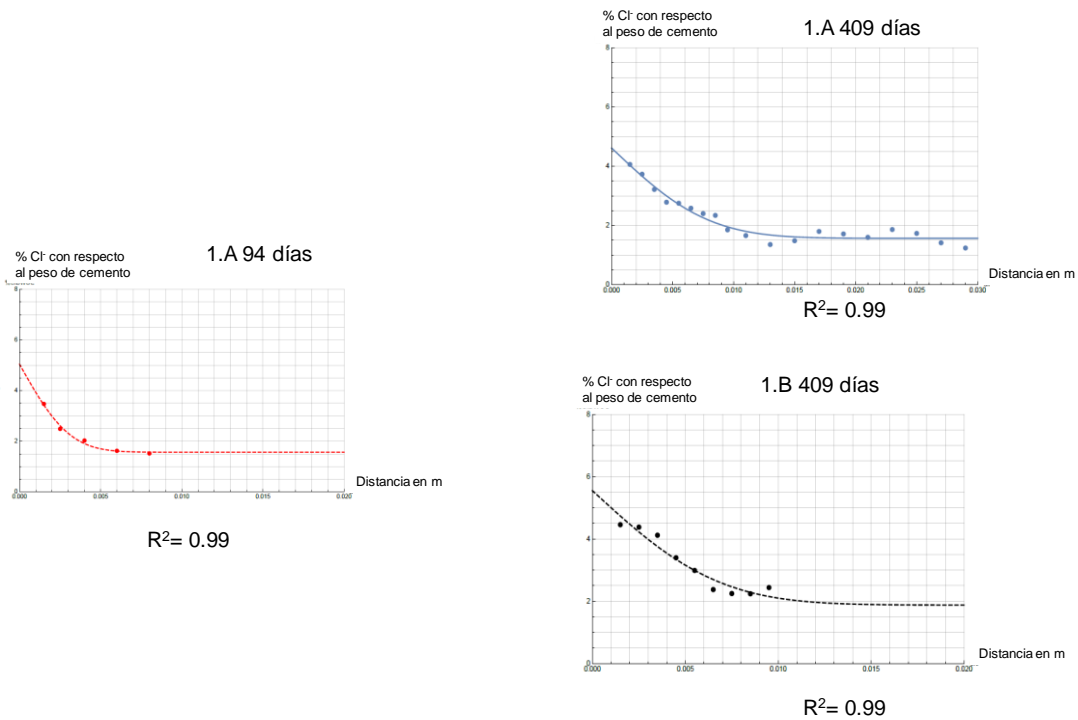


Gráfica 25. Porcentaje de concentración de cloruros totales con respecto al peso de cemento frente a la profundidad del testigo. La gráfica de la izquierda corresponde al bloque 1. A, transcurridos 94 días en el mar y la de la derecha corresponde a testigos extraídos de ambos bloques, 1.A y 1.B y transcurridos 409 días.

A partir de los valores de concentración de cloruros y las profundidades se calculan los coeficientes de difusión no estacionario (D_{ns}) que presentan cada uno de los testigos. Este cálculo se realiza mediante el ajuste a la función que aparece en la ecuación 67 dentro del apartado de metodología 3.6.2.2 y tal como se indica por norma [141]. Sin embargo, a dicha ecuación se le ha añadido un nuevo parámetro que corresponde al valor de la concentración inicial ($C_{inicial}$), pues según se observa en los perfiles de cloruros de la gráfica 25, los testigos extraídos de los bloques de gran tamaño presentan una concentración inicial de cloruros que a priori debería ser cero o muy baja, por lo que la ecuación se muestra de la siguiente forma:

$$C_x = C_{ini} + (C_s - C_{ini}) \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_{ns} \cdot t}} \right] \right) \quad \text{Eq. 75}$$

A continuación, se muestran los ajustes realizados a la ecuación 75, para el cálculo del D_{ns} , C_s y C_{ini} mediante las siguientes gráficas:



Gráfica 26. Ajustes de puntos procedentes de testigos para calcular C_s , D_{ns} y $C_{inicial}$.

Los valores calculados de los distintos parámetros se muestran a continuación, en la siguiente tabla 30.

Tabla 30. Coeficientes de difusión no estacionarios (D_{ns}) y concentración de cloruros superficial (C_s) de los testigos extraídos de los bloques de gran tamaño.

	C_s ([Cl ⁻] totales en % con respecto al peso de cemento)		D_{ns} (cm ² /s)		$C_{inicial}$ ([Cl ⁻] totales en % con respecto al peso de cemento)	
	94 días	409 días	94 días	409 días	94 días	409 días
Bloque 1.A	5.0	4.6	4.0E-09	5.5E-09	1.57	1.57
Bloque 1.B	x	5.5	x	4.0E-09	x	1.87

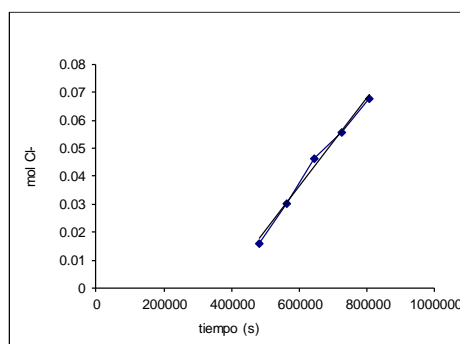
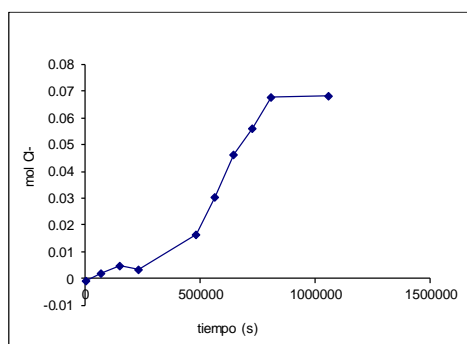
Una de las razones por las que los bloques contienen una cantidad de cloruros inicial, puede ser debido a que inicialmente el día que los bloques fueron colocados en el mar no se hidrataron previamente, por lo que el cloruros puede haber entrado en los estados iniciales además de por difusión, por otros fenómenos como pueden ser; succión capilar y permeabilidad, y esta puede ser a su vez la razón por la cual los valores de D_{ns} que se calculan para los testigos que se extraen de los grandes bloques presenten un orden menos a el que se calcula en las probetas de hormigón que se les aplica el ensayo de ponding en el laboratorio y estas a su vez un orden menos que las

que se calculan mediante el método de multirrégimen que se muestran en las tabla 31 y tabla 32 respectivamente que se presentan apartados posteriores.

4.3.3 Ensayos en laboratorio de probetas del hormigón de correspondiente a los grandes bloques.

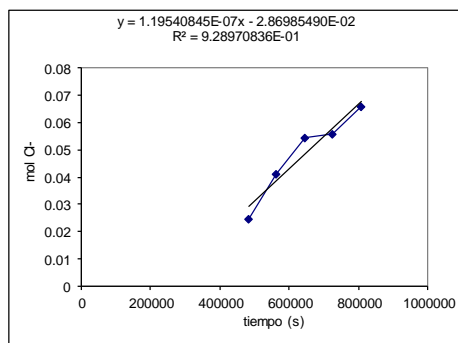
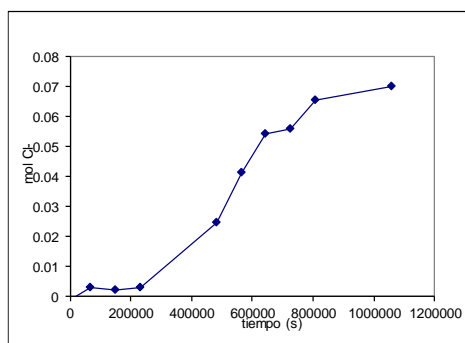
4.3.3.1 Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruros acelerados. Método multirrégimen.

El cálculo del coeficiente de difusión en estado no estacionario mediante la Eq. 65 y a partir del ensayo de multirrégimen requiere de un ajuste previo para calcular el tiempo de paso en estado estacionario y finalmente incluirlo en dicha ecuación. Las siguientes gráficas muestran dichos ajustes.



$R^2 = 0.91$

Tiempo de paso = 371426.15 s



$R^2 = 0.92$

Tiempo de paso = 240073.16 s

Gráfica 27. Ajustes para el cálculo del tiempo de paso que se utiliza para calcular el valor de D_{ns} mediante el ensayo de multirrégimen.

A continuación, se muestra mediante la siguiente tabla, los valores de los coeficientes de difusión en estado estacionario (D_s) y de difusión aparente o no estacionario (D_{ns}), que se calculan en probetas fabricadas con el mismo hormigón de los bloques de gran tamaño y que se someten al ensayo acelerado de multirrégimen [145] y que se encuentra descrito en el apartado de metodología.

Tabla 31. Coeficientes de difusión estacionario (D_s) y de difusión no estacionario (D_{ns})

m_1	m_2	Promedio	m_1	m_2	Promedio
D_s (cm ² /s)	D_s (cm ² /s)		D_{ns} (cm ² /s)	D_{ns} (cm ² /s)	
6.379E-08	5.226E-08	5.80E-08	1.989E-07	4.195E-07	3.09E-07

El estado estacionario, se caracteriza porque las condiciones permanecen invariables con el tiempo. En la mayoría de los casos se da la difusión en estado no estacionario, en el cual la concentración de los átomos de soluto (en nuestro caso los iones cloruros) en cualquier punto del material cambia con el tiempo. Para casos de difusión en estado no estacionario, se aplica la segunda ley de Fick:

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D \frac{dC_x}{dx} \right) \tag{Eq. 76}$$

Donde C_x es la concentración superficial de cloruros que difunden hacia dentro de la superficie, x es la distancia desde la superficie, D es el coeficiente de difusión en estado no estacionario y t es el tiempo.

Cuando el estado es estacionario se utiliza la primera ley de Fick:

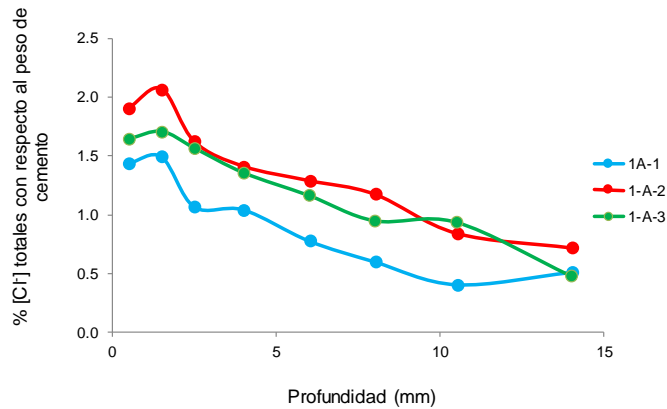
$$J = -D \frac{dC}{dx} \tag{Eq. 77}$$

Donde J es el flujo de corriente neta de átomos (cloruros), D es el coeficiente de difusión en estado estacionario o de difusividad, y dC/dx , es el gradiente de concentraciones.

4.3.3.2 Ensayo de Ponding en el laboratorio

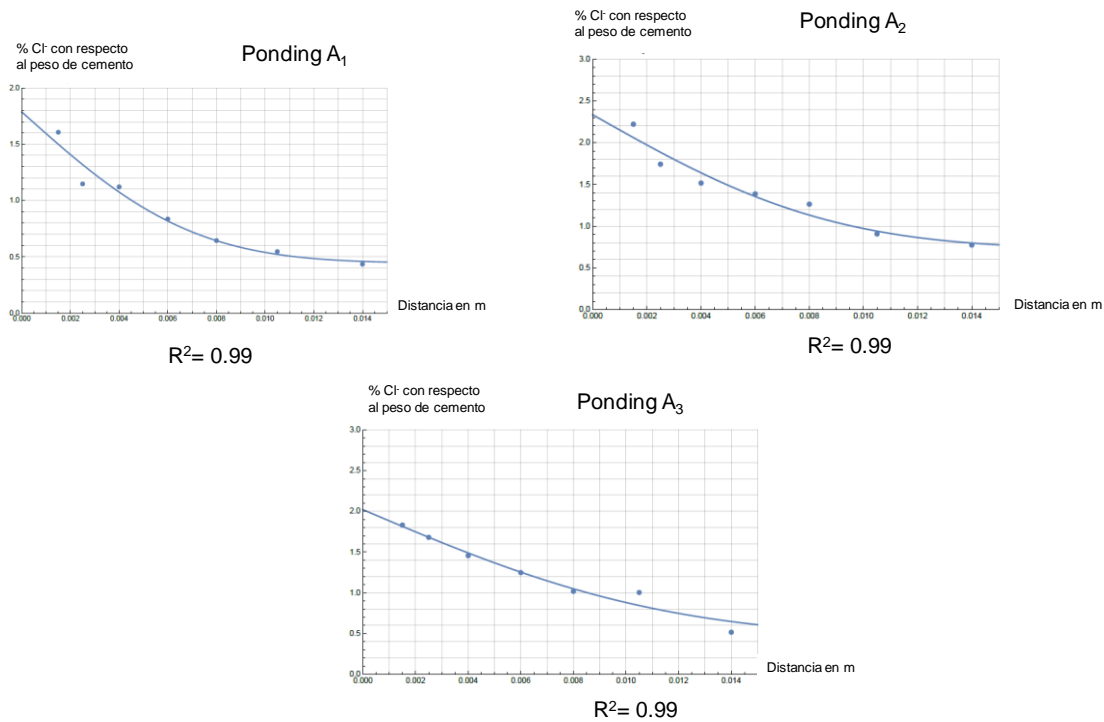
Se realiza el ensayo de laboratorio que se denomina “método de ponding” a probetas fabricadas con el mismo hormigón de los bloques de gran tamaño. En este ensayo, transcurridos 90 días, se extraen muestras de la probeta desde 0,5 mm de profundidad hasta 14 mm y se calcula en cada una de ellas la concentración de cloruros totales [130].

En la siguiente gráfica, se representan los valores de cloruros totales con respecto al peso de cemento a distintas profundidades y para las tres probetas iguales a las que se les realiza el ensayo. Dichas probetas se denominan como; 1A-1, 1A-2 y 1A-3.



Gráfica 28. Representación del porcentaje de cloruros totales con respecto al peso de cemento que existe en el hormigón, transcurridos 90 días de duración del ensayo.

A partir de los resultados de las anteriores probetas y utilizando cada uno de ellos por separado, se obtienen los valores de concentración superficial de cloruros totales o C_s y de cloruros totales iniciales o $C_{inicial}$ expresadas en tanto por ciento en peso de cemento, además de los coeficientes de difusión en estado no estacionario o D_{ns} en cm^2/s . Dichos parámetros se calculan mediante un ajuste de regresión no lineal por mínimos cuadrados a la función de la ecuación 75 como se muestra en las siguientes gráficas:



Gráfica 29. Ajustes de pondings para la obtención de los parámetros C_s , D_{ns} y $C_{inicial}$.

Tabla 32. Valores de C_s , D_{ns} y $C_{inicial}$.

Nombre de la muestra	C_s ([Cl] en % con respecto al peso de cemento)	D_{ns} (cm ² /s)	$C_{inicial}$ ([Cl] en % con respecto al peso de cemento)
1-A-1	1.8	2.0E-8	0.44
1-A-2	2.3	3.2E-8	0.72
1-A-3	2.0	5.4E-8	0.40
Valor promedio	2.0	3.5E-8	0.52

4.3.3.3 Medida de la resistividad. Método directo.

A continuación, se muestran los valores de resistividades obtenidos mediante el método directo en el laboratorio. A partir del mismo hormigón utilizado para los bloques de gran tamaño, se obtienen cuatro probetas cuyas dimensiones se encuentran en el apartado de metodología. Estas se dividen en dos grupos; probetas 1-B.1 y 1-B.2 que han sido introducidas en cámara húmeda y otras dos probetas con la misma denominación, que han sido sumergidas en una disolución con una concentración de cloruros del 3% en p/p.

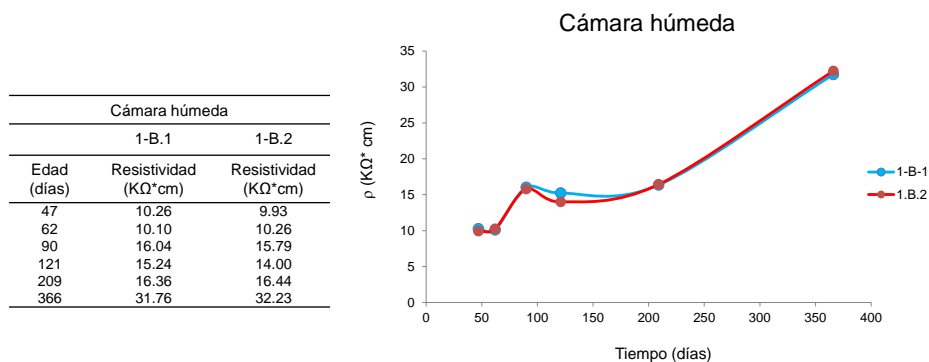


Figura 55. Resistividades en probetas de amasada de los grandes bloques, introducidas en cámara húmeda.

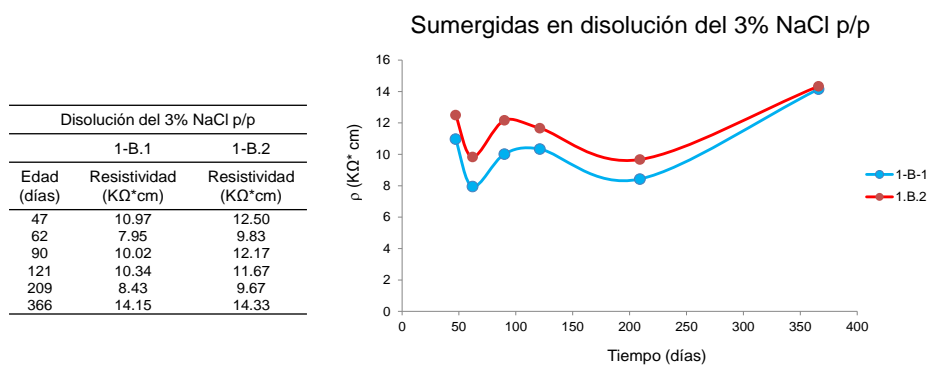


Figura 56. Resistividades en probetas de amasada de los grandes bloques, sumergidas en una disolución del 3% NaCl p/p.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

5. DISCUSIÓN

5.1 Voltametrías cíclicas.

5.1.1 Evaluación de potenciales críticos

A partir de los resultados analizados se deduce que la mayor parte de las barras que se estudian, cuando sufren corrosión muestran un desarrollo marcado de corrosión localizada y fundamentalmente de corrosión por picaduras.

Con el análisis de los potenciales críticos se pretende estudiar la importancia que los aceros inoxidables de estudio poseen ante la capacidad de regenerar una cavidad de la capa pasiva, en el caso de que esta se produzca.

Se considera que, una vez iniciado el crecimiento de picaduras estables, la repasivación es más fácil cuanto mayor sea la diferencia ($E_{pr}-E_{corr}$) y por tanto la pérdida de actividad de las picaduras. Así mismo, si $E_{pr}>E_{corr}$ el acero inoxidable tiene capacidad para regenerar la capa pasiva ante una eventual ruptura y la repasivación será tanto más fácil cuanto mayor sea la diferencia. Por el contrario, si $E_{corr}>E_{pr}$ las picaduras permanecen en estado activo una vez destruida la pasividad, estas no se regeneran y siguen sin interrupción [32].

Partiendo de estas premisas, se realiza un estudio de la diferencia entre ambos potenciales críticos, con la intención de evaluar de un modo cualitativo la capacidad de repasivación de las distintas calidades de acero inoxidable que se estudian y se desarrolla la tabla 33.

No obstante es importante resaltar que las interpretaciones de dichas diferencias son puramente cualitativas debido a que la formación de picaduras es un proceso estocástico donde participan un gran número de factores resaltando entre ellos la presencia de inclusiones de Mn que puedan provocar el inicio de la ruptura por formación de una micropila, la rugosidad de la superficie de los aceros de refuerzos, corrugas e intersticios, defectos creados en la conformación de la barra o diferencias de concentraciones de oxígeno que puedan provocar aireación diferencial, entre otras. La participación, conjunta de todos estos factores nos lleva a que barras gemelas con las mismas condiciones experimentales, presenten valores de sus potenciales críticos en ocasiones, con diferencias considerables. Una tercera medida no se incluyó en la programación de los ensayos evitando que el número de estos fuera excesivo.

Tabla 33. Capacidad para regenerar la capa pasiva, ante una eventual ruptura y capacidad de repasivación, una vez iniciado el crecimiento de las picaduras estables. Intervalo de pH [6-8], tabla de la izquierda e intervalo de pH [12-13], tabla de la derecha.

pH[6-8] 0%NaCl p/p								
	E _{pr} (V)		E _{corr} (V)		Regenera / no regenera		E _{pr} -E _{corr}	
	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂
2001	-0.16	0.05	-0.19	0.01	Regenera	Regenera	0.03	0.04
2304	0.1	0.01	-0.12	-0.01	Regenera	Regenera	0.22	0.02
2205	-0.21	-0.03	-0.26	-0.05	Regenera	Regenera	0.05	0.02
AISI-316-L	0.04	0.2	-0.17	0.12	Regenera	Regenera	0.21	0.08
AISI-304-L	-0.04	0.12	-0.3	-0.03	Regenera	Regenera	0.26	0.15

pH[6-8] 0.5% NaCl p/p								
	E _{pr} (V)		E _{corr} (V)		Regenera / no regenera		E _{pr} -E _{corr}	
	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂
2001	-0.32	-0.37	-0.19	-0.31	No regenera	No regenera	-0.13	-0.06
2304	-0.29	-0.17	-0.15	-0.27	No regenera	Regenera	-0.14	0.1
2205	-0.17	0.2	-0.24	-0.3	Regenera	Regenera	0.07	0.5
AISI-316-L	-0.29	-0.26	-0.09	-0.02	No regenera	No regenera	-0.2	-0.24
AISI-304-L	-0.31	-0.34	-0.13	-0.12	No regenera	No regenera	-0.18	-0.22

pH[6-8] 1% NaCl p/p								
	E _{pr} (V)		E _{corr} (V)		Regenera / no regenera		E _{pr} -E _{corr}	
	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂
2001	-0.33	-0.37	-0.21	-0.31	No regenera	No regenera	-0.12	-0.06
2304	-0.3	-0.24	-0.2	-0.37	No regenera	Regenera	-0.1	0.13
2205	-0.16	-0.1	-0.35	-0.4	Regenera	Regenera	0.19	0.3
AISI-316-L	-0.21	-0.35	-0.19	-0.03	No regenera	No regenera	-0.02	-0.32
AISI-304-L	-0.31	-0.29	-0.17	-0.17	No regenera	No regenera	-0.14	-0.12

pH[6-8] 3% NaCl p/p								
	E _{pr} (V)		E _{corr} (V)		Regenera / no regenera		E _{pr} -E _{corr}	
	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂
2001	-0.33	-0.41	-0.33	-0.4	No regenera	No regenera	0	-0.01
2304	-0.33	-0.32	-0.27	-0.19	No regenera	No regenera	-0.06	-0.13
2205	-0.18	-0.15	-0.29	-0.4	Regenera	Regenera	0.11	0.25
AISI-316-L	-0.34	-0.23	-0.12	-0.18	No regenera	No regenera	-0.22	-0.05
AISI-304-L	-0.32	-0.52	-0.13	-0.15	No regenera	No regenera	-0.19	-0.37

pH[12-13] 0%NaCl p/p								
	E _{pr} (V)		E _{corr} (V)		Regenera / no regenera		E _{pr} -E _{corr}	
	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂
2001	0.55	0.63	-0.22	-0.18	Regenera	Regenera	0.77	0.81
2304	-0.02	-0.13	-0.18	-0.31	Regenera	Regenera	0.16	0.18
2205	0.59	0.6	-0.39	-0.2	Regenera	Regenera	0.98	0.8
AISI-316-L	0.59	0.66	-0.22	-0.11	Regenera	Regenera	0.81	0.77
AISI-304-L	0.58	0.63	-0.23	-0.15	Regenera	Regenera	0.81	0.78

pH[12-13] 0.5% NaCl p/p								
	E _{pr} (V)		E _{corr} (V)		Regenera / no regenera		E _{pr} -E _{corr}	
	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂
2001	-0.41	-0.32	-0.23	-0.23	No regenera	No regenera	-0.18	-0.09
2304	-0.27	0.07	-0.21	-0.25	No regenera	Regenera	-0.06	0.32
2205	0.09	-0.22	-0.24	-0.34	Regenera	Regenera	0.33	0.12
AISI-316-L	-0.29	-0.18	-0.18	-0.1	No regenera	No regenera	-0.11	-0.08
AISI-304-L	-0.37	-0.35	-0.2	-0.19	No regenera	No regenera	-0.17	-0.16

pH[12-13] 1% NaCl p/p								
	E _{pr} (V)		E _{corr} (V)		Regenera / no regenera		E _{pr} -E _{corr}	
	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂
2001	-0.47	-0.48	-0.25	-0.22	No regenera	No regenera	-0.22	-0.26
2304	-0.37	-0.18	-0.22	-0.19	No regenera	Regenera	-0.15	0.01
2205	-0.2	0.06	-0.21	-0.23	Regenera	Regenera	0.01	0.29
AISI-316-L	-0.36	-0.32	-0.21	-0.22	No regenera	No regenera	-0.15	-0.1
AISI-304-L	-0.46	-0.53	-0.19	-0.25	No regenera	No regenera	-0.27	-0.28

pH[12-13] 3% NaCl p/p								
	E _{pr} (V)		E _{corr} (V)		Regenera / no regenera		E _{pr} -E _{corr}	
	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂
2001	-0.38	-0.46	-0.27	-0.21	No regenera	No regenera	-0.11	-0.25
2304	-0.4	-0.11	-0.23	-0.25	No regenera	Regenera	-0.17	0.14
2205	0.07	-0.07	-0.24	-0.22	Regenera	Regenera	0.31	0.15
AISI-316-L	-0.46	-0.53	-0.19	-0.25	No regenera	No regenera	-0.27	-0.28
AISI-304-L	-0.54	-0.43	-0.18	-0.19	No regenera	No regenera	-0.36	-0.24

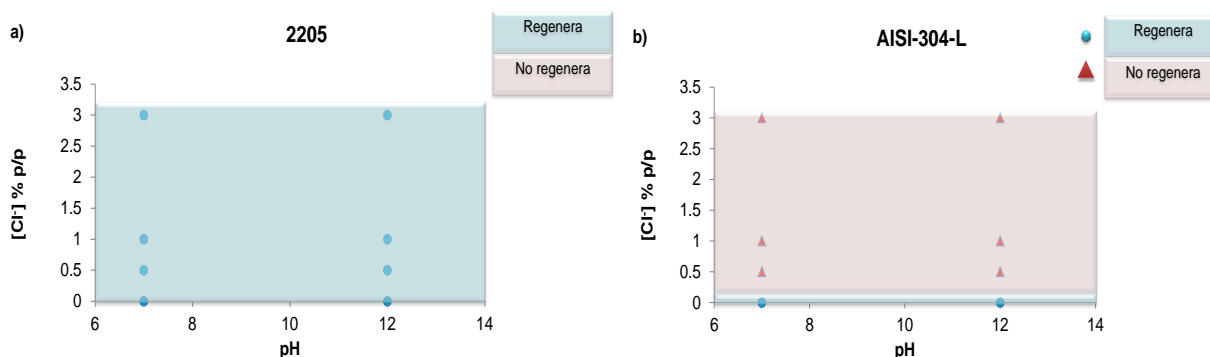
En el análisis de la tabla 33 se obtiene que el acero inoxidable austenítico AISI-304-L y el dúplex 2001, no presentan la capacidad de regenerar en ninguno de los dos intervalos de pH en presencia de cloruros. Solo muestran la posibilidad de hacerlo cuando no existen cloruros en el medio. Esto se reafirma con la tendencia que presentan los valores de la diferencia de $E_{rep}-E_{corr}$, los cuales se muestran cada vez menores conforme la concentración de cloruro aumenta en la disolución de la celda electroquímica.

El acero dúplex 2205 muestra la capacidad de regenerar la capa pasiva, ante una eventual ruptura, para todas las concentraciones de iones cloruros y en ambos intervalos de pH, incluso cuando la concentración de cloruros es máxima. Dichas barras de aceros inoxidables muestran un comportamiento muy superior en cuanto a la resistencia a la corrosión por cloruros con respecto al resto de los aceros inoxidables estudiados.

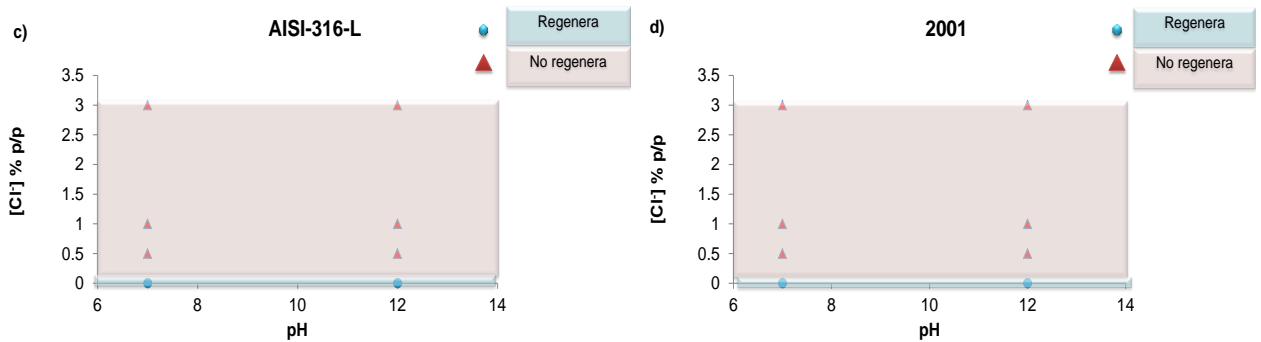
El acero austenítico AISI-316-L no regenera su capa pasiva en ningún caso, excepto cuando la concentración de cloruros es cero.

El acero dúplex 2304 presenta una peculiaridad con respecto al resto de aceros inoxidables que se estudian y es que en numerosos casos de dicha tabla presenta resultados contrarios, es decir, para una misma condición una muestra regenera y otra no. Ante esta peculiaridad y por ponernos de lado de la seguridad se considera el peor resultado, es decir que no regenera, por lo que en su evaluación se concluye que para el intervalo de pH [6-8] no regenera en ningún caso salvo cuando no existen cloruros y para el intervalo de pH alcalino tampoco.

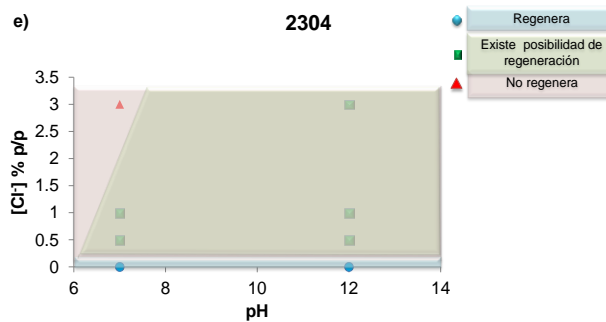
A continuación, se muestra mediante gráficas, una mejor interpretación y visualización de los valores que se muestran en la tabla 33.



Gráfica 30. Esquema de la posibilidad de regeneración ante una eventual ruptura de la capa pasiva. Acero inoxidable dúplex 2205 y austenítico AISI-304-L.



Gráfica 31. Esquema de la posibilidad de regeneración ante una eventual ruptura de la capa pasiva. Acero inoxidable austenítico AISI-316-L y dúplex 2001.



Gráfica 32. Esquema de la posibilidad de regeneración ante una eventual ruptura de la capa pasiva. Acero inoxidable dúplex 2304.

Otra interpretación de los potenciales críticos es su relación entre el potencial de corrosión, E_{corr} y el de ruptura E_r , la cual nos permite evaluar la susceptibilidad a la corrosión por picaduras. Cuanto mayor sea la diferencia $E_r - E_{corr}$, mayor resistencia existe a la corrosión por picadura. A continuación, se muestran estas diferencias mediante tablas.

Tabla 34. Diferencia $E_r - E_{corr}$. Intervalo de pH [6-8].

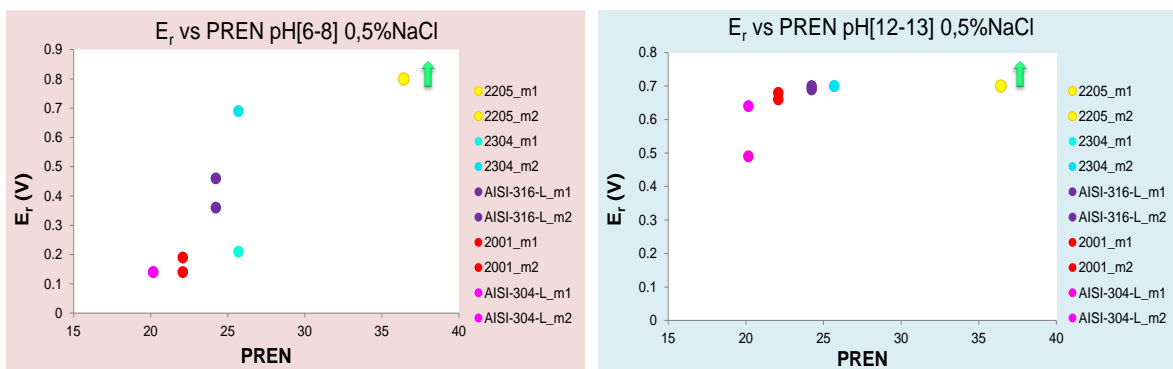
pH[6-8] 0%NaCl p/p						
	E_{corr} (V)		E_r (V)		$E_r - E_{corr}$	
	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2
2001	-0.19	0.01	0.80	0.80	0.99	0.79
2304	-0.12	-0.01	0.80	0.80	0.92	0.81
2205	-0.26	-0.05	0.80	0.80	1.06	0.85
AISI-316-L	-0.17	0.12	0.80	0.80	0.97	0.68
AISI-304-L	-0.30	-0.03	0.80	0.80	1.1	0.83
pH[6-8] 0.5%NaCl p/p						
	E_{corr} (V)		E_r (V)		$E_r - E_{corr}$	
	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2
2001	-0.19	-0.31	0.19	0.14	0.38	0.45
2304	-0.15	-0.27	0.21	0.69	0.36	0.96
2205	-0.24	-0.3	0.8	0.8	1.04	1.1
AISI-316-L	-0.09	-0.02	0.46	0.36	0.55	0.38
AISI-304-L	-0.13	-0.12	0.14	0.14	0.27	0.26
pH[6-8] 1%NaCl p/p						
	E_{corr} (V)		E_r (V)		$E_r - E_{corr}$	
	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2
2001	-0.21	-0.31	0.11	0.07	0.32	0.38
2304	-0.2	-0.37	0.17	0.34	0.37	0.71
2205	-0.35	-0.4	0.8	0.8	1.15	1.2
AISI-316-L	-0.19	-0.03	0.38	0.33	0.57	0.36
AISI-304-L	-0.17	-0.17	0.18	0.24	0.35	0.41
pH[6-8] 3%NaCl p/p						
	E_{corr} (V)		E_r (V)		$E_r - E_{corr}$	
	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2
2001	-0.33	-0.40	0.13	0.05	0.46	0.45
2304	-0.27	-0.19	0.07	0.53	0.34	0.72
2205	-0.29	-0.40	0.80	0.80	1.09	1.2
AISI-316-L	-0.12	-0.18	0.18	0.20	0.3	0.38
AISI-304-L	-0.13	-0.15	0.06	0.08	0.19	0.23

Tabla 35. Diferencia $E_r - E_{corr}$. Intervalo de pH [12-13].

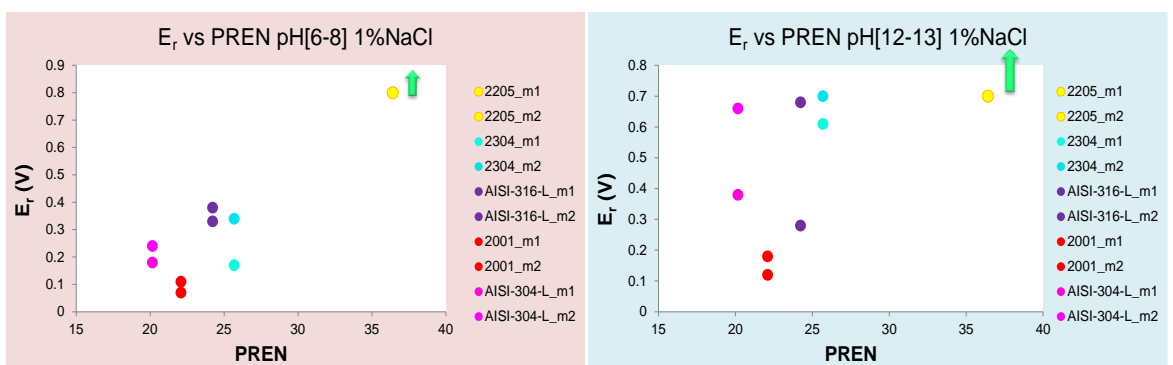
pH[12-13] 0%NaCl p/p						
	E_{corr} (V)		E_r (V)		$E_r - E_{corr}$	
	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2
2001	-0.22	-0.18	0.7	0.7	0.92	0.88
2304	-0.18	-0.31	0.7	0.7	0.88	1.01
2205	-0.39	-0.2	0.7	0.7	1.09	0.9
AISI-316-L	-0.22	-0.11	0.7	0.7	0.92	0.81
AISI-304-L	-0.23	-0.15	0.7	0.7	0.93	0.85
pH[12-13] 0.5%NaCl p/p						
	E_{corr} (V)		E_r (V)		$E_r - E_{corr}$	
	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2
2001	-0.23	-0.23	0.68	0.66	0.91	0.89
2304	-0.21	-0.25	0.7	0.7	0.91	0.95
2205	-0.24	-0.22	0.7	0.7	0.94	0.92
AISI-316-L	-0.18	-0.1	0.69	0.7	0.87	0.8
AISI-304-L	-0.2	-0.19	0.49	0.64	0.69	0.83
pH[12-13] 1%NaCl p/p						
	E_{corr} (V)		E_r (V)		$E_r - E_{corr}$	
	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2
2001	-0.25	-0.22	0.12	0.18	0.37	0.4
2304	-0.22	-0.19	0.61	0.7	0.83	0.89
2205	-0.21	-0.23	0.7	0.7	0.91	0.93
AISI-316-L	-0.21	-0.22	0.28	0.68	0.49	0.9
AISI-304-L	-0.19	-0.25	0.38	0.66	0.57	0.91
pH[12-13] 3%NaCl p/p						
	E_{corr} (V)		E_r (V)		$E_r - E_{corr}$	
	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2
2001	-0.27	-0.21	0	0.46	0.27	0.67
2304	-0.23	-0.25	0.38	0.7	0.61	0.95
2205	-0.24	-0.22	0.7	0.7	0.94	0.92
AISI-316-L	-0.19	-0.25	0.37	0.66	0.56	0.91
AISI-304-L	-0.18	-0.19	0.29	0.37	0.47	0.56

Se observa en ambas tablas 34 y 35 que es el dúplex 2205 el que presenta un valor más elevado de la diferencia entre estos dos potenciales críticos, $E_r - E_{corr}$, para ambos intervalos de pH y para todas las concentraciones. Por otro lado, se observa cómo el valor de esta diferencia para el resto de calidades, es menor en el pH [6-8] que para el alcalino pH [12-13], como era de esperar debido a la protección de la capa pasiva ante la corrosión cuando el medio en el que se desarrolla es alcalino. Además, para ambos intervalos de pH y para todas las concentraciones de cloruros, se observa cómo los valores de las diferencias son parecidos entre el par constituido por el austenítico AISI 304-L y el dúplex de bajo contenido en níquel 2001, y distando de estos dos existe otro par donde esta diferencia se aproxima entre ellos, constituido por el austenítico AISI 316-L y el dúplex 2304.

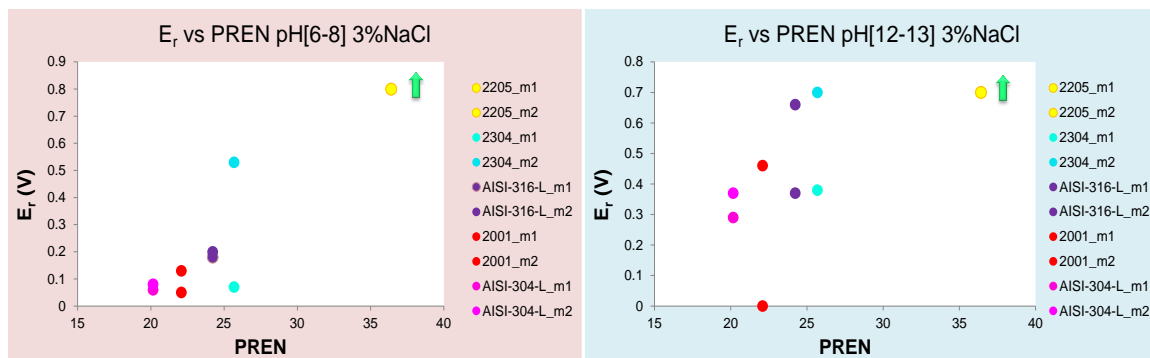
A continuación, se representa mediante gráficas, el valor del índice PREN de cada una de las calidades de acero inoxidable, frente a los potenciales de ruptura que presentan en las distintas condiciones de pH y salinidad.



Gráfica 33. Índice PREN frente al potencial de ruptura E_r , para una concentración de cloruros de 0,5% NaCl p/p. Para un intervalo de pH [6-8], gráfica de la izquierda y un intervalo de pH [12-13], gráfica de la derecha.



Gráfica 34. Índice PREN frente al potencial de ruptura E_r , para una concentración de cloruros de 1% NaCl p/p. Para un intervalo de pH [6-8], gráfica de la izquierda y un intervalo de pH [12-13], gráfica de la derecha.



Gráfica 35. Índice PREN frente al potencial de ruptura E_r para una concentración de cloruros de 3% NaCl p/p. Para un intervalo de pH [6-8], gráfica de la izquierda y un intervalo de pH [12-13], gráfica de la derecha.

A pesar de que el índice PREN es un indicador útil de la resistencia a la corrosión por picaduras, resulta interesante complementarlo con otros indicadores como, es en este estudio, el potencial de ruptura. Así pues, no es lo mismo que el material se encuentre en un pH neutro o ligeramente ácido que alcalino. Además, la concentración de cloruros resulta también un factor importante para el desarrollo del inicio de la corrosión y desarrollo de las picaduras.

Siendo los valores del índice PREN de los aceros inoxidable del presente estudio; 20.16 (AISI-304-L) < 22.09 (2001) < 24.23 (AISI-316-L) < 25.69 (2304) < 36.41 (2205), se observa cómo, para ambos intervalos de pH y una concentración baja de cloruros tal como 0,5%NaCl p/p, los E_r de todos los aceros aparecen en el orden esperado por el índice PREN. Sin embargo, a medida que aumenta la concentración en cloruros, se observa como los E_r para el par austenítico AISI-304-L y el dúplex 2001, no aparecen en el orden que se espera por los valores del índice PREN, pues es el 2001 el que, en numerosas ocasiones muestra el E_r más bajo y según el PREN debería ser el AISI-304-L.

Un comportamiento similar, aunque no tan acusado, ocurre si comparamos el par austenítico AISI-316-L y el dúplex 2304.

Un aspecto a resaltar, es la dispersión que muestran los potenciales E_r del dúplex 2304, mostrándose en ocasiones con una baja resistencia a la corrosión por cloruros y en otras con resistencias muy elevadas, tanto que incluso llega a aproximarse al 2205. Este resultado junto a otros que se discuten más adelante, muestran que el acero dúplex 2304 no siempre se manifiesta del mismo modo frente a la corrosión por cloruros. Se establece la hipótesis de que la causa pueda ser el bajo contenido en molibdeno que el dúplex 2304 presenta con respecto al 2205 y el austenítico AISI 316-L y que, así como la microestructura dúplex del 2304 favorece su resistencia a la corrosión localizada acercándose al dúplex 2205 y diferenciándose del AISI 316-L cuya microestructura austenítica lo hace más susceptible, sin embargo es el contenido

en Mo el que le permite la repasivación antes de que la picadura avance y esta capacidad de repasivación la presenta en mucha menor medida el dúplex 2304 por su bajo contenido en molibdeno, pudiendo ser la causa de la dualidad de su comportamiento.






Por último, el acero dúplex 2205, no presenta potencial de ruptura, en ninguno de los casos. Se utiliza el potencial al cual se produce la reacción de oxidación del agua, que es 0.8V, cuando el intervalo de pH [6-8] y 0.7V para el intervalo de pH [12-13]. Indicar que en ninguno de los casos el potencial de ruptura ha sido enmascarado por las reacciones de oxidación del agua, pues todas las voltametrías cíclicas muestran ausencia de bucle de histéresis en el barrido de vuelta.

5.1.2 Evaluación de imágenes mediante lupa binocular

Se detecta que las barras corrugadas muestran formas de picaduras diferentes dependiendo de si el acero inoxidable es austenítico o dúplex.

Para el intervalo de pH [6-8], llaman la atención las picaduras formadas para ambos austeníticos AISI 316-L y AISI 304-L. Sin embargo, para el dúplex 2001, las picaduras no se observan tan profundas y parecen que se extienden en la superficie más que en profundidad. Los dúplex 2005 y 2304, no presentan indicios aparentes de picaduras, aunque el 2304 para la concentración más elevada de NaCl, muestra lo que pudiera ser un comienzo de formación de picaduras aunque esto no se observa claramente mediante la lupa binocular.

Tabla 36. Comparativa para la observación de las picaduras entre austeníticos y dúplex tras los ensayos de voltametría cíclica.

Voltametrías cíclicas. pH[6-8]. 3% p/p de NaCl				
AISI 316-L	2001	AISI 304-L	2304	2205
				

Para el intervalo de pH alcalino (tabla 13), el cloruro ataca y afecta a las distintas calidades. Se observa como las calidades afectadas y las formas de las picaduras son muy parecidas al anterior intervalo de pH, aunque de una forma menos agresiva.

5.1.3 Evaluación cuantitativa. Pérdida de material

Según los resultados obtenidos se puede deducir que la metodología de F.J. Recio en su tesis doctoral [148], junto con la modificación añadida, muestran una adecuada coincidencia entre la pérdida de material calculada a partir de la ley de Faraday y la

que se obtiene mediante el cálculo de pérdida de material gravimétrico, como se muestra en la gráfica 17. Por otro lado, y como se esperaba que ocurriese, la pérdida de material es mayor para el intervalo de pH [6-8] que para el intervalo de pH alcalino y esta pérdida también aumenta conforme la concentración de iones cloruros es mayor, para todas las calidades de acero inoxidable.

En cuanto a la pérdida de material entre las distintas calidades de acero inoxidable, para el intervalo de pH [6-8], es el acero inoxidable austenítico AISI-304-L el que pierde mayor cantidad de material en gramos para todas las concentraciones de NaCl. El segundo lugar lo ocupa el austenítico AISI-316-L, excepto cuando la concentración de cloruros es la más baja, la de 0,5%NaCl p/p, donde es el acero dúplex 2001 con bajo contenido en níquel, el que muestra una pérdida ligeramente superior al AISI-316-L. El dúplex 2304 presenta una pérdida de material pequeña y muy por debajo de los anteriormente nombrados. Para el dúplex 2205 se puede considerar una pérdida de material despreciable o muy bajo con respecto al resto.

En cuanto a los resultados para el intervalo de pH [12-13], la tendencia no es exactamente la misma que para el anterior intervalo de pH. El acero austenítico AISI-304-L, sigue siendo el que pierde más cantidad de material en todos los casos, sin embargo, se observa que para la concentración media de NaCl 1% p/p es el acero dúplex 2001 el segundo en pérdida de material por encima del austenítico AISI-316-L. Para el resto de concentraciones de cloruros el AISI-316-L se mantiene por debajo del dúplex 2001 o muy próximo a él. El acero dúplex 2304, muestra una pérdida muy baja de material a pH alcalino con respecto al resto de aceros que muestran pérdidas. Finalmente, el acero dúplex 2205, presenta una pérdida de material casi despreciable, con respecto al resto de aceros y menor que la que se produce para el intervalo de pH [6-8].

Como resultado de una evaluación inicial, se considera que la unión de los resultados discutidos en apartados anteriores donde se evalúan los potenciales críticos, junto a los resultados de pérdida de material que se muestra en este mismo, nos lleva a establecer un orden cualitativo de resistencia a la corrosión por cloruros que se extiende a ambos intervalos de pH y a las tres concentraciones de cloruro de cada intervalo. Las calidades de acero inoxidable presentarían el siguiente orden de resistencia:

AISI-304-L \cong 2001 < AISI-316-L \cong 2304 <<< 2205

5.2 Celdas de corrosión

La discusión de los resultados obtenidos mediante las celdas de corrosión, se desarrolla con el análisis de tres bloques de resultados diferenciados; el análisis de los indicadores de corrosión E_{corr} e I_{corr} , el cálculo de la P_{corr} junto con la pérdida de material y observación mediante lupa binocular, y finalmente el análisis de los parámetros obtenidos mediante los ajustes de las medidas de impedancias a un circuito equivalente.

5.2.1 Análisis de la evolución de E_{corr} e I_{corr}

En el primer bloque se analizan los valores de E_{corr} a lo largo de 953 días y paralelamente los valores de I_{corr} durante ese mismo periodo.

El análisis de la evolución del parámetro E_{corr} , se inicia tomando como referencia unas series de curvas ficticias que se muestran en la figura 57, donde se representan los distintos comportamientos que puede presentar un acero al carbono en un medio agresivo. Se representa una curva A que muestra un comportamiento típico de un estado activo bajo una picadura y cuyo comportamiento se caracteriza por potenciales muy negativos. Una curva C, característica de estados muy pasivos y constituidos por potenciales mucho más nobles y estables, con una evolución suave en el tiempo. Esta evolución suele darse sobre superficies perfectamente limpias o bajo algunas manchas de óxido y finalmente una curva B que se caracteriza por la existencia de una cierta actividad típica de pasividades poco estables que muestran oscilaciones frecuentes en el potencial.

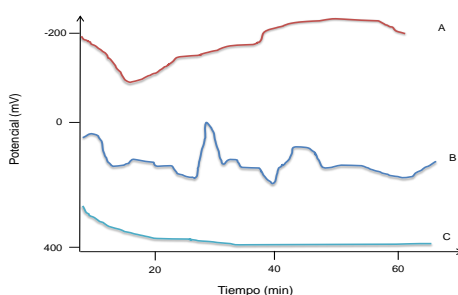


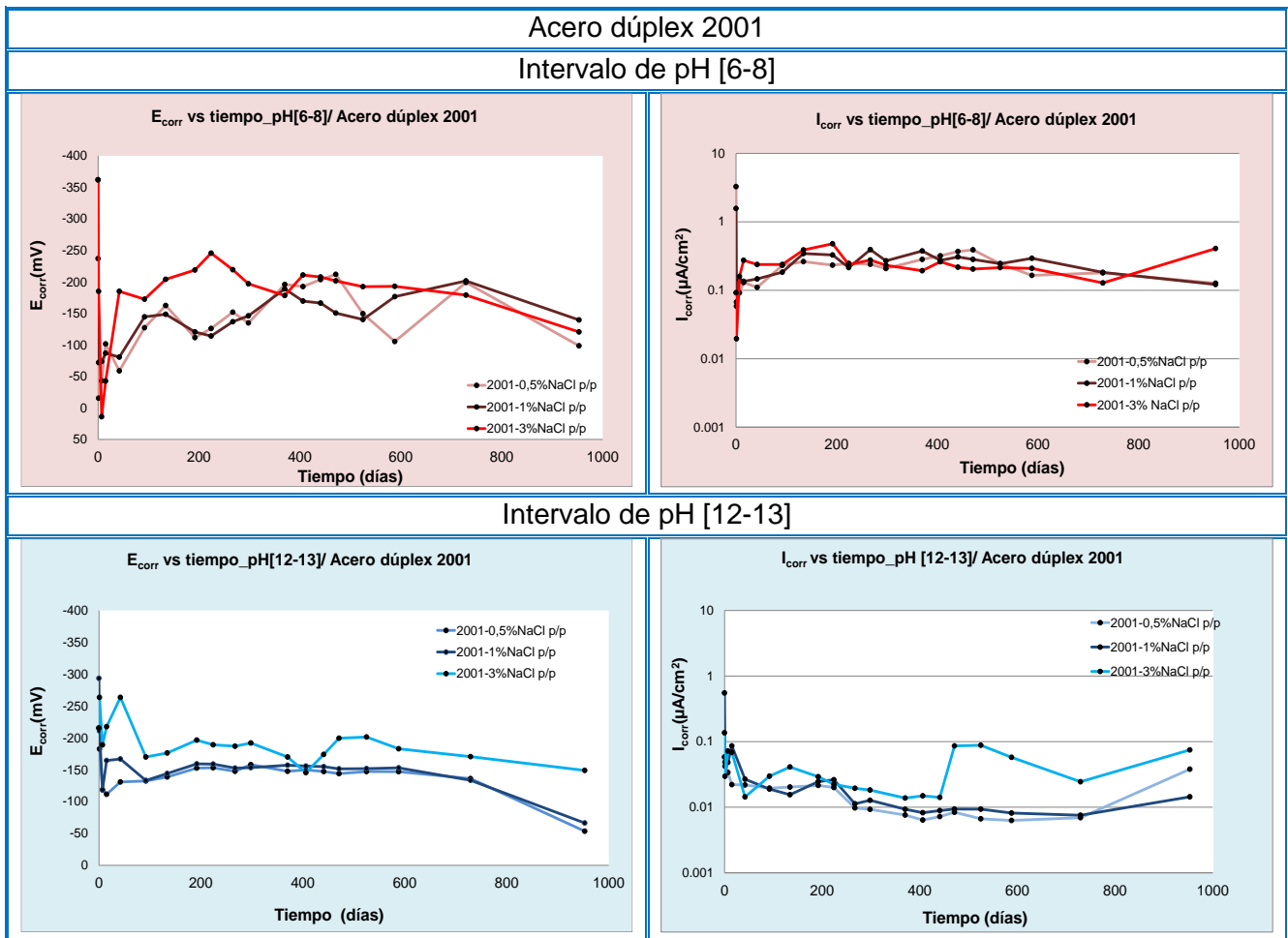
Figura 57. Evolución del potencial libre de corrosión, E_{corr} , en el tiempo, para una barra de acero al carbono sumergida en una disolución 0,5M NaCl [32].

Tomando como referencia dichas manifestaciones e intentando aplicarlas a la evolución de la E_{corr} en nuestro estudio con aceros inoxidable de refuerzo, se detecta que en algunos de nuestros resultados no se muestran ejemplos tan claros como los que se muestran en la figura 57, sino que debido a la capacidad de repasivación de estos aceros inoxidable, la evolución de dicho parámetro se muestra en ocasiones, con una gran inestabilidad.

Cuando el intervalo de pH es alcalino y la capa pasiva no ha sido afectada generalmente la E_{corr} presenta estabilidad. Sin embargo, en el intervalo de pH [6-8] se observan grandes diferencias de dicho parámetro principalmente en los estados iniciales de medida y esta inestabilidad se presenta especialmente acusada para las calidades de acero inoxidable AISI 316-L y dúplex 2304 durante todo el período de tiempo.

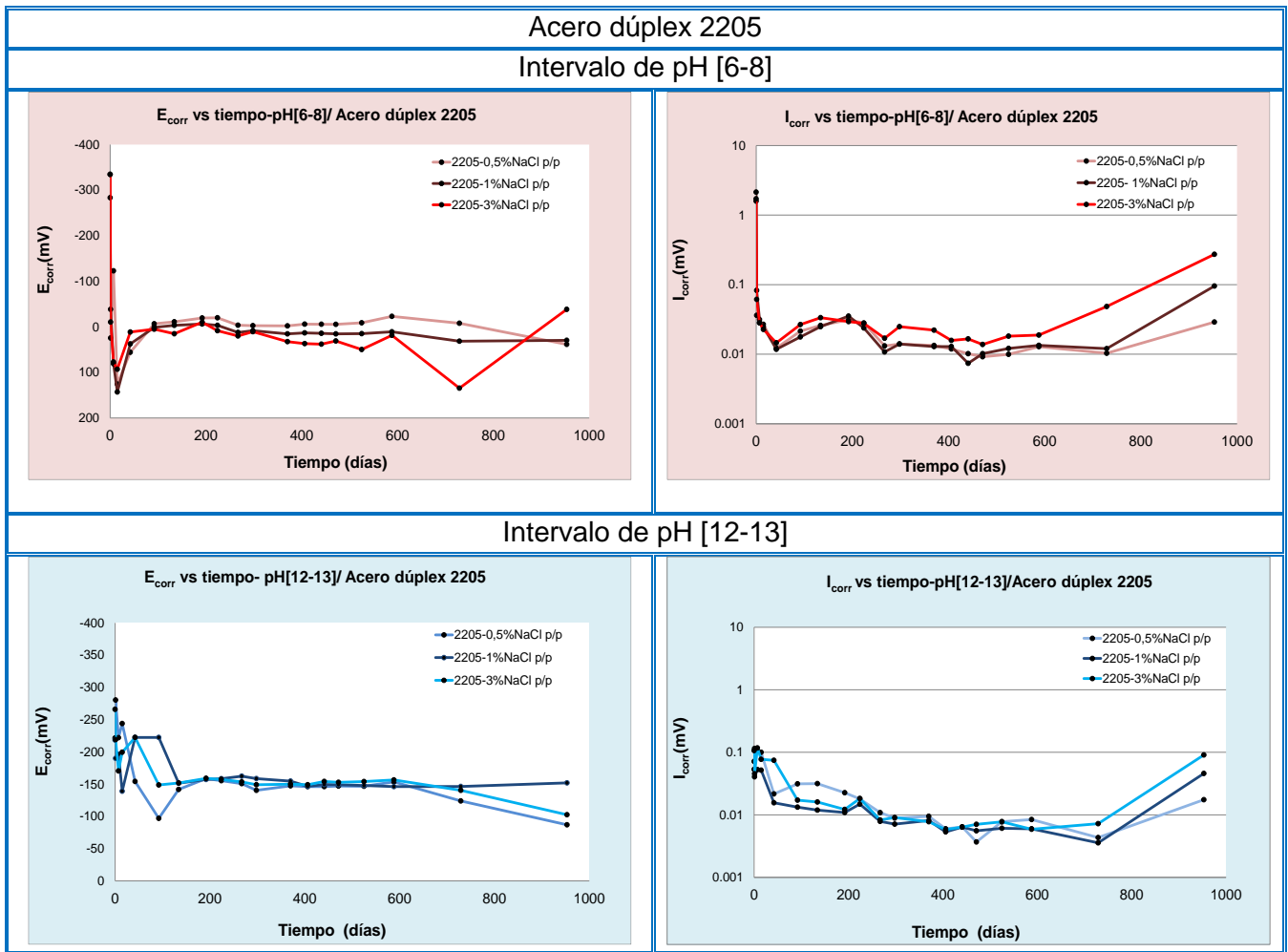
Cuando estas fluctuaciones de la E_{corr} se producen, pueden llegar a ser muy drásticas pudiendo llegar a pasar la E_{corr} de un estado pasivo a uno activo para luego volver a encontrarse pasivos, todo ello entre medidas contiguas. Se considera que estas fluctuaciones puedan deberse a la presencia de los distintos metales de aleación como el cromo o el molibdeno que proporcionan al acero inoxidable la capacidad de regenerar la capa pasiva y de repasivar zonas donde las picaduras han comenzado a desarrollarse generándose picaduras metaestables, las cuales se inician pero antes de desarrollarse por completo se repasivan y dejan de crecer. No obstante, con el tiempo esta repasivación puede dejar de producirse dando lugar a la estabilidad y avance de las mismas [149-151]. Cuando esto ocurre, el valor de la E_{corr} presenta menor fluctuación, evolucionando hacia valores más negativos a medida que avanza la corrosión y esto se observa en nuestros resultados.

Existen por tanto una serie de etapas establecidas para los aceros inoxidables, donde según el valor de la E_{corr} que presenten, estos pueden encontrarse con un alto riesgo de corrosión, aproximadamente en valores más negativos de -300mV, una probabilidad alta de que el acero se encuentra pasivo, por debajo de -150mV y un intervalo de incertidumbre donde no se puede asegurar la actividad exacta del acero, entre [-150 y -300] mV [152]. Para una mejor visualización de lo que ocurre en las celdas de corrosión se muestra la evolución de cada uno de los aceros en los distintos intervalos de pH y de concentraciones de cloruros mediante gráficas que representan los valores medios obtenidos a partir de m_1 y m_2 , para ambos parámetros E_{corr} e I_{corr} .



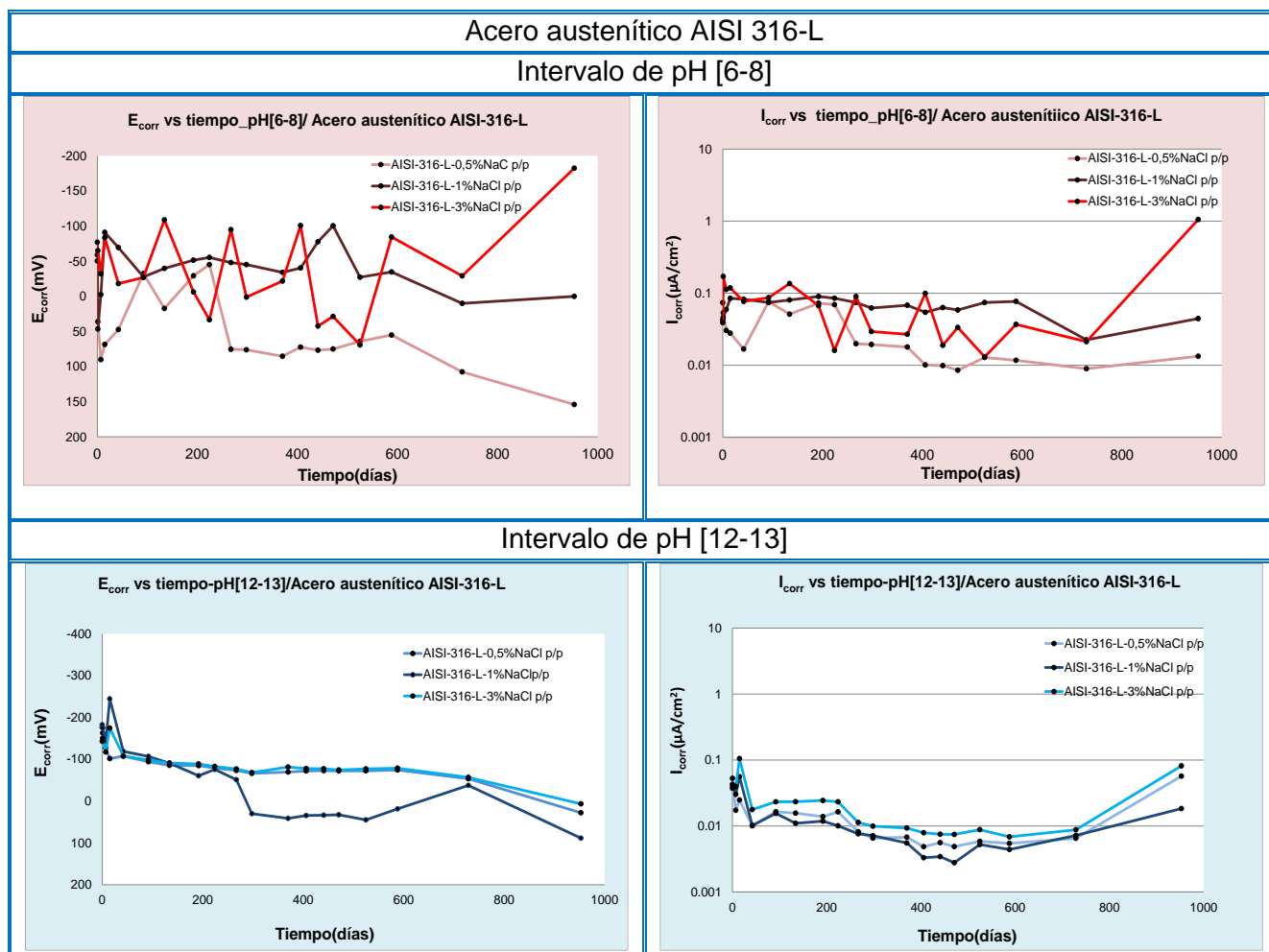
Gráfica 36. E_{corr} e I_{corr} promedios, medidos en celdas de corrosión. Acero dúplex 2001.

El acero dúplex 2001, cuando se encuentra en pH [6-8], se muestra activo inicialmente. Este presenta fluctuaciones que parecen indicar que intenta repasivarse, pero parece que no lo consigue y se mantiene activo con un valor de I_{corr} en torno a 0.2 $\mu A/cm^2$ o por encima de él. Esto ocurre para las tres concentraciones de NaCl. Sin embargo, cuando se encuentra en el intervalo de pH alcalino, se muestra pasivo para las tres concentraciones de cloruros salvo para la más alta y donde a partir de los 441 días la I_{corr} se aproxima a 0.1 $\mu A/cm^2$, lo cual indica un inicio de activación que finalmente parece repasivarse conforme pasa el tiempo sin llegar a superar dicho valor transcurridos 953 días. Las imágenes mediante lupa binocular una vez desmontadas las celdas y que se encuentran en el ANEXO 2, muestran signos claros de corrosión y picaduras visibles, para el intervalo de pH más bajo y alguna picadura cuando el intervalo de pH es alcalino y la concentración de cloruro la del 3%, lo cual concuerda con lo descrito.



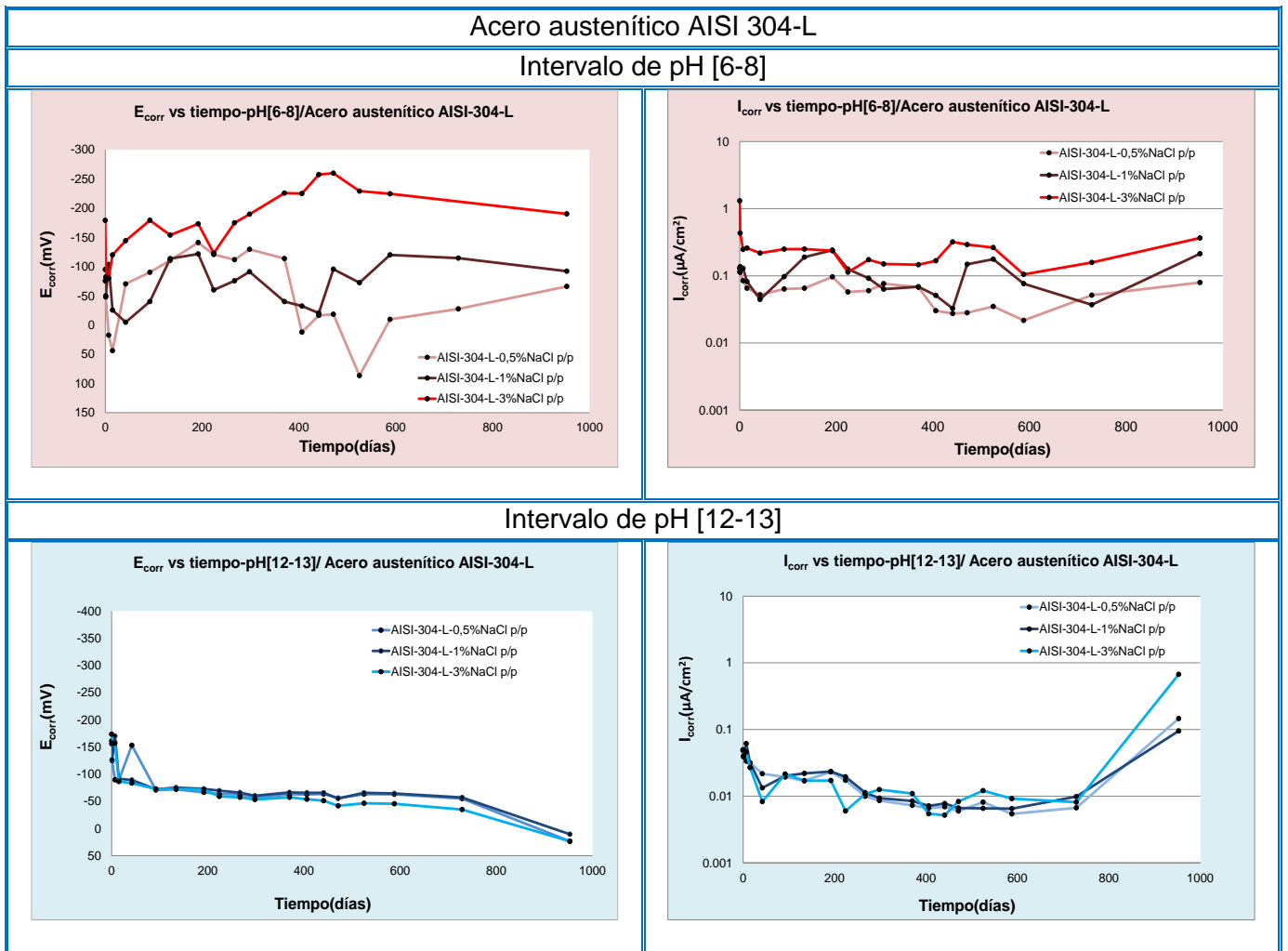
Gráfica 37. E_{corr} e I_{corr} promedios medidos en celdas de corrosión. Acero dúplex 2205.

El acero dúplex 2205, para ambos intervalos de pH, muestra su habitual resistencia a la corrosión por cloruro y no presenta, ni fluctuaciones excesivas en ambos parámetros, E_{corr} e I_{corr} , ni indicios de activación durante el período completo de medida. Tan sólo en el período final de medida y para el intervalo de pH [6-8] parece que se hubiesen activado algunas picaduras, observándose algunas pequeñas zonas de óxidos. No obstante, salvo alguna mancha de óxido pequeña, no se observan indicios de picaduras mediante la lupa.



Gráfica 38. E_{corr} e I_{corr} promedios, medidos en celdas de corrosión. Acero austenítico AISI 316-L.

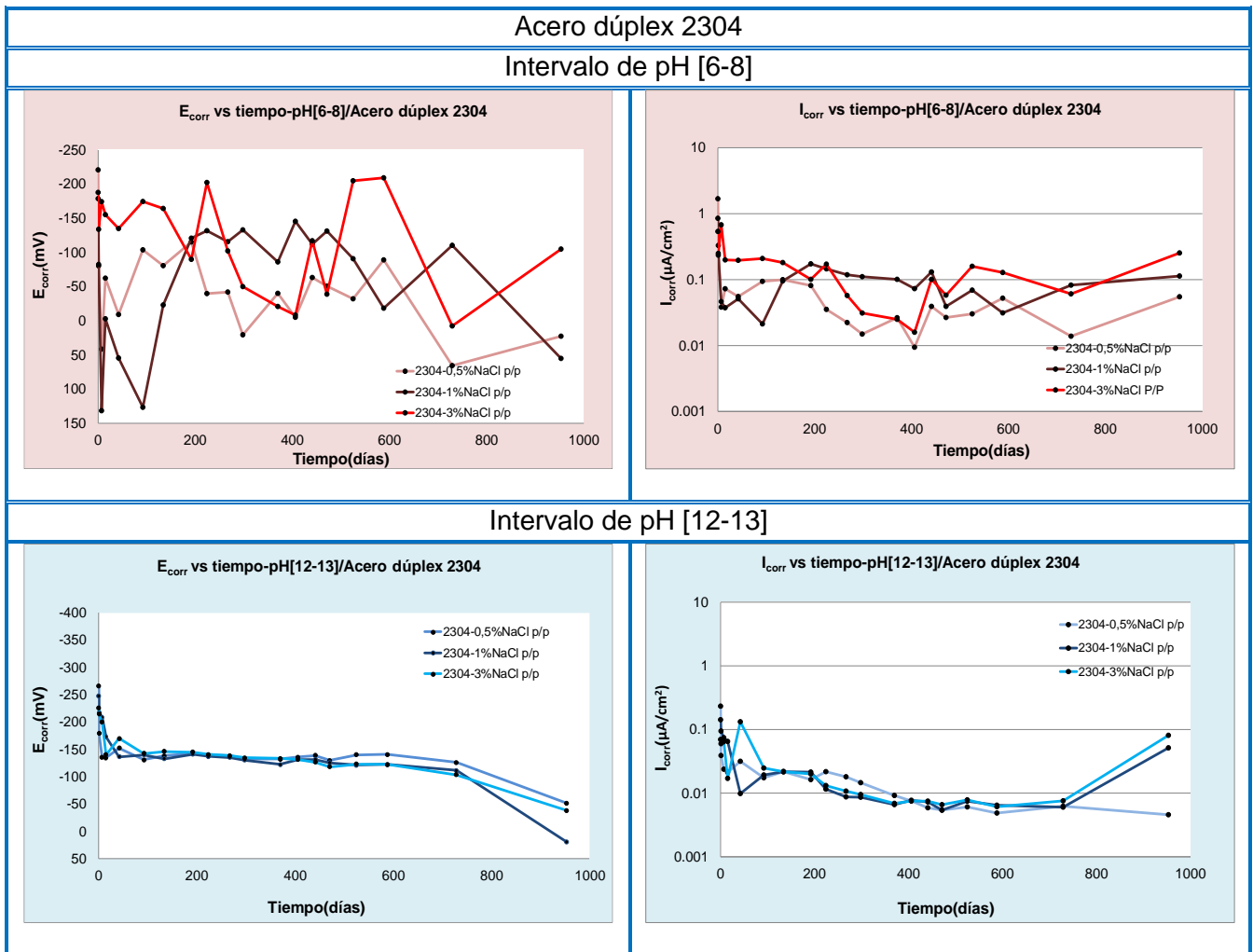
En cuanto al acero austenítico AISI-316-L, se muestra pasivo durante los 953 días, cuando el intervalo de pH es alcalino y para todas las concentraciones de cloruro. Cabe destacar como, para la concentración de cloruros del 1%NaCl p/p, los valores de ambos parámetros muestran con el tiempo que los aceros se están repasivando cada vez más, en comparación con las de 0,5 y 3% de NaCl p/p. Por otro lado, y para el intervalo de pH cercano al neutro, la E_{corr} muestra numerosas fluctuaciones y la I_{corr} muestra valores inactivos y por debajo de $0.1\mu A/cm^2$ durante los 953 días aunque habría que destacar una brusca subida de dicho parámetro, para la concentración de cloruros más alta, justo en la medida de 953 días.



Gráfica 39. E_{corr} e I_{corr} promedio, medidos en celdas de corrosión. Acero austenítico AISI 304-L.

El acero austenítico AISI-304-L, cuando el intervalo de pH es alcalino muestra estabilidad en los valores de E_{corr} y según la I_{corr} se mantiene pasivo para las tres concentraciones de cloruro, sólo transcurridos 953 días se observa una subida de este parámetro, la cual se encuentra muy próxima a $0,1\mu A/cm^2$, para las concentraciones de 0,5 y 1% de NaCl p/p sin embargo, la concentración del 3% supera dicho valor de I_{corr} , mostrándose activo.

En cuanto a lo que ocurre para el intervalo de pH [6-8], la concentración 0,5%, se encuentra por debajo de $0.1\mu A/cm^2$ durante todo el período de medida, en la del 3%, se encuentra activo y por encima de dicho valor de I_{corr} , desde el inicio hasta el final de las medidas. Finalmente, para la concentración del 1%, ambos parámetros fluctúan, encontrándose a veces la I_{corr} por debajo de $0.1\mu A/cm^2$ y otras por encima. Esto indica que pudieran iniciarse picaduras, activándose parte de la superficie y que más tarde consiguen repasivarse. Las imágenes mediante lupa binocular muestran picaduras bien diferenciadas para todos los casos y estas son de mayor tamaño en las condiciones más extremas.



Gráfica 40. E_{corr} e I_{corr} promedios, medidos en celdas de corrosión. Acero dúplex 2304.

Por último, se hace referencia al dúplex 2304, el cual, se muestra pasivo totalmente durante los 953 días, para ambos intervalos de pH y para todas las concentraciones de cloruros. Tan sólo se muestra una subida del valor de la I_{corr} , para el pH no alcalino y la concentración más alta de cloruros, justo en la medida de 953 días, quedando este parámetro por encima de $0.1 \mu A/cm^2$.

En cuanto a las picaduras que se observan en todas las barras que se ensayan en las celdas de corrosión es que coinciden en apariencia con lo que se observa para los ensayos de voltametrías cíclicas, aunque en una medida mucho menor. Es decir, las picaduras de los austeníticos se muestran más profundas y redondeadas, así como en los dúplex que muestran picaduras, se muestran más extendidas en la superficie, ANEXO 2.

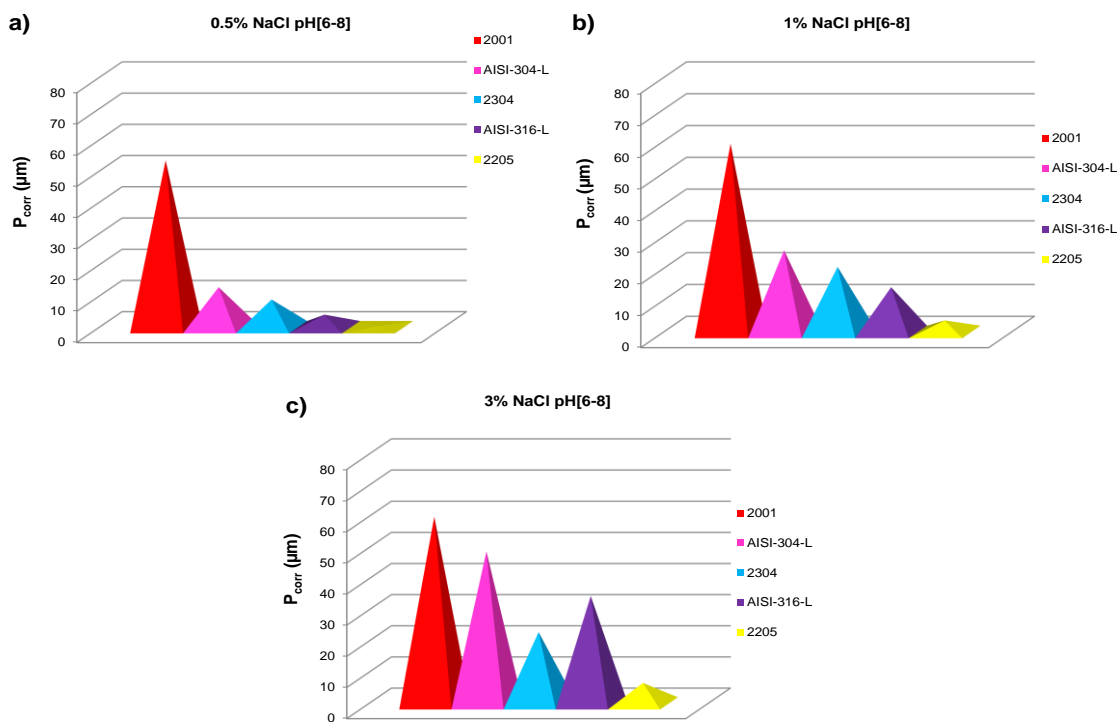
Tabla 37. Comparativa para la observación de las picaduras entre austeníticos y dúplex tras los ensayos de celdas de corrosión.

Celdas de corrosión con un pH[6-8] y 3% p/p de NaCl.				
AISI 316-L	2001	AISI 304-L	2304	2205
				

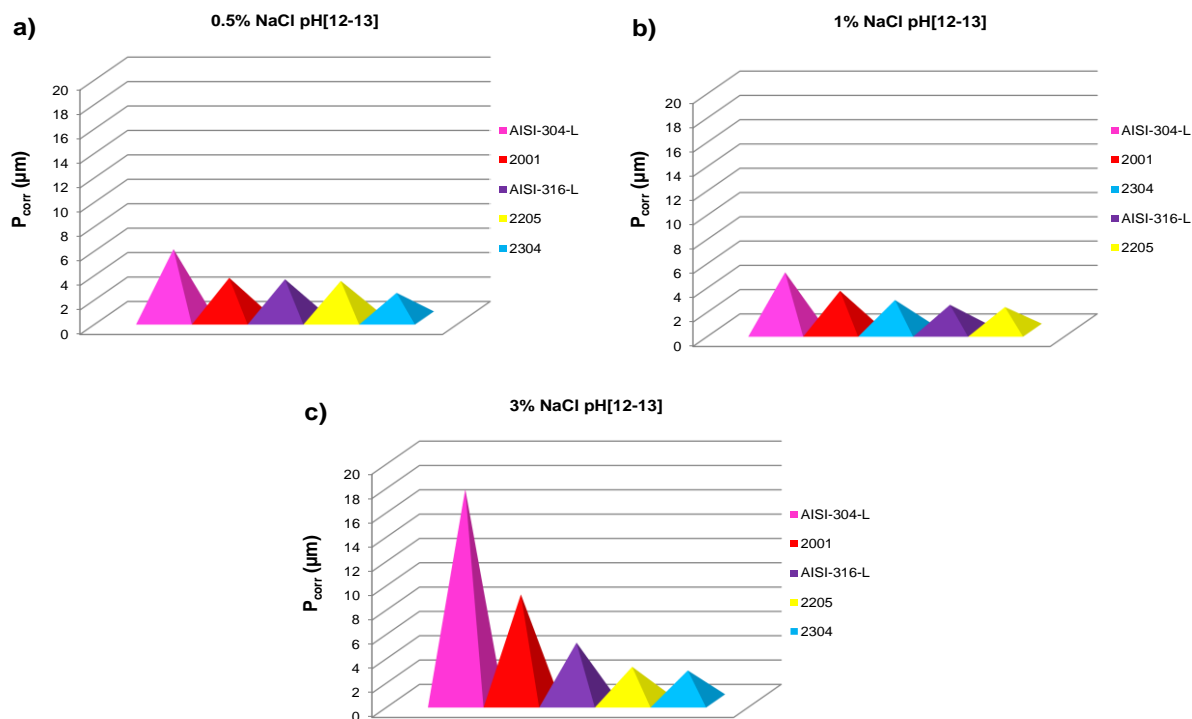
5.2.2 Evaluación de P_{corr} y de la pérdida de material.

El segundo estudio que se realiza a partir de las celdas de corrosión, es el cálculo de la P_{corr} (valores que se muestran en la tabla 24 obtenidos mediante la eq.57).

A continuación, se muestran mediante gráficas los valores medios de P_{corr} , con el objetivo de una comparación conjunta de los cinco tipos de aceros inoxidable, aunque sí separándolos por intervalos de pH y concentración de cloruros.



Gráfica 41. Comparación de valores medios de P_{corr} de todas las calidades para el intervalo de pH [6-8], transcurridos 953 días en distintas concentraciones de NaCl. a) 0.5% de NaCl p/p, b) 1% de NaCl p/p y c) 3% de NaCl p/p.



Gráfica 42. Comparación de valores medios de P_{corr} de todas las calidades para el intervalo de pH [12-13], transcurridos 953 días en distintas concentraciones de NaCl. a) 0.5% de NaCl p/p, b) 1% de NaCl p/p y c) 3% de NaCl p/p.

Los distintos valores de P_{corr} o profundidad de la corrosión, se muestran diferentes según el intervalo de pH donde se encuentran inmersas las barras. Así pues, para el intervalo de pH [6-8] la profundidad de la corrosión ha afectado en mayor medida al acero dúplex 2001 que al AISI-304-L, tal como cabría esperar según su valor del índice PREN cuyos valores se recuerdan y son los siguientes: 20.16 (AISI-304-L) < 22.09 (2001) < 24.23 (AISI-316-L) < 25.69 (2304) << 36.42 (2205).

Al acero dúplex 2001 le sigue el austenítico AISI-304-L, cuya profundidad de la corrosión aumenta considerablemente casi igualándose al 2001 cuando la concentración de cloruro es del 3% NaCl p/p.

A estos dos aceros inoxidable les sigue, en valor de P_{corr} , el acero dúplex 2304 a pesar de que el acero esperado, según el valor del índice PREN, tendría que ser el AISI-316-L. Este último muestra profundidades de corrosión menores a dicho dúplex, para las tres concentraciones de cloruros, incluyendo la más alta.

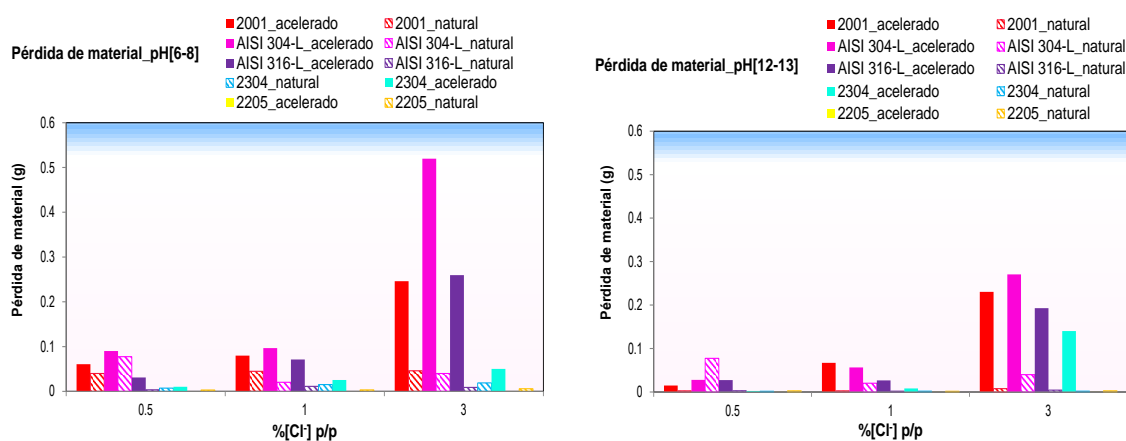
Por último, el acero dúplex 2205 muestra los valores más bajos de P_{corr} , a pesar de que éste sufre un leve aumento a medida que aumente la concentración de cloruros.

En cuanto al intervalo de pH alcalino, los aceros inoxidable muestran valores de P_{corr} bastante más bajos que en el anterior intervalo pH [6-8]. Sin embargo y sorprendentemente, el orden que anteriormente se describe se invierte en algunas calidades de acero inoxidable.

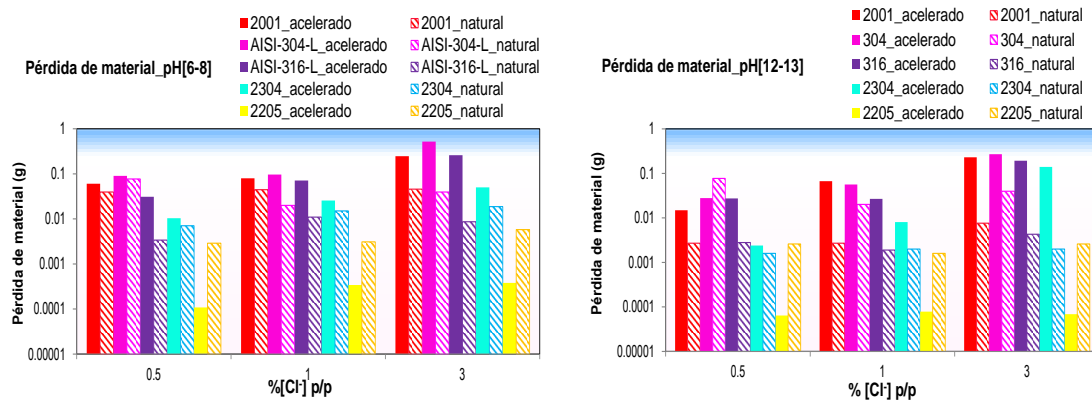
Sintetizando lo anteriormente analizado, es el acero austenítico AISI-304-L el que muestra mayor profundidad de la corrosión para las tres concentraciones de cloruros, tal y como se encuentra el orden de los índices PREN. A este le sigue el 2001, después el AISI-316-L, el 2304 y por último el 2205, coincidiendo el orden con el que marca el índice PREN.

Una vez se analizan los valores obtenidos para el parámetro P_{corr} , se calcula la pérdida de material que ha sufrido cada acero en distintos medios. La cantidad de material perdido se calcula a partir de los valores de I_{corr} y la ley de Faraday, dada la validez de las medidas de dicho indicador como se demuestra en la gráfica 18, donde se enfrentan las pérdidas de material gravimétrica frente a la pérdida material que denominamos electroquímica.

Retomando los valores de pérdida de material “electroquímica” por su obtención a partir de la ley de Faraday de los ensayos de voltametrías cíclicas (ensayos acelerados), nos surge la necesidad de compararlos con la pérdida de material “electroquímica” que se obtienen a partir de las celdas de corrosión (ensayos no acelerados o natural). La posibilidad de compararlos surge debido a que ambos ensayos se realizan en las mismas condiciones de pH y de concentraciones de cloruros, con la diferencia que los primeros son ensayos acelerados y los segundos son a tiempo real.



Gráfica 43. Pérdida de material electroquímica expresada en gramos. Ensayo no acelerado o natural en celdas de corrosión durante un período de 953 días en comparación con la pérdida producida en ensayos acelerados.



Gráfica 44. Pérdida de material natural y acelerada en escala logarítmica.

Analizando los resultados de pérdida de material mediante celdas de corrosión a tiempo real, que se muestran con columnas ralladas en las gráficas 43 y 44, se observa cómo para el intervalo de pH no alcalino, son el austenítico AISI 304-L y el dúplex 2001 los que pierden mayor cantidad de material, para las tres concentraciones de cloruros. Muy próximo a estos se encuentra el dúplex 2304 y el austenítico AISI 316-L. Por último, les sigue en pérdida de material el 2205. Sin embargo, para el pH alcalino la pérdida de material en general es sustancialmente menor, siendo en estas condiciones el austenítico AISI 304-L el que más pierde, seguido del dúplex 2001. El resto presentan unas pérdidas de material muy bajas y muy próximas entre ellos.

Si se comparan estos resultados estudiados de forma natural, con los obtenidos mediante las voltametrías cíclicas o acelerados, gráficas 43 y 44, se observa como la cantidad de material que se pierde en estos últimos es en todos los casos superior a la que se pierde durante los ensayos en tiempo real que duran 953 días. Llama la atención una excepción, el dúplex 2205 el cual muestra lo contrario. Esta manifestación de los resultados del dúplex 2205, pudieran ser causa de algún fenómeno que resulta de interés para un futuro y que habría que comprobar con otros estudios que no se abordan aquí o bien y debido a los valores tan pequeños que presenta, podrían formar parte del margen de error de cálculo que debe existir, aunque no se ha calculado.

La coincidencia en ambos tipos de ensayo, se produce en que el austenítico AISI 304-L y el dúplex 2001 presentan mayor pérdida de material para ambos intervalos de pH seguidos del 2304 y el austenítico AISI 316-L, aunque estas dos calidades se encuentran mucho más próximas en los ensayos en estado natural que en los acelerados.

Otra coincidencia radica en que la pérdida de material es mayor en los aceros inoxidables con microestructura austenítica en comparación con su dúplex más

próximo en resistencia a la corrosión excepto para los ensayos naturales en el intervalo de pH [6-8] donde se muestran próximos.

Resulta de interés la comparación entre ambos tipos de ensayos, pues mientras los acelerados pueden proporcionar una idea cualitativa de la resistencia a la corrosión por cloruros ante una situación forzada y extrema, los que se realizan a tiempo real donde las condiciones ambientales y otras condiciones pueden influir, pueden no evolucionar en el mismo sentido que los acelerados. Esta misma importancia la adquieren los ensayos desarrollados "in situ" cuando las barras de acero inoxidable se encuentran embebidas en el hormigón.

5.2.3 Parámetros de los circuitos equivalentes e interpretación de los resultados.

Las medidas de impedancia sólo han sido estudiadas durante dos años, pues la última medida correspondiente a 953 días no se ha tomado como válida debido a que los diagramas de impedancias presentaban un gran número de puntos dispersos que no permitían realizar ningún ajuste.

A continuación, se discute el significado y la evaluación de los parámetros obtenidos por la aproximación de las medidas de impedancia a un circuito equivalente, tomando como base la correspondiente interpretación física que se encuentra descrita en el apartado de metodología.

El parámetro R_0 se interpreta como la resistencia del medio. Dicho medio es una disolución y los valores de resistividades en medios acuosos son mucho menores que cuando el medio que rodea a la barra de acero inoxidable es hormigón o mortero. La resistencia es una magnitud que varía de forma inversa a la conductividad, por lo que cuando la cantidad de electrolitos del medio es mayor, la conductividad aumenta y como consecuencia la resistividad del medio es menor. Por lo tanto, se espera que cuanto mayor sea la concentración de cloruros en la disolución, menor será el valor de R_0 .

Un CPE es un elemento de fase constante que se utiliza para representar una pseudocapacitancia por su alejamiento con respecto a un capacitador ideal, debido a la rugosidad de la superficie de estudio.

Se considera una primera constante de tiempo constituida por CPE_1 (Y_1, n_1) y R_1 , que se interpreta como los procesos que ocurren en la interfase disolución /capa pasiva, siendo CPE_1 la pseudocapacitancia de la capa pasiva y R_1 la resistencia de esta misma.

Por otro lado, se considera una segunda constante de tiempo, constituida por CPE_2 (Y_2, n_2) y R_2 y que se interpreta como la interfase capa pasiva/ metal y donde CPE_2

representa la pseudocapacidad de transferencia de carga en la zona de la picadura y R_2 , la resistencia a la transferencia de carga del hueco de la picadura.

Si los parámetros de la CPE_1 , permanecieran invariables significaría que no se están produciendo modificaciones en la capa pasiva y por lo tanto se mostraría una gran estabilidad de la misma.

Los parámetros n_1 y n_2 se relaciona con la superficie y su homogeneidad. Este parámetro varía entre 0 y 1. Cuando n se aproxima a 1, la CPE se describe como un capacitador ideal. Para valores de $0.5 < n < 1$, la CPE describe una distribución de relaciones de tiempo dieléctricas en el espacio de frecuencias. Cuando $n=0.5$, describe una impedancia de Warburg con carácter difusional. En estos casos y para representar el fenómeno de difusión, se suele incluir un elemento de Warburg al circuito, elemento que no hemos considerado incluir en la interpretación de nuestros resultados.

Cuando los valores de n_1 y n_2 son altos, indican que la capa pasiva o la zona de estudio es más uniforme y compacta. Si la capa pasiva es más estable, la capacidad protectora será mayor.

El aumento del valor de Y_1 , indica que se están produciendo modificaciones desfavorables con respecto a la capa pasiva y su resistencia a la corrosión. En estos procesos pueden englobarse, modificaciones en la composición, rupturas locales o aumento de la porosidad de la misma.

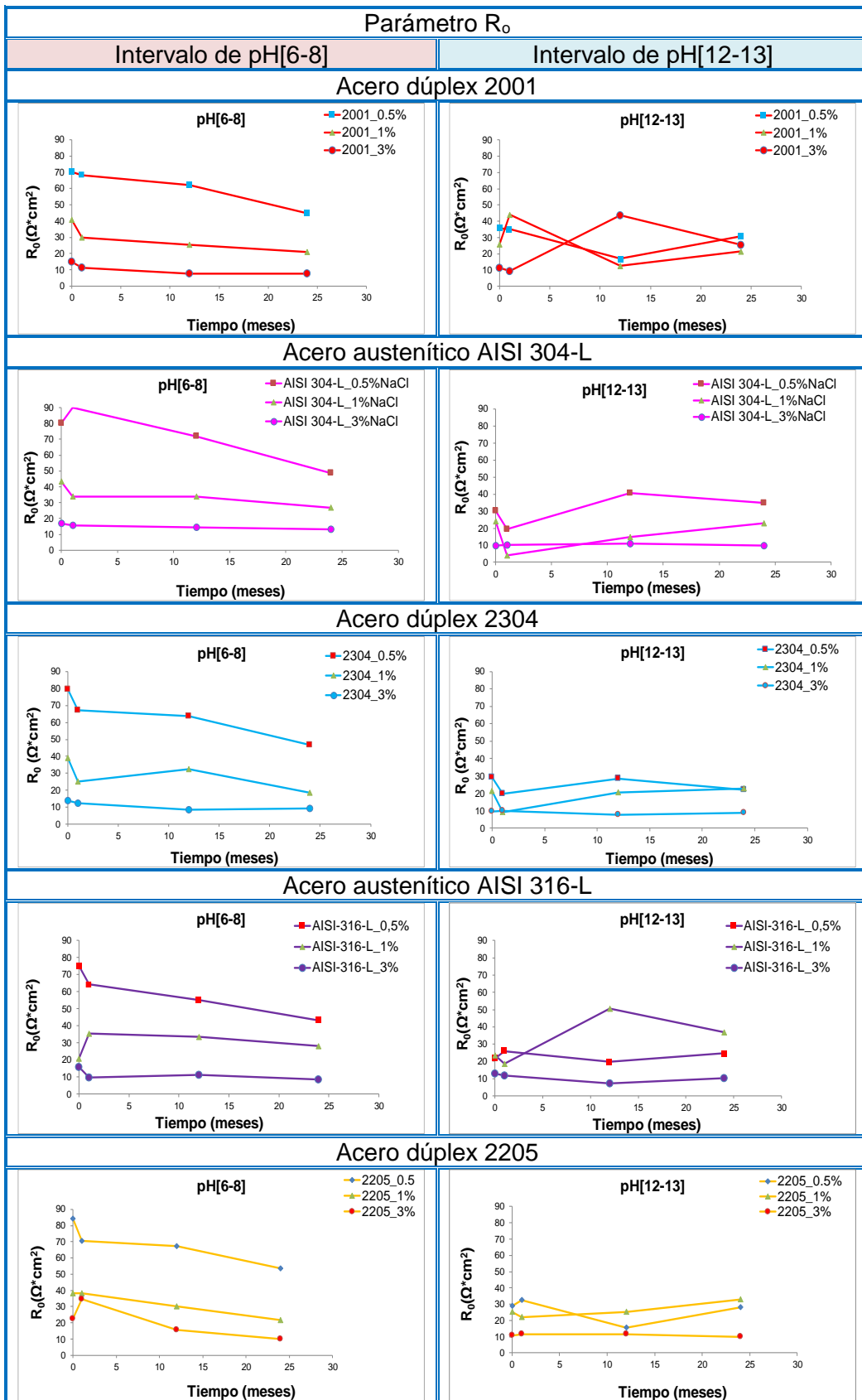
Un aumento de la admitancia Y_1 , es lógico que vaya acompañado de una disminución de la resistencia R_1 , disminuyendo por tanto la resistencia de la capa pasiva. La evolución en este sentido de ambos parámetros, significa una evaluación desfavorable con respecto a la resistencia a la corrosión por cloruros y viceversa, ya que una disminución de Y_1 junto con un aumento de R_1 nos indica que la capa pasiva está sufriendo modificaciones en el sentido de una mayor resistencia frente al proceso corrosivo.

Del mismo modo, si estas consideraciones las trasladamos a la segunda constante de tiempo, observamos que cuando el valor del parámetro Y_2 aumenta y la R_2 disminuye, se produce pérdida de la homogeneidad en la interfase capa pasiva/ metal, indicando que la evolución de la zona de picadura avanza.

A continuación, se muestra la representación de los parámetros del circuito para cada acero por individual. Dentro de cada acero se representan por una parte el bloque de pH cercano al neutro y por otro el del pH alcalino y dentro de cada bloque de pH se representan las distintas concentraciones de cloruros y su evolución durante dos años. Es importante tener en cuenta que los valores que se representan, corresponden al valor promedio entre m_1 y m_2 , todos ellos con sus correspondientes errores que se

muestran en el anexo 5. Indicar que no se han considerado válidos para ser representados ni evaluados aquellos valores que poseen un error por encima de un 20%, a excepción del parámetro R_2 que ha sido representado, aunque no evaluado, debido al elevado error que presentan la mayor parte de sus resultados. Se culpabiliza de este error tan elevado a la necesidad de realizar el mismo ajuste con un mayor número de puntos y alcanzando frecuencias más bajas de las que se han medido, es decir, menores a 0.01 Hz, pudiendo haber contribuido a la aportación de más información sobre la segunda constante de tiempo o el segundo círculo formado en el diagrama de Nyquist. No obstante la falta de poder evaluar estos R_2 , se suple con la medida de los valores de I_{corr} en el tiempo que se encuentran representados en el anexo 1 y cuya validez se comprueba con las pérdidas de material gravimétricas que se representan en la gráfica 18.

Se comienza con la representación del parámetro R_0 que revela para el intervalo de pH [6-8] una disminución de su valor conforme la concentración de cloruros aumenta y a su vez se produce un descenso leve a lo largo del tiempo. Sin embargo, para el intervalo de pH alcalino, la R_0 se mantiene prácticamente estable, aunque con alguna fluctuación leve que no se muestra en el intervalo de pH [6-8]. Esto puede ser debido a la concentración saturada de $Ca(OH)_2$ que se encuentra en el medio.



Gráfica 45. Parámetro R_o para todos los aceros inoxidables de estudio.

5.2.3.1 Primera constante de tiempo

Si se analiza el intervalo de pH [6-8] se observa que de forma generalizada el valor de la admitancia Y_1 aumenta en los estados iniciales y conforme aumenta la concentración de cloruros. Esto demuestra que inicialmente y debido a la presencia de cloruros, la capa pasiva sufre modificaciones que disminuyen su homogeneidad, incluso existe la posibilidad de que se produzcan rupturas de la misma a lo largo de la superficie. Sin embargo, se observa como para este intervalo de pH y en las distintas concentraciones de cloruros, la Y_1 sufre fluctuaciones disminuyendo o aumentando en el tiempo. Esto nos indica que la capa pasiva y en presencia de cloruros no siempre se va a degenerar con el paso del tiempo, sino que los valores de Y_1 nos revelan que puede llegar a disminuir, pudiendo incluso mejorar en cuanto a estructura y homogeneidad. Estas modificaciones a favor de la recuperación de la capa pasiva, pueden ser debidas a causa de las diferentes reacciones que de forma sinérgica realizan algunos elementos de aleación como por ejemplo el molibdeno.

Llaman la atención diferentes observaciones; atendiendo al dúplex 2001 se observa como a medida que el tiempo avanza Y_1 sufre modificaciones, llegando a mostrar valores menores para la concentración mayor de cloruros y aumentando el mismo para las concentraciones más bajas. Todo ello en contra de lo esperado, aunque esto sólo ocurre en el intervalo de pH no alcalino. Los valores de admitancia Y_1 se encuentra en un intervalo aproximado de $[20-120\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{(1-n)}]$. Sin embargo, para el acero AISI 304-L, presenta una clara tendencia de aumento de Y_1 conforme aumenta la concentración de cloruros y encontrándose los valores de dicho parámetro en rangos superiores de entre $[20-200\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{(1-n)}]$. Cuando se analiza el comportamiento del dúplex 2304, se observa que la admitancia Y_1 presenta una gran fluctuación a lo largo del tiempo de medida, esto concuerda con la elevada dispersión de los resultados que presenta en otras experimentaciones, donde en ocasiones se comporta como un gran resistente a la corrosión y en otras se muestra próximo a aceros inoxidable que a priori se suponen inferiores. El intervalo de valores se encuentra entre $[20-200\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{(1-n)}]$.

El acero austenítico AISI 316-L, aunque un poco fluctuante, presenta valores de Y_1 que varían en menor medida cuando se compara con el resto de aceros inoxidable. No obstante, se observa un aumento claro en la última medida cuando han transcurrido dos años y esto se cumple para las tres concentraciones de cloruros. El intervalo de valores en los que se encuentra es $[20-100\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{(1-n)}]$, aparentemente menor que el resto de los aceros inoxidable y muy próximo a lo que se muestra en el acero dúplex 2205, el cual suele presentar una enorme resistencia a la corrosión en

todos los ensayos realizados. El acero dúplex 2205 presenta un aumento claro y ordenado de Y_1 el cual aumenta conforme se aumenta la concentración de cloruros y el tiempo de exposición al medio. El intervalo de valores de Y_1 se encuentra [$20-140\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{(1-n)}$].

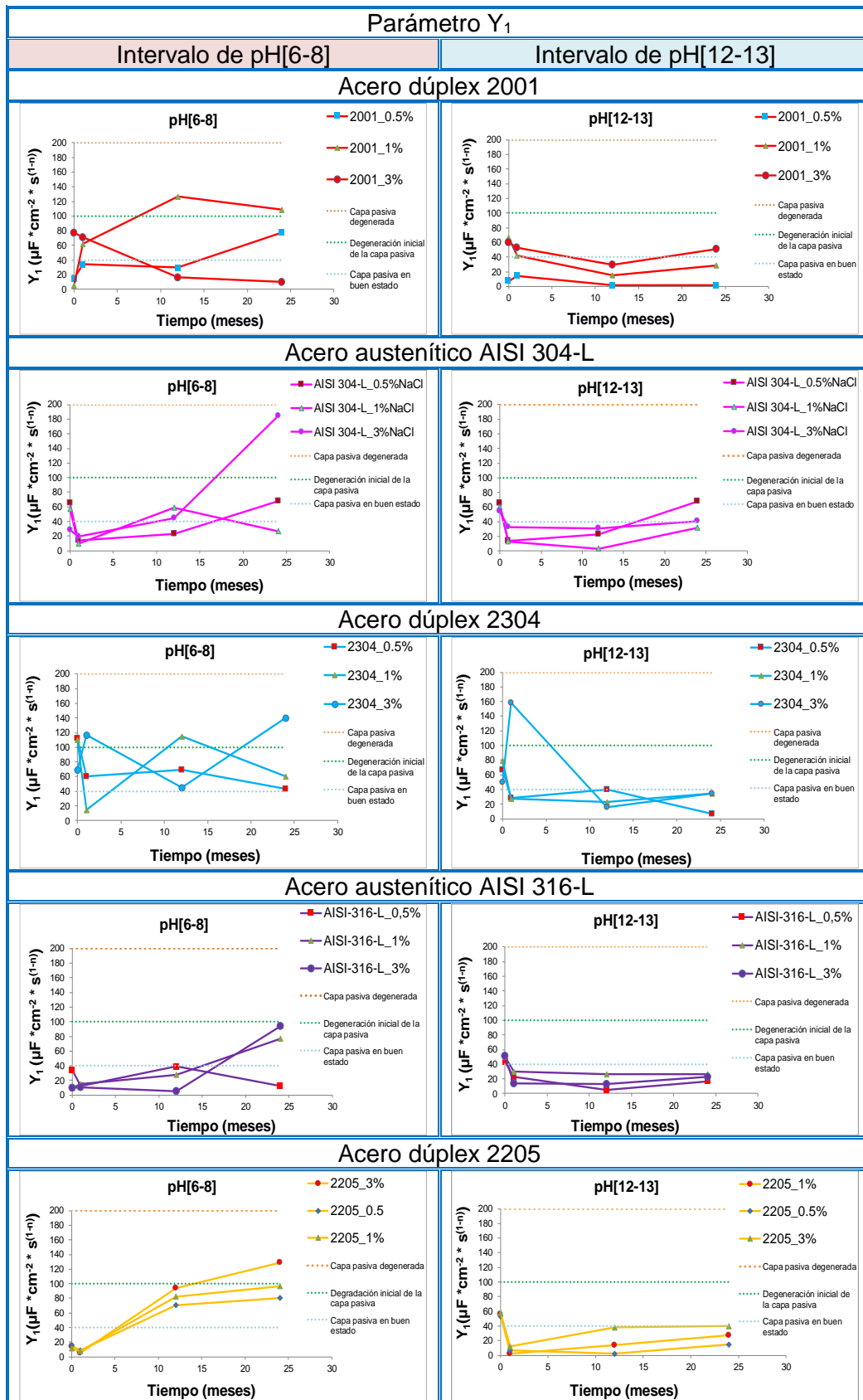
El análisis anteriormente descrito, se modifica cuando el intervalo de pH es alcalino. Cuando el medio es alcalino, la capa pasiva es más homogénea y compacta y por lo tanto su resistividad es mayor y el valor de Y_1 debe ser menor.

Esto se muestra con una clara estabilidad de dicho parámetro en todas las calidades de acero inoxidable para las tres concentraciones de cloruros y a lo largo del tiempo de exposición al medio. Todos los valores de Y_1 se encuentran por debajo de $60\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{(1-n)}$.

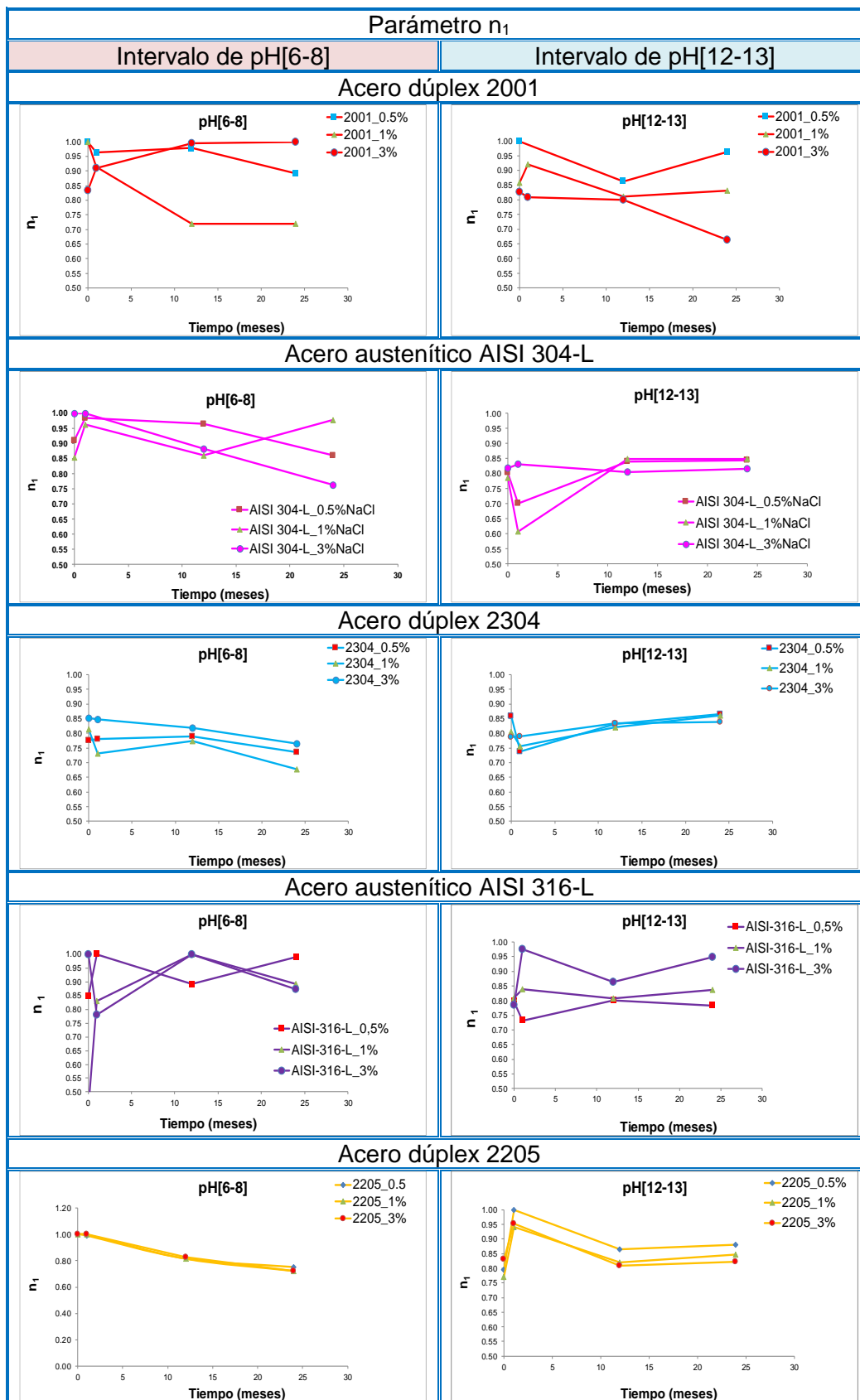
Dentro de este intervalo alcalino, resaltar la poca variabilidad de los parámetros para el austenítico AISI 316-L, permaneciendo los valores de Y_1 por debajo de $40\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{(1-n)}$ y presentando valores muy próximos al dúplex 2205. Por último, el dúplex 2304, muestra fluctuaciones con respecto al resto de los aceros, aunque con diferencias menores que las que se presentan en el intervalo de pH no alcalino.

En relación a los resultados de admitancia Y_1 , se establece la hipótesis de que cuando la Y_1 se encuentra por debajo de $40\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{(1-n)}$, la capa pasiva se encuentra en buen estado. Sin embargo, a medida que avanza el valor de éste parámetro, dicha capa se degenera y disminuye la capacidad de protección que confiere a los aceros inoxidables, considerándose estados de degeneración iniciales cuando la Y_1 se aproxima a $100\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{(1-n)}$ y estados altos de degeneración cuando éste se aproxima a $200\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{(1-n)}$.

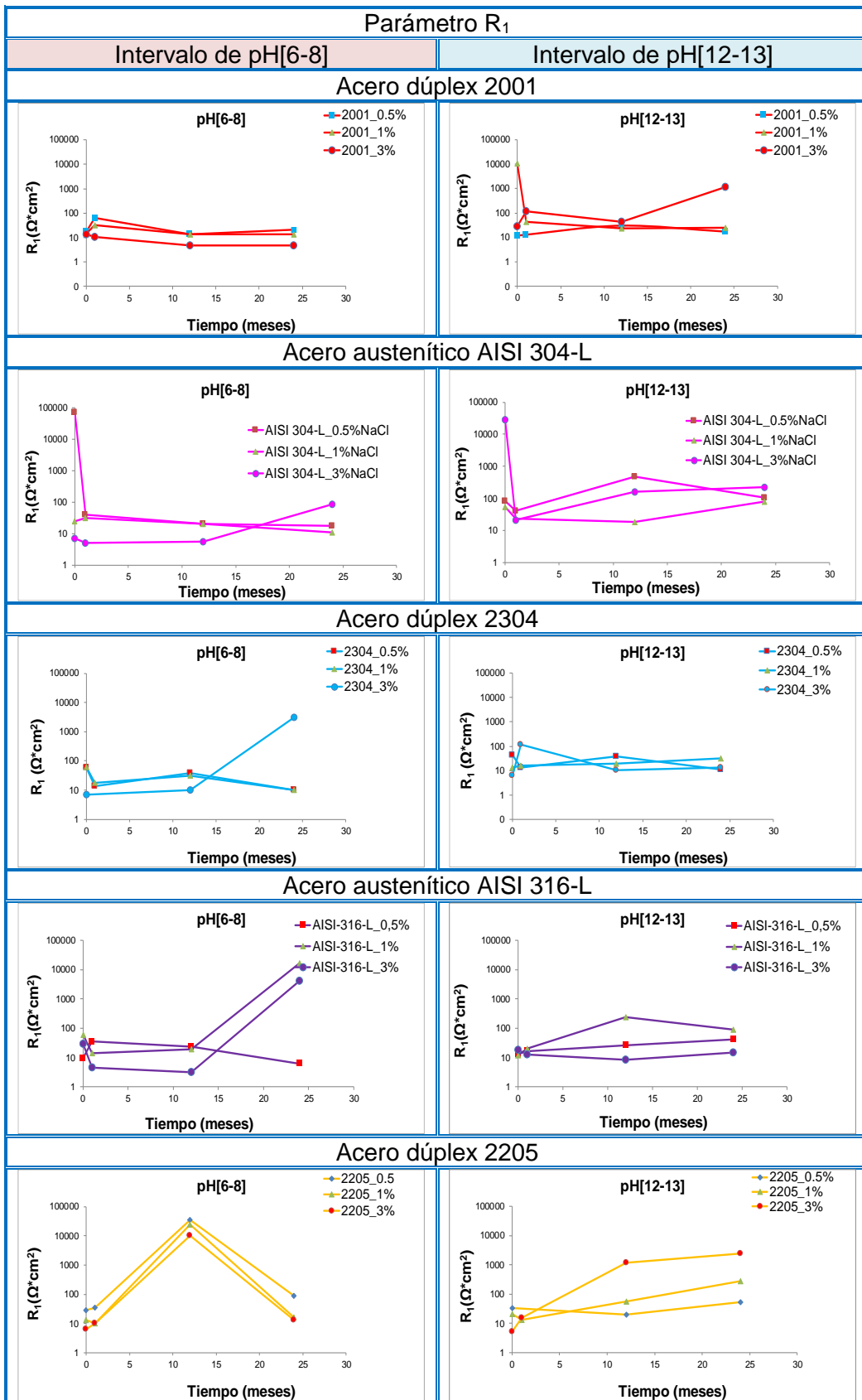
Por último y con respecto a R_1 y n_1 , se observa cómo de forma genérica las evoluciones de Y_1 concuerdan con la evolución de la resistencia R_1 , la cual disminuye en la degradación de la capa pasiva disminuyendo la resistividad de la misma y aumenta en los casos en los que mejoren sus características con respecto a la resistencia a la corrosión por cloruros. La evolución de n_1 sufre fluctuaciones y en general, también disminuye su valor con la degradación de la capa pasiva. Del mismo modo, n_1 permanece casi invariable cuando ambos parámetros, Y_1 y R_1 sufren modificaciones leves.



Gráfica 46. Parámetro Y_1 para todos los aceros inoxidables de estudio.



Gráfica 47. Parámetro n_1 para todos los aceros inoxidable de estudio.



Gráfica 48. Parámetro R_1 para todos los aceros inoxidables de estudio.

5.2.3.2 Segunda constante de tiempo

En el análisis de la evolución de la segunda constante de tiempo se comienza con el intervalo de pH [6-8]. Atendiendo a las gráficas de I_{corr} que anteriormente se han mostrado en este apartado de discusión para tener en cuenta cuales están activos y cuales pasivos y su relación con los valores de Y_2 , se observa cómo aquellos aceros que se encuentran por debajo de $60 \mu F \cdot cm^{-2} \cdot s^{(1-n)}$ se encuentran pasivos, aquellos que se encuentran entre $60 \mu F \cdot cm^{-2} \cdot s^{(1-n)}$ y $120 \mu F \cdot cm^{-2} \cdot s^{(1-n)}$ pueden presentar ambos estados como consecuencia de la repasivación de las zonas de picaduras y aquellos por encima de $120 \mu F \cdot cm^{-2} \cdot s^{(1-n)}$ se encuentran activos. Destacar que el acero dúplex 2001 presenta los valores más altos que se muestran en comparación con el resto de los aceros. Este aumenta de forma directa conforme aumenta el tiempo de exposición al medio, llegando incluso a valores cercanos a $160 \mu F \cdot cm^{-2} \cdot s^{(1-n)}$, para la concentración de cloruros más altas. Sin embargo, el acero austenítico AISI 304-L, aun presentando valores altos de Y_2 , este disminuye conforme aumenta el tiempo de exposición al medio.

Los valores de Y_2 que presenta el acero dúplex 2304, no presenta fluctuaciones ni se muestran elevados, lo que nos indica que a pesar de que su capa pasiva sufra fluctuaciones, la zona de picadura parece mantenerse estable.

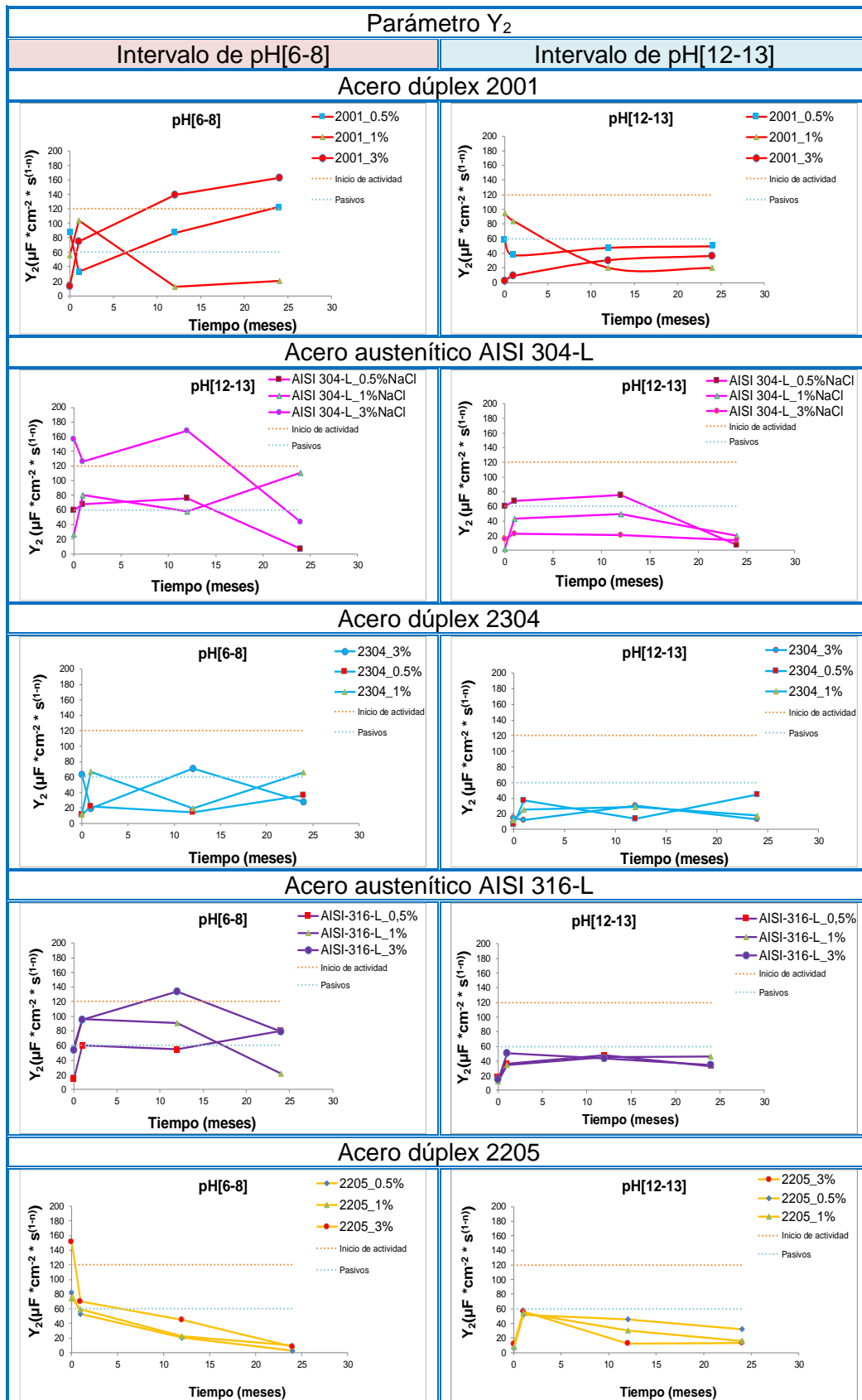
El acero austenítico AISI-316-L presenta valores altos de Y_2 desde el inicio de la experimentación que se encuentran en el intervalo donde la activación /pasivación pueden confluir. Por último, destacar la evolución de Y_2 para el acero dúplex 2205, cuyos valores se encuentran muy por debajo del que presenta el resto de los aceros y, al contrario que el resto de aceros el parámetro Y_2 , sufre un descenso brusco desde el inicio de la experimentación hasta el final. De nuevo con este fenómeno de descenso de Y_2 , el 2205, muestra su gran superioridad, con respecto al resto de los aceros inoxidable estudiados y frente a la corrosión por cloruros incluso cuando el pH no es alcalino.

Los valores de Y_2 cuando el pH es alcalino, se muestran por debajo de $60 \mu F \cdot cm^{-2} \cdot s^{(1-n)}$, con una evolución estable y sin demasiadas fluctuaciones, lo cual concuerda con la evolución que se muestra cuando se estudia la variación del parámetro I_{corr} y donde en la mayoría de los casos y para este intervalo de pH, los aceros se muestran pasivos a lo largo de todo el tiempo de experimentación y para todas las concentraciones de cloruros.

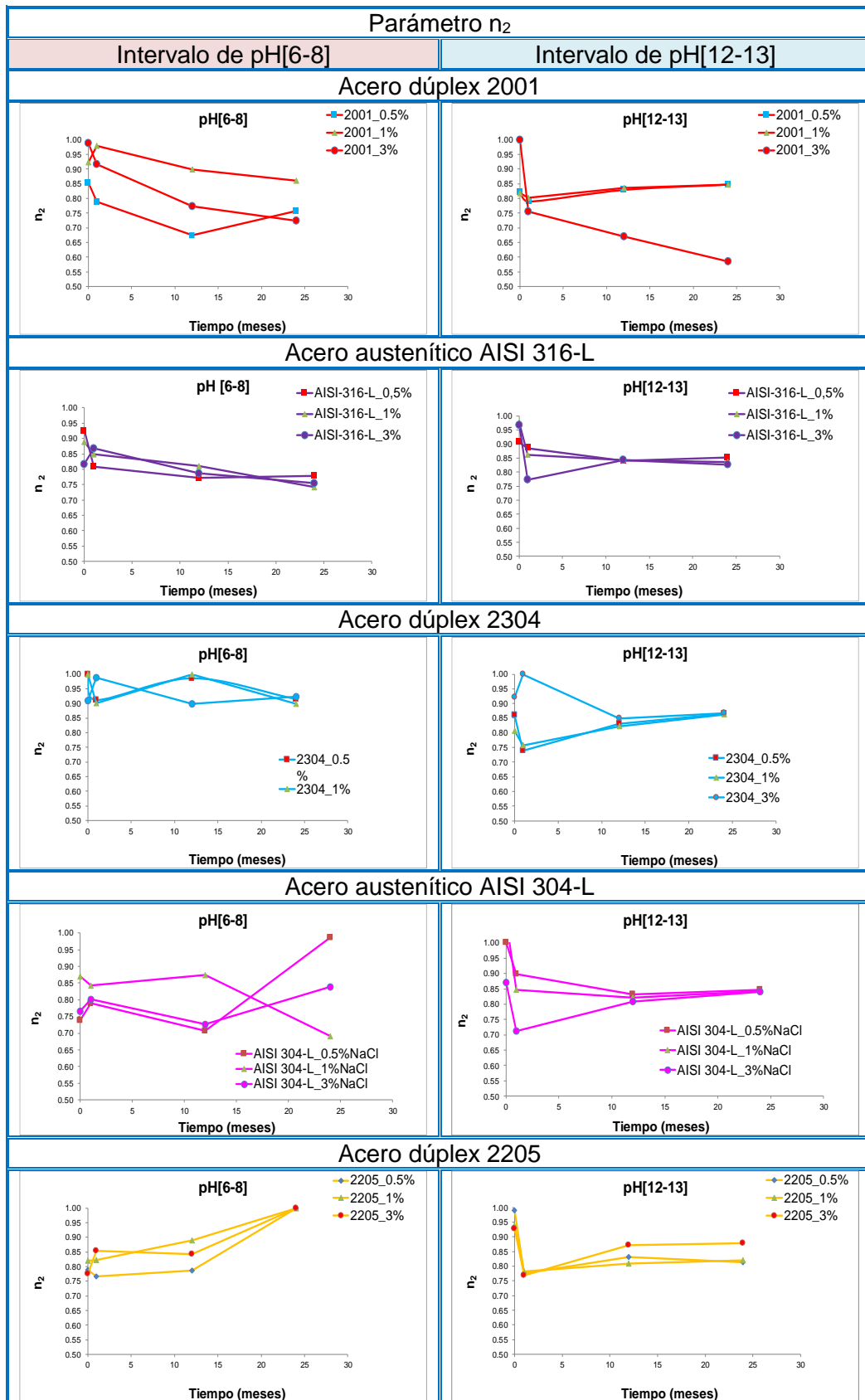
Con referencia al parámetro R_2 y su dificultad para obtener un valor con un error aceptable cuando la medida de impedancia se ajusta al circuito equivalente, se indica su imposibilidad de profundizar en su análisis y lo único que se realiza es una

excepción con respecto al resto de los parámetros analizados siendo éstos representados gráficamente a pesar de su alto porcentaje de error, con el objetivo de poder analizar que teniendo en cuenta que la $R_p = R_1 + R_2$ [44], es la R_2 , el parámetro determinante y que un valor de I_{corr} de $0.1 \mu A/cm^2$ se obtendría si la suma de $R_2 + R_1$ superasen $260000 \Omega \cdot cm^2$, valor que se representa en cada grafica como $R_{crítico}$. La finalidad de representar R_2 radica en la comprobación de que a pesar del alto error los aceros que se muestran activos en las correspondientes gráficas de I_{corr} del anexo 1 se muestran en las gráficas de R_2 por debajo o en la línea del $R_{crítico}$ y viceversa.

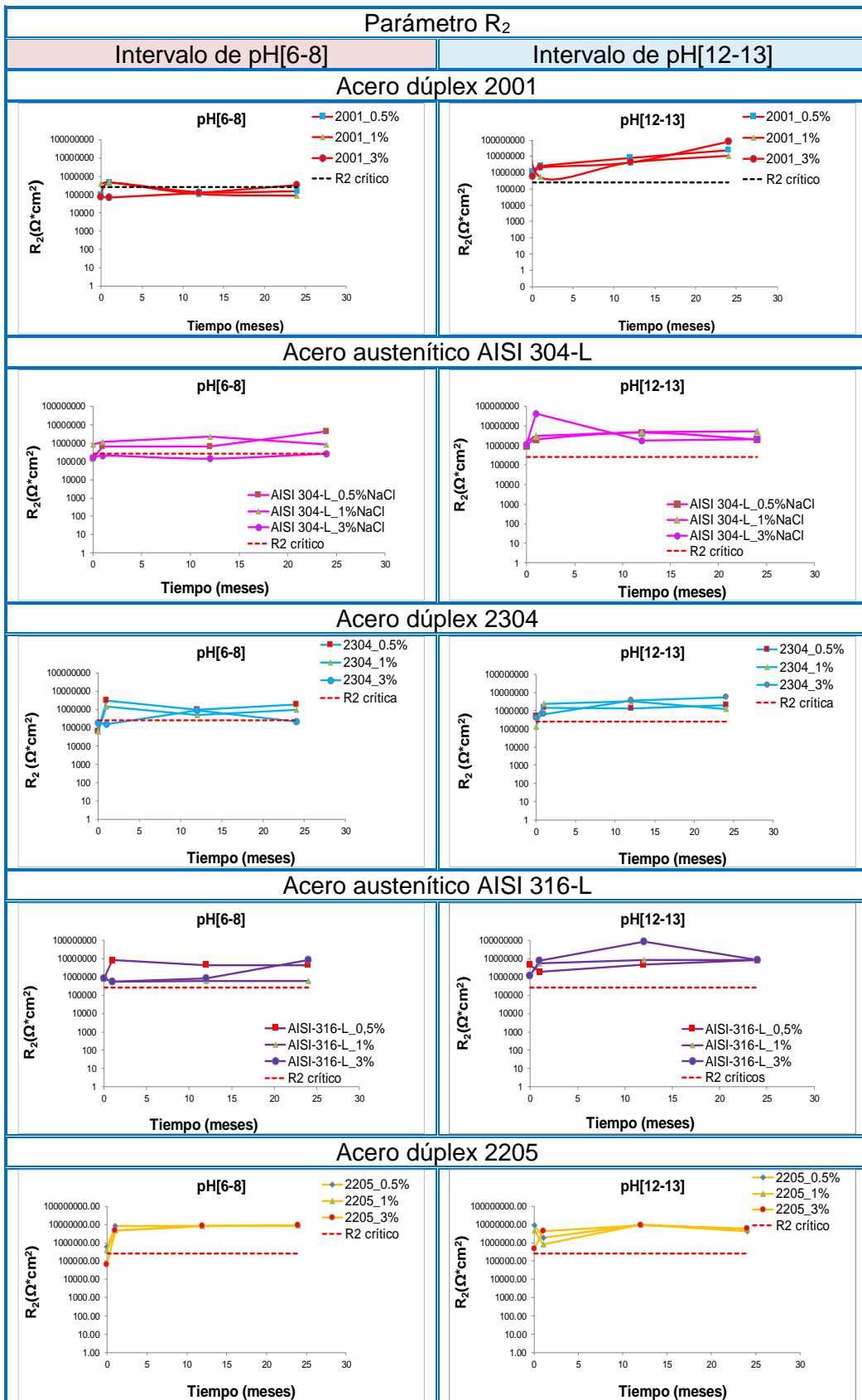
Finalizar analizando que a pesar de no poder comprobar a partir estos valores de R_2 , los valores de I_{corr} obtenidos mediante LPR, se demuestra la validez de los mismos con la representación de la pérdida de material gravimétrica frente a la pérdida de material calculada electroquímicamente en la gráfica 18.



Gráfica 49. Parámetro Y_2 para todos los aceros inoxidables de estudio.



Gráfica 50. Parámetro n_2 para todos los aceros inoxidables de estudio



Gráfica 51. Parámetro R_2 para todos los aceros inoxidables de estudio.

En el ANEXO 8, se representa una gráfica para cada intervalo de pH y concentración de cloruros, donde se enfrentan las cinco calidades de acero inoxidable de estudio.

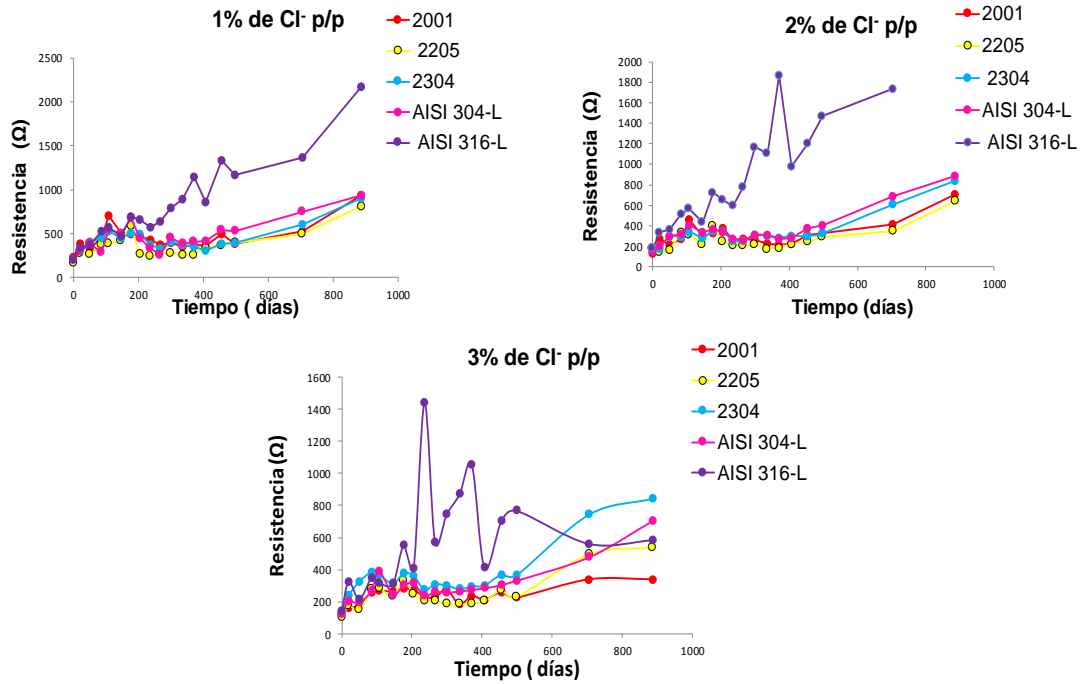
5.3 Probetas de mortero

5.3.1 Probetas con cloruros en su interior

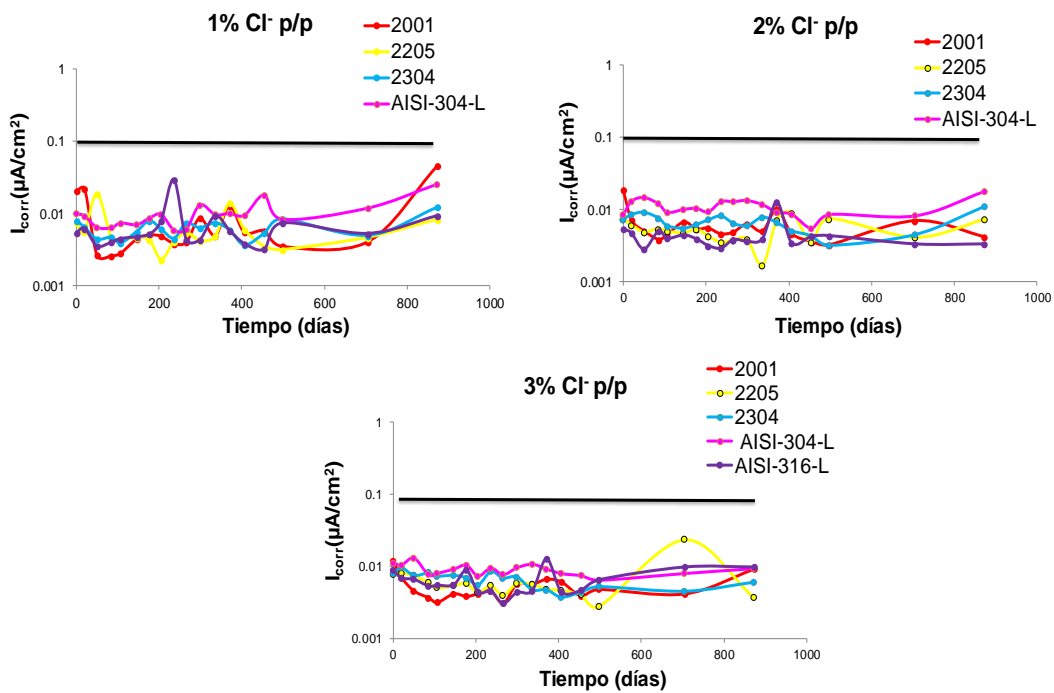
Las probetas de mortero con tres concentraciones distintas de cloruro en su interior; 1,2 y 3% de Cl⁻ p/p, se interpretan mediante dos estudios. Por una parte, la evolución de los parámetros E_{corr} e I_{corr} , que se registran mediante la técnica de la resistencia a la polarización lineal o LPR durante un período de 873 días y por otro lado el estudio de la posibilidad de que se desarrolle un par galvánico en cada probeta, debido a la conexión mediante una resistencia de 1 ohmio que existe entre la muestra m_1 de acero inoxidable y la barra de acero al carbono.

5.3.1.1 Evaluación de E_{corr} e I_{corr} en el tiempo

En este apartado se analiza la evolución de los indicadores de corrosión, E_{corr} e I_{corr} para cada uno de los aceros que se encuentran insertados en el interior de probetas de morteros con diferentes concentraciones de cloruros en forma de CaCl₂. Se realiza un análisis general y para ello se decide representar los valores promedios de I_{corr} correspondientes a m_1 y m_2 dentro una misma probeta y se muestran todas las calidades de acero inoxidable juntas, aunque en tres gráficas que se diferencian en la concentración de cloruros de las que están constituidas las amasadas. Además, se representan mediante gráficas los valores de las resistencias del mortero que presentan en cada medida de los indicadores de corrosión E_{corr} e I_{corr} .



Gráfica 52. Resistencias promedio de las probetas de mortero con concentraciones de 1,2 y 3 %de cloruros p/p.



Gráfica 53. Valores promedio de I_{corr} de las cinco calidades de acero inoxidable. Tiempo de exposición, 873 días.

Se observa como las cinco calidades de acero inoxidable se encuentran totalmente pasivas y todas muestran valores muy inferiores a $0.1 \mu A/cm^2$, incluso para las concentraciones más elevadas de cloruros.

Dichos resultados no parecen coherentes con las altas concentraciones de cloruros que presentan las amasadas por lo que, ante la duda de poder haber cometido algún error en el cálculo de la amasada, se toma una muestra de varias probetas de cada

concentración, se les calculan los cloruros totales y se observa como los resultados se adaptan perfectamente a las concentraciones que se pretenden obtener inicialmente en las amasadas y que son; 1, 2 y 3% p/p de cloruros totales con respecto al peso de cemento. Tras descartar esta posibilidad se piensa que el CaCl_2 pudiera no ser la sal más adecuada para este tipo de estudio, pues si bien el acero al carbono por ser más sensible, sí muestra señales de despasivación, los aceros inoxidable en las probetas de mortero no y ello nos lleva a pensar que quizás la mayor parte del cloruro añadido como CaCl_2 , pudiera no estar libre sino formando parte de una estructura cristalina, por ejemplo, en forma de Sal de Friedel el cual es un mineral de intercambio iónico perteneciente a la familia de los hidróxidos doble laminares y que presenta afinidad por iones como el cloruro o yoduro siendo capaz de retenerlos en su estructura cristalográfica [153]. Si esta hipótesis fuera cierta habría que considerar que la concentración de cloruros libres que atacan las superficies de las barras es menor que la esperada. Sin embargo, la prueba de que parte del cloruro añadido se encuentra libre son los indicadores de corrosión E_{corr} e I_{corr} que han sido medido para los aceros al carbono que se encuentran en la misma probeta, cuyos valores revelan una clara corrosión por cloruros.

Los valores obtenidos de cloruros libres se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 38. Porcentaje de concentración de cloruros libres en probetas de mortero

%[Cl] totales con respecto al peso de cemento	1%		2%		3%	
	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2
%[Cl] libres con respecto al peso de cemento	0.14	0.21	0.98	0.84	2.29	2.03
Promedio	0.17		0.91		2.16	

Como se observa en la tabla 38, la cantidad de cloruros libres es sustancialmente menor a la que se consideran que tienen las amasadas, especialmente para la concentración del 1% y 2 % en p/p de cloruros. Por lo tanto, se deduce que la causa de que los aceros inoxidable permanezcan pasivos puede ser debido a la gran resistencia a la corrosión que presentan los aceros inoxidable y a la baja concentración de cloruros libres y por lo tanto disponibles que se encuentran formando parte de las amasadas de los morteros.

Este fenómeno no ocurre en el resto de experimentación que constituye el presente trabajo de investigación, donde se ha utilizado el cloruro sódico como fuente de cloruros para los diferentes estudios siendo esta una sal ampliamente utilizada para

desarrollar ensayos de corrosión por cloruros y si bien no siempre todo el cloruro se presenta libre si la mayor parte del que se añade.

5.3.1.2 Desarrollo de par galvánico

Se inicia este estudio con la hipótesis de que cuando dentro de una estructura se encuentran muy próximas barras corrugadas de dos tipos de acero, al carbono y acero inoxidable no se desarrolla un par galvánico entre ellos.

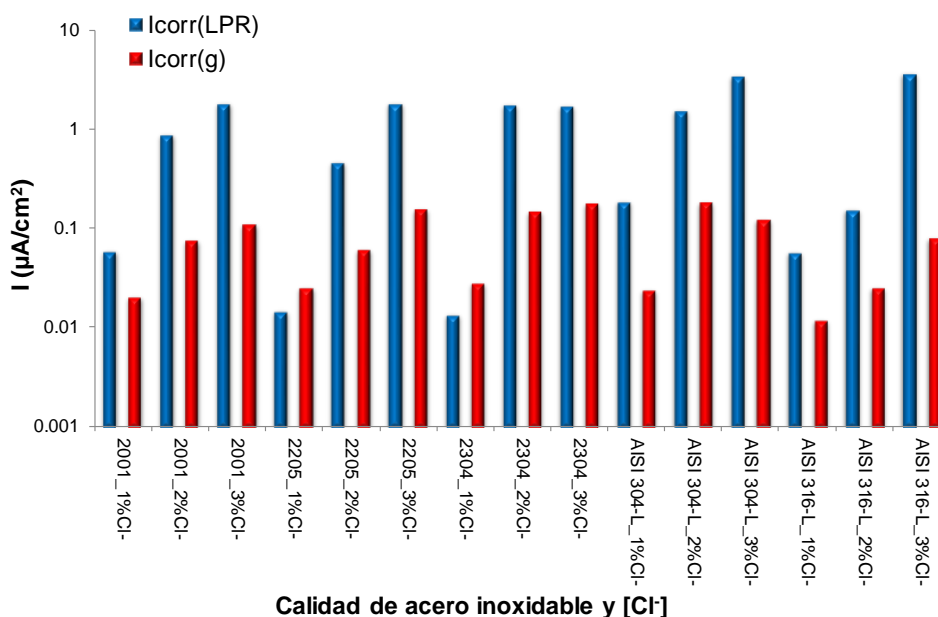
La conexión mediante una resistencia entre el acero inoxidable m_1 y el acero al carbono de cada probeta nos permite estudiar si se produce un par galvánico entre ellos. Se analiza si es posible que la corriente fluya desde el acero al carbono actuando este como ánodo y el acero inoxidable m_1 actué como cátodo recibiendo electrones. Dicho estudio se realiza desde el punto de vista del acero al carbono debido a que es más sensible y sus respuestas permiten ver resultados que si el estudio se hubiera realizado desde el punto de vista del acero inoxidable no se hubieran podido evaluar al encontrarse en todo momento muy pasivos. Por lo tanto, las intensidades registradas entre ambas barras, en cada una de las probetas, se transforman en densidad de corrosión en $\mu A/cm^2$ y se calcula un valor promedio de todas ellas durante los 873 días.

Se observa una gran inestabilidad de los valores de intensidad adquiridos durante los cinco primeros días, lo cual pudiera indicar diferentes procesos en la superficie de las barras como pudiera ser la formación de la capa pasiva. Por ello, para el cálculo de este promedio no se tienen en cuenta los cinco primeros días en ninguna de las probetas.

Suponiendo que esta densidad de corriente pudiera corresponder a ambas barras, inoxidable y al carbono, a este valor se le resta el valor promedio de I_{corr} , obtenido para la barra m_1 (inoxidable) que se ha obtenido en el transcurso del ensayo, mediante la técnica de LPR. Con esto pretendemos tener una densidad de corriente que corresponda exclusivamente al acero al carbono y la llamamos intensidad de corriente galvánica o $I_{corr}(g)$.

Para cada probeta, el valor de $I_{corr}(g)$ es comparado con la I_{corr} promedio, obtenidas mediante LPR, de las barras de acero al carbono y que se denomina como $I_{corr}(LPR)$.

Los valores anteriormente explicados se muestran en la siguiente gráfica:



Gráfica 54. $I_{corr}(g)$ promedio mediante el estudio de par galvánico frente al valor de I_{corr} promedio mediante la medida de LPR, $I_{corr}(LPR)$.

Se observa como la mayoría de los valores de $I_{corr}(g)$ son menores a los obtenidos mediante LPR, lo cual indica que no se ha producido par galvánico en ninguna de las probetas. Tan sólo en dos casos que se muestran en la gráfica, pero se encuentran muy próximos y son el 2205 y el 2304 ambos para la concentración de cloruros del 1% p/p.

Los valores de I_{corr} (LPR) se miden en desconexión y por lo tanto sin la influencia del acero inoxidable. Que los valores de $I_{corr}(g) < I_{corr}(LPR)$ quiere decir que el acero inoxidable no acelera el proceso de corrosión debido a que al formarse la capa pasiva el inoxidable no se comporta como buen cátodo [91, 154].

5.3.2 Límite crítico de cloruros

Durante años y tras numerosos estudios se han establecidos valores de límites de cloruros máximo para la despasivación del acero al carbono [155], sin embargo, la determinación de establecer un único límite crítico de cloruros que sea de aplicación para todas las calidades de aceros inoxidables no es posible debido al comportamiento diferente que presentan cada uno de ellos y causado principalmente por las diferentes microestructuras, así como diferentes concentraciones y composiciones de los elementos de aleación que los constituyen.

Una de las características que hace interesantes a los aceros inoxidables en el presente estudio, es el tiempo que se detecta que cada calidad de acero inoxidable necesita para despasivarse cuando se someten a la misma concentración de ión

cloruro. Otra característica es la concentración crítica que desencadena una despasivación permanente. Ambas consideraciones, tiempo y concentración pueden influir en aumentar o disminuir el período existente entre el tiempo de iniciación y el tiempo de propagación dentro del modelo de vida útil de Tutti. Estas características se deben fundamentalmente a la resistencia a la corrosión por cloruros y a la capacidad que poseen cada uno de los aceros inoxidable para repasivarse.

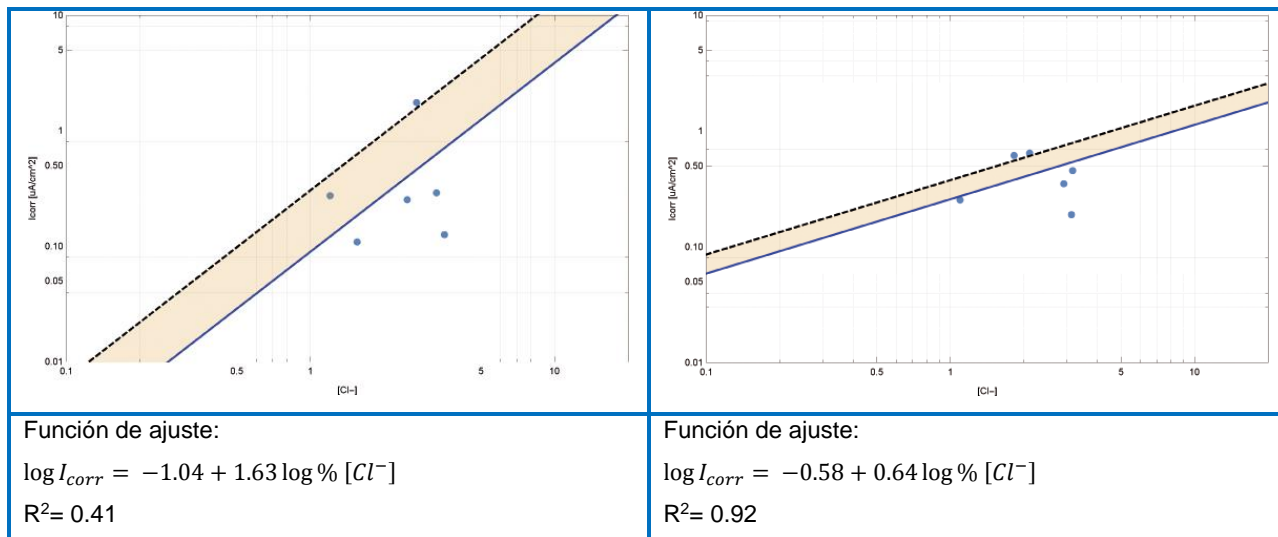
El ensayo del integral acelerado modificado nos proporciona resultados de tiempo de despasivación que se muestran en la tabla 26 pudiéndose utilizar como un indicador cualitativo inicial del tiempo que cada acero inoxidable de estudio requiere para la despasivación inicial en presencia de cloruros, aunque sin la posibilidad de especificar la cantidad de los mismos que se encuentran cercanos a la barra en ese momento. A pesar de ello, las concentraciones para todos los aceros de estudio deben ser próximas ya que las condiciones de ensayo se repiten para todos los casos.

Otra información de relevancia que proporciona este estudio son los límites de concentración crítica de cloruros que se expresan en $\%[Cl^-]$ totales con respecto al peso de cemento y para cada una de las calidades de acero inoxidable. Estos valores se obtienen una vez que el acero inoxidable se encuentra en un estado de despasivación permanente porque impiden la repasivación. A partir de las concentraciones de cloruros que se muestran en la tabla 28, se calculan los límites críticos de cloruros. El cálculo se basa en el ajuste a una función de los valores de I_{corr} ($\mu A/cm^2$) situados en ordenadas, frente a valores de $\% [Cl^-]$ con respecto del peso de cemento en abscisas.

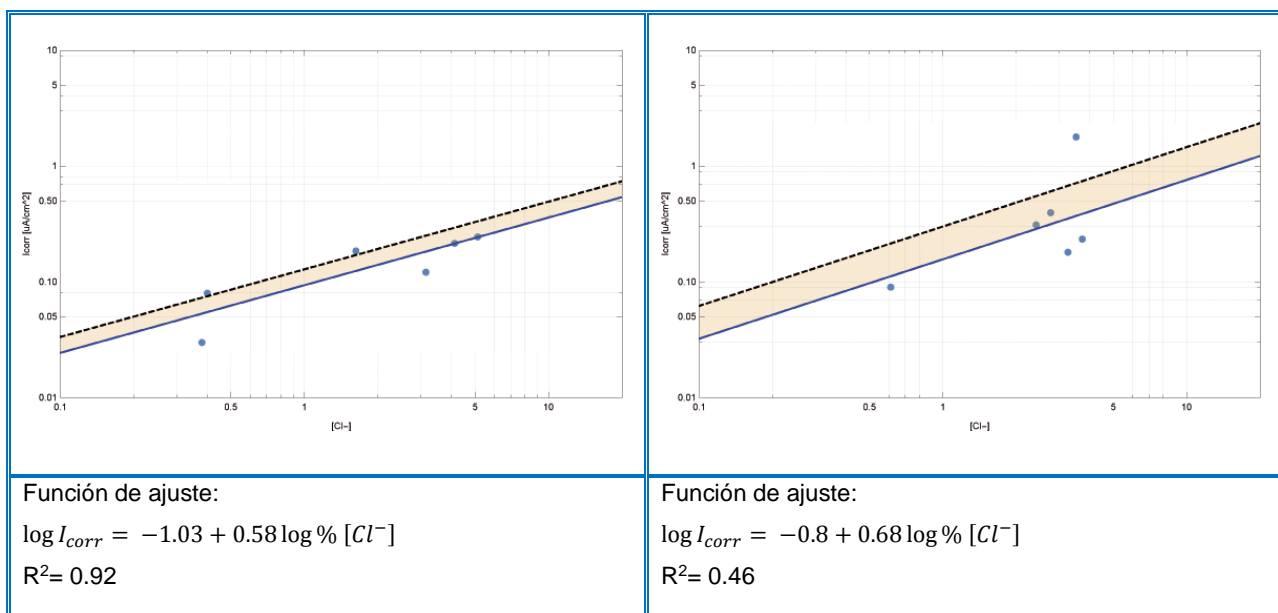
La función que se utiliza para el ajuste de los datos se obtiene teniendo en cuenta la relación de Alonso .C y col [\[92\]](#) que encuentran una relación lineal entre las I_{corr} de despasivación y el contenido en cloruros para sus estudios con probetas de morteros en presencia de cloruros y para aceros al carbono. Dicha relación viene dada por la siguiente ecuación.

$$\log I_{corr\ media} = - 1.07 + 0.76 \log \% [Cl^-] \quad \text{Eq. 78}$$

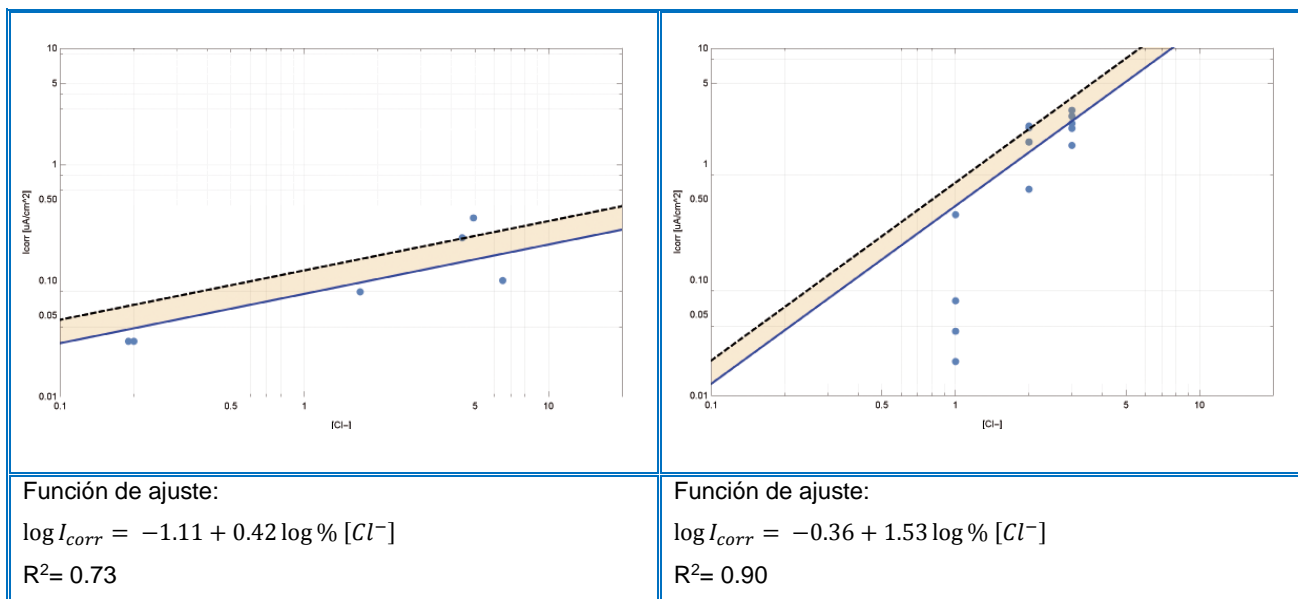
Por lo tanto para el cálculo de los límites críticos de cloruros, se representan todos los puntos que se muestran en tabla 28, para cada una de las calidades de acero inoxidable corrugado por separado y se ajustan sus correspondientes valores a una función del tipo, $\log (I_{corr}) = a + b \log (\%[Cl^-])$, donde la concentración de cloruro continúa expresándose en porcentaje de concentración de cloruros totales con respecto al peso de cemento y los valores que se obtiene para a y b son diferentes para cada ajuste individual de cada uno de los aceros inoxidables de estudio.



Gráfica 55. Ajuste de los datos. I_{corr} ($\mu A/cm^2$) vs concentración de cloruros en % en peso de cemento. La gráfica de la izquierda, corresponde al acero AISI-304-L y la de la derecha al 2001.



Gráfica 56. Ajuste de los datos. I_{corr} ($\mu A/cm^2$) vs concentración de cloruros en % en peso de cemento. La gráfica de la izquierda, corresponde al acero AISI-316-L y la de la derecha al 2304.



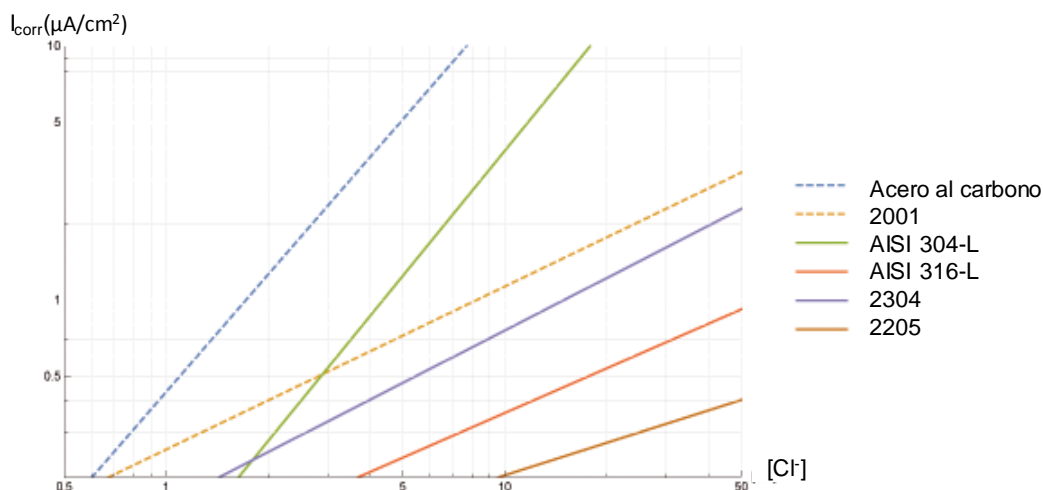
Gráfica 57. Ajuste de los datos. I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) vs concentración de cloruros en % en peso de cemento. La gráfica de la izquierda, corresponde al acero 2205 y la de la derecha al acero al carbono.

Tras realizar los ajustes a la función, se considera que aquellos valores que se extraen de dicha función tienen un 50% de probabilidad. Introduciendo en cada función el valor de I_{corr} correspondiente a $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ se extrae de cada función un primer valor de límite crítico de cloruros que se consideran necesarios para la despasivación permanente y con una probabilidad del 50%. Sin embargo, con la intención de encontrarnos del lado de la seguridad, se realizan nuevos ajustes en cada función individual (líneas punteadas de las gráficas 55, 56 y 57), donde sólo existe un 10% de probabilidades de que algunos de los puntos representados se encuentren por encima de él y del mismo modo se procede al cálculo de un límite crítico de cloruros con este porcentaje de probabilidad menor. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 39. Valores de límites críticos de cloruros totales en %cemento, necesarios para la despasivación, correspondientes a una probabilidad del 10% y del 50%.

Probabilidad	Calidad de acero inoxidable					
	2001	AISI-304-L	2304	AISI-316-L	2205	Acero al carbono
50%	0.67	1.63	1.36	3.66	9.5	0.6
10%	0.37	0.77	0.55	2.13	3.17	0.45

Para poder observar cómo los ajustes difieren entre distintas calidades de acero inoxidable se representan todos los ajustes con un 50% de probabilidad en una misma gráfica.



Gráfica 58. Representación de todos los ajustes juntos

A partir del estudio de la gráfica 58, surge un análisis adicional que se basa en que no sólo es importante tener en cuenta el límite crítico de cloruros que se ha establecido cuando la densidad de corrosión es alta, en este caso de $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$, sino también la pendiente que presentan las distintas funciones de ajustes. Se obtiene una comparativa interesante en la observación de la gráfica 58, donde para dicho valor de I_{corr} , los límites de cloruros correspondientes para el acero AISI 304-L y el dúplex 2304 se encuentran muy próximos, pudiéndose considerar muy parecidos en cuanto a límites críticos de cloruros y por lo tanto en cuanto a resistencia frente a la corrosión por cloruros sin embargo, las evoluciones de sus pendientes se muestran totalmente diferentes. Es a partir de estas apreciaciones que se decide realizar el mismo cálculo, pero aumentando el valor de I_{corr} con la intención de que con una densidad de corrosión más avanzada las pendientes se encuentren más diferenciadas que para el valor de $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Tras este análisis se decide tomar $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$, donde se observa que la diferencia entre ellos es bastante alta. En estas diferencias de pendientes se refleja la capacidad de repasivación de cada uno de los aceros inoxidable.

Tabla 40. Valores de límites críticos de % de cloruros totales con respecto al peso de cemento, que se necesita para la despasivación. Probabilidad correspondiente al 50% y cuando el valor de la I_{corr} corresponde a $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Stainless Steel grades						
Probability	2001	AISI-304-L	2304	AISI-316-L	2205	Black carbon
50%	2.64	2.88	5.43	18.13	85	1.10

Todo el análisis anteriormente explicado, se hace más sólido cuando se observa que el valor de cloruros totales con respecto al peso de cemento que se han obtenido para el acero al carbono, coincide con el que se refleja en normas de edificación como la

EHE-08 y otros estudios, [5, 92, 156, 157]. Sin embargo, la capacidad de repasivación del acero al carbono, nada tiene que ver con la que presentan los aceros inoxidable, siendo esta la principal causa de su mayor resistencia a la corrosión con respecto al acero al carbono. Es por ello que, para la interpretación de la evolución de los aceros inoxidable frente a la corrosión por cloruros, es importante la pendiente de la función que se obtiene a partir del ajuste experimental. Así pues, el orden creciente de resistencia a la corrosión por cloruros basado en los límites críticos de cloruros calculados y teniendo en cuenta el caso en el que I_{corr} fuera $0.5\% \mu\text{A}/\text{cm}^2$, valor que indica una situación de elevada corrosión es el siguiente:

2001 < AISI 304-L < 2304 < AISI 316-L <<<< 2205.

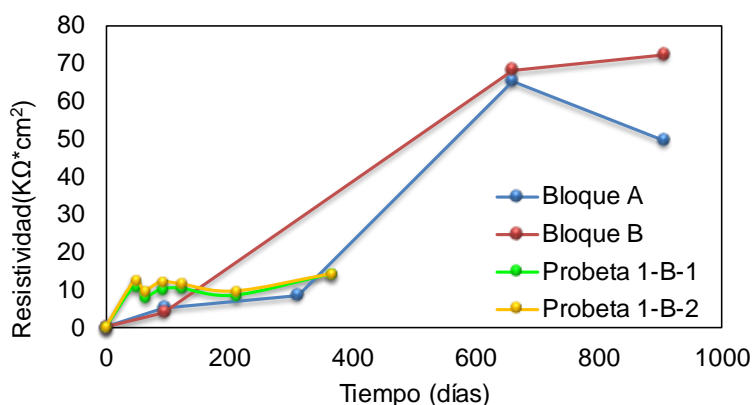
5.4 Bloques situados en el mar

Se analizan indicadores de corrosión como E_{corr} e I_{corr} , para evaluar si los aceros introducidos en los bloques se encuentran pasivos o activos. Ambos indicadores se miden desde el primer día que se depositan en la playa hasta que transcurren 903 días. Se observan fluctuaciones de ambos indicadores desde el inicio al final de las medidas, pero en ningún caso y para ninguno de los aceros inoxidable se presentan valores de I_{corr} por encima de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Debido a que todos los aceros inoxidable presentan valores muy bajos de I_{corr} no se considera relevante la comparación que entre ellos que se presenta en la gráfica 23, donde se muestran mediante barras los últimos valores tomados de ambos indicadores. Dichos valores tendrían validez comparativa y evaluadora en el caso en el que todas o más de una I_{corr} de los aceros de estudio, se encontraran por encima de $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ que se mantuvieran por encima de dicho valor durante un largo período de tiempo como podrían ser algunos meses. Por el momento eso no resulta posible y para realizar esta comparativa en el mar, se debe esperar durante un largo periodo de años, esperando sean máximo y demostrando de este modo la resistencia frente a la corrosión por cloruros de los cinco aceros inoxidable, no sólo en un ambiente tan agresivo como resulta ser el mar, sino que además situado en uno de los lugares más agresivos dentro de las distintas posibilidades de colocación como resulta ser la zona de carreras de mareas.

Por otro lado, indicar la causa de los valores tan negativos que muestra el indicador E_{corr} . Se observa como a pesar de que la I_{corr} muestra que los aceros se encuentran totalmente pasivos en contraposición con los valores tan negativos de la E_{corr} . Esto se debe a que la medida de dicho parámetro puede sufrir una variación de entre 100 y 200mV de diferencia, entre medir un hormigón seco a uno húmedo, siendo el hormigón húmedo el que proporciona siempre valores más negativos [158]. Esto es

debido a que la medida de E_{corr} se ve influenciada por la humedad del hormigón y por la ausencia de oxígeno cerca de la armadura y ambos factores se producen durante las medidas de los indicadores de corrosión en los bloques por lo que da explicación a los valores tan negativos que presenta la E_{corr} .

En cuanto a la resistividad del hormigón, se observa cómo los valores medidos en probetas de laboratorio que se han sumergido en una disolución del 3% en NaCl p/p, figura 56, se aproximan a los que se obtienen en el mismo hormigón y de la misma amasada pero situado en el mar, gráfica 24 y tabla 29. Esto ocurre hasta los 366 días, tiempo durante el cual se miden las resistividades de las probetas en el laboratorio. Sin embargo, los bloques se continúan midiendo y se observa un claro aumento de la resistividad que pudiera ser debido a la presencia de los denominados escaramujos que con el tiempo se van adhiriendo a las paredes del bloque y que, aunque antes de la medida se retiran quedan restos y al envejecimiento natural del hormigón.



Gráfica 59. Comparación entre resistividades de los bloques situados en el mar y probetas de laboratorio.

Atendiendo a los valores de resistividad, obtenidos por la medida directa en los bloques de hormigón, ayuda a interpretar el valor de la densidad de corrosión I_{corr} , ya que está íntimamente relacionado con el contenido en humedad del hormigón y se establecen distintos rangos en relación con la probabilidad de corrosión. En un principio y para las primeras medidas que se realizan a los grandes bloques, dicha resistividad no superaba los 10 $K\Omega \cdot cm$ con lo que no se consideraba la resistividad como un parámetro controlante del proceso de corrosión sin embargo, los valores de dicho parámetro en la actualidad sí que superan el valor encontrándose en el intervalo entre [50-100] $K\Omega \cdot cm$ y para el cual se considera que sí es un factor determinante la resistividad y que por lo tanto las velocidades de corrosión que se presenten van a ser bajas [153].

En cuanto a la concentración de cloruros totales que se calculan en los testigos extraídos de los bloques, desgraciadamente sólo se ha conseguido extraer uno de

ellos cuya profundidad supere el recubrimiento del bloque, el cual es de 30 mm. El último punto calculado presenta un valor de 1,26 % de cloruros totales con respecto al peso de cemento. Con respecto a este valor, si se compara con los límites críticos de cloruros que se estudian mediante probetas de mortero (tabla 40) y en el laboratorio, indicar que los valores de límites de cloruros en los hormigones, suelen ser sustancialmente mayor que los calculados en morteros y estos a su vez mayores que los detectados en disoluciones [92].

5.5 Modelo de vida útil de una estructura que contiene los cinco tipos de aceros inoxidables que se estudian.

Teniendo en cuenta el modelo de vida útil de Tuutti y los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, resulta posible estimar el tiempo de servicio de una estructura mediante una simulación.

Utilizando un software comercial de elementos finitos llamado Comsol Multiphysics, se lleva a cabo una simulación en una dimensión (medio semi-infinito)

Se considera una estructura que se localiza en la zona de carrera de mareas y con ello se deben tener en cuenta los parámetros que se relacionan con las propiedades del transporte del hormigón [159], la concentración de cloruros en la superficie del hormigón (C_s), concentración inicial (C_o), cobertura o espesor (r) y coeficiente de difusión de cloruros no estacionario (D_o).

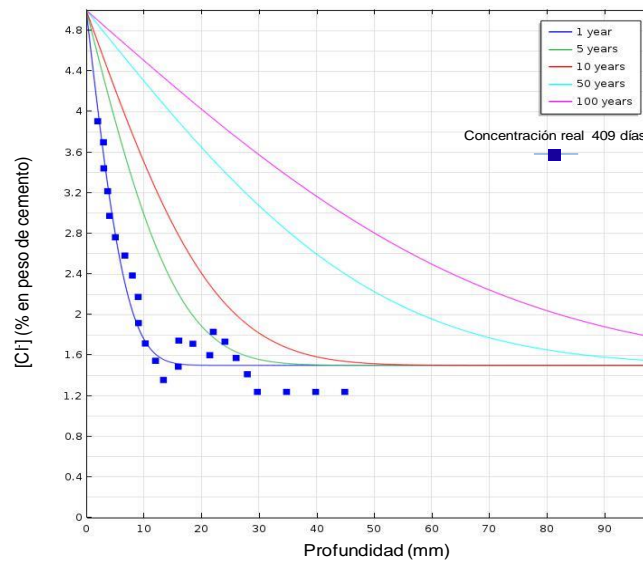
La concentración de C_s está sometida a una condición de contorno, la longitud de la malla es de 0.2mm (3301 número de grados de libertad) y la tolerancia relativa es de 10^{-6} .

Los valores de los parámetros relacionados con las propiedades del hormigón en dicha simulación se muestran en la siguiente tabla. Todos ellos se seleccionan por ser parámetros reales obtenidos en el estudio de los bloques de gran tamaño que se encuentran situados en una zona real de carrera de mareas en el mar y que se han desarrollado en el presente trabajo.

Tabla 41. Parámetros necesarios para el modelo. C_s , C_o , r , D_o .

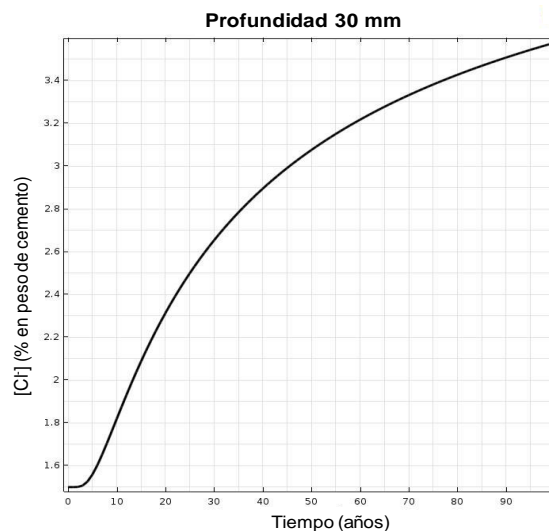
C_s ([Cl ⁻] en % con respecto al peso de cemento)	C_o ([Cl ⁻] en % con respecto al peso de cemento)	r (mm)	D_o (cm ² /s)
5	1.5	30	4.5E-09

Con todo ello, como se muestra en la gráfica 60, se obtienen los perfiles de concentración de cloruros a 1, 5, 10, 50 y 100 años.



Gráfica 60. Concentración de cloruros a 1, 5, 10, 50 and 100 años.

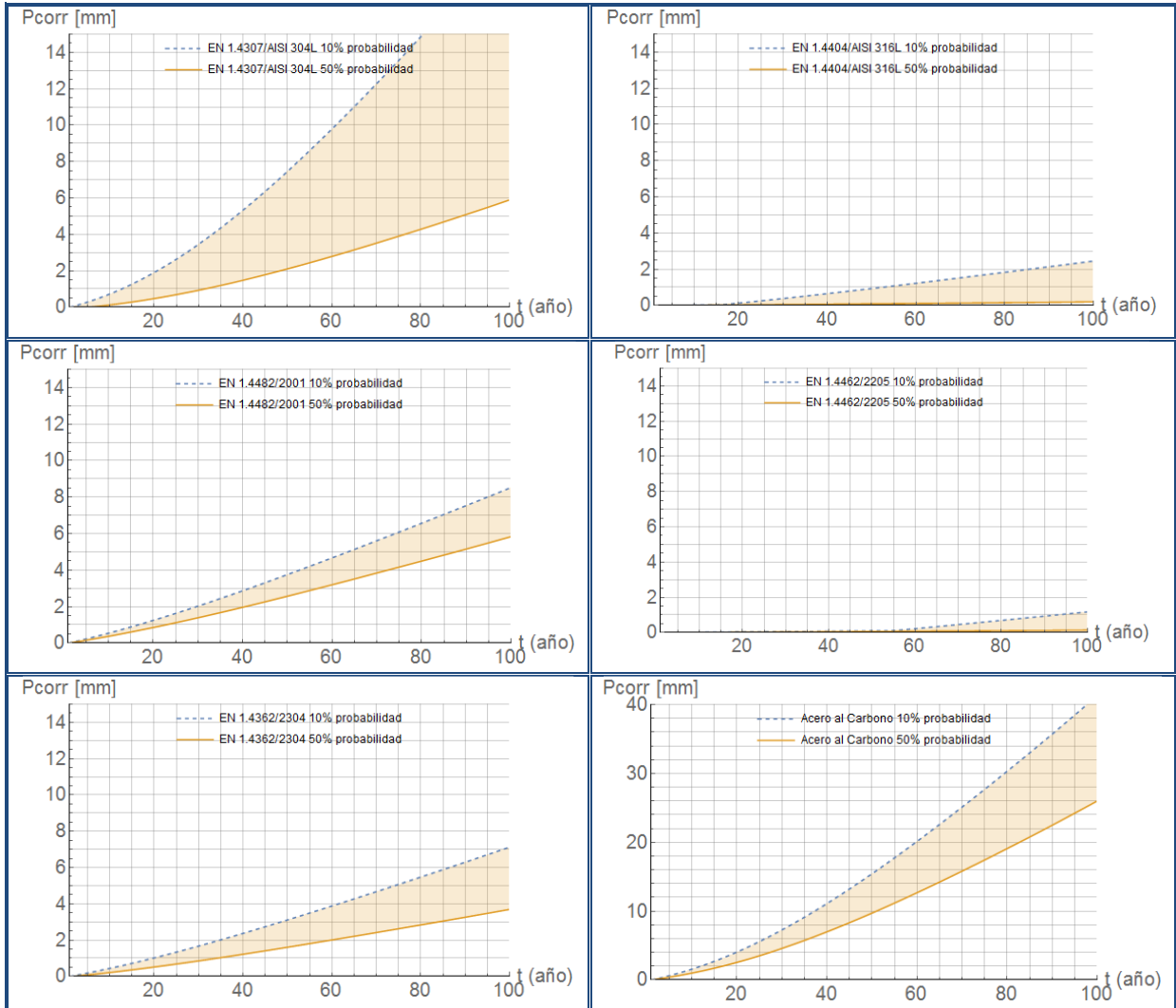
Tomando los valores de la concentración de cloruros de la gráfica 60 para los distintos intervalos de tiempo y a una profundidad de 30 mm, distancia donde se encuentra situada la barra, se obtiene la gráfica 61.



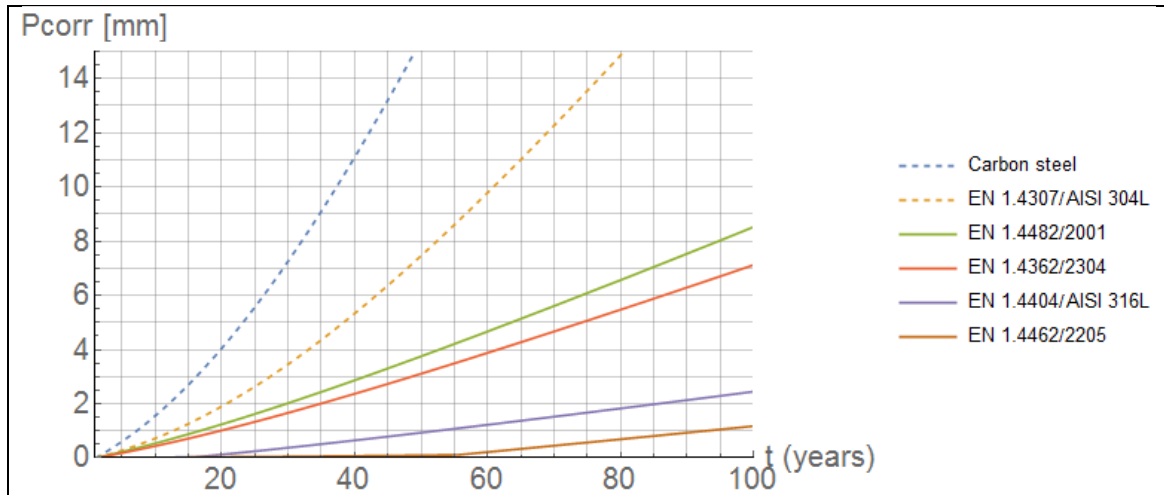
Gráfica 61. Concentración de cloruros en la zona de la barra (30 mm).

Teniendo en cuenta la concentración de cloruros en la barra que se muestra en la gráfica 61 y las relaciones entre la concentración de cloruros y la I_{corr} que se muestran en las gráficas 55, 56 y 57, resulta posible estimar el tiempo de vida útil para estas condiciones. La hipótesis mantiene que las propiedades de saturación del hormigón no

cambian significativamente. Además, se utiliza un parámetro de penetración del ataque o P_{corr} (Eq. 57) y un factor constante de picadura igual a 10 [130]. La gráfica 62 muestra la penetración de la corrosión para diferentes grados de acero inoxidable teniendo en cuenta los ajustes a funciones del 50% y del 10% de probabilidad obtenidos en el presente trabajo.



Gráfica 62. Penetración de la corrosión para el 10% y el 50% de probabilidad.



Gráfica 63. Penetración de la corrosión para una probabilidad del 10% y para todas las calidades de aceros inoxidables estudiados.

La siguiente gráfica 63 muestra la penetración de la corrosión esperada para una probabilidad del 10% para todos los grados de acero inoxidable estudiados. Según el modelo de vida útil que se ha desarrollado, la profundidad de la corrosión del acero inoxidable austenítico AISI 304-L es mayor que la del dúplex 2001 como así lo muestran sus pendientes. Por otro lado, los dúplex 2001 y 2304 muestran pendientes próximas siendo la del 2001 más acusada que la del 2304. El acero austenítico AISI 316-L presenta una mayor tolerancia que el dúplex 2304 y el dúplex 2205 no alcanza el límite de concentración crítica. El desarrollo de los aceros inoxidables de refuerzo se compara con el del acero al carbono.

Así pues, suponiendo una evaluación del tiempo de vida útil para 2mm de penetración de la corrosión y una probabilidad del 10%, se establecería en 11 años para el acero al carbono, 20 para el AISI 304-L, menos de 30 para el 2001, 35 años para el 2304, 85 años para el AISI 316-L y más de 100 para el 2205.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

1. El acero inoxidable de refuerzo debe ser seleccionado en función del tipo de estructura al que vaya a ser destinado de forma total o parcial. La agresividad del medio y el precio de sus elementos de aleación en el mercado debe ser estudiadas para elegir el más adecuado entre ambas microestructuras austeníticas o dúplex.
2. El acero inoxidable dúplex 2205, laminado en frío y como acero de refuerzo, es el acero más resistente a la corrosión por cloruros incluso en los casos en los que pudiera producirse un descenso del pH interno del hormigón debido a la carbonatación. Sin embargo, en su composición contiene una gran concentración de Mo, elemento cuyo precio suele sufrir fluctuaciones en el mercado por lo que no sería el más óptimo en el caso de que dicho elemento presentara un precio muy elevado y podría ser sustituido por el dúplex 2304, el cual presenta menores contenidos en Mo y Ni que el 2205 y sí presenta una elevada resistencia a la corrosión en dichas condiciones extremas.
3. Los aceros austeníticos AISI 304-L y dúplex 2001 han demostrado ser los menos resistentes a la corrosión dentro de los cinco tipos que constituyen el grupo de estudio, por lo que suponen la elección más óptima para casos en los que las concentraciones de cloruros sean bajas y no existe riesgo de un descenso del pH interno a causa de la entrada de agresivos que lo provoquen. Ambos presentan comportamientos frente a la corrosión por cloruros muy parecidos, aunque si se comparan con respecto a la pérdida de material, es el austenítico el que pierde mayor cantidad y sus picaduras mediante lupa se observan más redondeadas y profundas que las del dúplex. Además, el dúplex 2001 presenta un contenido menor en Ni y Mo que se traduce en menor fluctuación de su precio, por lo que sería otra razón para seleccionarlo con respecto al austenítico. Sin embargo, sin la estructura requiere de aceros que no presenten magnetismo, la elección correcta es la del AISI 304-L.
4. Son el acero austenítico AISI 316-L y el dúplex 2304, los que se encuentran en un estado intermedio de resistencia a la corrosión por cloruro, por lo que se recomiendan para ambientes intermedios con concentraciones de cloruros y con un riesgo también intermedio de que se produzca un descenso del pH por carbonatación del hormigón. A pesar de la similitud en algunos casos, es el austenítico el que de nuevo presenta una mayor cantidad de pérdida de material que el dúplex llegando en ocasiones a aproximarse a la pérdida de material del dúplex 2001 y sin embargo, es el AISI 316-L el que presenta niveles críticos de

- cloruros más elevados que el 2304 a pesar de que este último presente más resistencia a la corrosión que el austenítico. Por otro lado, el austenítico presenta un alto contenido en el elemento Mo y su precio es susceptible de fluctuar, problema que presentan en mucha menor medida el dúplex 2304 por sus bajos contenidos en Ni y en Mo. Resulta difícil establecer cuál de los dos aceros es el más adecuado en el caso de que el Mo no sea determinante.
5. Se considera de gran importancia el estudio de los aceros inoxidable de refuerzo dentro de probetas de mortero y hormigón debido a la diferencia de resultados para una misma calidad de aceros inoxidable entre disolución y mortero. Además, el estudio de dichas probetas en lugares “in situ” donde las condiciones ambientales no se controlen completan el comportamiento real frente a la corrosión.
 6. El orden establecido que marca el índice PREN es una guía inicial pero no es suficiente. Así pues, iguala en su ranking la diferencia que existe entre el AISI 304-L y el dúplex 2001 que se presentan muy próximos y con dos puntos de diferencia en el índice PREN, la misma distancia que existe entre el 2001 y el austenítico AISI 316-L que presentan una distancia sustancialmente diferente. Además, el PREN no refleja la capacidad de repasivación de los distintos aceros, la pérdida de material que experimenta ante estados muy agresivos y hasta qué límites de cloruros pueden llegar a comportarse así de resistentes.
 7. La capacidad de repasivación de los aceros inoxidable se diferencia también en función de la calidad que se estudia, así pues, para estudiar los límites críticos de cloruros de cada uno de ellos es necesario llevarlos a niveles de corrosión altos que impidan sucesivas repasivaciones. La concentración crítica de cloruros, para una I_{corr} de $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y con una probabilidad del 50% son de; 1.63 para el AISI 304-L, 0.67 para el dúplex 2001, 3.66 para el AISI 316-L, 1.36 para el dúplex 2304, y 9.5 para el dúplex 2205.
 8. Los cálculos de vida útil que se realizan para los grandes bloques de hormigón situados en el mar revelan que, si se considera una profundidad de 2 mm de penetración de la corrosión y una probabilidad del 10%, se establecería en 11 años para el acero al carbono, 20 para el AISI 304-L, menos de 30 para el 2001, 35 años para el 2304, 85 años para el AISI 316-L y más de 100 para el 2205.
 9. La utilidad de las cinco calidades de aceros inoxidable de refuerzo como sustitución parcial de una estructura durante la construcción o reparación es posible debido a que no forman un par galvánico con el acero al carbono.

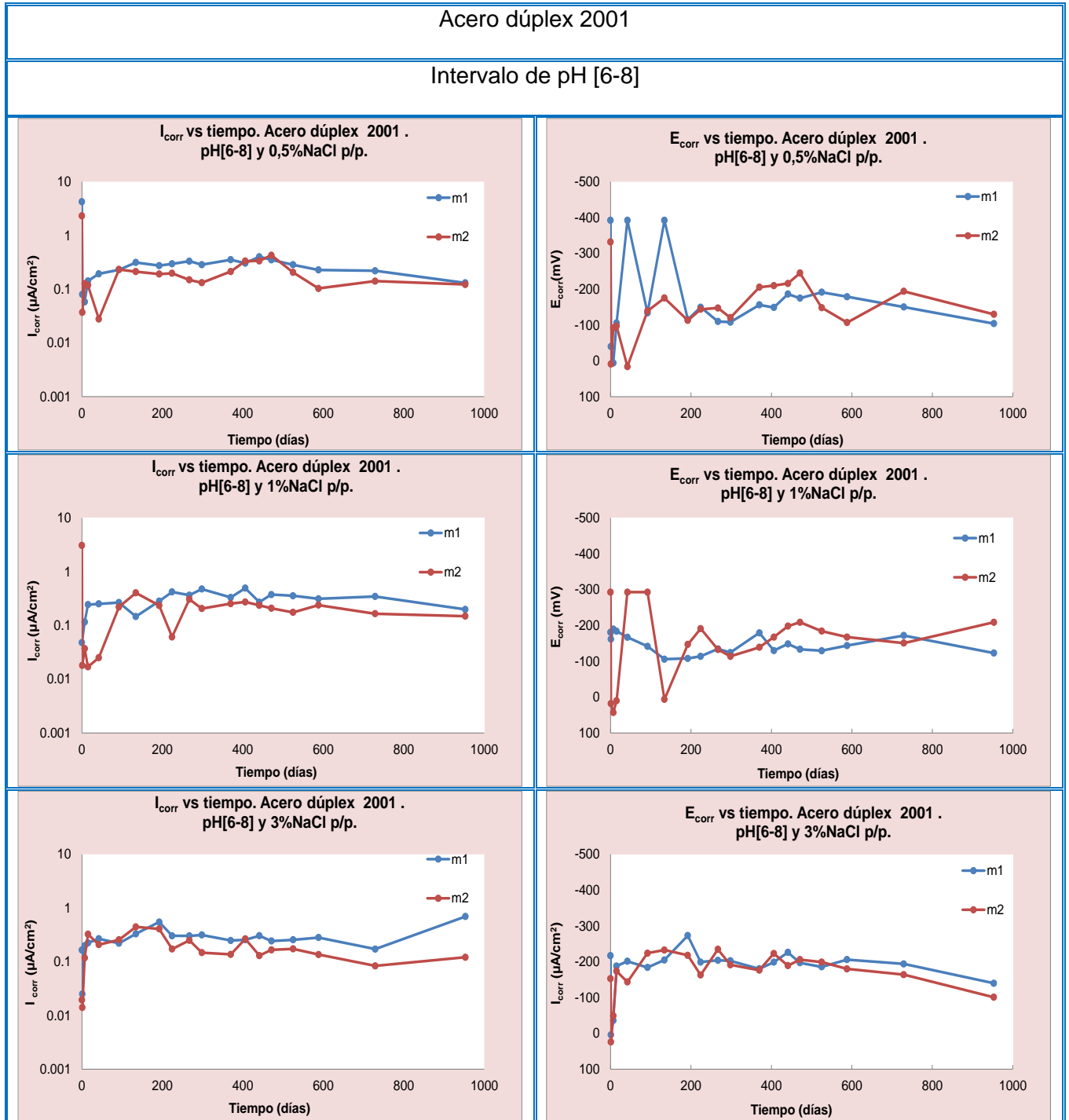
TRABAJOS FUTUROS

Uno de los principales trabajos futuros se basa en el seguimiento de los bloques de gran tamaño que se encuentran situados en el mar y conforme pasen los años comprobar si el comportamiento de los diferentes aceros inoxidable se aproxima a lo que presentan los modelos que se desarrollan en el presente trabajo.

Por otro lado, resulta de interés realizar un estudio que se enfoque en la resistencia a la corrosión por cloruros de dúplex 2304. Dicho estudio podría iniciarse con ensayos donde las concentraciones de cloruros sean muy altas y a su vez con un gran número de repeticiones, entre 10 y 20 repeticiones. Si se comprueba la dualidad de este acero en cuanto a comportamiento frente a la corrosión por cloruros, es decir que en ocasiones se presenta muy resistente y muy próximo al 2205 y en ocasiones no, obtener un estudio estadístico de su comportamiento. Una vez que este comportamiento se compruebe, estudiar la causa comparándolo con un acero menos resistente a la corrosión por cloruros que él, pero que posea la misma microestructura dúplex. Este acero de comparación podría ser el 2001.

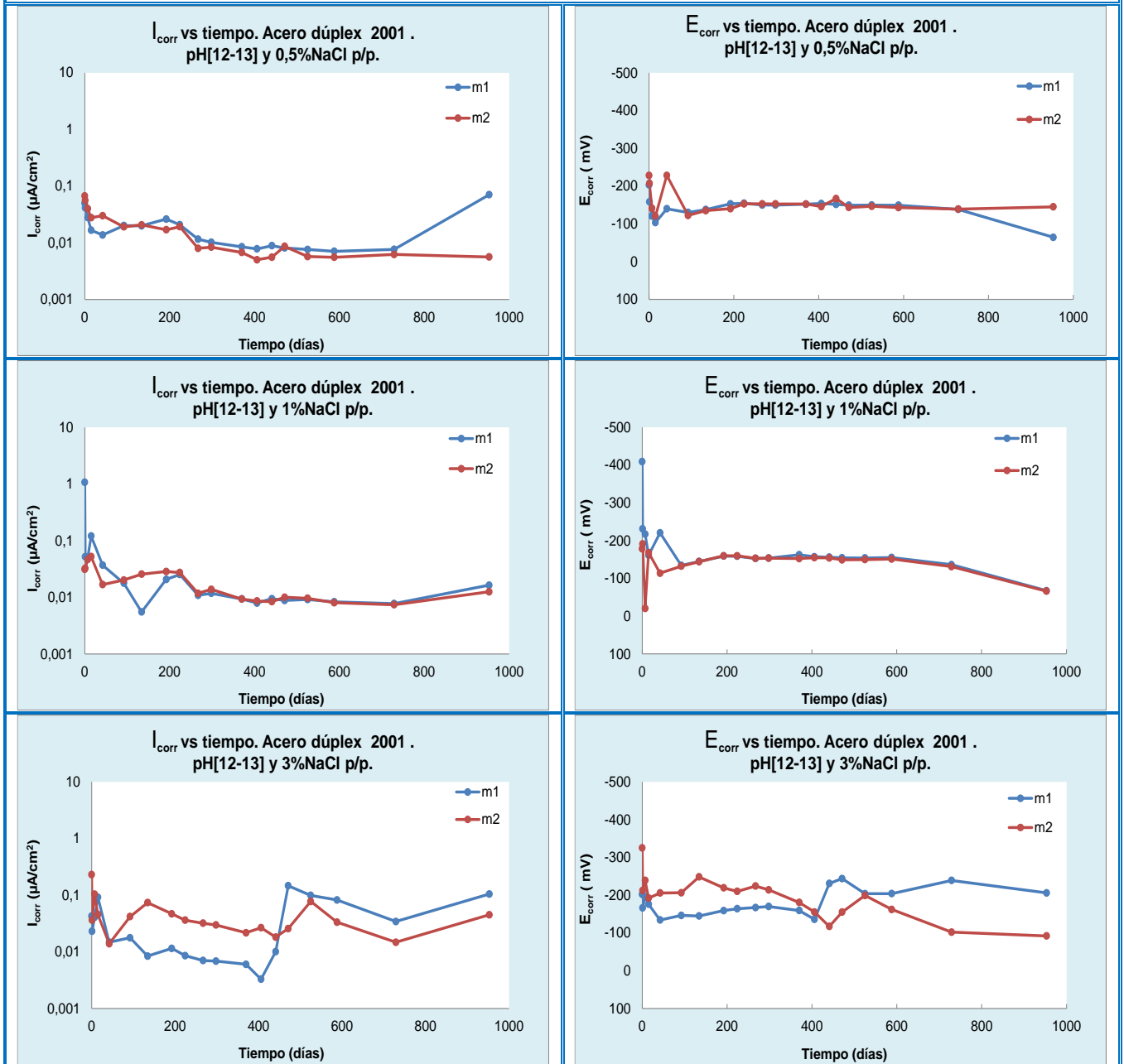
ANEXO 1

Anexo 1. Celdas de corrosión. Representación de indicadores de corrosión, E_{corr} e I_{corr} de muestras m1 y m2.



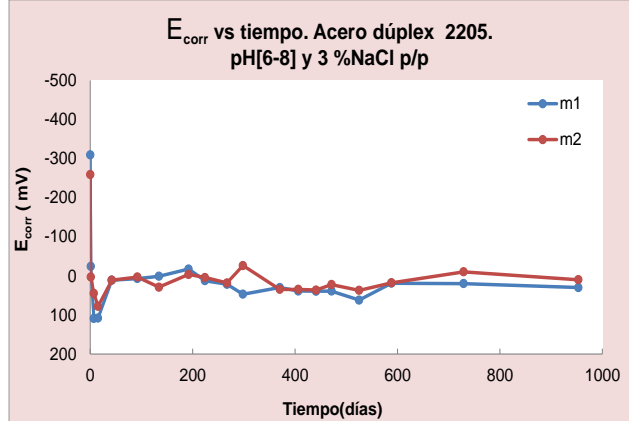
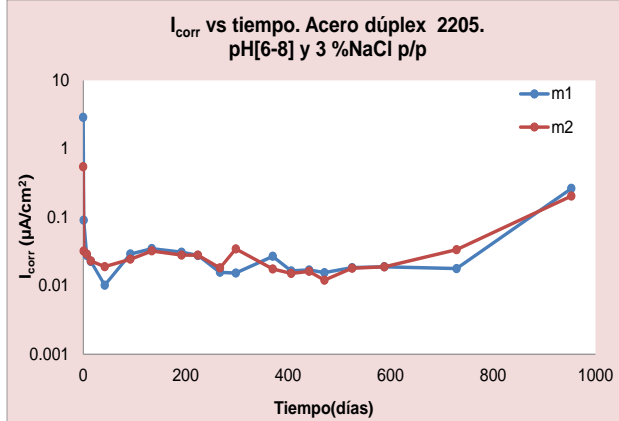
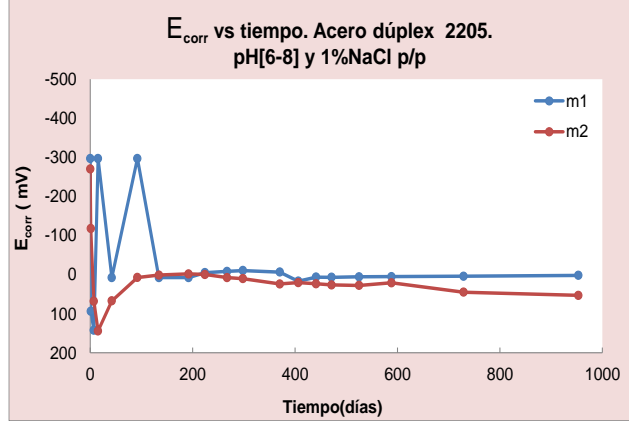
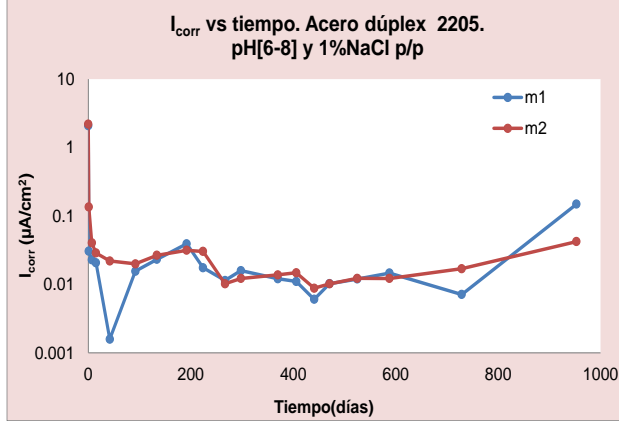
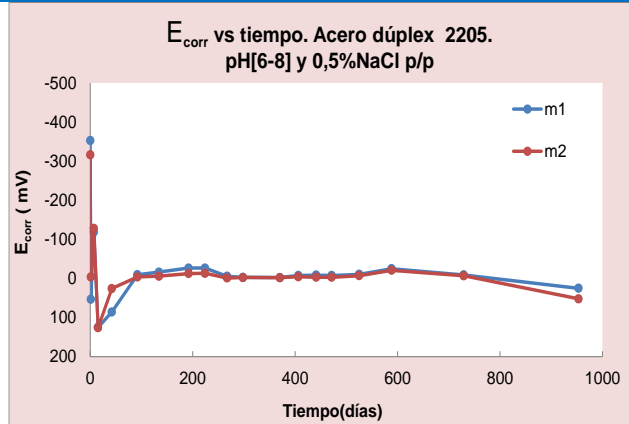
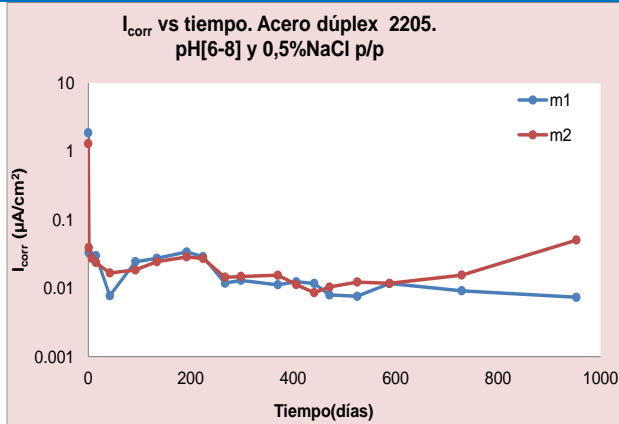
Acero dúplex 2001

Intervalo de pH [12-13]



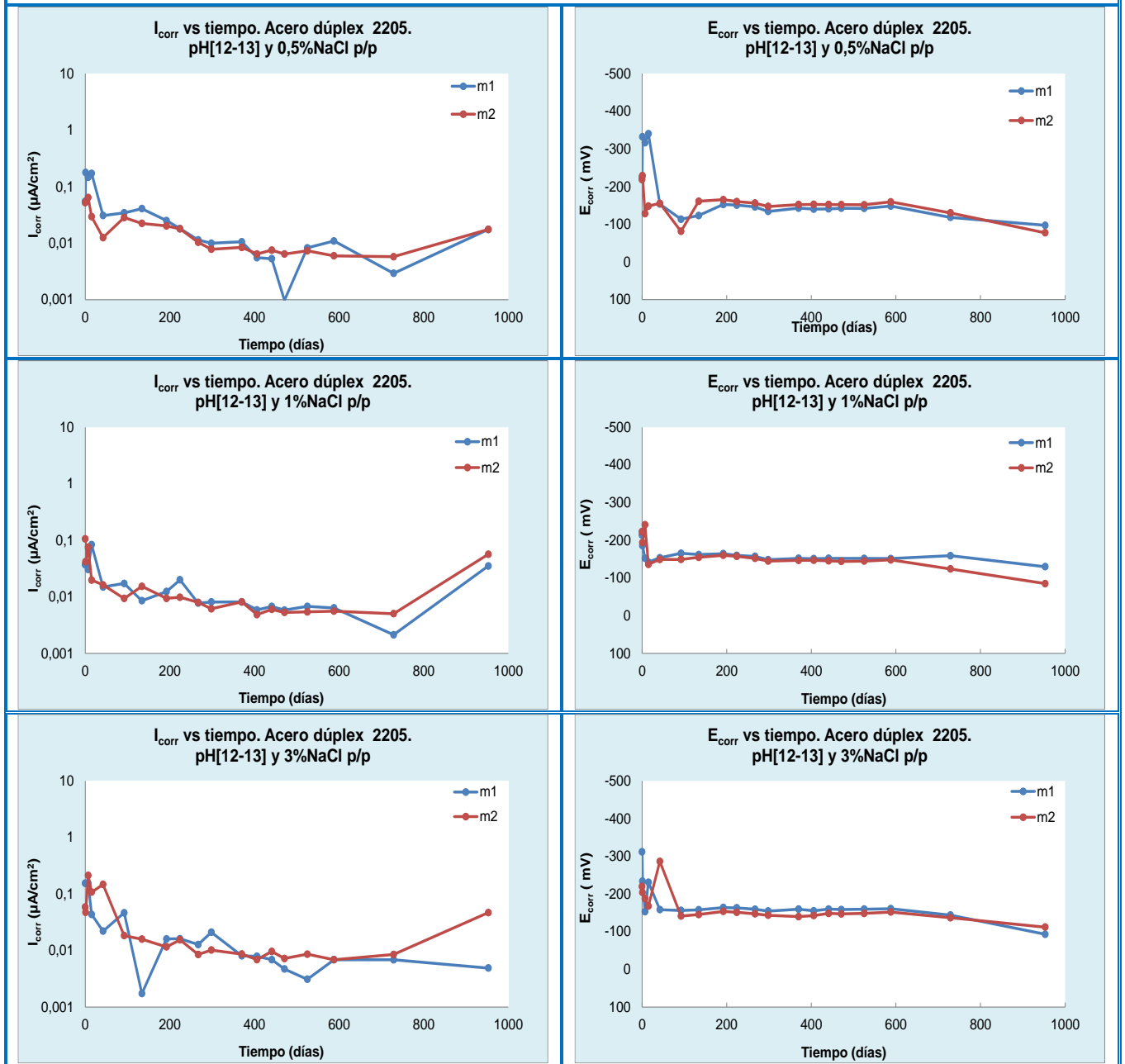
Acero dúplex 2205

Intervalo de pH [6-8]



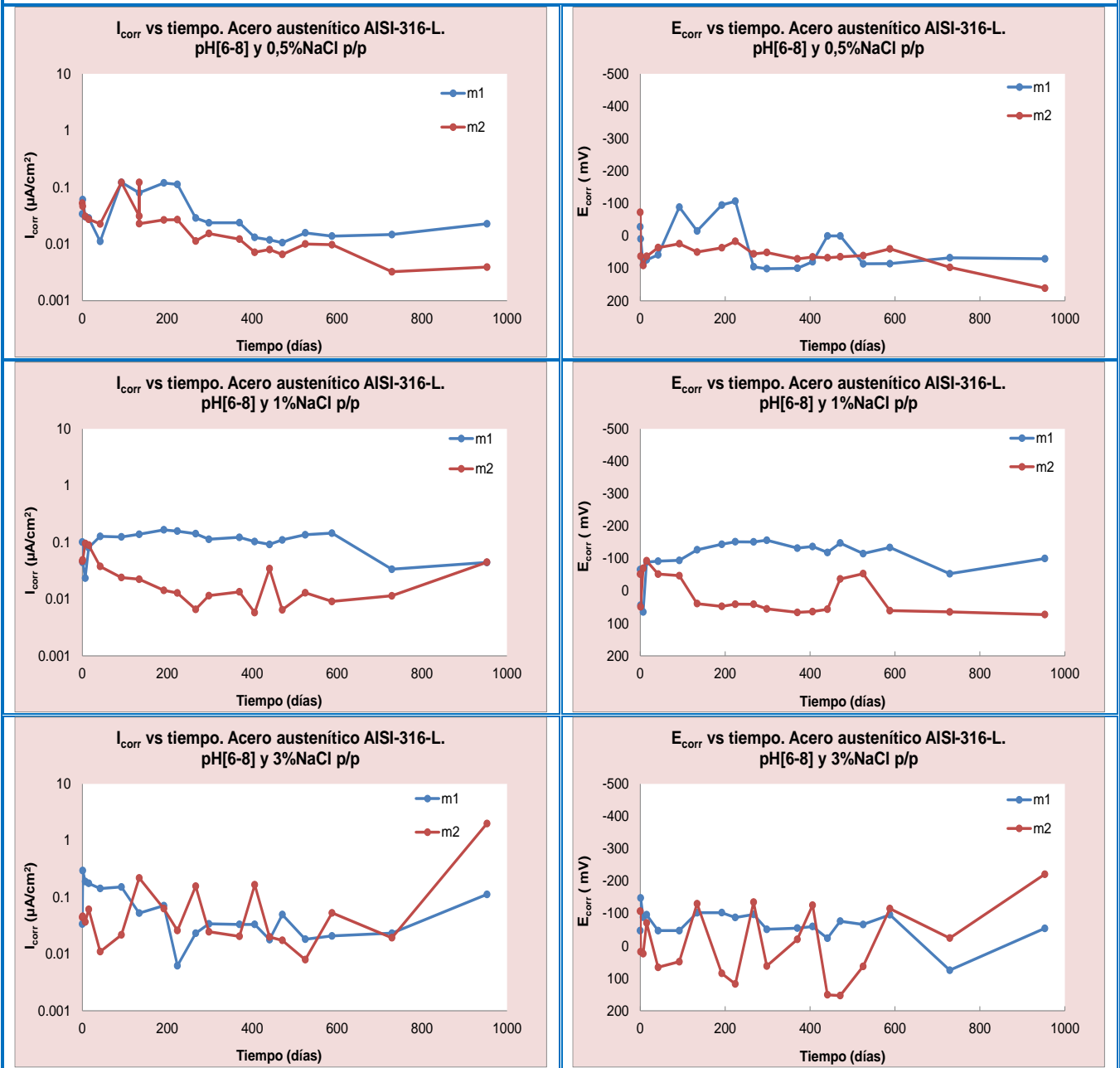
Acero dúplex 2205

Intervalo de pH [12-13]



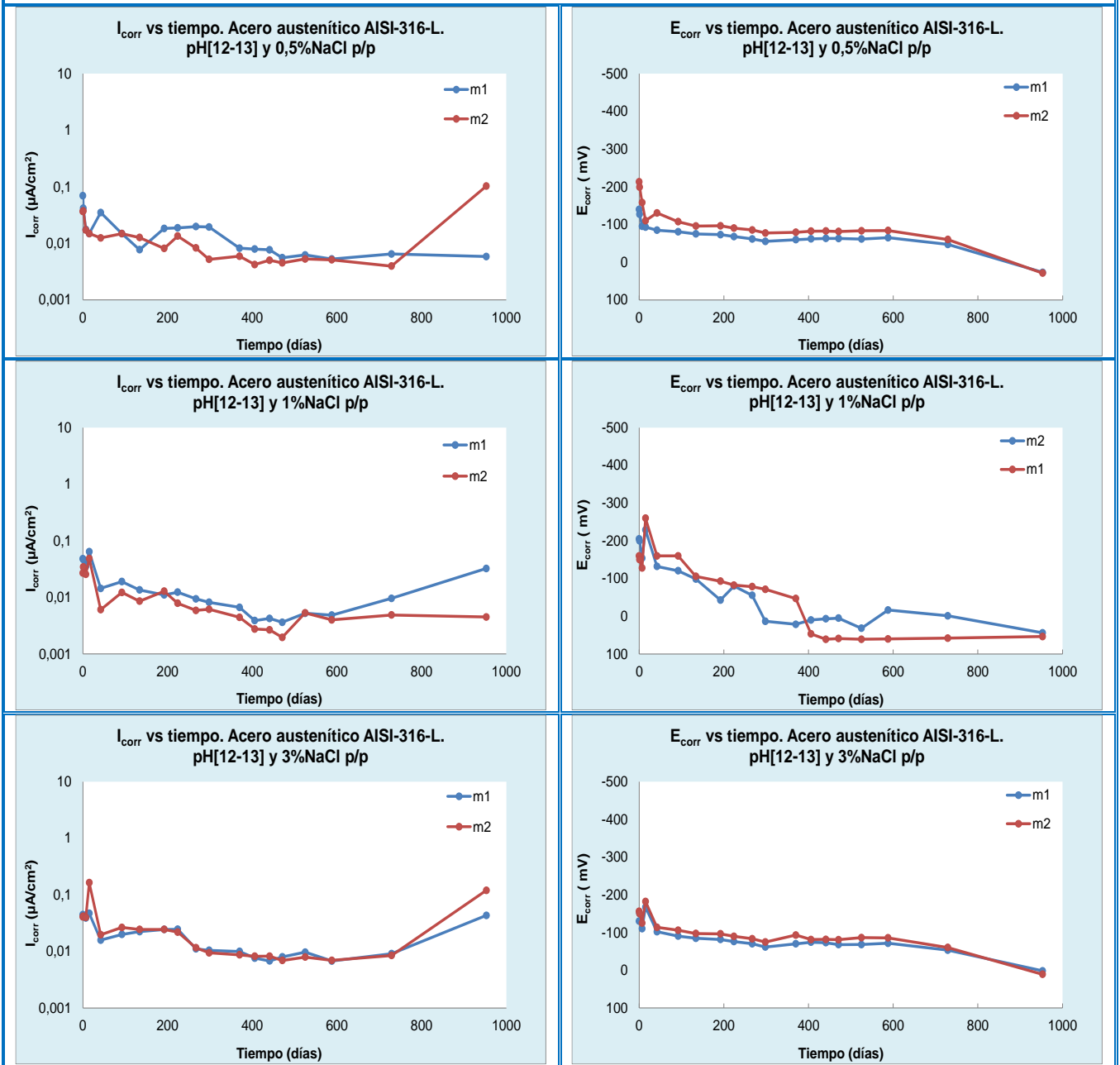
Acero austenítico AISI-316-L

Intervalo de pH [6-8]



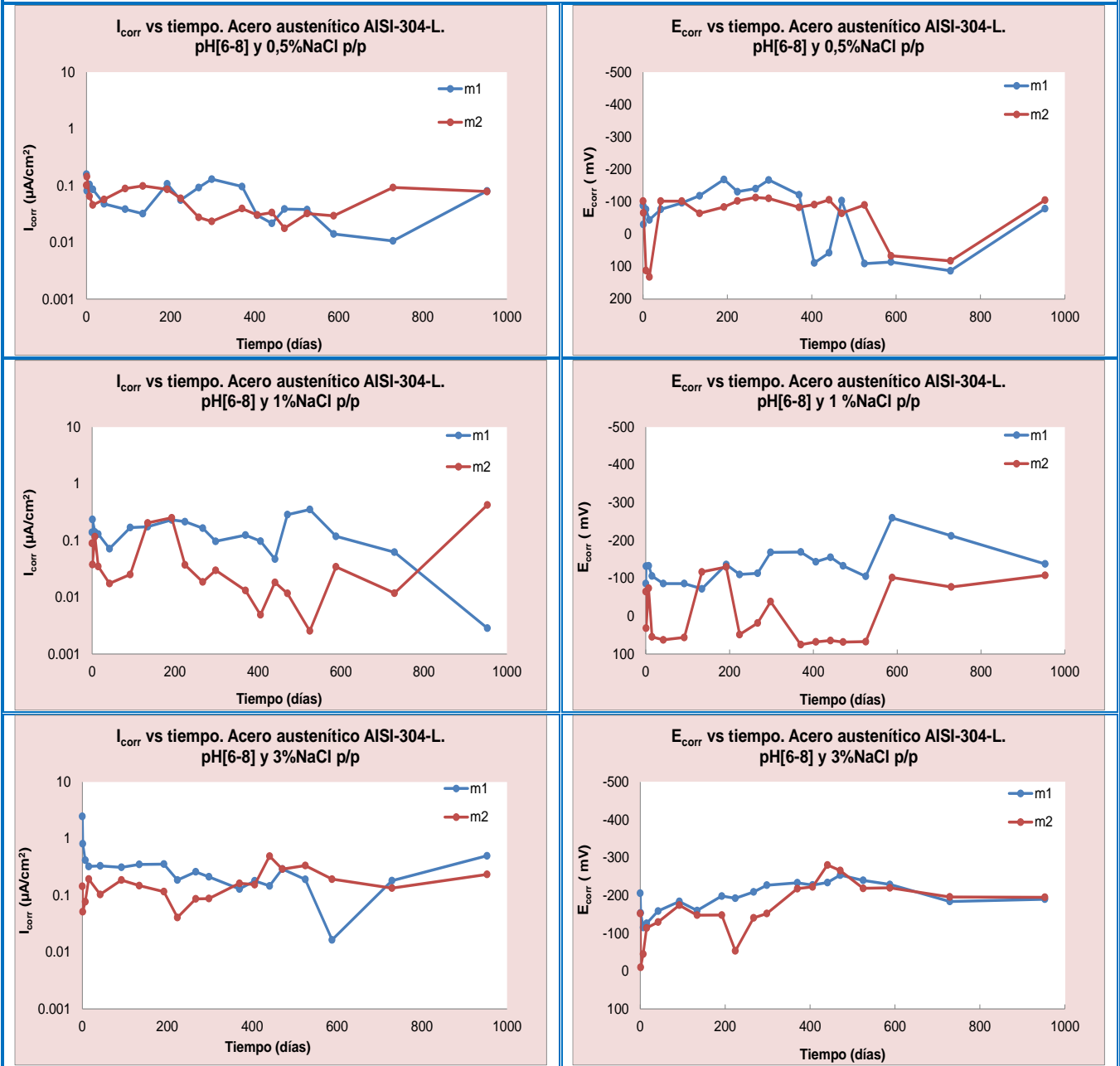
Acero austenítico AISI-316-L

Intervalo de pH [12-13]



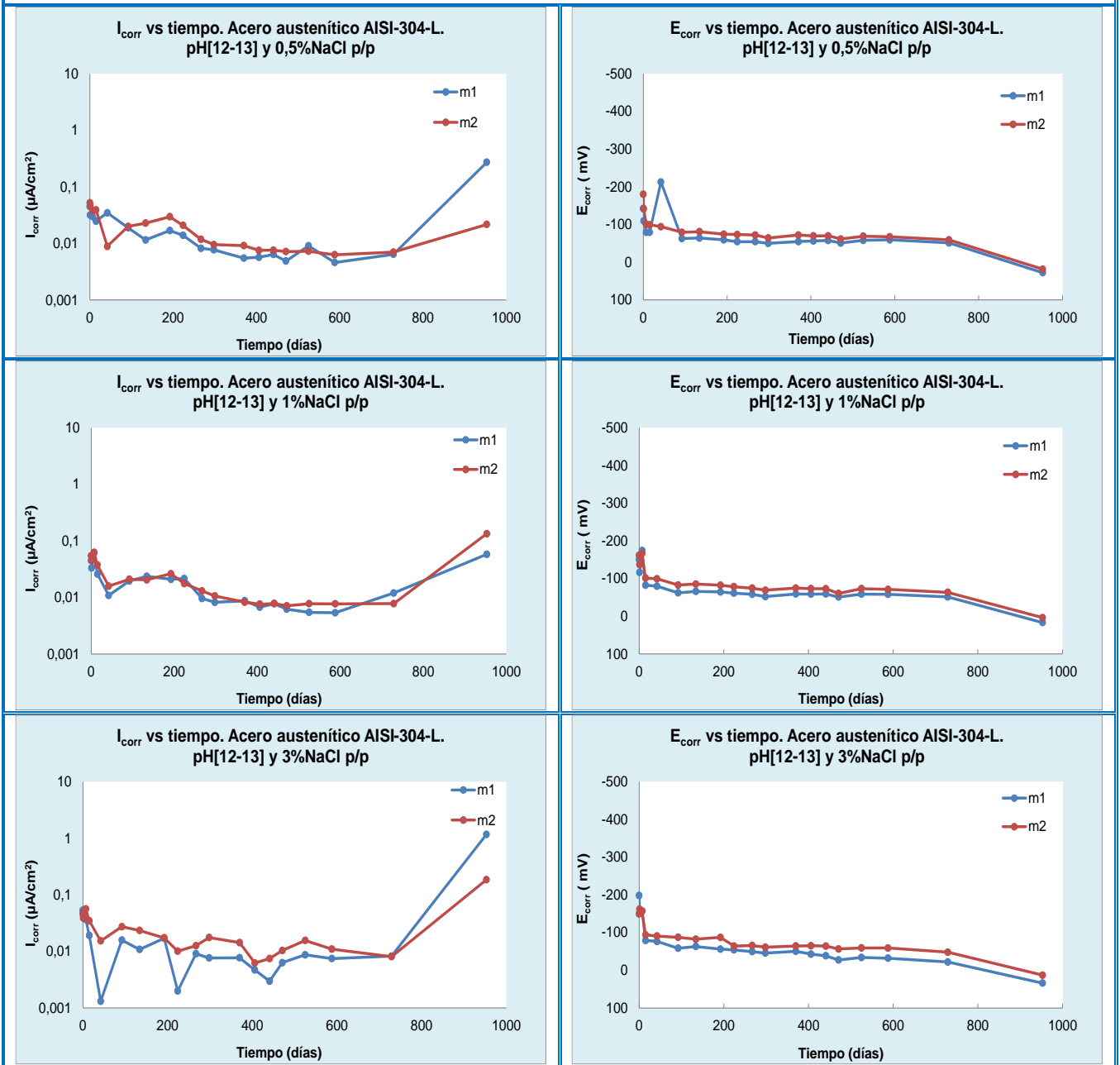
Acero austenítico AISI-304-L

Intervalo de pH [6-8]



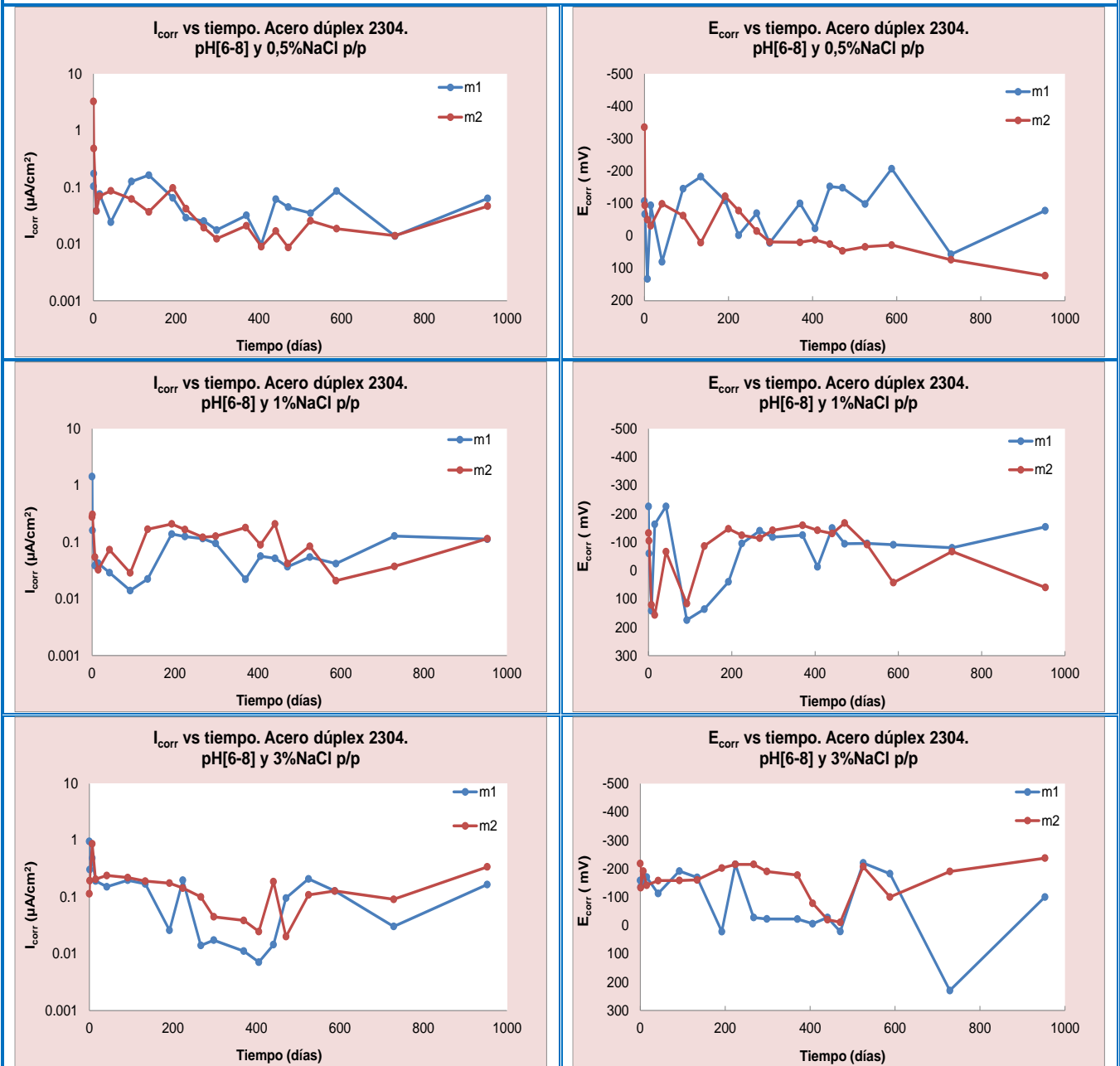
Acero austenítico AISI-304-L

Intervalo de pH [12-13]



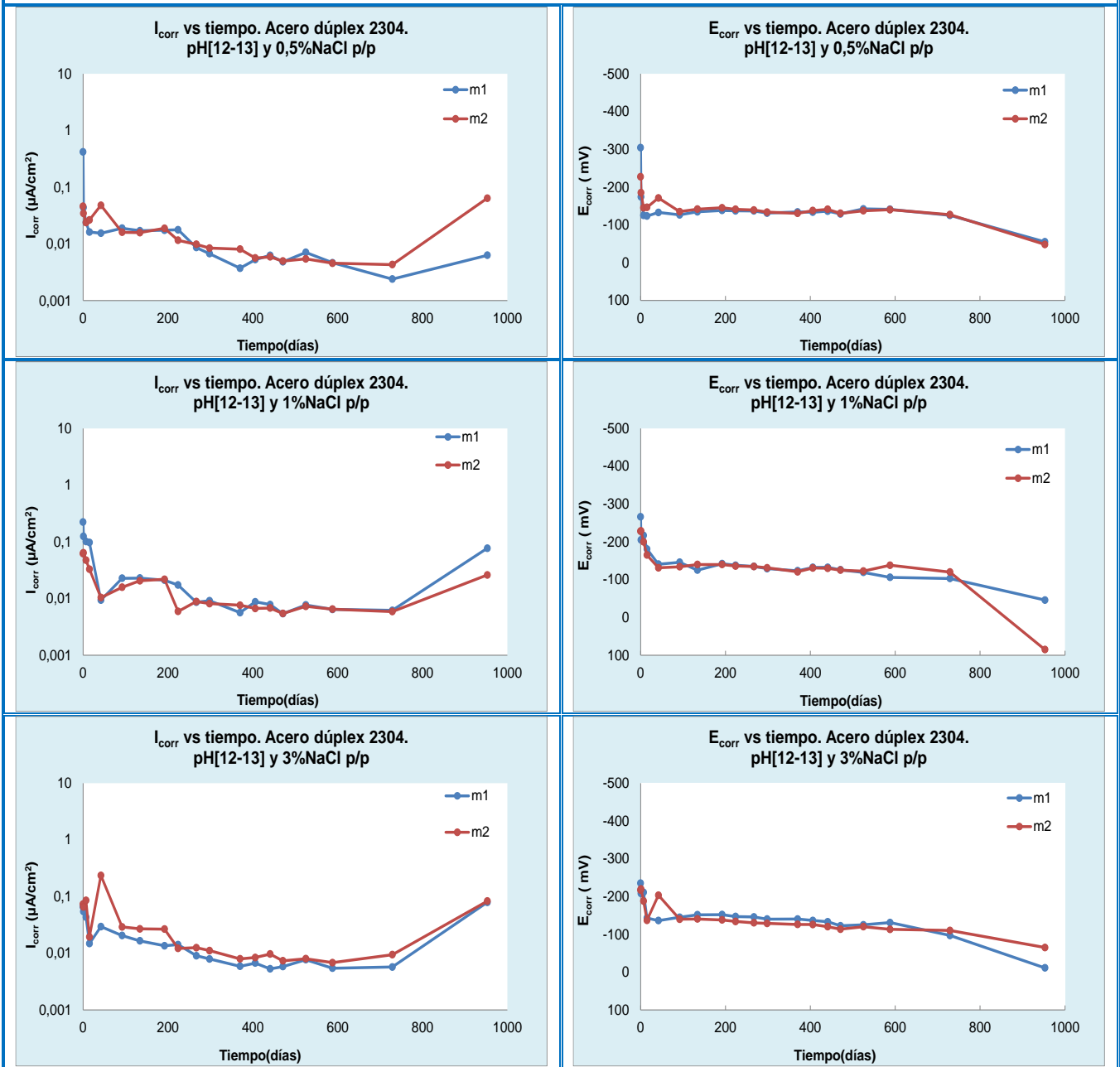
Acero dúplex 2304

Intervalo de pH [6-8]



Acero dúplex 2304

Intervalo de pH [12-13]



ANEXO 2

Anexo 2. Celdas de corrosión. Imágenes mediante lupa binocular, transcurridos 953 días.

En cada tabla, las imágenes de la izquierda, corresponden a las barras, tras el desmontaje de las celdas y retiro de las cintas aislantes fuertemente enrolladas que se coloca al inicio del estudio con la intención de dejar al descubierto un área conocida.

Las imágenes de la derecha, muestran indicios de corrosión localizada que se observan mediante lupa binocular, tras varios ciclos de limpieza para el cálculo de la pérdida de material gravimétrica.

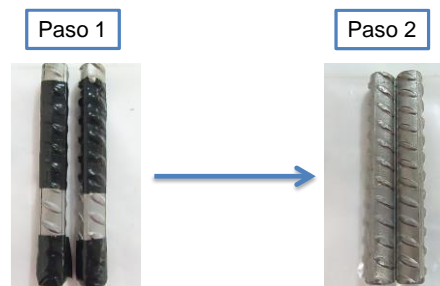











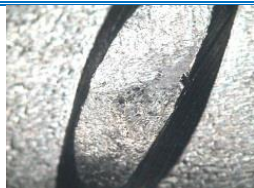

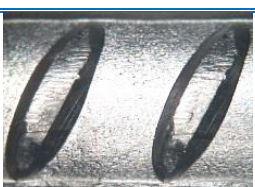
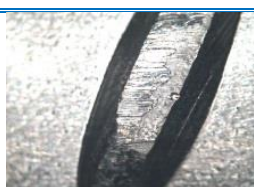

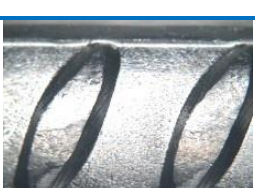
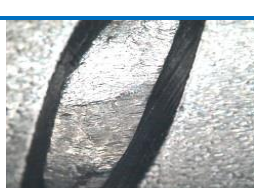














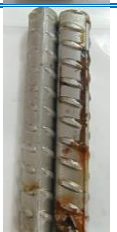
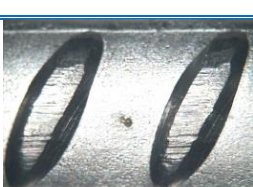
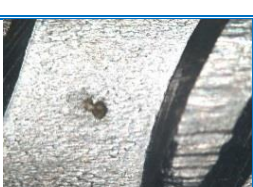

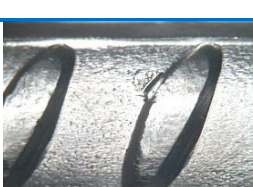
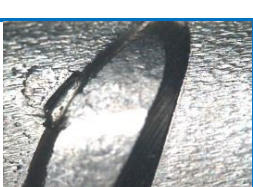
Figura 58. Barras de estudio con cinta y sin cinta, previo a los ciclos de limpieza









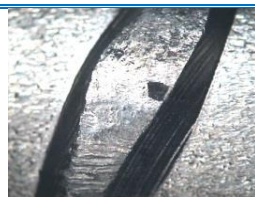
Acero dúplex 2001			
Intervalo de pH [6-8]			
0,5% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
1% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
3% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	










Acero dúplex 2001			
Intervalo de pH [12-13]			
0,5% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
1% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
3% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			






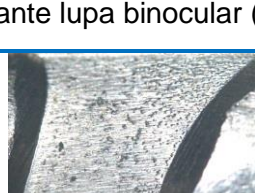
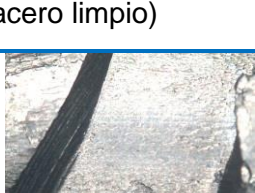



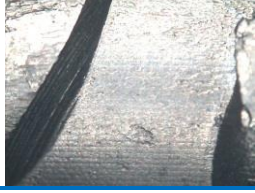

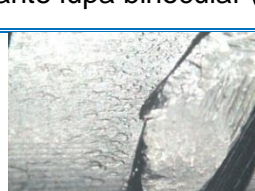
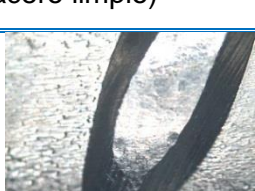




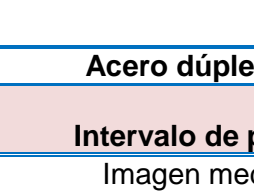
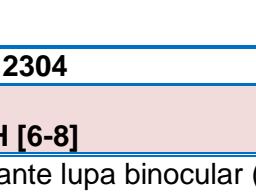
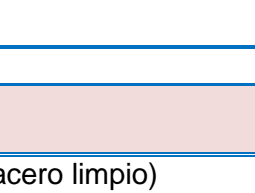
Acero dúplex 2205			
Intervalo de pH [6-8]			
0,5% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
1% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
3% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			




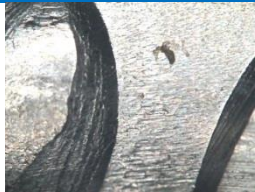
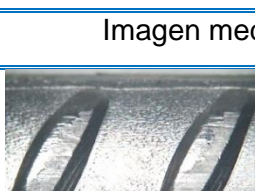
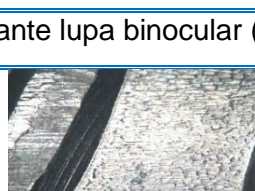
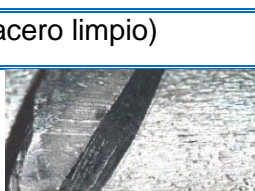




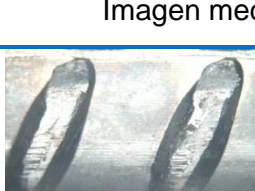








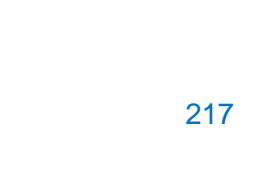
Acero dúplex 2205			
Intervalo de pH [12-13]			
0,5% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
1% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
3% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			








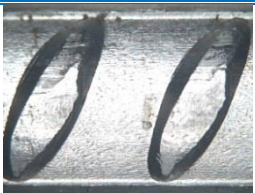

Acero austenítico AISI 316-L			
Intervalo de pH [6-8]			
0,5% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
1% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
3% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			

Acero austenítico AISI 316-L			
Intervalo de pH [12-13]			
0,5% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
1% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
3% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			

Acero austenítico AISI 304-L			
Intervalo de pH [6-8]			
0,5% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
1% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
3% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			

Acero austenítico AISI 304-L				
Intervalo de pH [12-13]				
0,5% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)		
				
				
1% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)		
				
				
3% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)		
				
				

Acero dúplex 2304				
Intervalo de pH [6-8]				
0,5% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)		
				
				
1% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)		
				
				
3% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)		
				
				

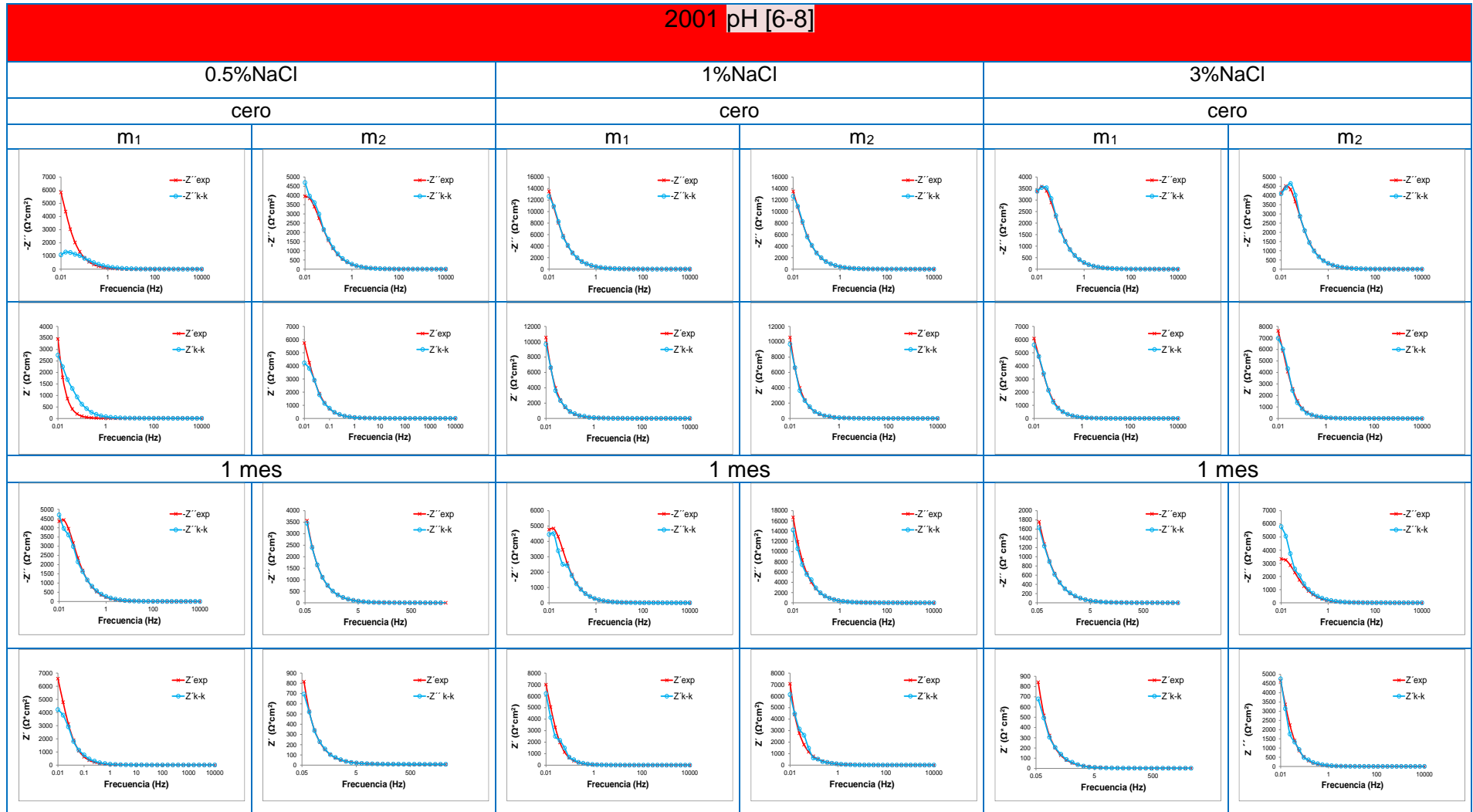
Acero dúplex 2304			
Intervalo de pH [12-13]			
0,5% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
1% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			
3% NaCl p/p		Imagen mediante lupa binocular (acero limpio)	
			

ANEXO 3

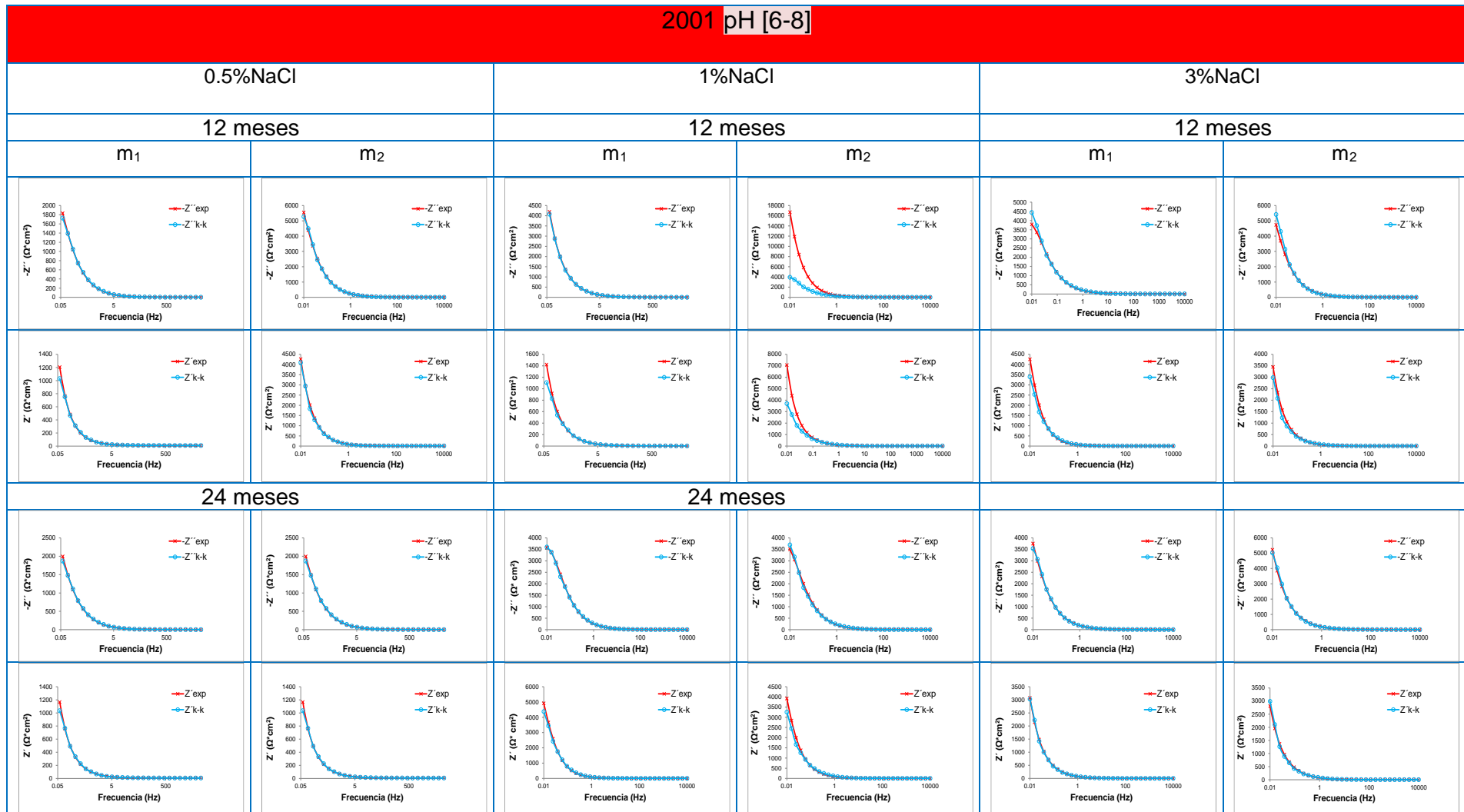
ANEXO 3

ANEXO 3

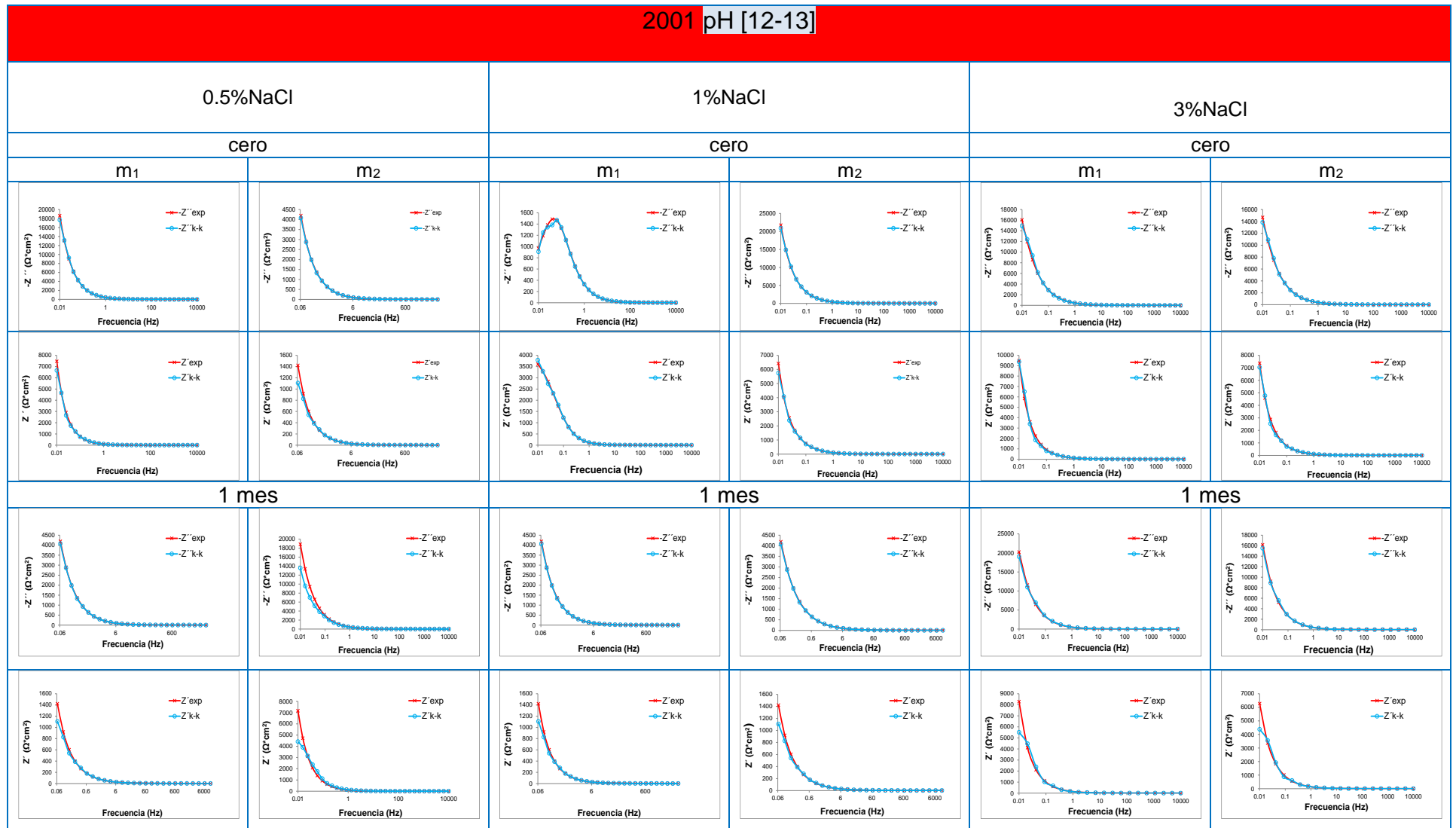
Anexo 3. Consistencia de las medidas experimentales de EIS.



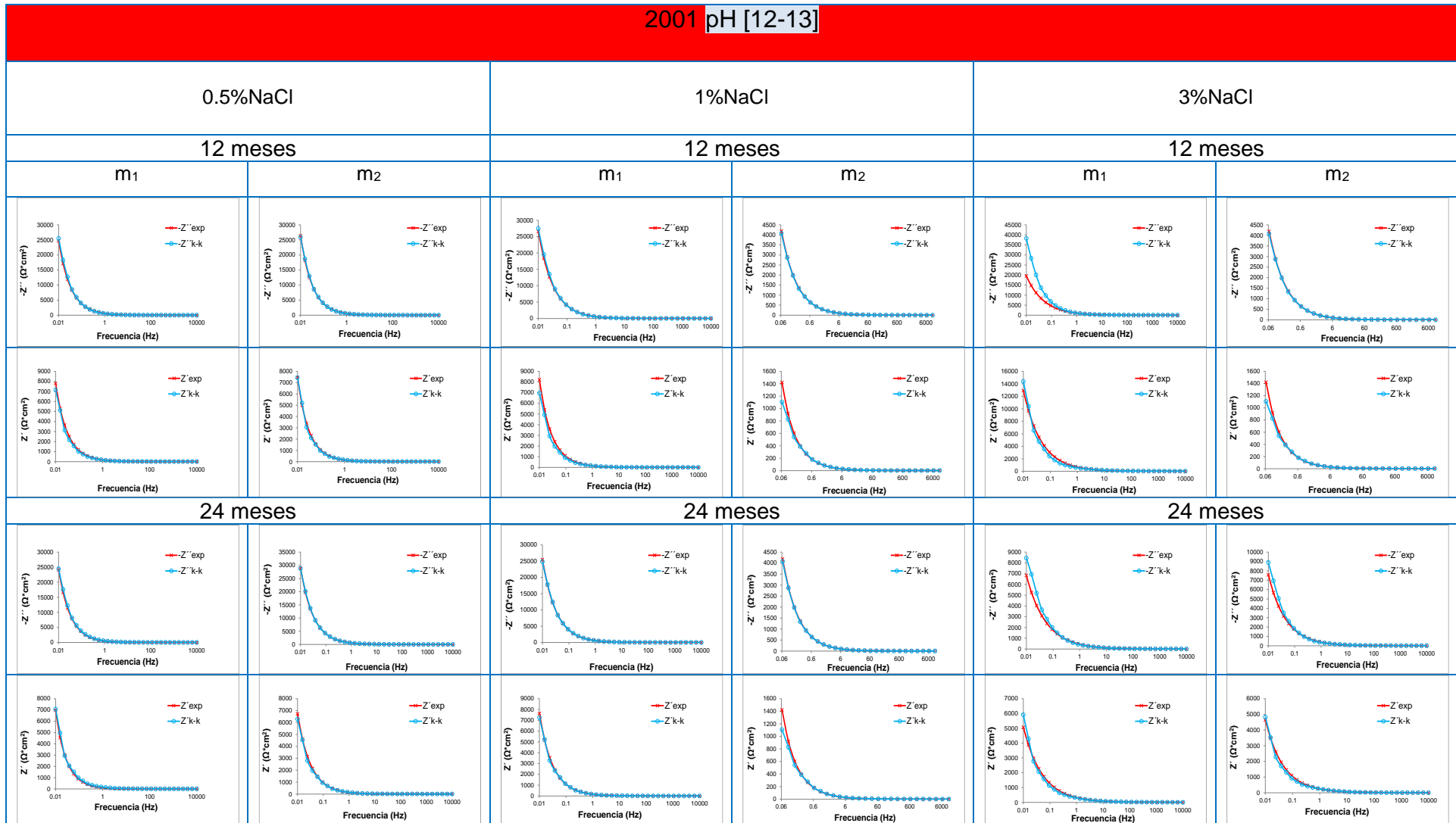
ANEXO 3



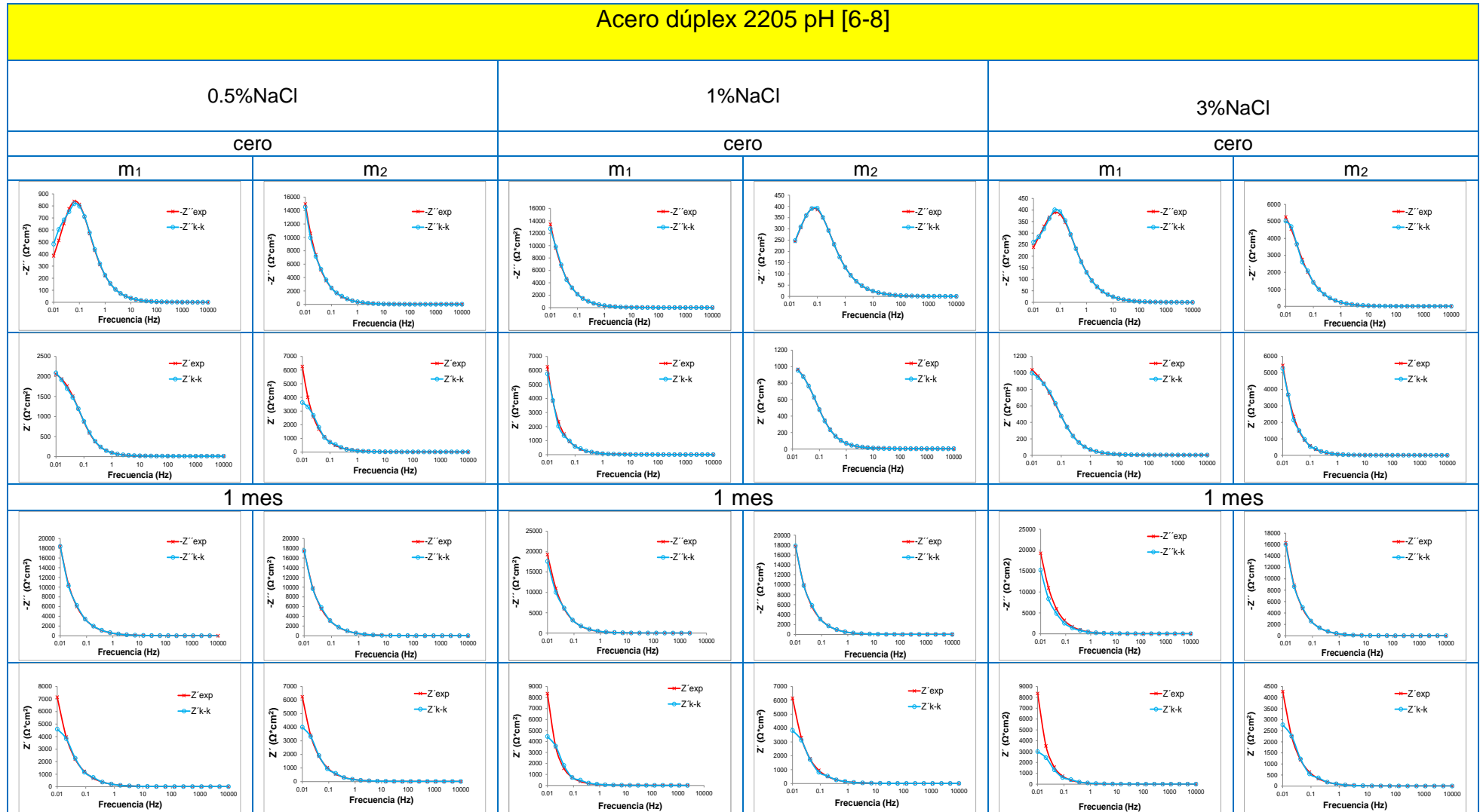
ANEXO 3



ANEXO 3

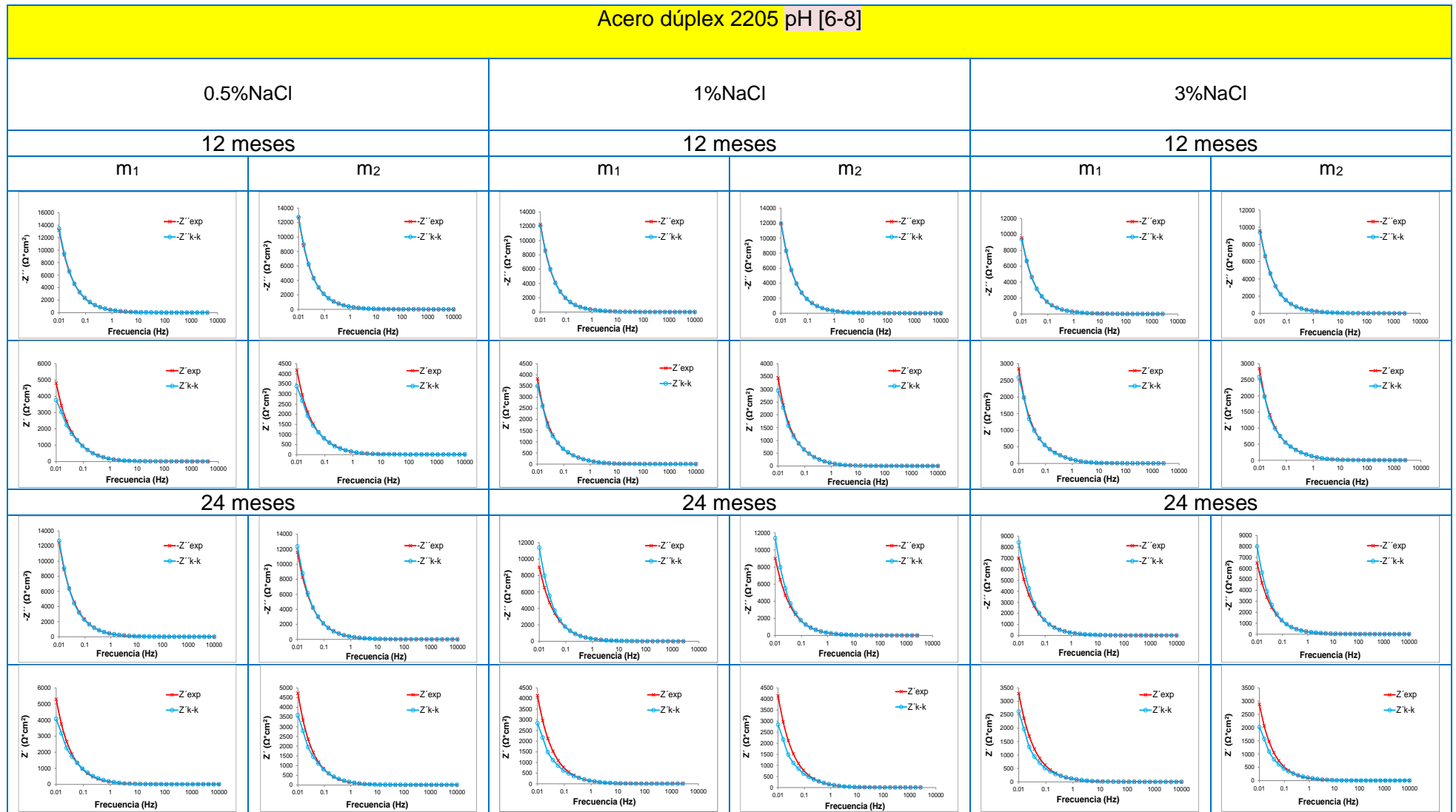


ANEXO 3

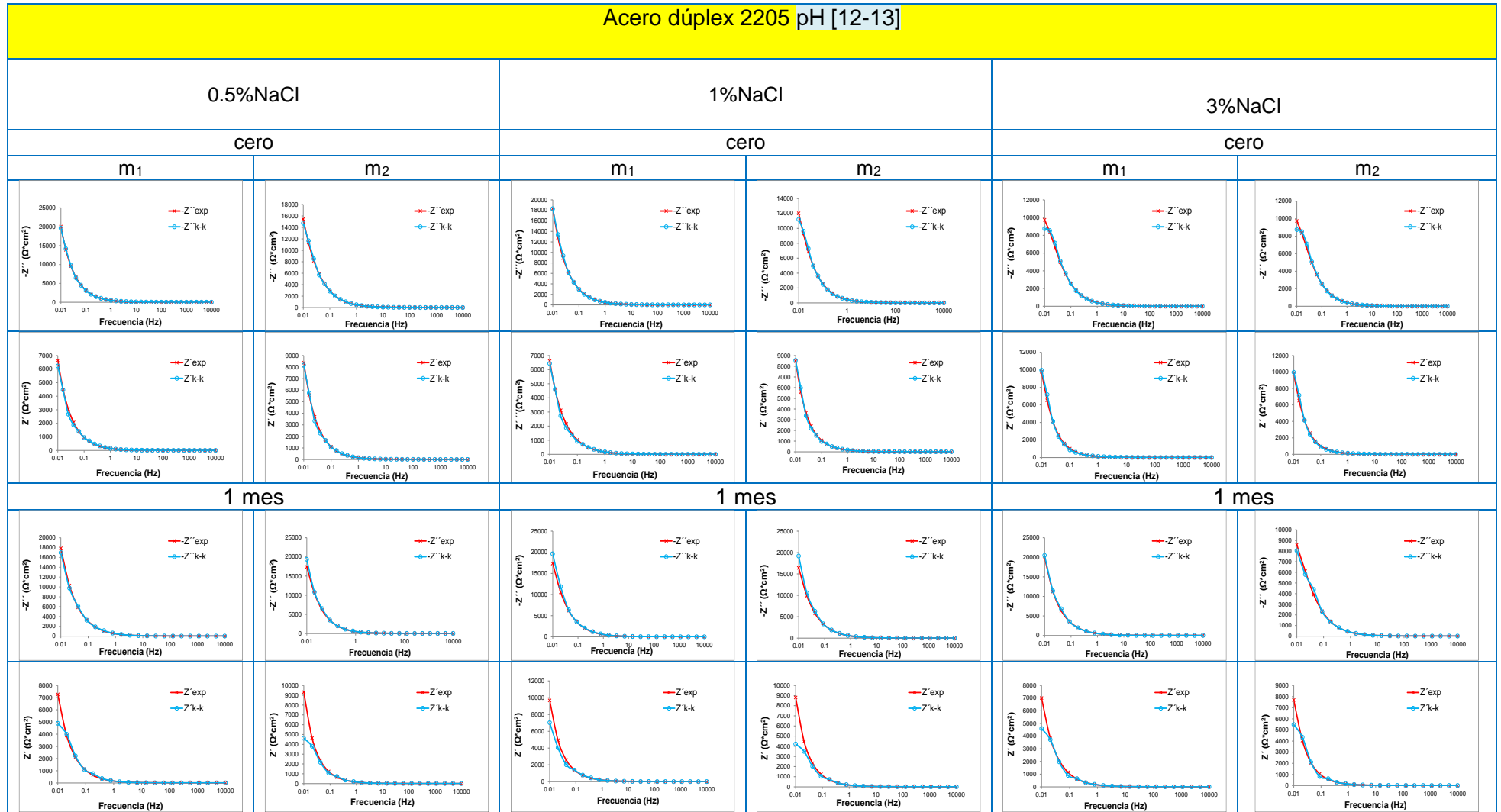


ANEXO 3

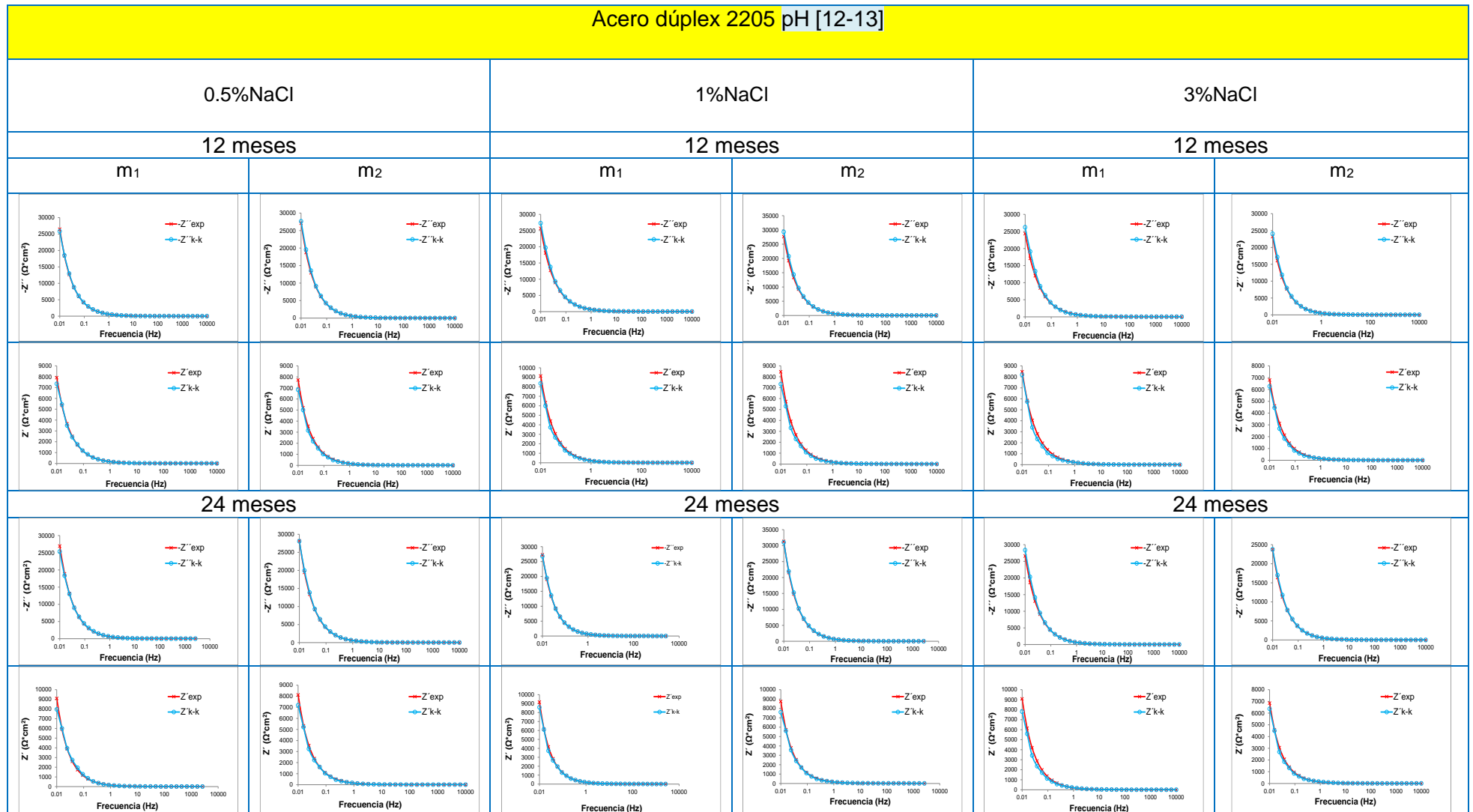
Acero dúplex 2205 pH [6-8]



ANEXO 3

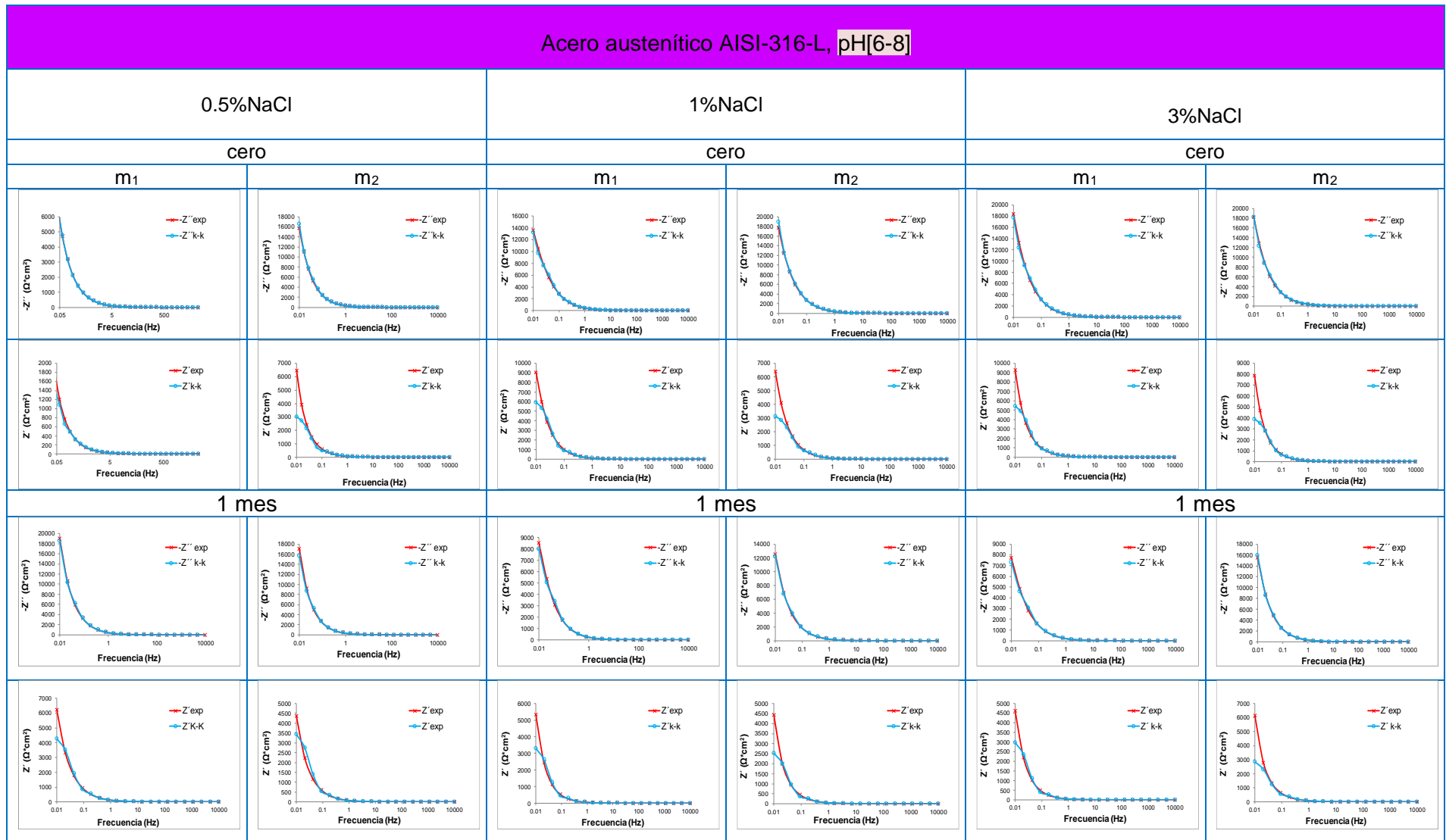


ANEXO 3

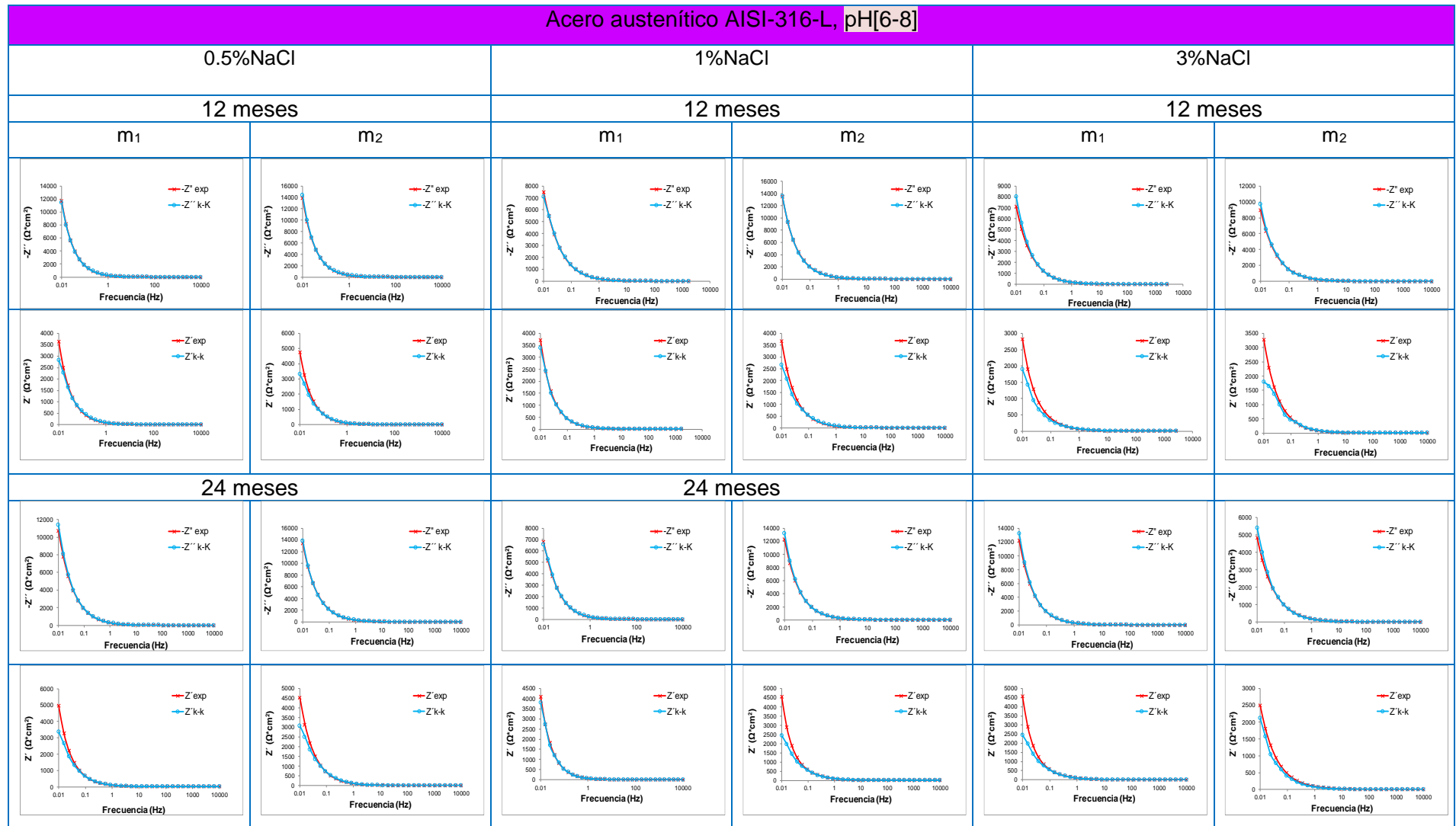


ANEXO 3

Acero austenítico AISI-316-L, pH[6-8]

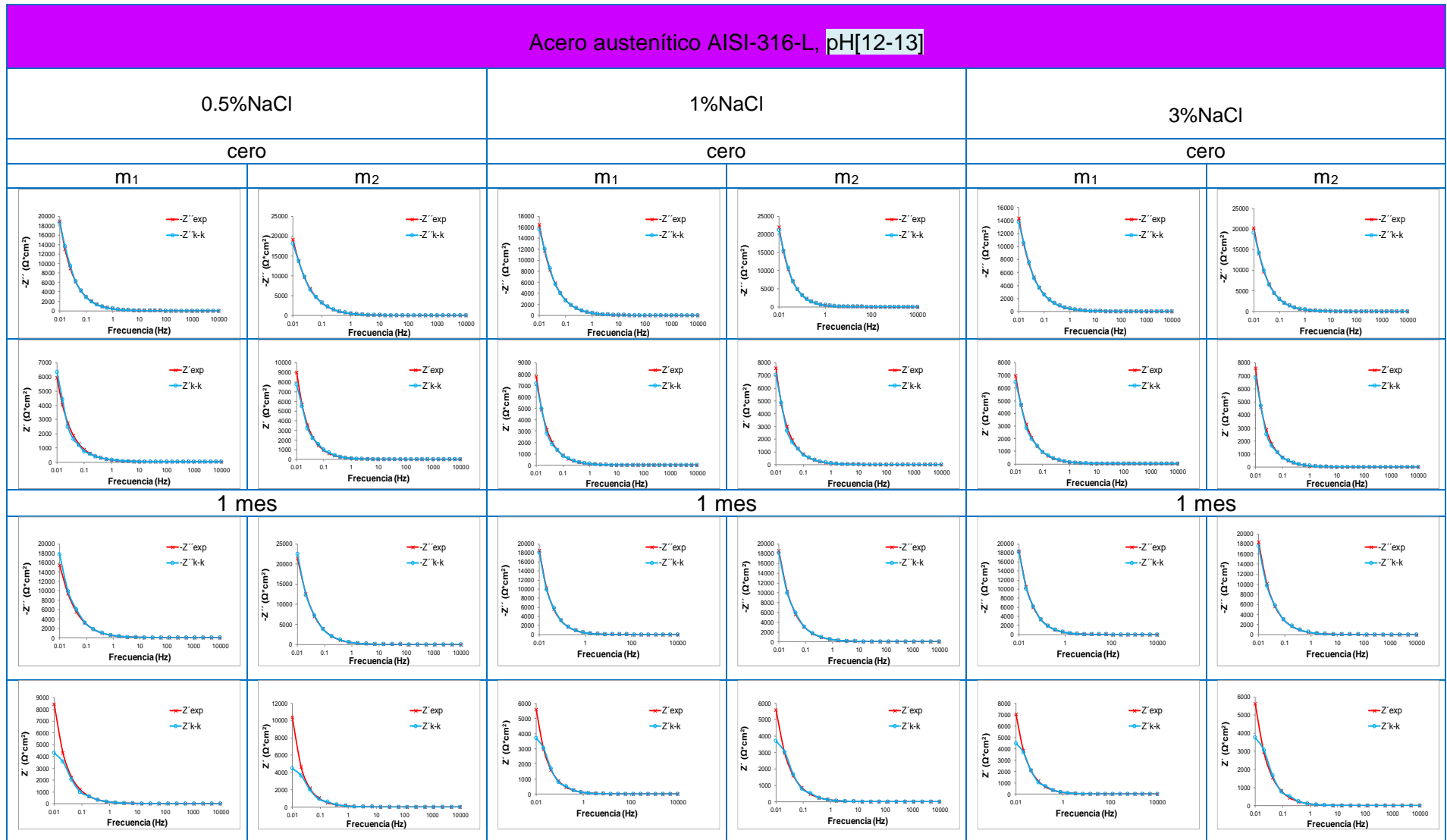


ANEXO 3

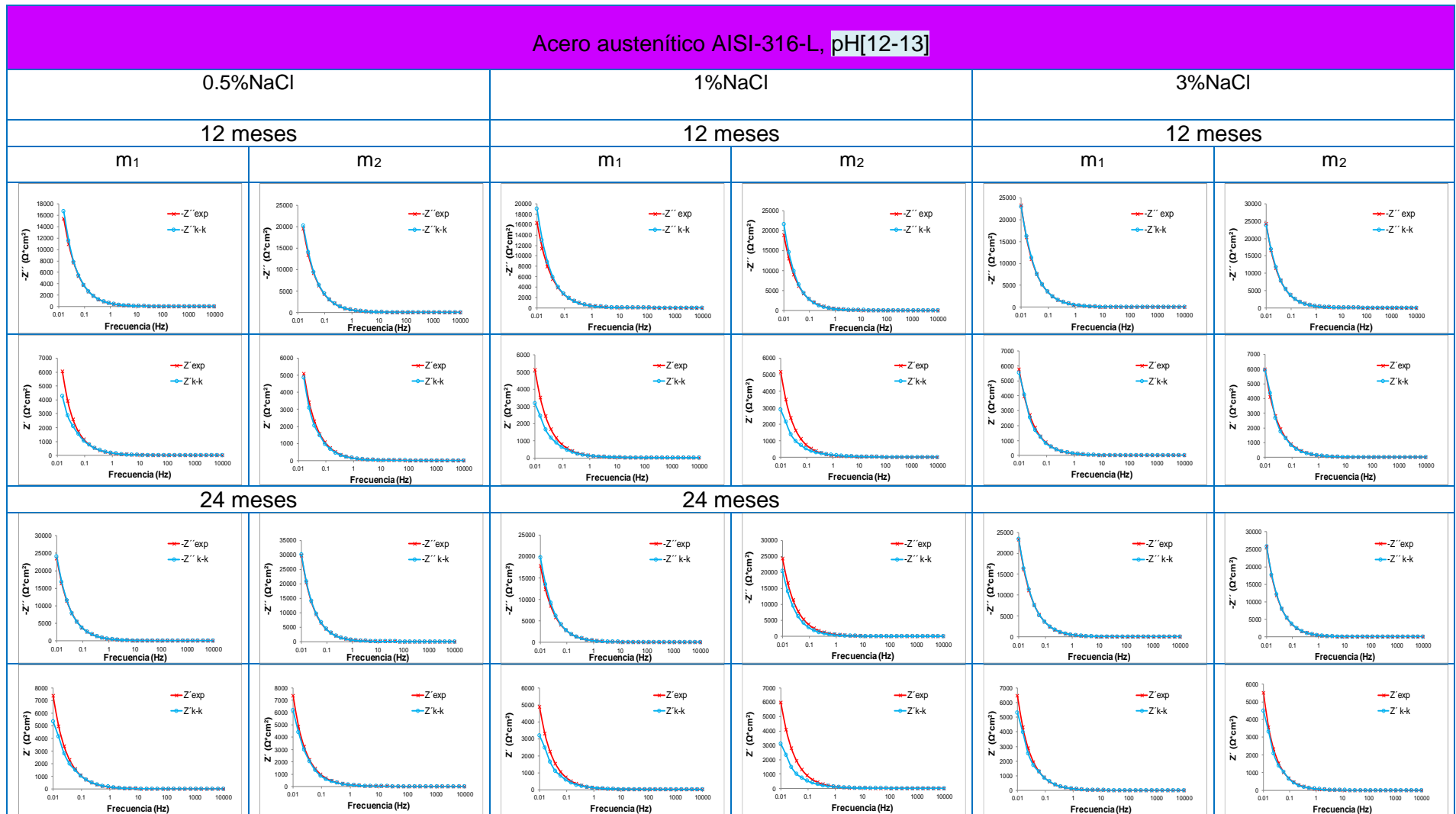


ANEXO 3

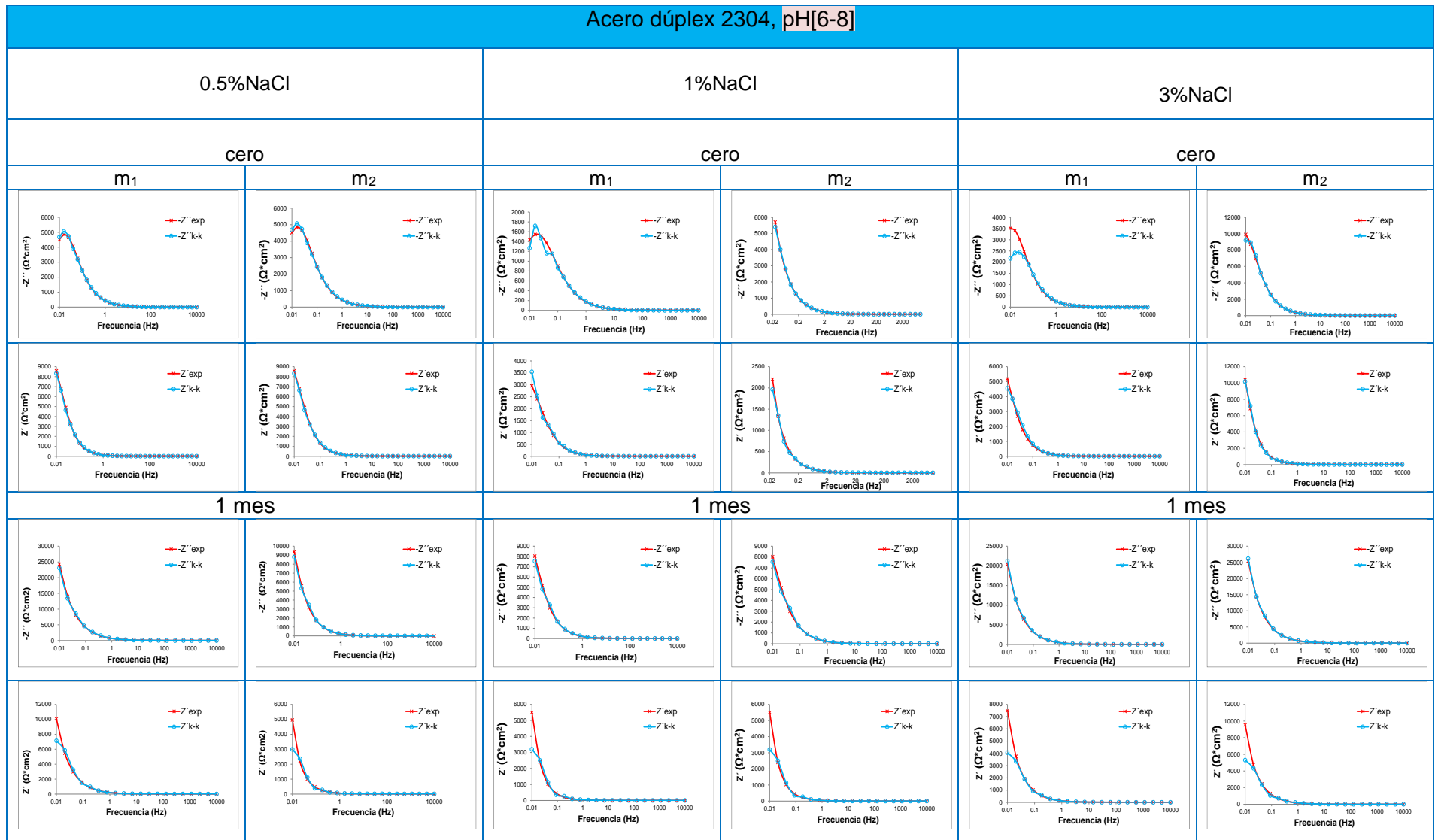
Acero austenítico AISI-316-L, pH[12-13]



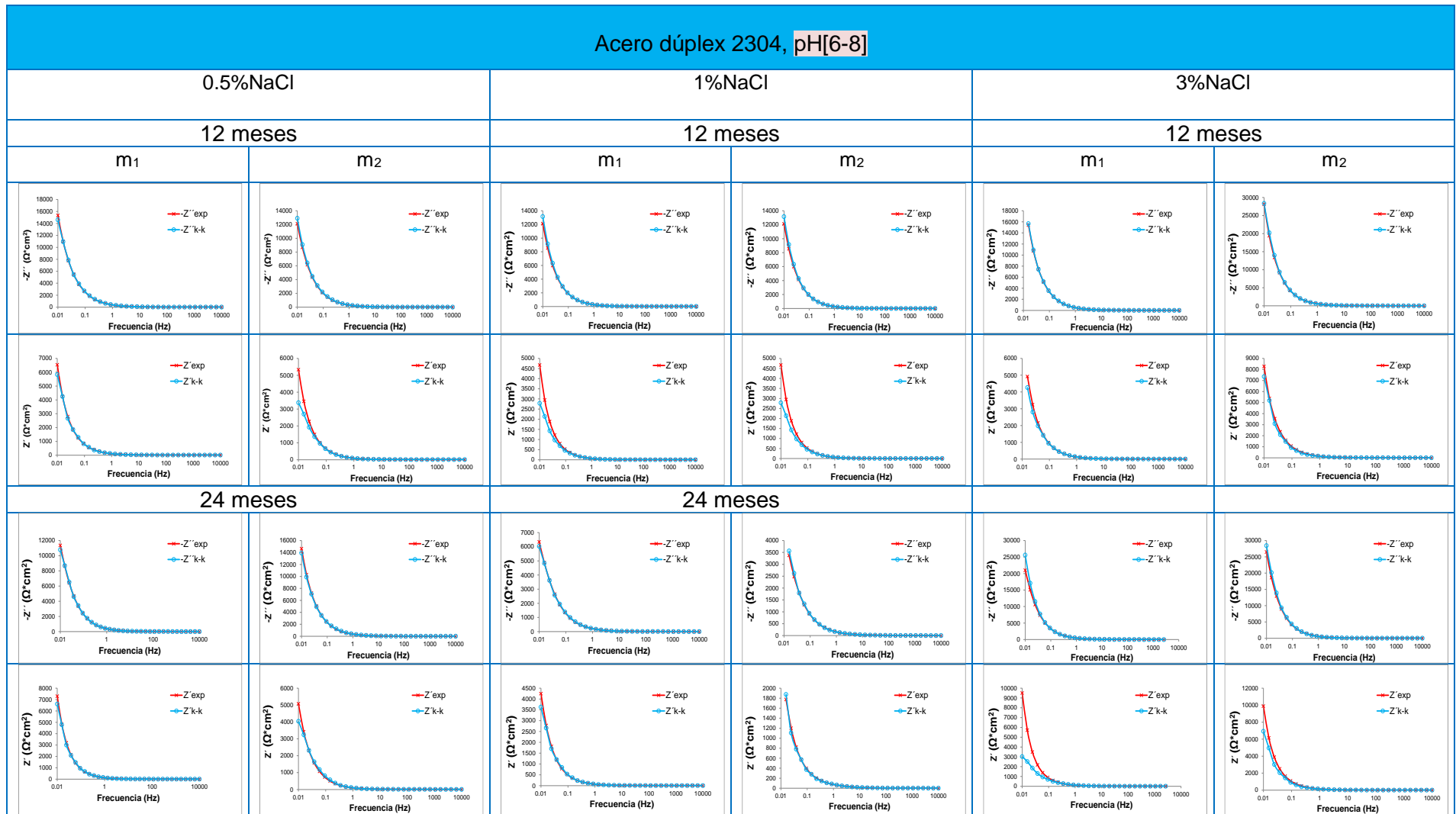
ANEXO 3



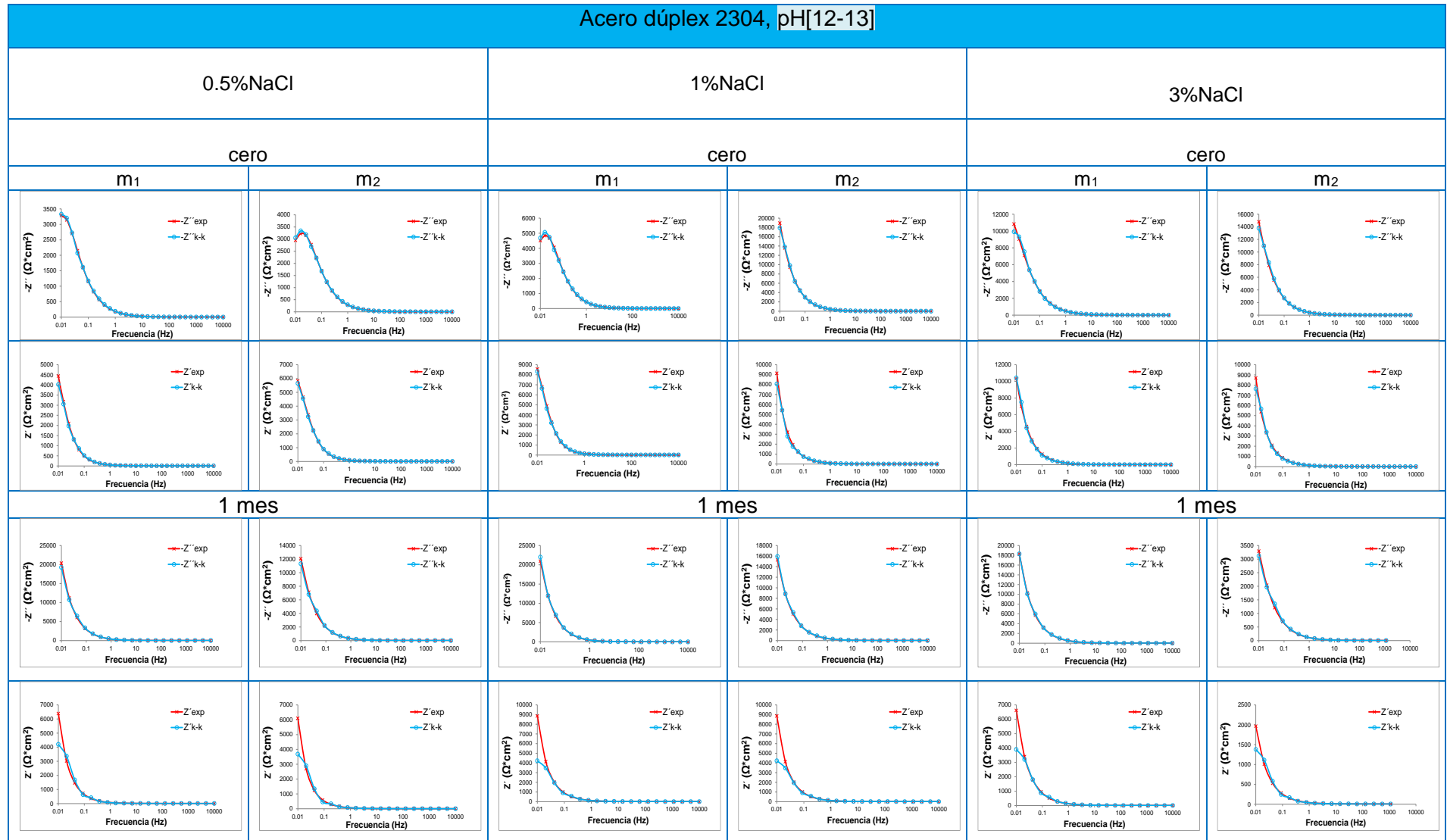
ANEXO 3



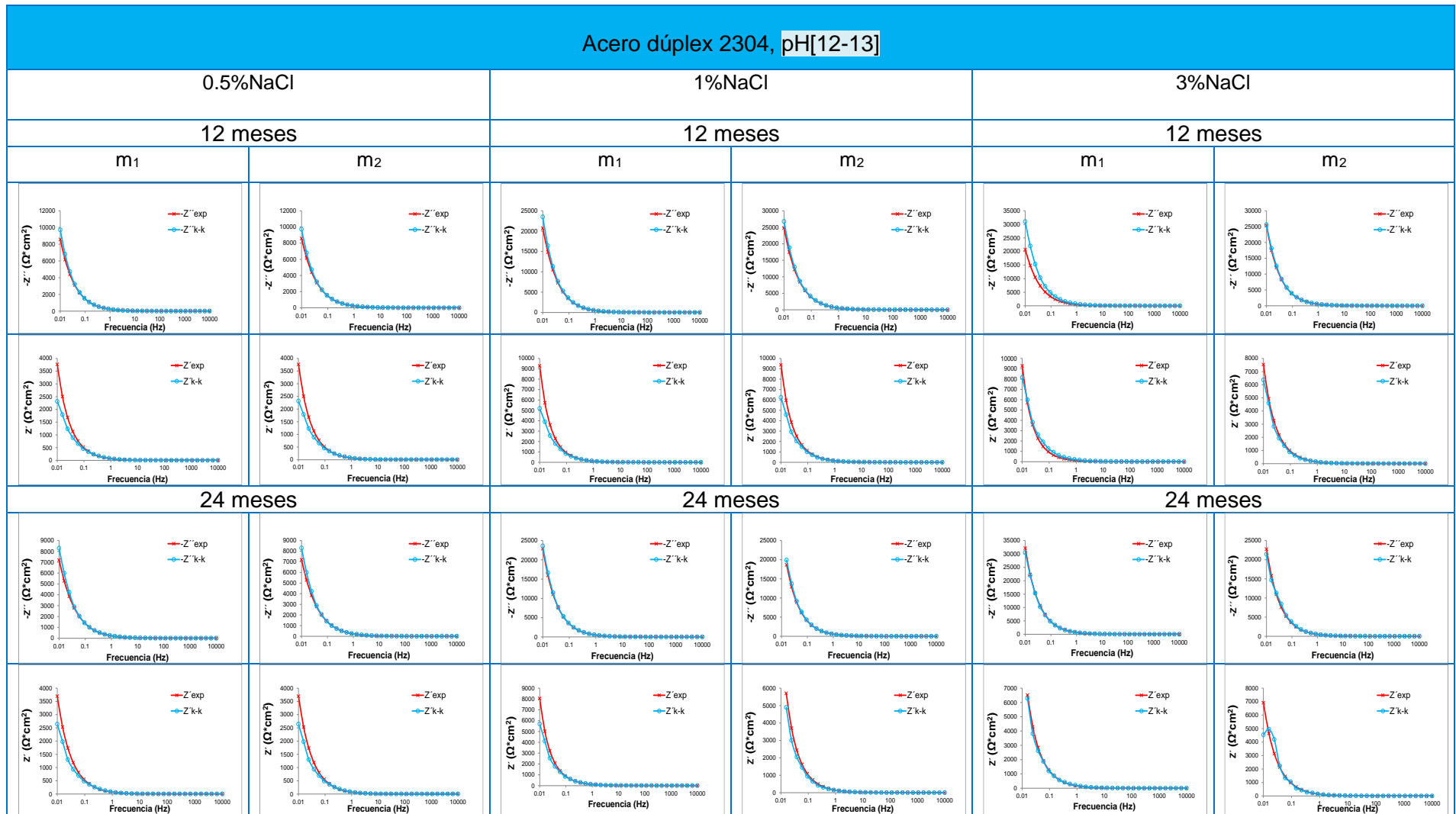
ANEXO 3



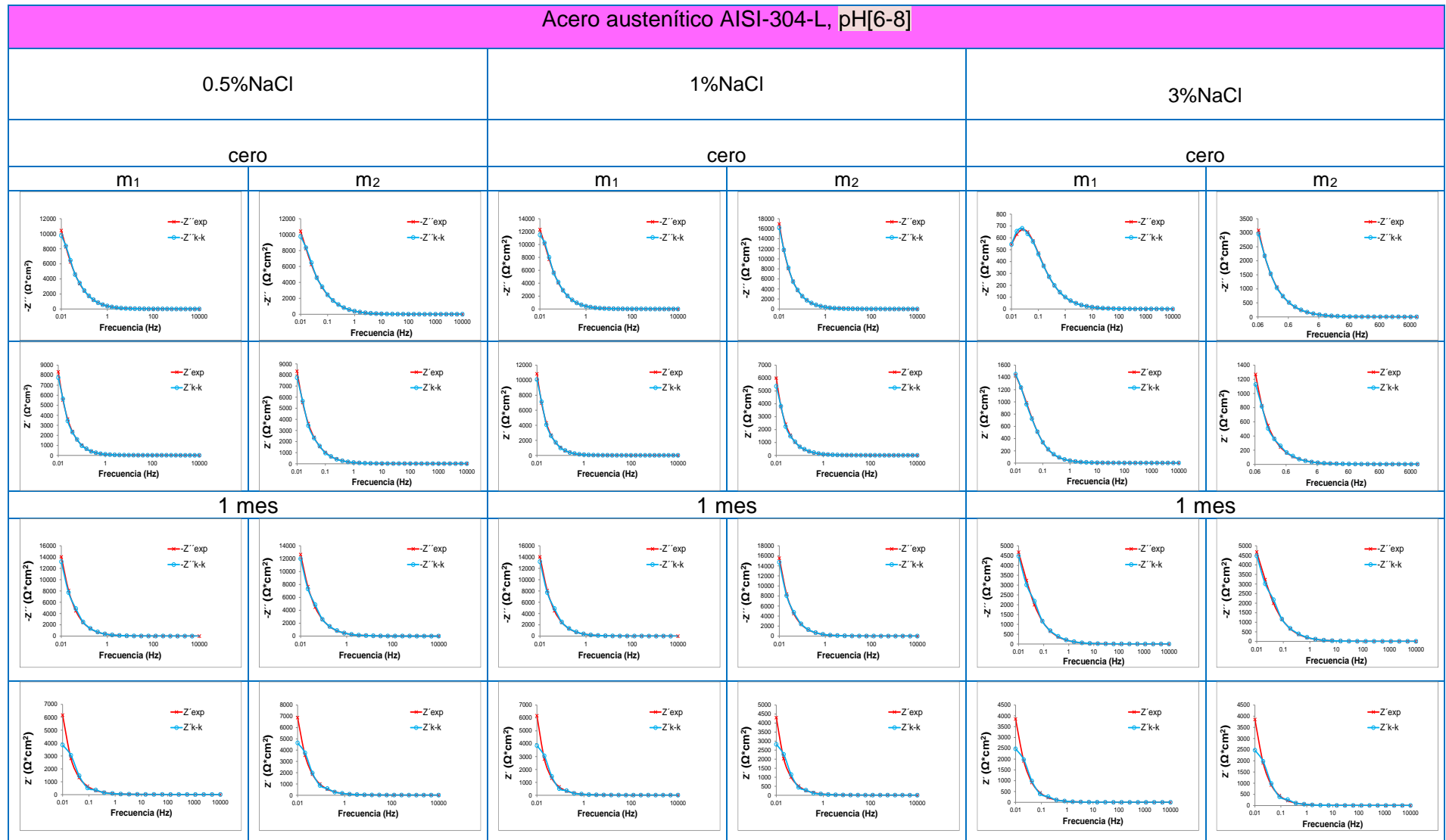
ANEXO 3



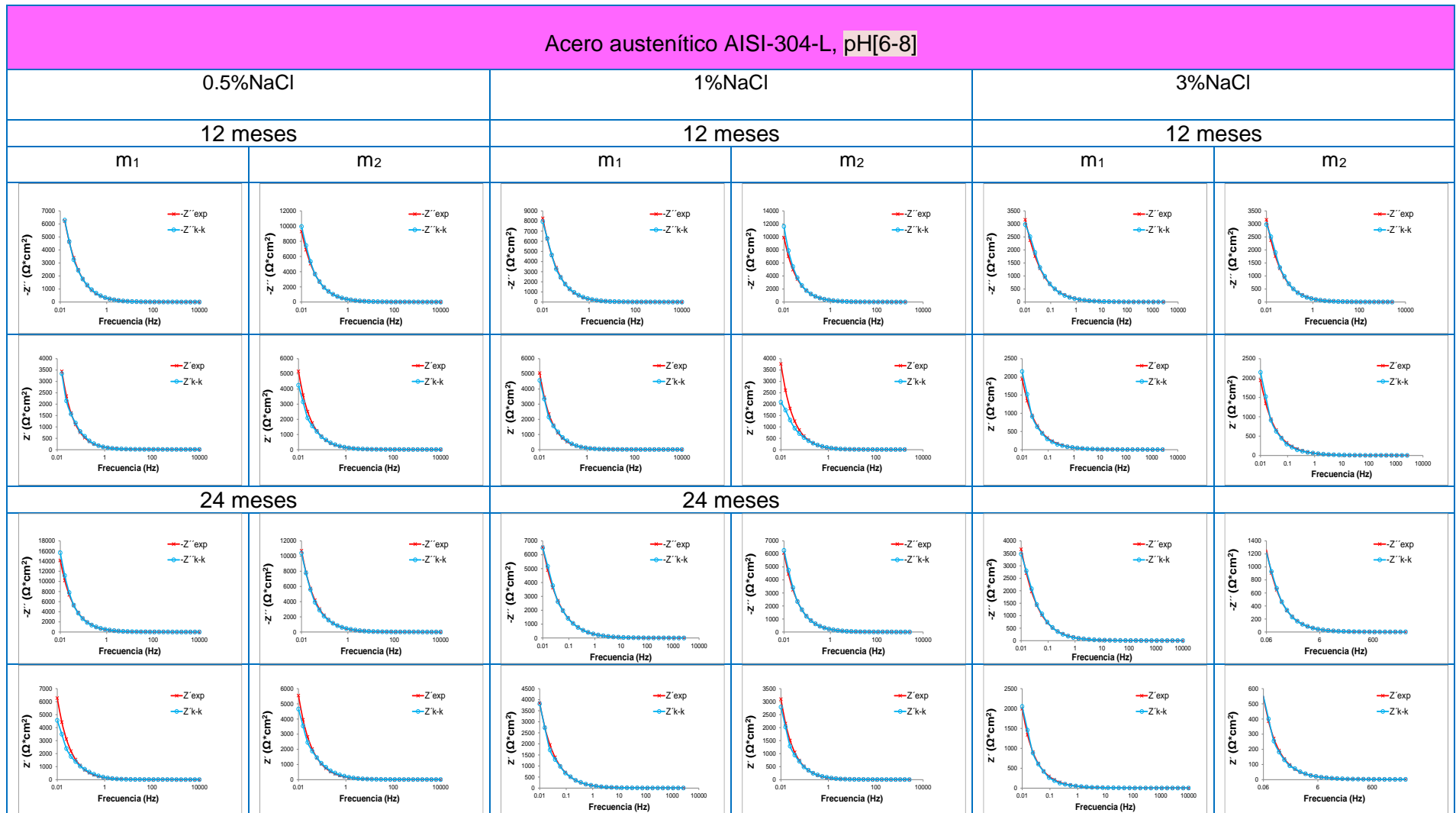
ANEXO 3



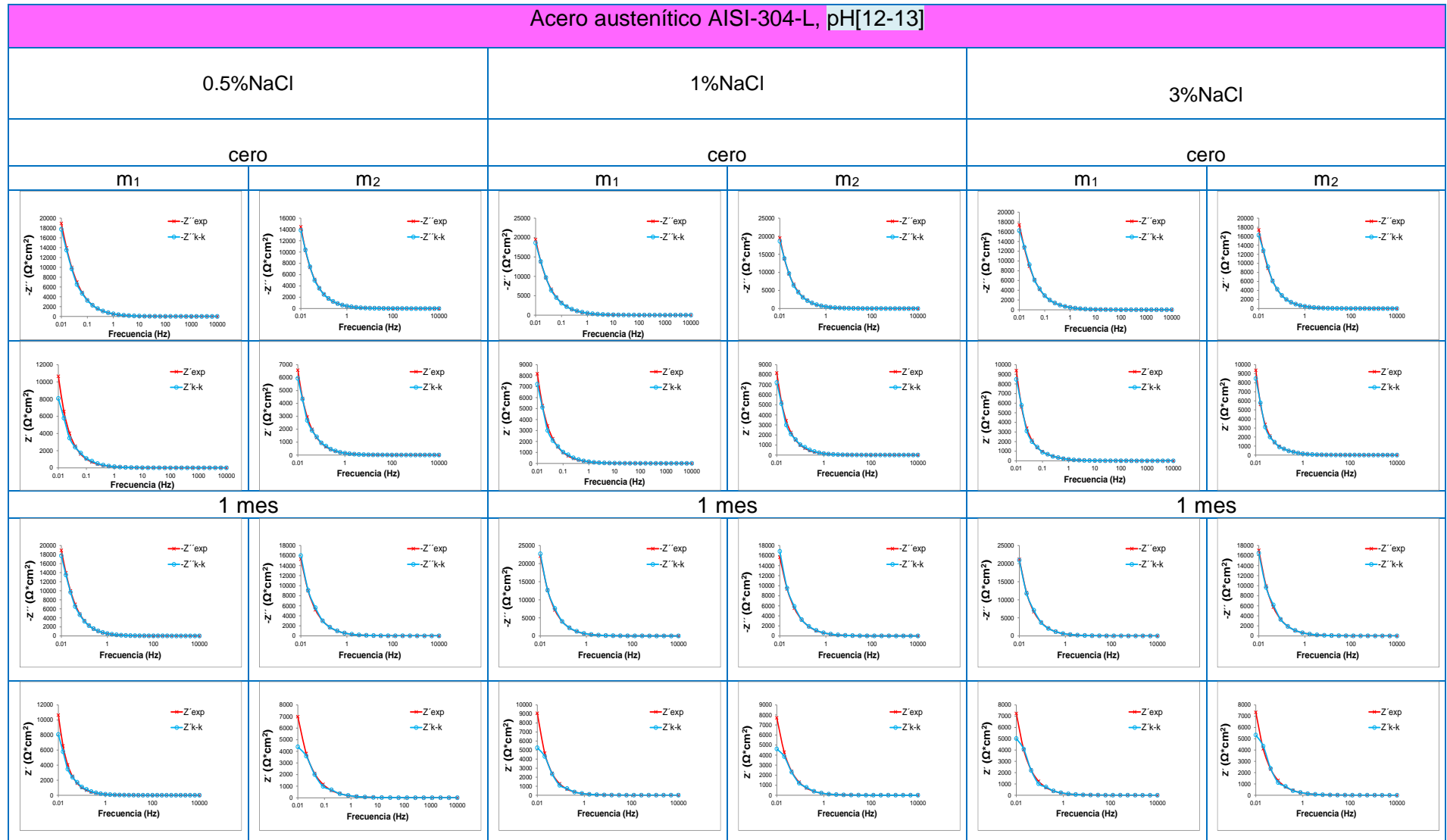
ANEXO 3



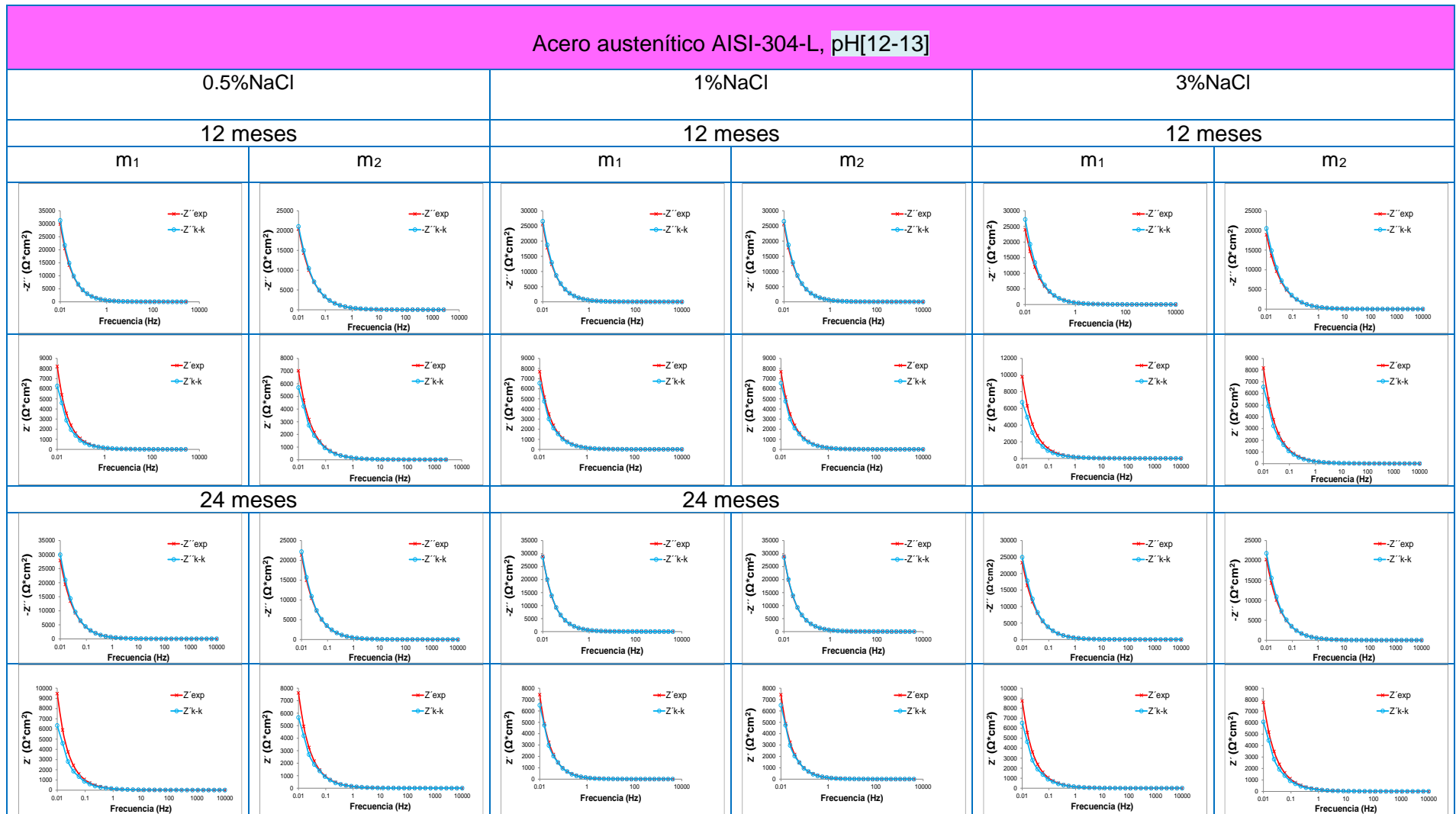
ANEXO 3



ANEXO 3



ANEXO 3



ANEXO 3

Tabla 42. ΔZ para las medidas de EIS realizadas sobre el acero inoxidable dúplex 2001.

		Acero inoxidable dúplex 2001 pH[6-8]							
		cero		1 mes		1 año		2 año	
		$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$
		Real->Imaginario	Imaginario->Real	Real->Imaginario	Imaginario->Real	Real->Imaginario	Imaginario->Real	Real->Imaginario	Imaginario->Real
0,5%NaCl	m ₁	0.38	0.33	0.24	0.21	0.38	0.50	0.33	0.43
	m ₂	0.68	0.21	0.21	0.18	0.15	0.73	0.33	0.30
1%NaCl	m ₁	0.72	0.59	0.39	0.43	0.29	0.71	0.62	0.68
	m ₂	0.48	0.08	0.77	0.22	0.29	0.71	0.54	0.99
3%NaCl	m ₁	0.32	0.80	0.54	0.57	0.65	0.43	0.68	0.22
	m ₂	0.41	1.79	0.52	0.57	0.25	0.58	0.43	0.17
		Acero inoxidable dúplex 2001 pH[12-13]							
		cero		1 mes		1 año		2 año	
		$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$
		Real->Imaginario	Imaginario->Real	Real->Imaginario	Imaginario->Real	Real->Imaginario	Imaginario->Real	Real->Imaginario	Imaginario->Real
0,5%NaCl	m ₁	0.89	0.21	0.23	0.42	0.41	0.46	0.35	0.59
	m ₂	0.89	0.21	0.13	0.09	0.92	0.32	0.26	0.20
1%NaCl	m ₁	2.19	0.71	1.68	1.30	0.24	0.37	0.33	0.14
	m ₂	1.64	0.11	1.23	1.86	0.21	0.45	0.29	0.25
3%NaCl	m ₁	0.53	0.56	0.71	0.55	2.53	2.52	1.97	1.68
	m ₂	0.53	0.56	0.60	0.32	2.81	3.00	1.11	1.25

ANEXO 3

Tabla 43. ΔZ para las medidas de EIS realizadas sobre el acero inoxidable dúplex 2205.

		Acero inoxidable dúplex 2205 pH[6-8]							
		cero		1 mes		1 año		2 año	
		$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$
		Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real
0,5%NaCl	m ₁	0.25	0.69	0.34	0.35	0.08	0.14	0.30	0.24
	m ₂	0.38	0.35	0.18	0.39	0.24	0.24	0.10	0.38
1%NaCl	m ₁	0.44	0.19	0.32	0.26	0.31	0.17	1.51	1.51
	m ₂	0.41	0.43	0.26	0.74	0.21	0.12	0.62	0.89
3%NaCl	m ₁	0.10	0.10	2.72	2.36	0.25	0.10	0.80	1.23
	m ₂	0.46	2.81	0.28	0.36	0.25	0.10	1.00	1.23
		Acero inoxidable dúplex 2205 pH[12-13]							
		cero		1 mes		1 año		2 año	
		$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$
		Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real
0,5%NaCl	m ₁	0.22	0.11	0.52	0.47	0.10	0.24	0.41	0.27
	m ₂	0.37	0.26	0.17	0.34	0.31	0.19	0.26	0.18
1%NaCl	m ₁	0.26	0.16	0.19	0.52	0.56	0.29	0.31	0.21
	m ₂	0.47	0.30	0.37	0.70	0.58	0.28	0.20	0.15
3%NaCl	m ₁	0.53	0.57	0.42	0.36	0.78	0.43	0.29	0.56
	m ₂	0.53	0.57	0.52	1.09	0.46	0.23	0.26	0.29

ANEXO 3

Tabla 44. ΔZ para las medidas de EIS realizadas sobre el acero inoxidable austenítico AISI-316-L.

		Acero inoxidable austenítico AISI-316-L pH[6-8]							
		cero		1 mes		1 año		2 año	
		$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$
		Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real
0,5%NaCl	m ₁	0.22	0.12	0.31	0.45	0.17	0.14	0.11	0.22
	m ₂	0.23	0.18	0.68	0.54	0.06	0.16	0.10	0.10
1%NaCl	m ₁	0.36	0.34	0.84	0.65	0.29	0.27	0.40	0.17
	m ₂	0.17	0.24	0.61	0.38	0.33	0.12	0.13	0.28
3%NaCl	m ₁	0.44	0.40	0.89	0.50	0.46	0.78	0.13	0.28
	m ₂	0.33	0.23	0.52	0.29	0.18	0.49	0.42	0.69
		Acero inoxidable austenítico AISI-316-L pH[12-13]							
		cero		1 mes		1 año		2 año	
		$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$
		Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real
0,5%NaCl	m ₁	0.31	0.16	0.23	0.62	0.16	0.37	0.06	0.18
	m ₂	0.43	0.38	0.54	0.38	0.18	0.32	0.10	0.19
1%NaCl	m ₁	0.36	0.29	0.36	0.40	0.76	0.94	0.60	0.73
	m ₂	0.29	0.14	0.66	0.35	0.76	0.85	2.02	1.87
3%NaCl	m ₁	0.32	0.25	0.52	0.29	0.22	0.18	0.29	0.16
	m ₂	0.35	0.22	0.62	0.38	0.21	0.21	0.30	0.15

ANEXO 3

Tabla 45. ΔZ para las medidas de EIS realizadas sobre el acero inoxidable dúplex 2304.

		Acero inoxidable dúplex 2304 pH[6-8]							
		cero		1 mes		1 año		2 año	
		$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$
		Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real
0,5%NaCl	m ₁	0.43	0.46	0.68	0.57	0.75	0.34	0.21	0.59
	m ₂	0.32	0.31	0.99	0.43	0.38	0.36	0.57	0.44
1%NaCl	m ₁	0.45	0.27	0.84	0.47	0.78	0.41	0.29	0.30
	m ₂	0.30	0.18	0.52	0.54	0.81	0.89	0.21	0.27
3%NaCl	m ₁	0.13	0.30	0.89	0.66	0.56	0.28	0.47	0.18
	m ₂	0.29	0.29	0.85	0.56	0.81	0.50	0.28	0.20
		Acero inoxidable dúplex 2304 pH[12-13]							
		cero		1 mes		1 año		2 año	
		$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$
		Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real
0,5%NaCl	m ₁	0.68	0.74	0.78	0.40	0.29	0.43	0.15	0.51
	m ₂	0.32	0.34	0.31	0.32	0.14	0.29	0.14	0.26
1%NaCl	m ₁	0.38	0.34	0.36	0.19	0.48	0.33	0.22	0.13
	m ₂	0.36	0.38	0.13	0.34	0.58	0.43	0.15	0.41
3%NaCl	m ₁	0.45	0.33	0.49	0.28	0.48	0.89	0.15	0.55
	m ₂	0.27	0.07	0.58	0.28	0.38	0.60	0.24	0.55

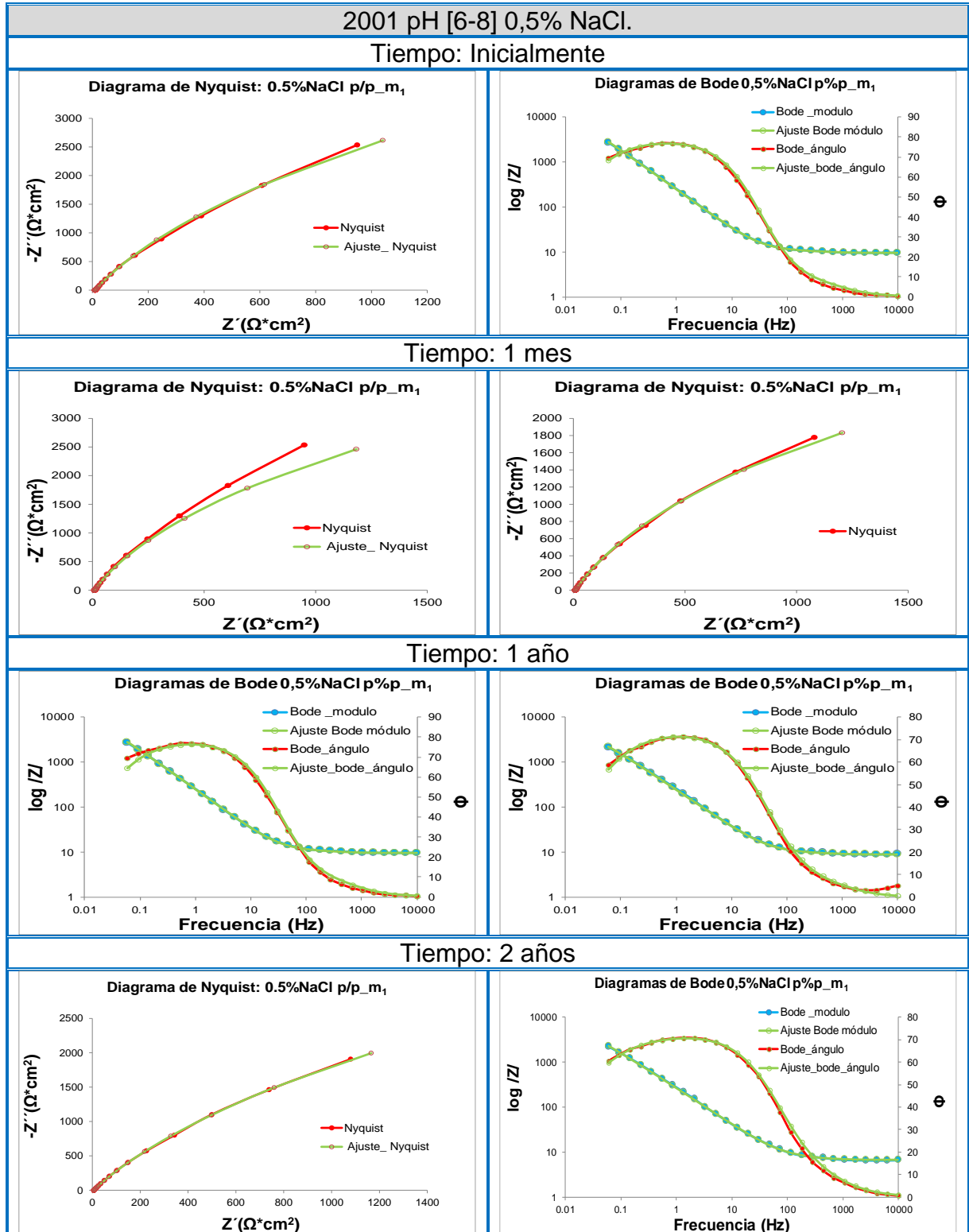
ANEXO 3

Tabla 46. ΔZ para las medidas de EIS realizadas sobre el acero inoxidable austenítico AISI-304-L.

		Acero inoxidable austenítico AISI-304-L pH[6-8]							
		cero		1 mes		1 año		2 año	
		$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$
		Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real
0,5%NaCl	m ₁	0.20	0.45	0.48	0.53	0.44	0.14	0.39	0.35
	m ₂	0.18	0.16	0.85	0.56	0.13	0.27	0.39	0.29
1%NaCl	m ₁	0.37	0.59	0.64	0.56	0.33	0.55	0.41	0.65
	m ₂	0.16	0.25	2.14	0.51	0.47	0.53	0.23	0.40
3%NaCl	m ₁	1.35	2.88	1.00	0.63	0.14	0.38	0.54	0.45
	m ₂	0.34	0.28	0.83	0.46	0.44	0.62	0.50	0.17
		Acero inoxidable austenítico AISI-304-L pH[12-13]							
		cero		1 mes		1 año		2 año	
		$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$	$\Delta Z(\%)$
		Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real	Real-->Imaginario	Imaginario-->Real
0,5%NaCl	m ₁	0.59	0.55	0.20	0.27	0.30	0.56	0.25	0.27
	m ₂	0.43	0.25	0.26	0.20	0.20	0.44	0.18	0.47
1%NaCl	m ₁	1.21	1.60	0.09	0.31	0.19	0.09	0.91	0.68
	m ₂	0.41	0.23	0.35	0.23	0.29	0.32	0.21	0.50
3%NaCl	m ₁	0.47	0.33	0.36	0.22	0.21	0.18	0.61	0.21
	m ₂	0.39	0.50	0.68	0.74	0.20	0.22	0.11	1.00

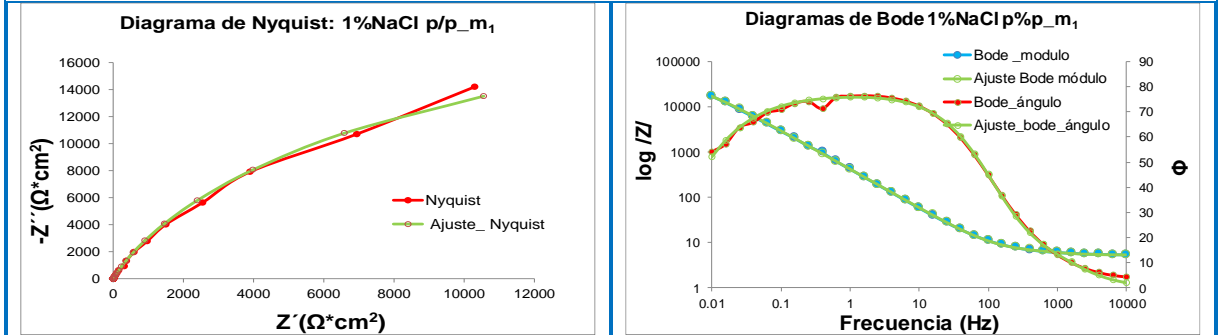
ANEXO 4

Anexo 4. Diagramas de Nyquist y Bode (ángulo y fase) para las muestras m_1 de cada celda de corrosión junto con la representación del ajuste al circuito equivalente.

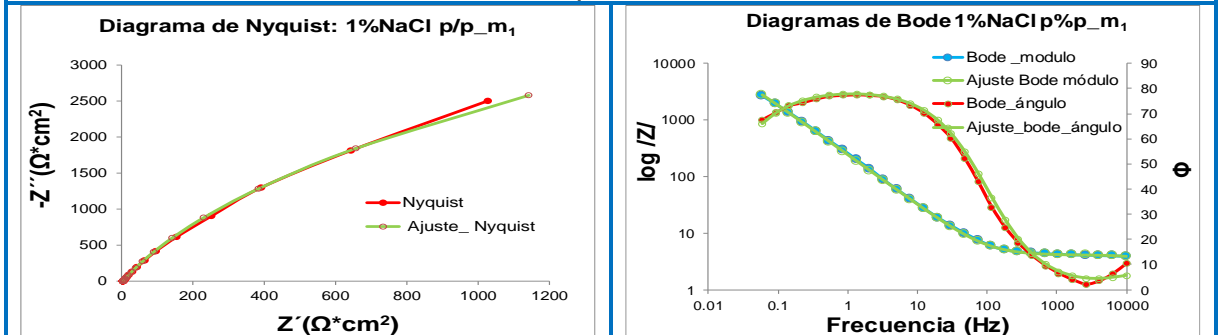


2001 pH [6-8] 1% NaCl.

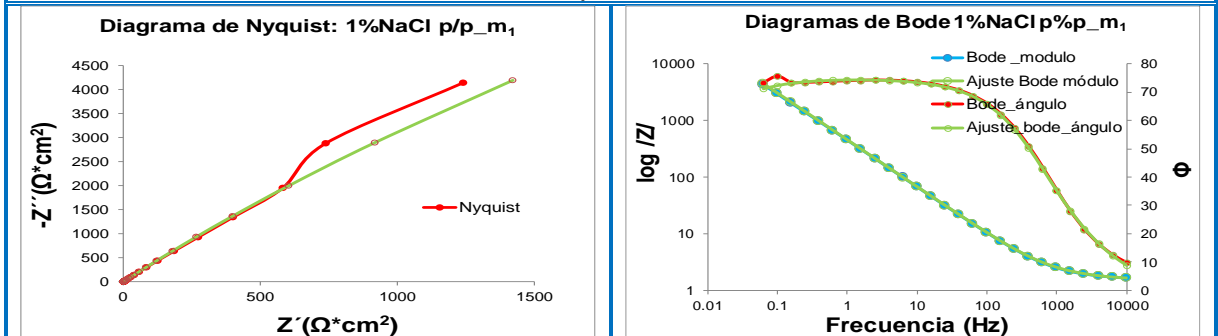
Tiempo: Inicialmente



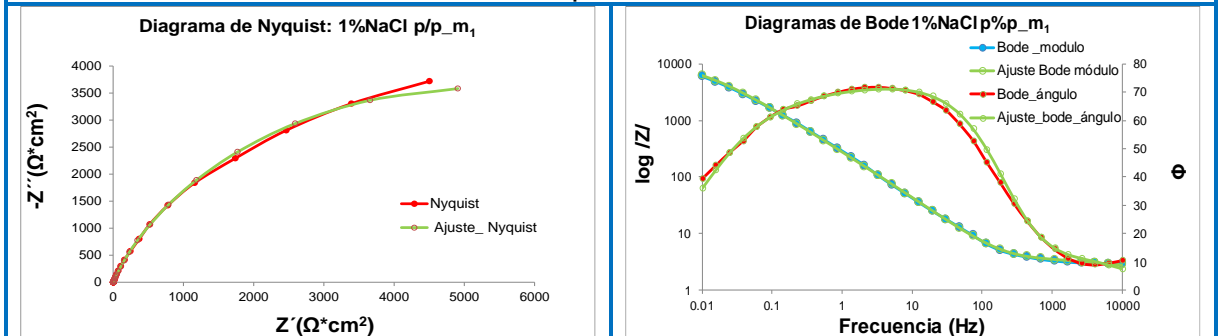
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

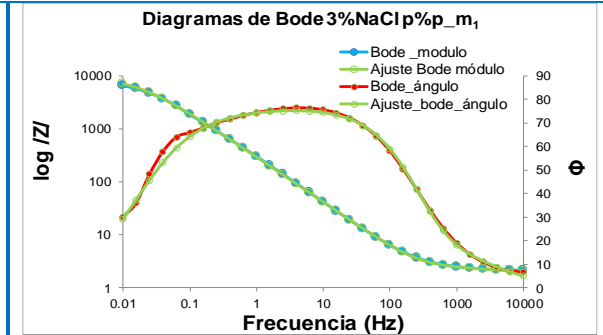
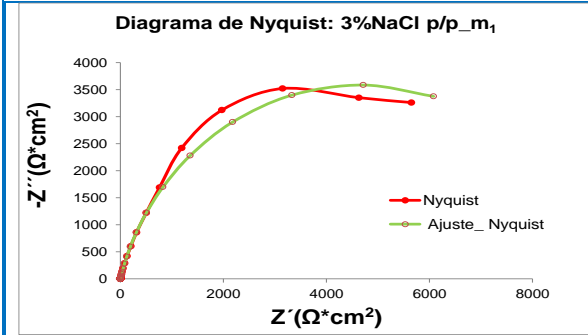


Tiempo: 2 años

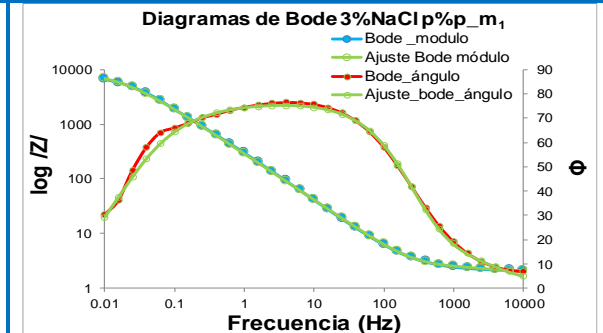
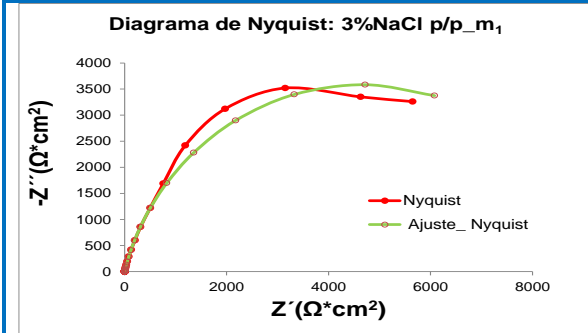


2001 pH [6-8] 3% NaCl.

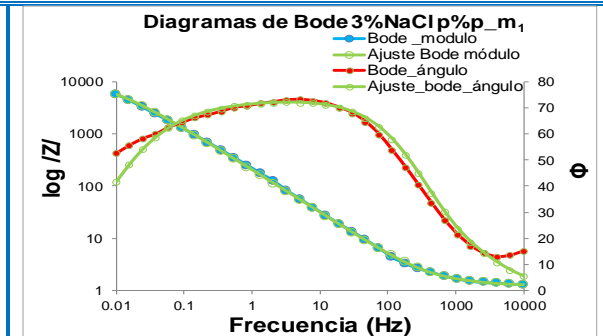
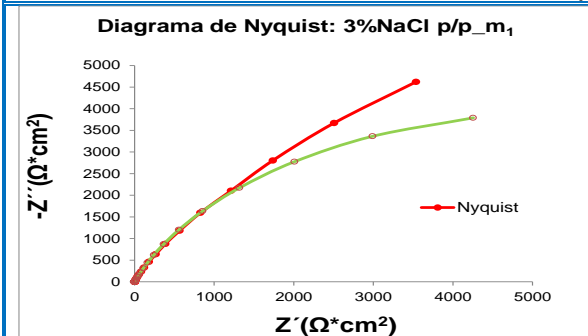
Tiempo: Inicialmente



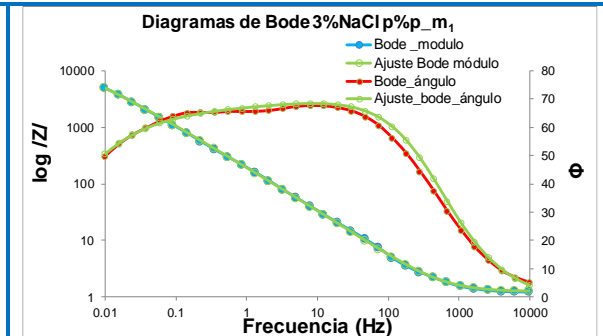
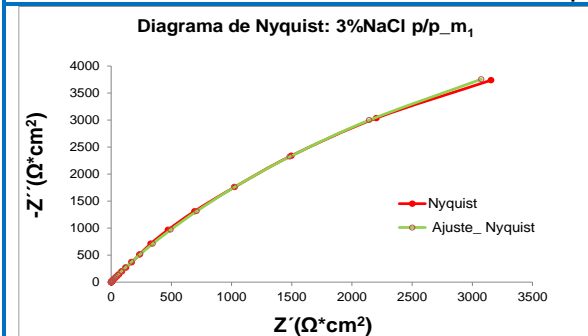
Tiempo: 1 mes

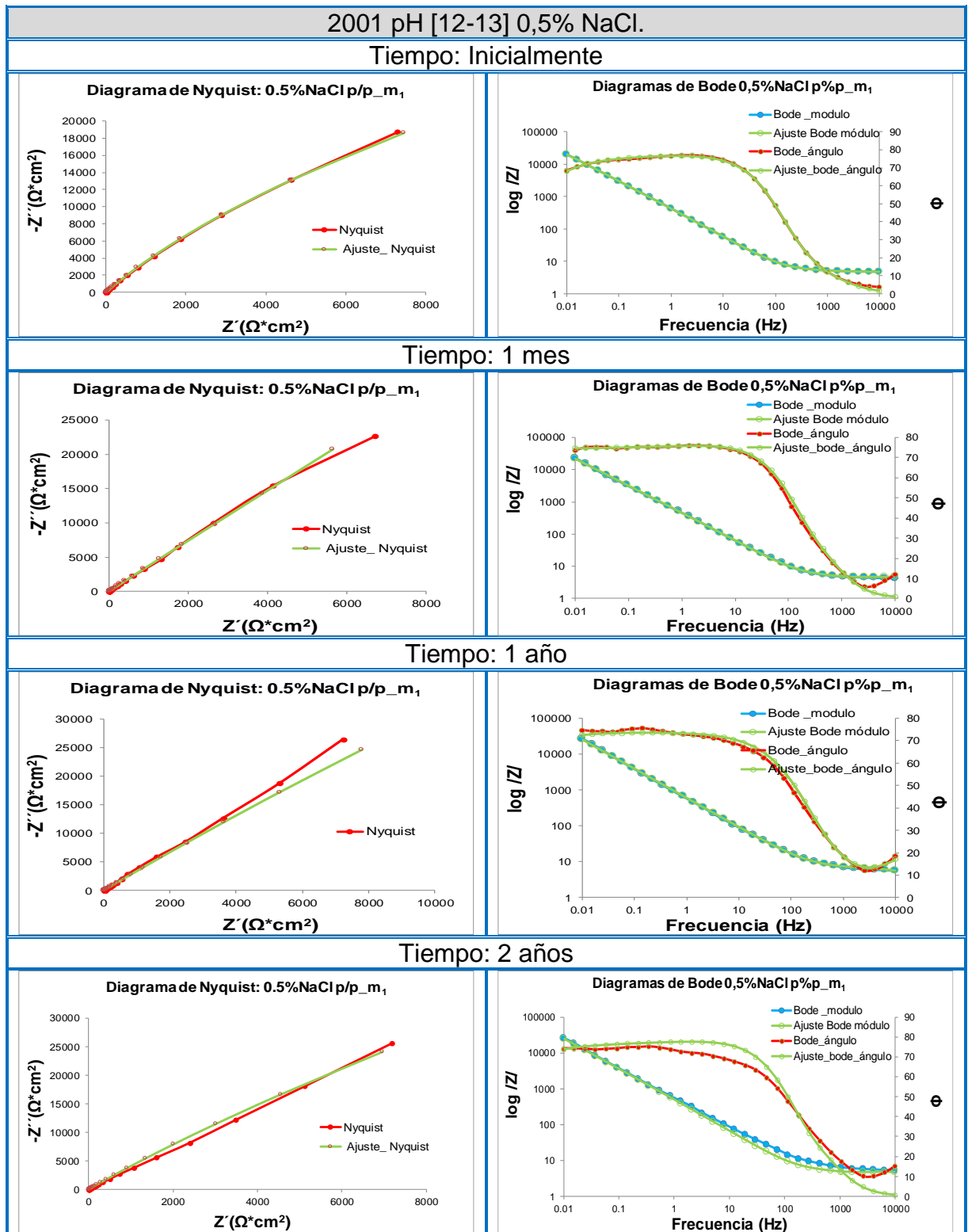


Tiempo: 1 año



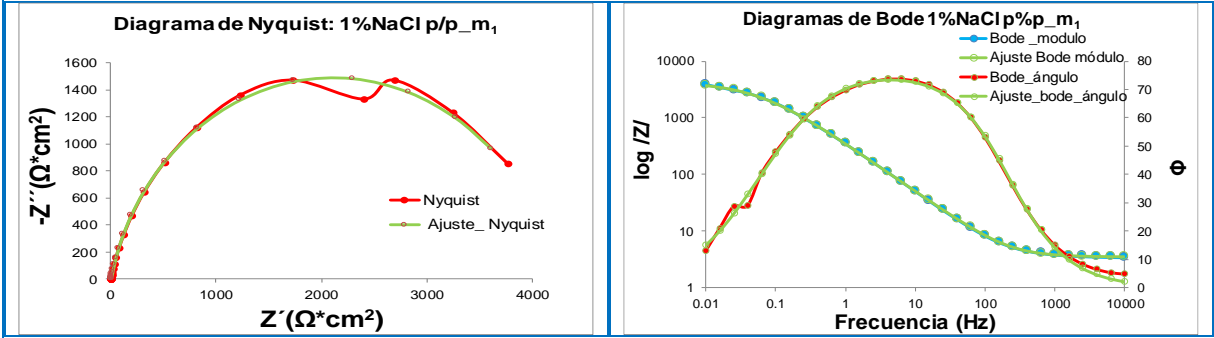
Tiempo: 2 años



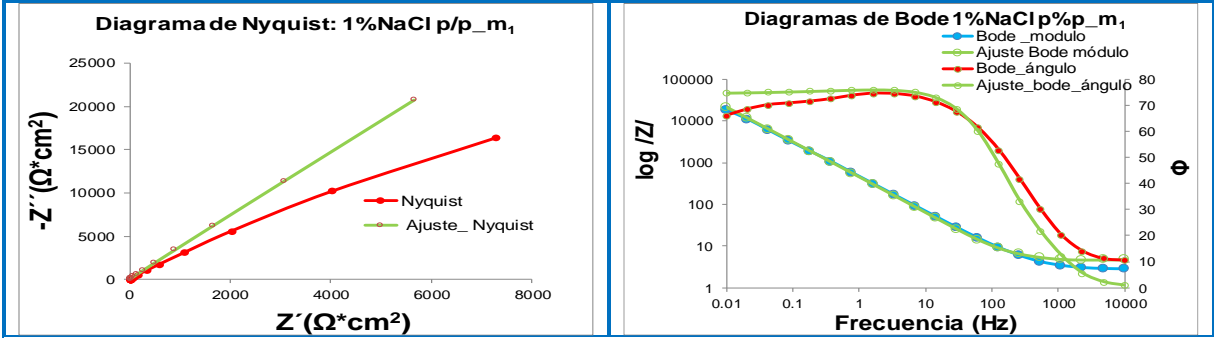


2001 pH [12-13] 1% NaCl.

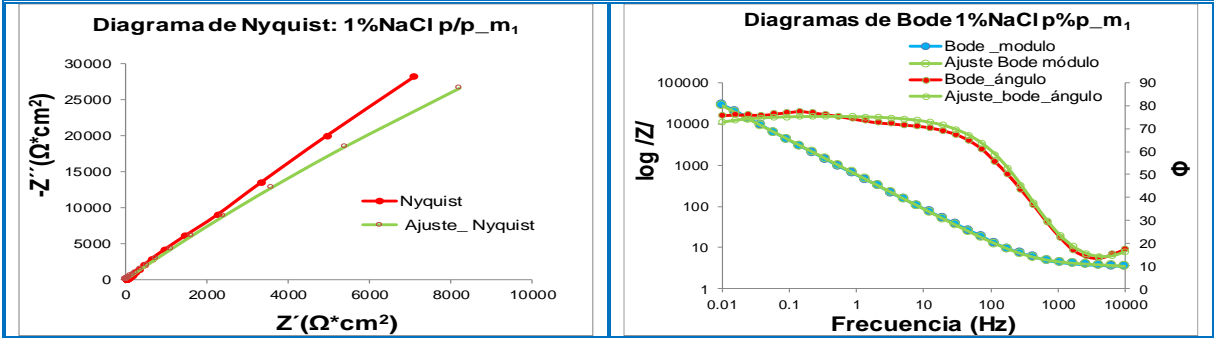
Tiempo: Inicialmente



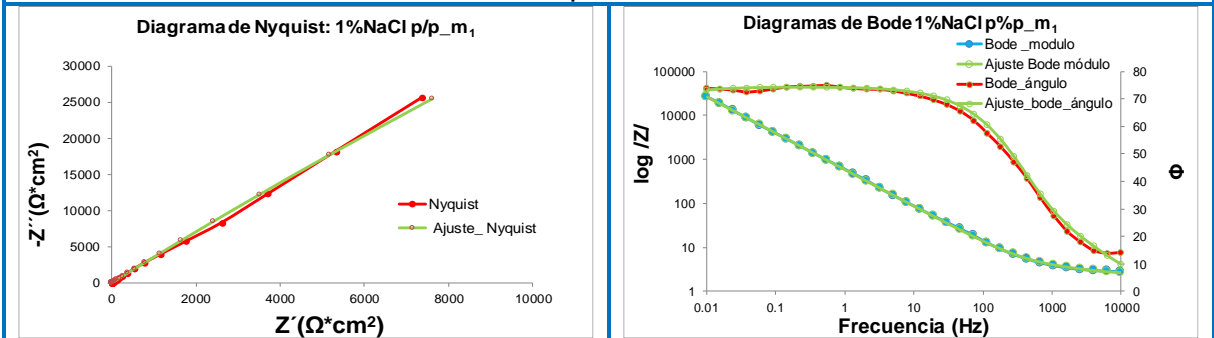
Tiempo: 1 mes

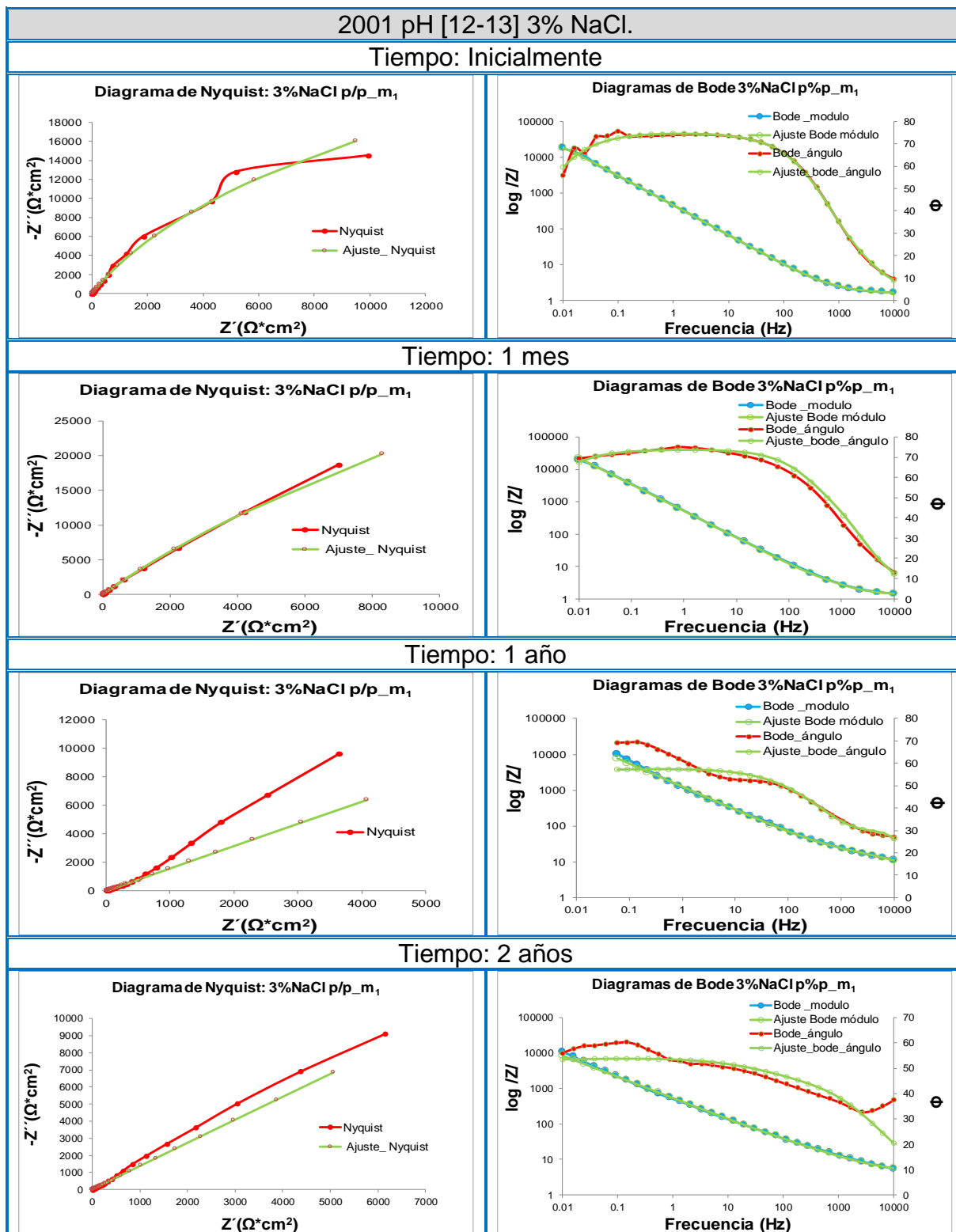


Tiempo: 1 año



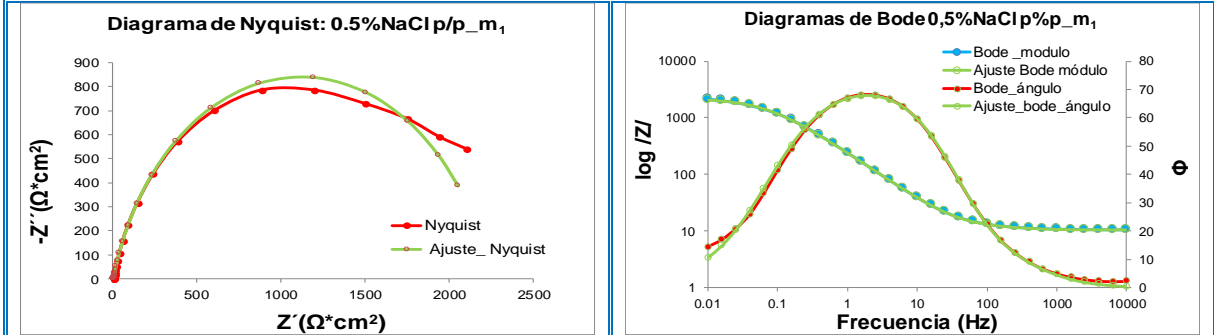
Tiempo: 2 años



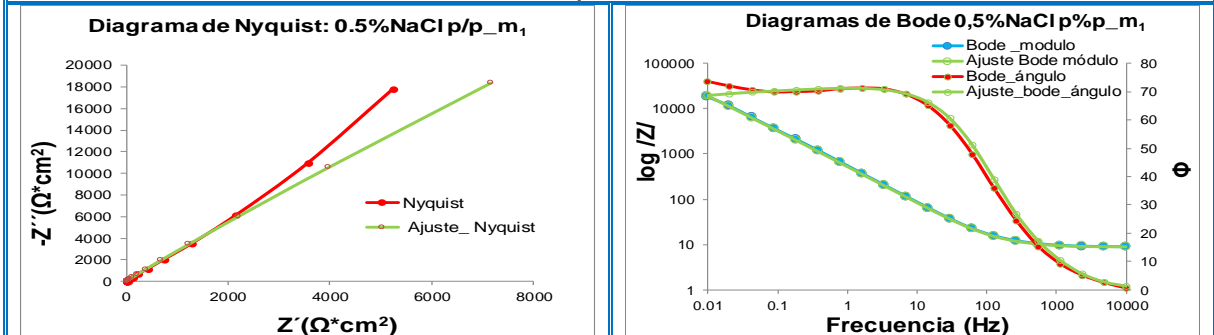


2205 pH [6-8] 0,5% NaCl.

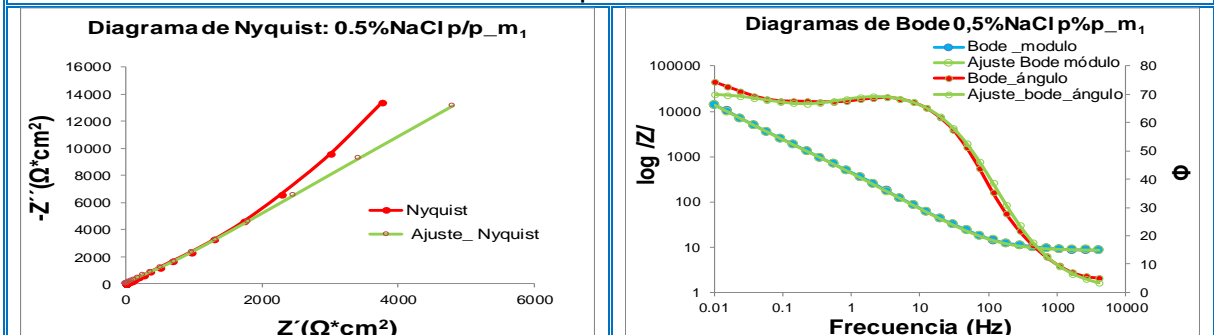
Tiempo: Inicialmente



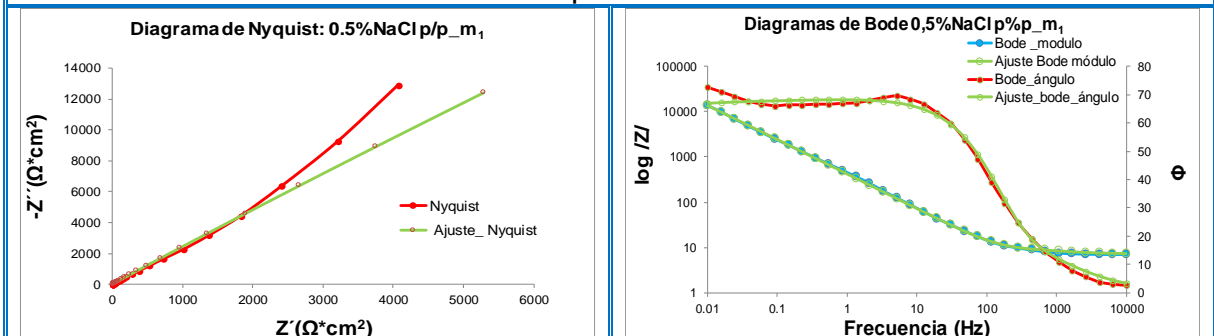
Tiempo: 1 mes

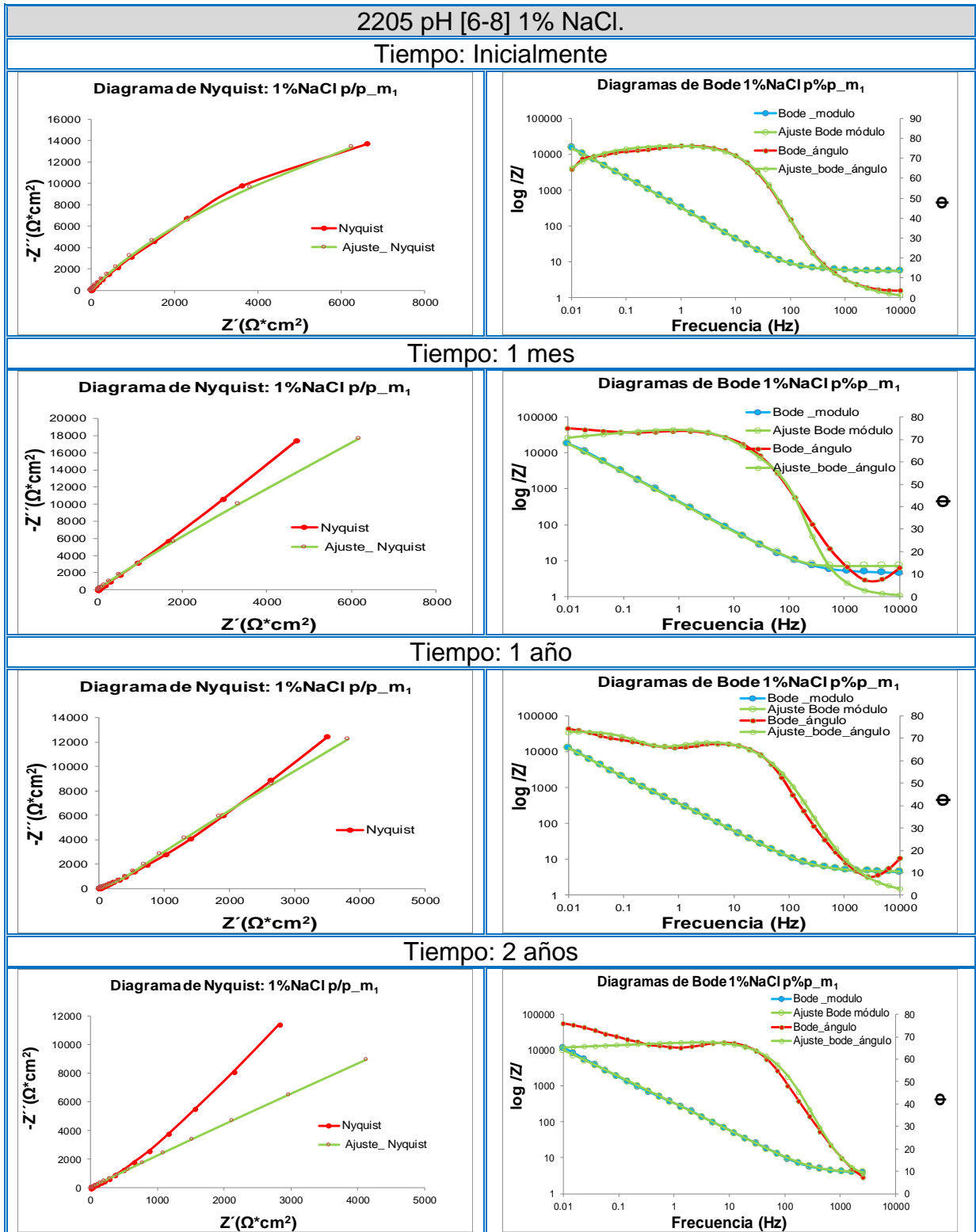


Tiempo: 1 año



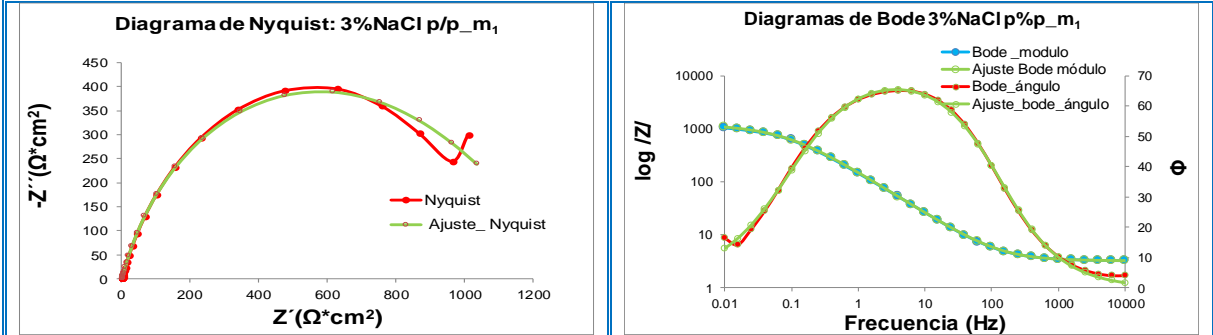
Tiempo: 2 años



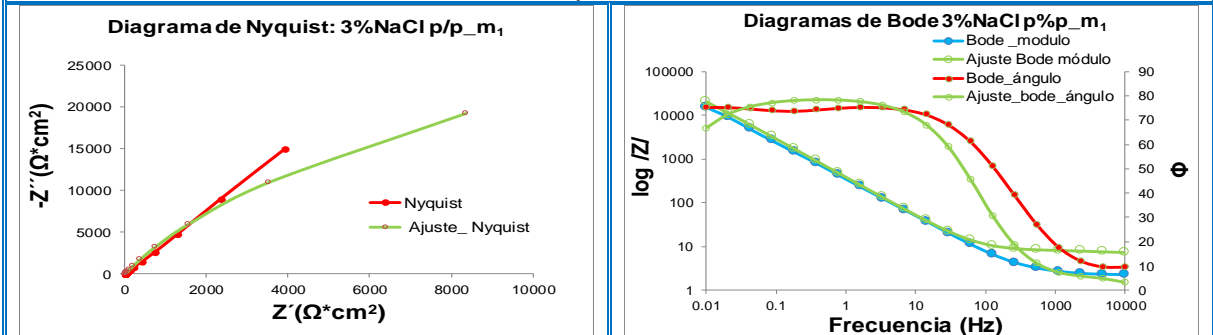


2205 pH [6-8] 3% NaCl.

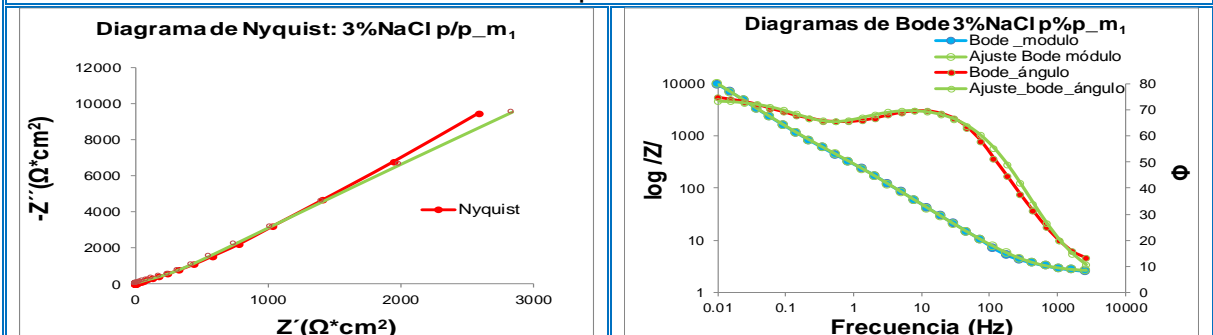
Tiempo: Inicialmente



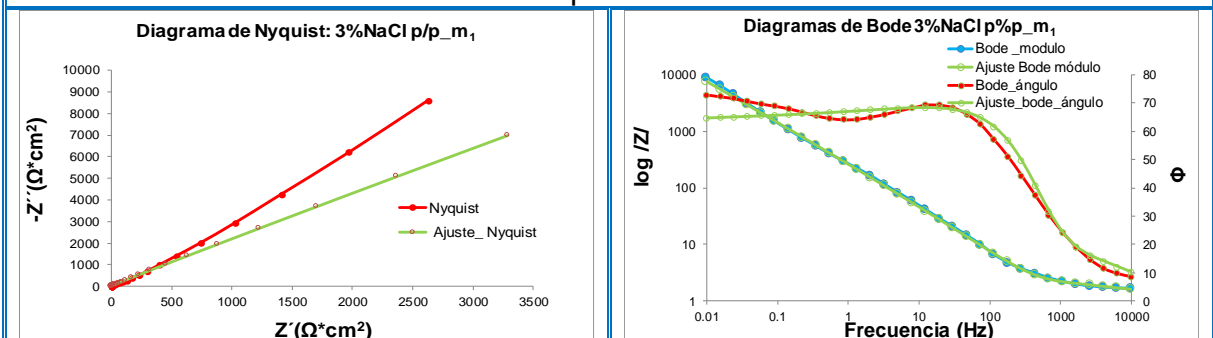
Tiempo: 1 mes

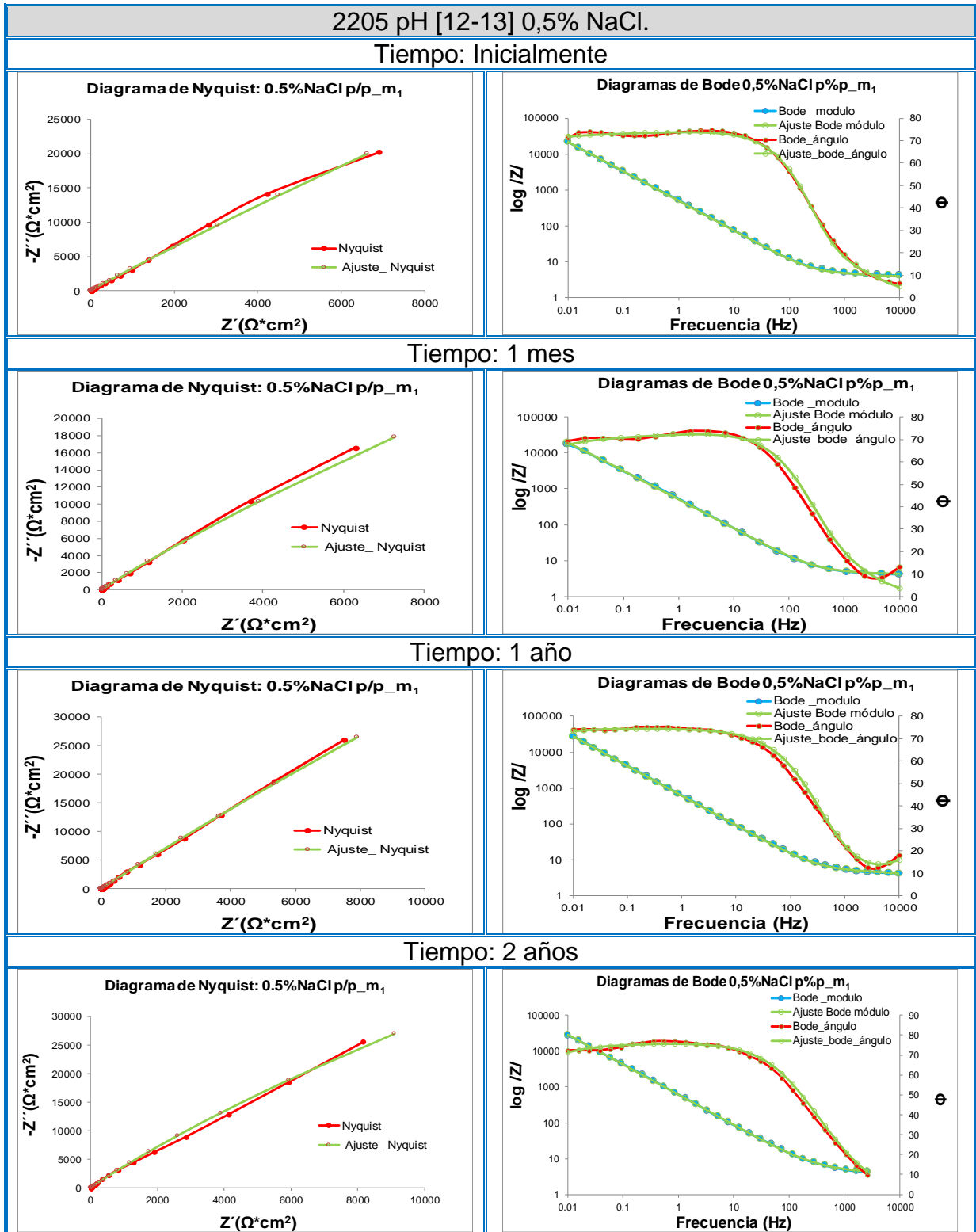


Tiempo: 1 año



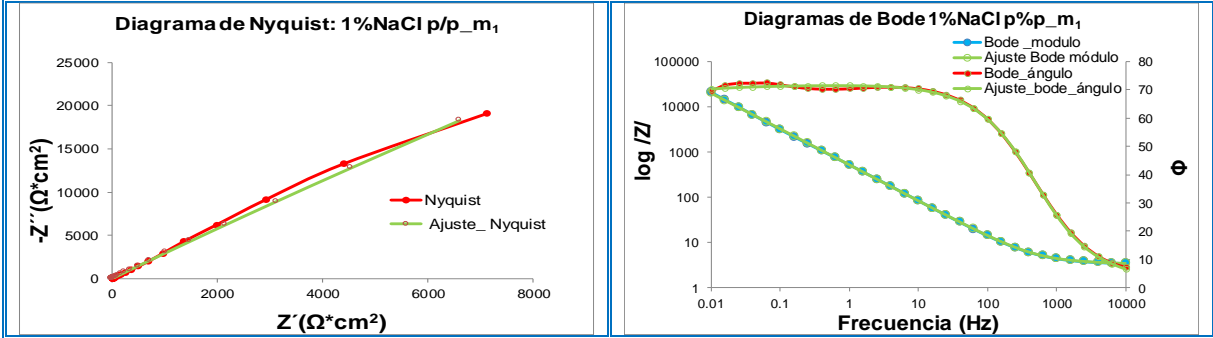
Tiempo: 2 años



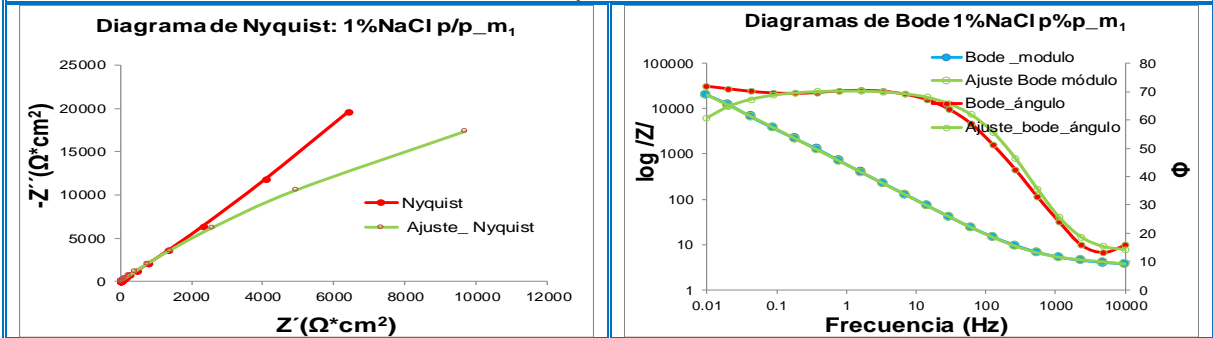


2205 pH [12-13] 1% NaCl.

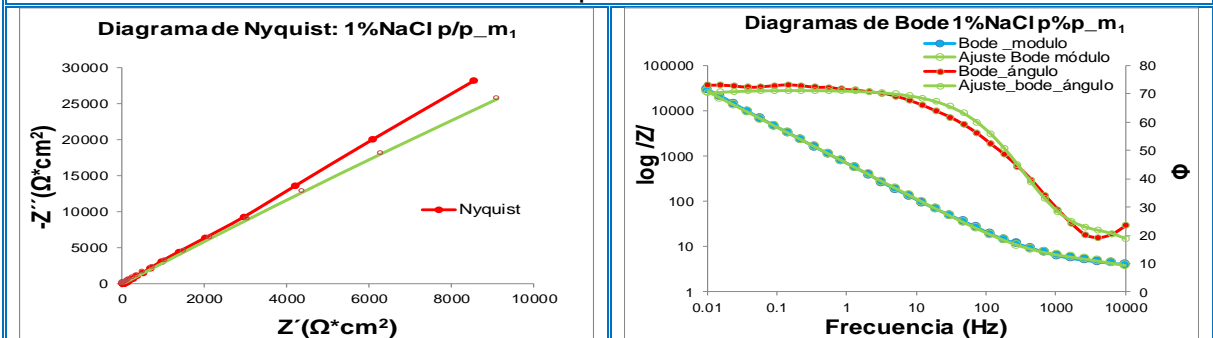
Tiempo: Inicialmente



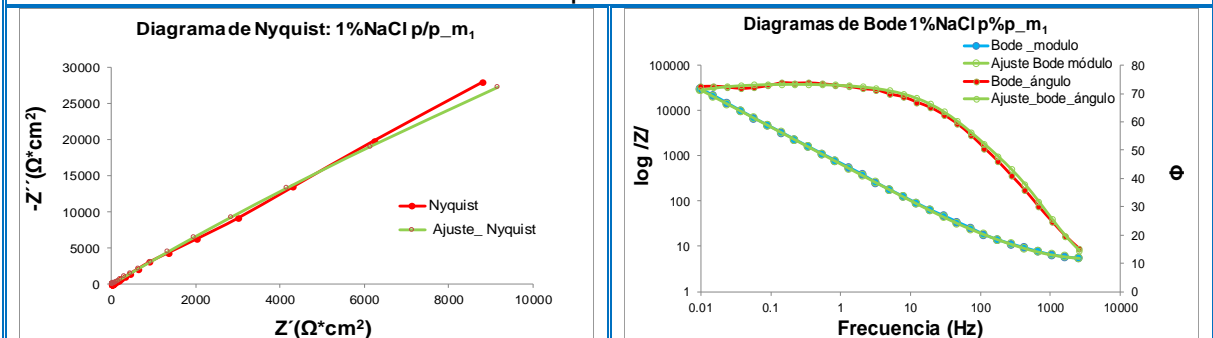
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

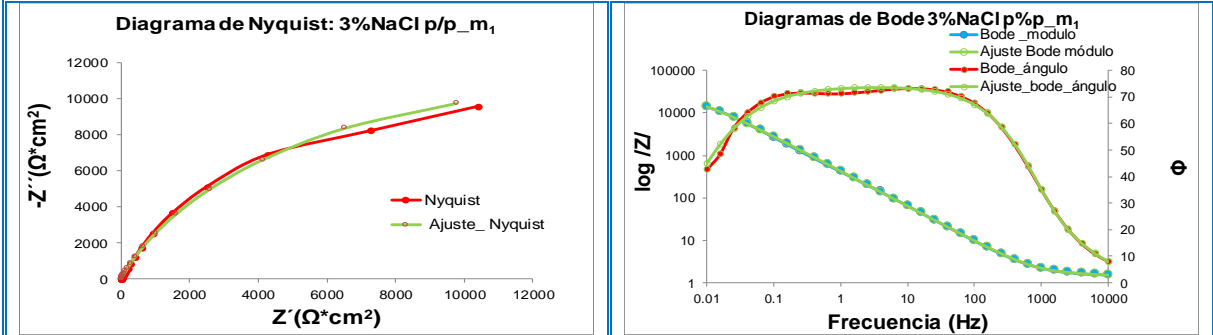


Tiempo: 2 años

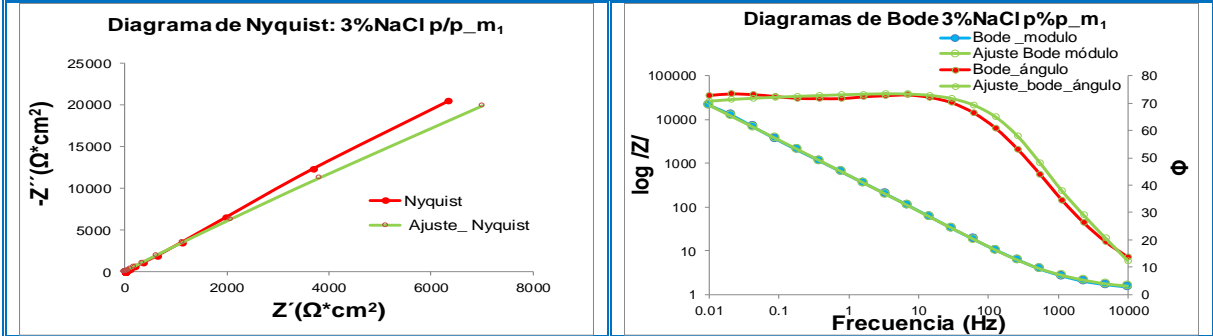


2205 pH [12-13] 3% NaCl.

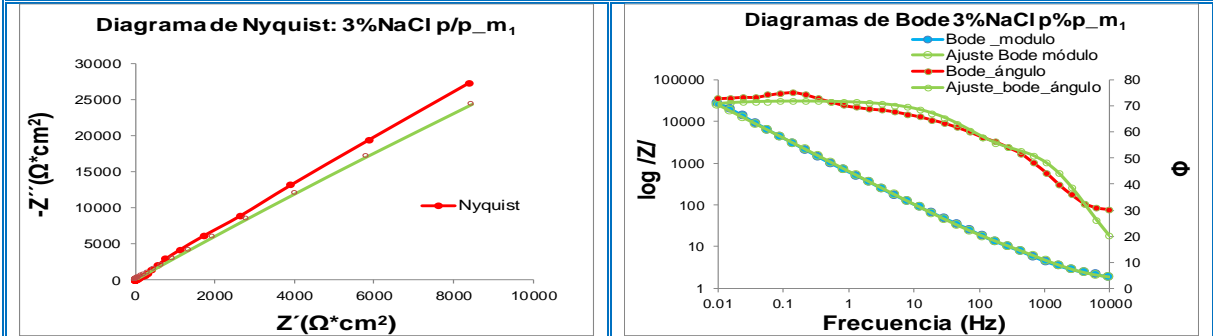
Tiempo: Inicialmente



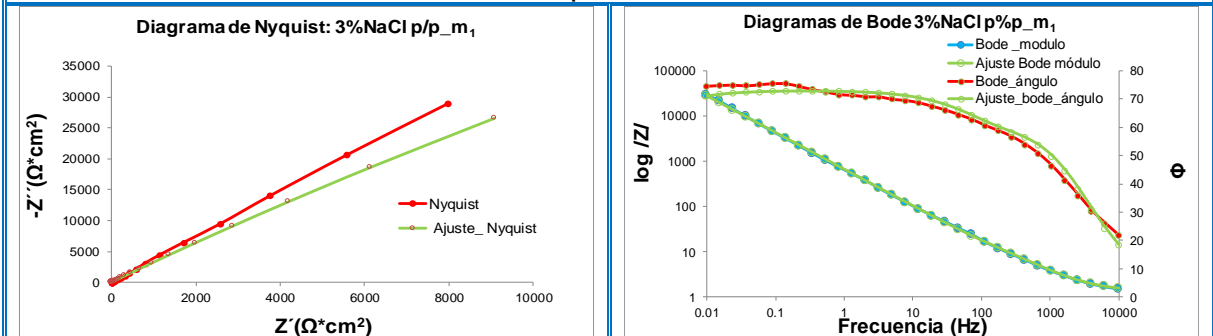
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

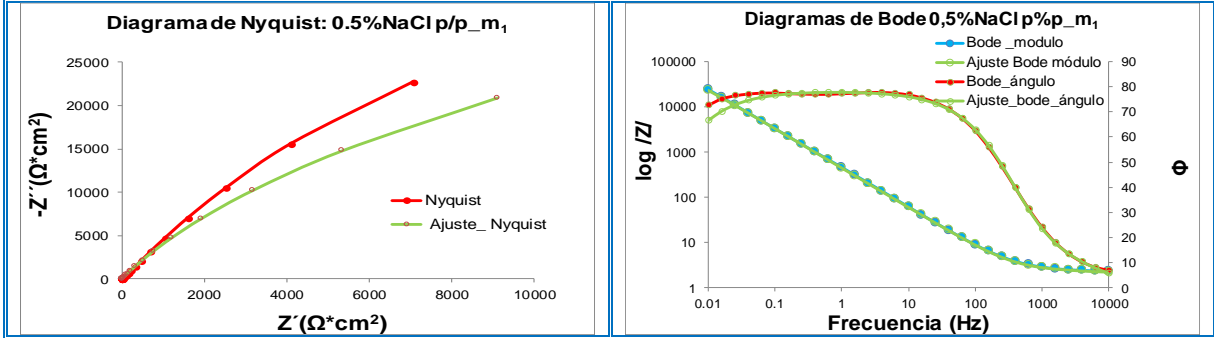


Tiempo: 2 años

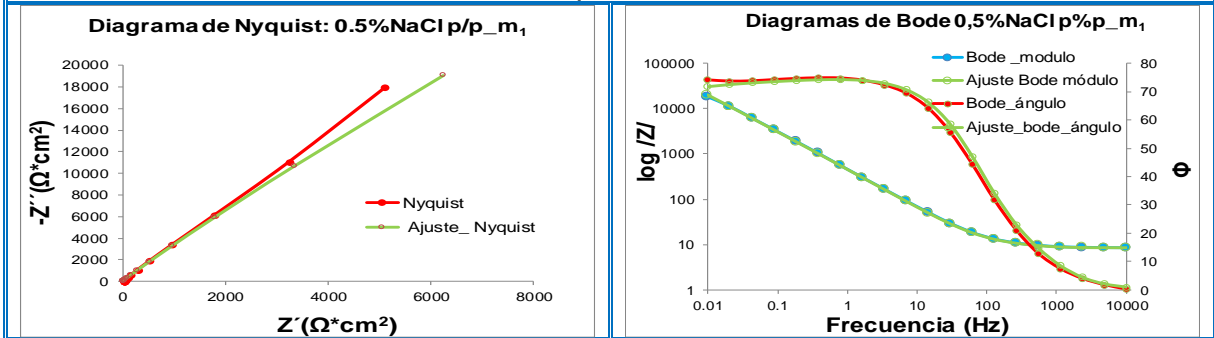


AISI 3016-L pH [6-8] 0,5% NaCl.

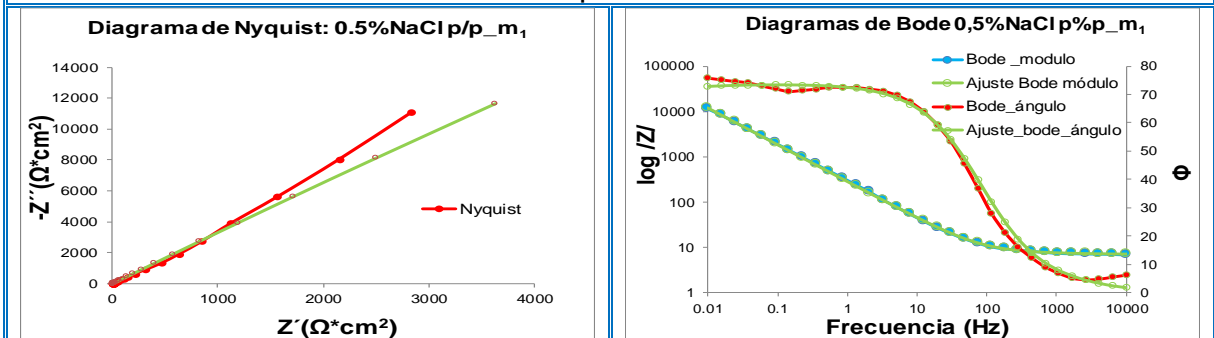
Tiempo: Inicialmente



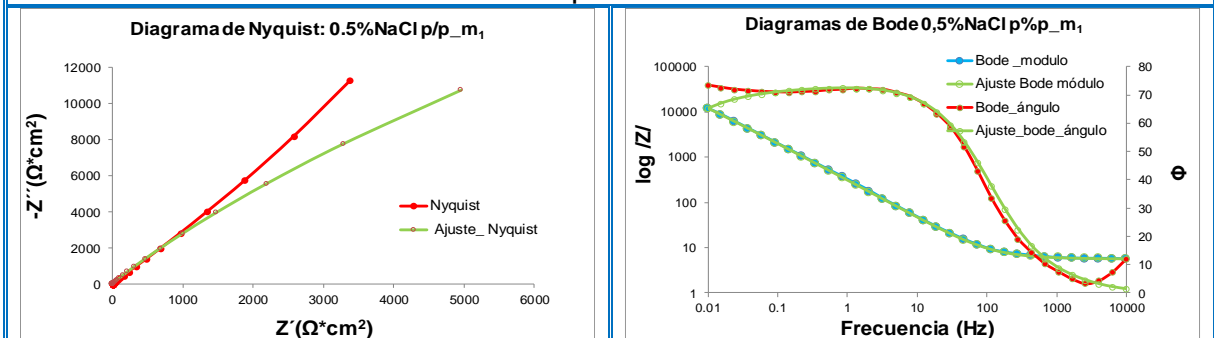
Tiempo: 1 mes

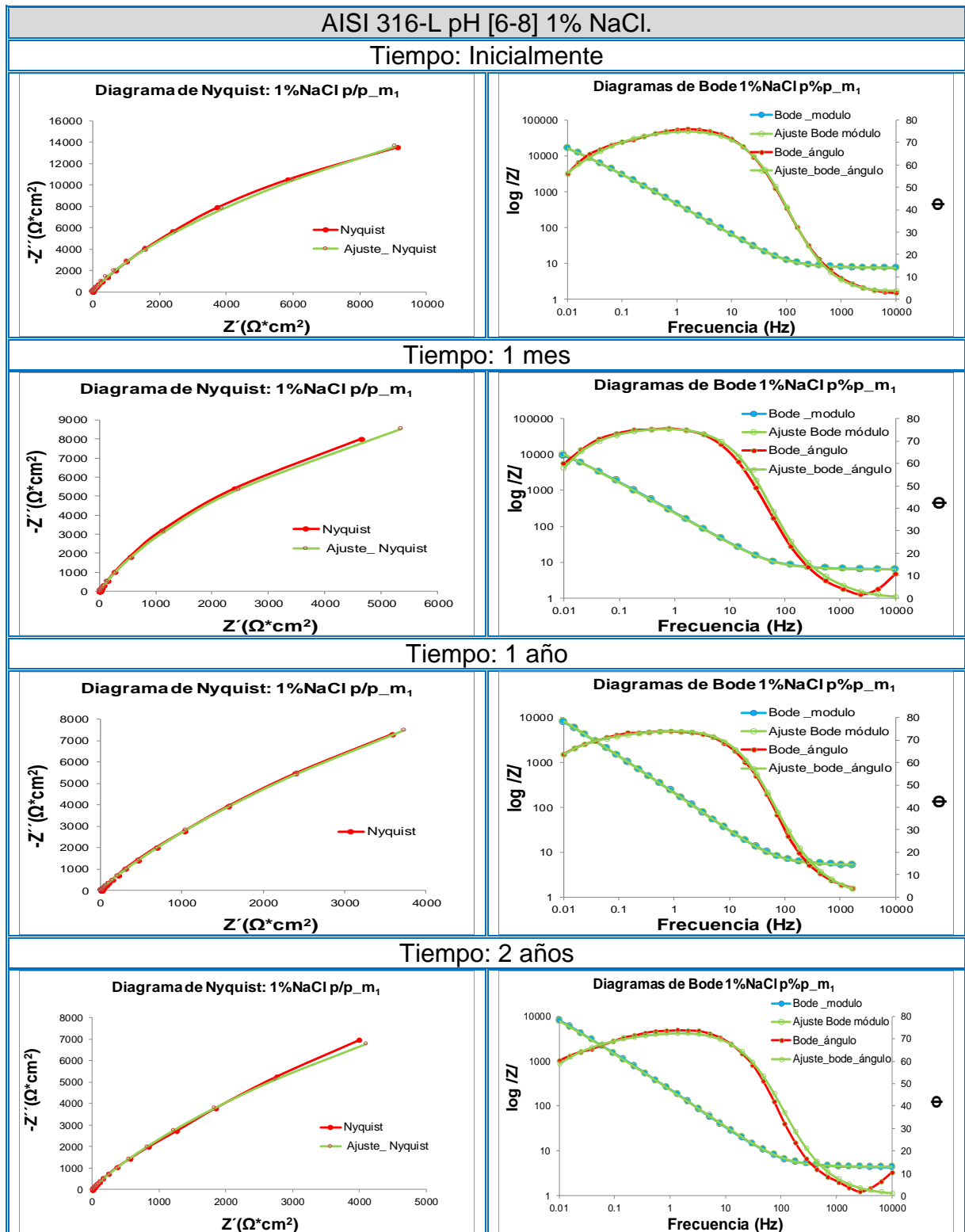


Tiempo: 1 año



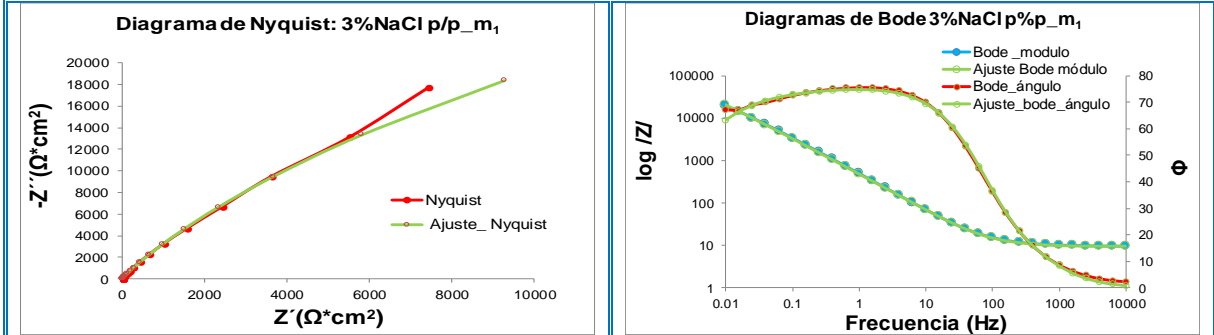
Tiempo: 2 años



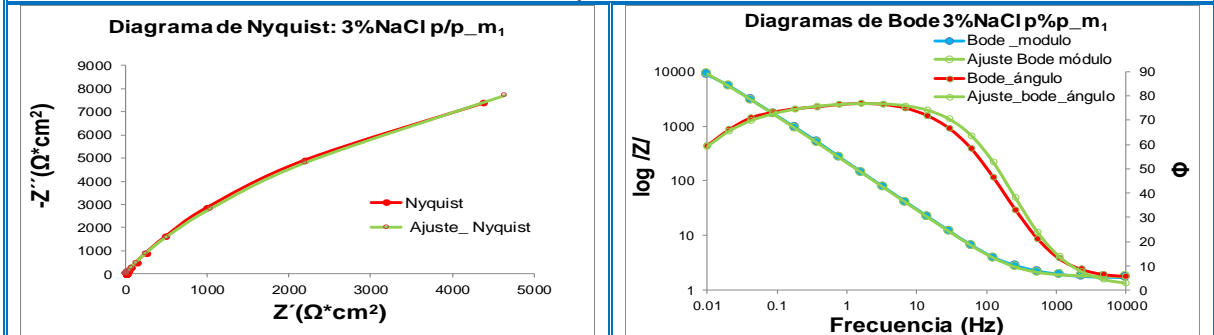


AISI 316-L pH [6-8] 3% NaCl.

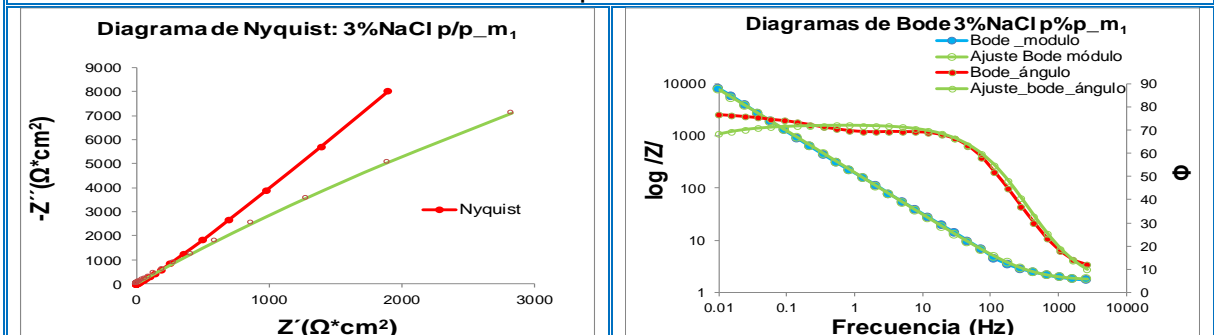
Tiempo: Inicialmente



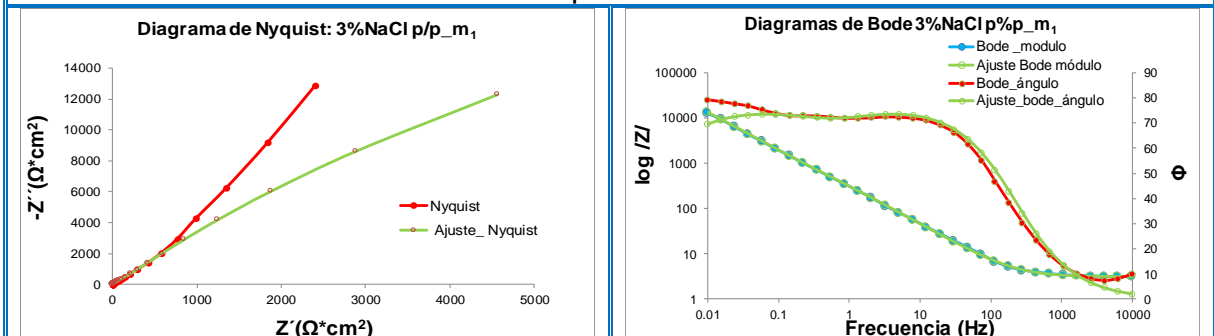
Tiempo: 1 mes

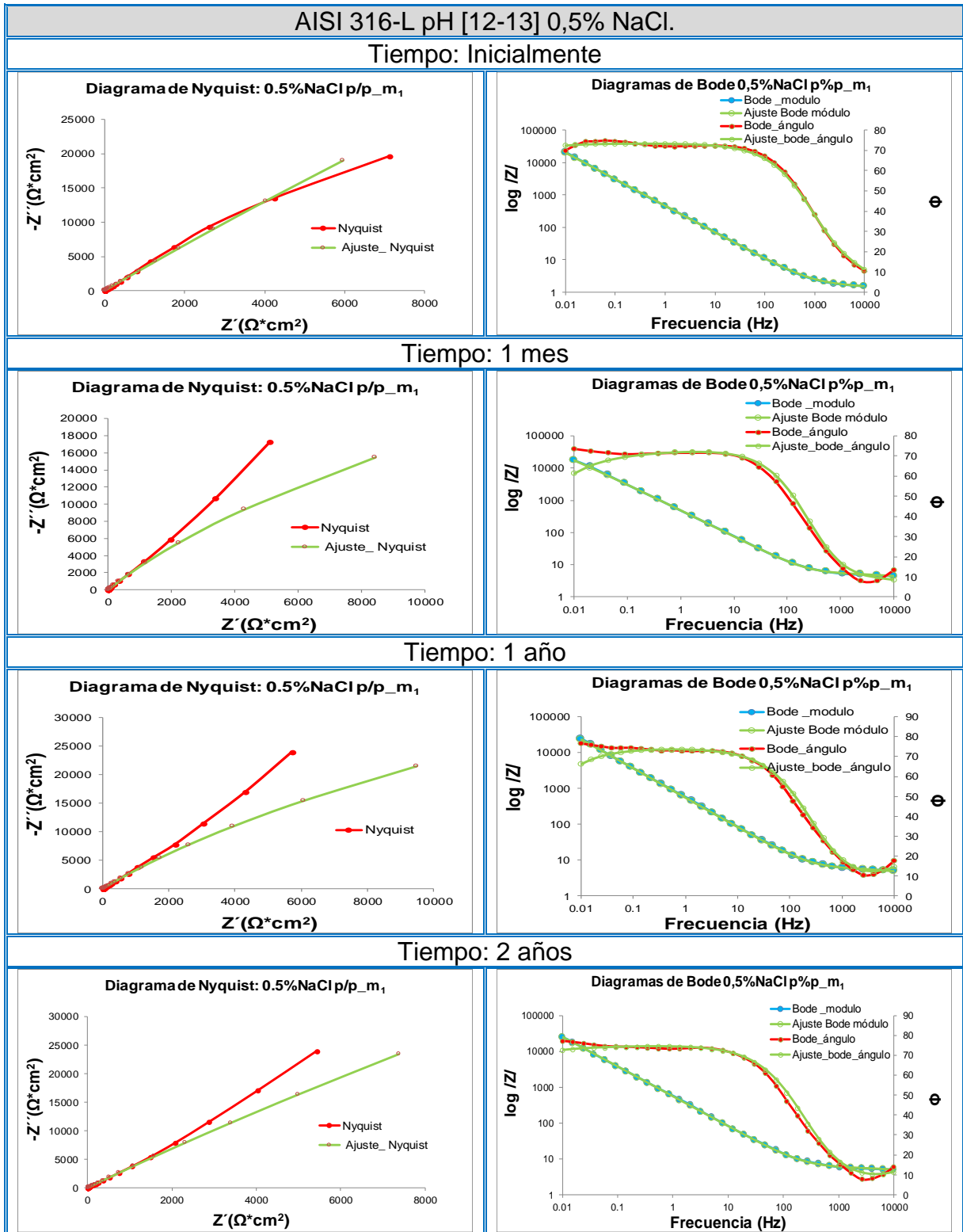


Tiempo: 1 año



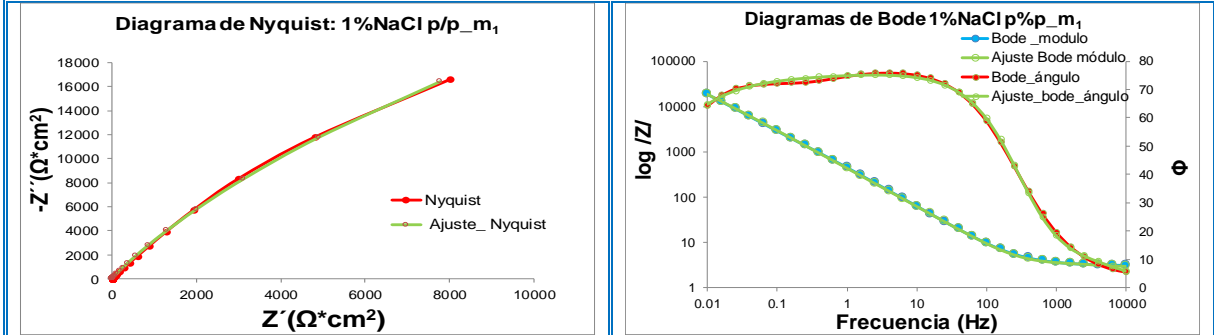
Tiempo: 2 años



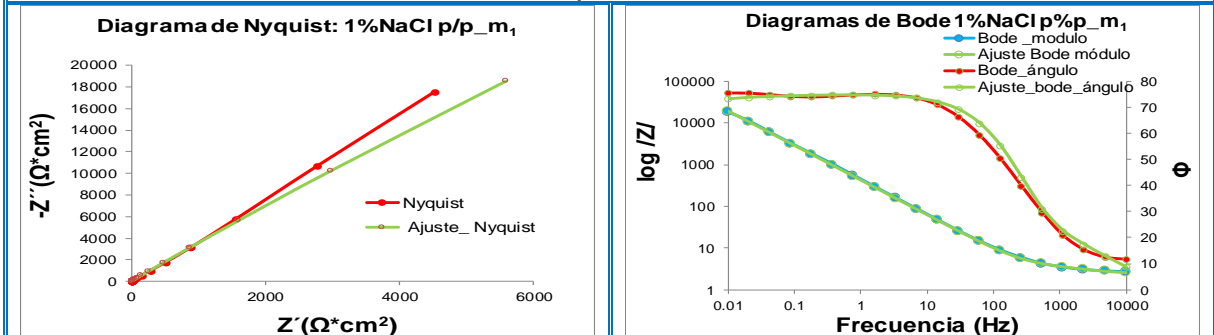


AISI 316-L pH [12-13] 1% NaCl.

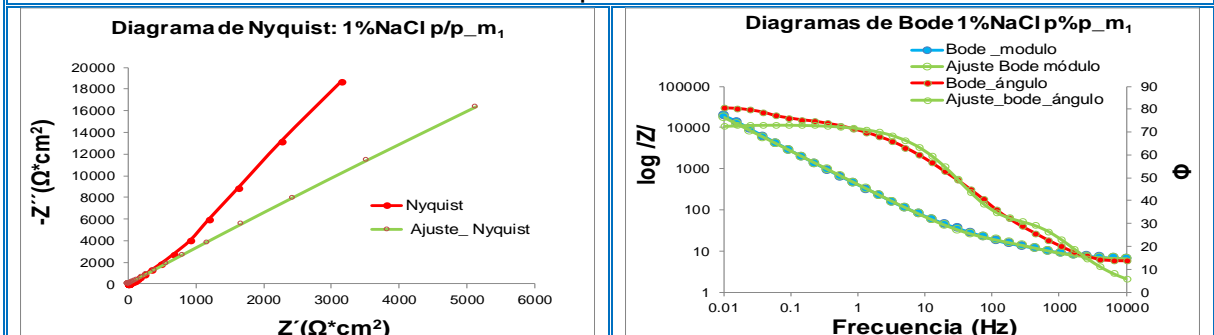
Tiempo: Inicialmente



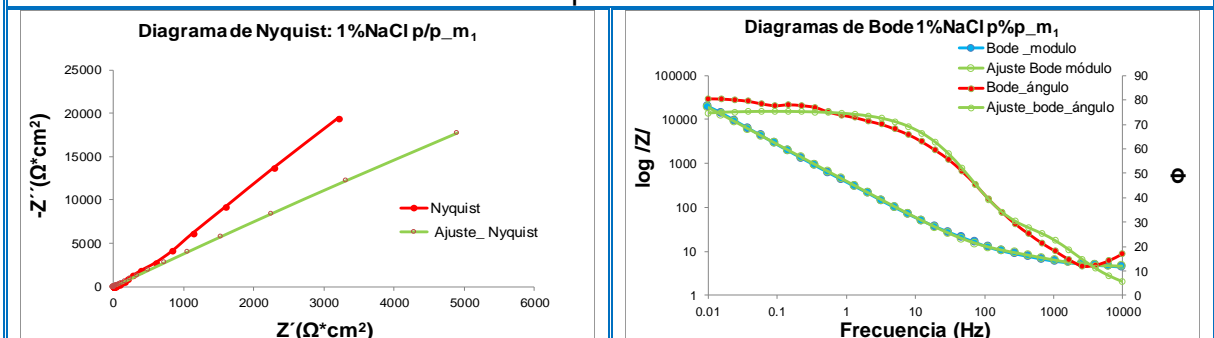
Tiempo: 1 mes

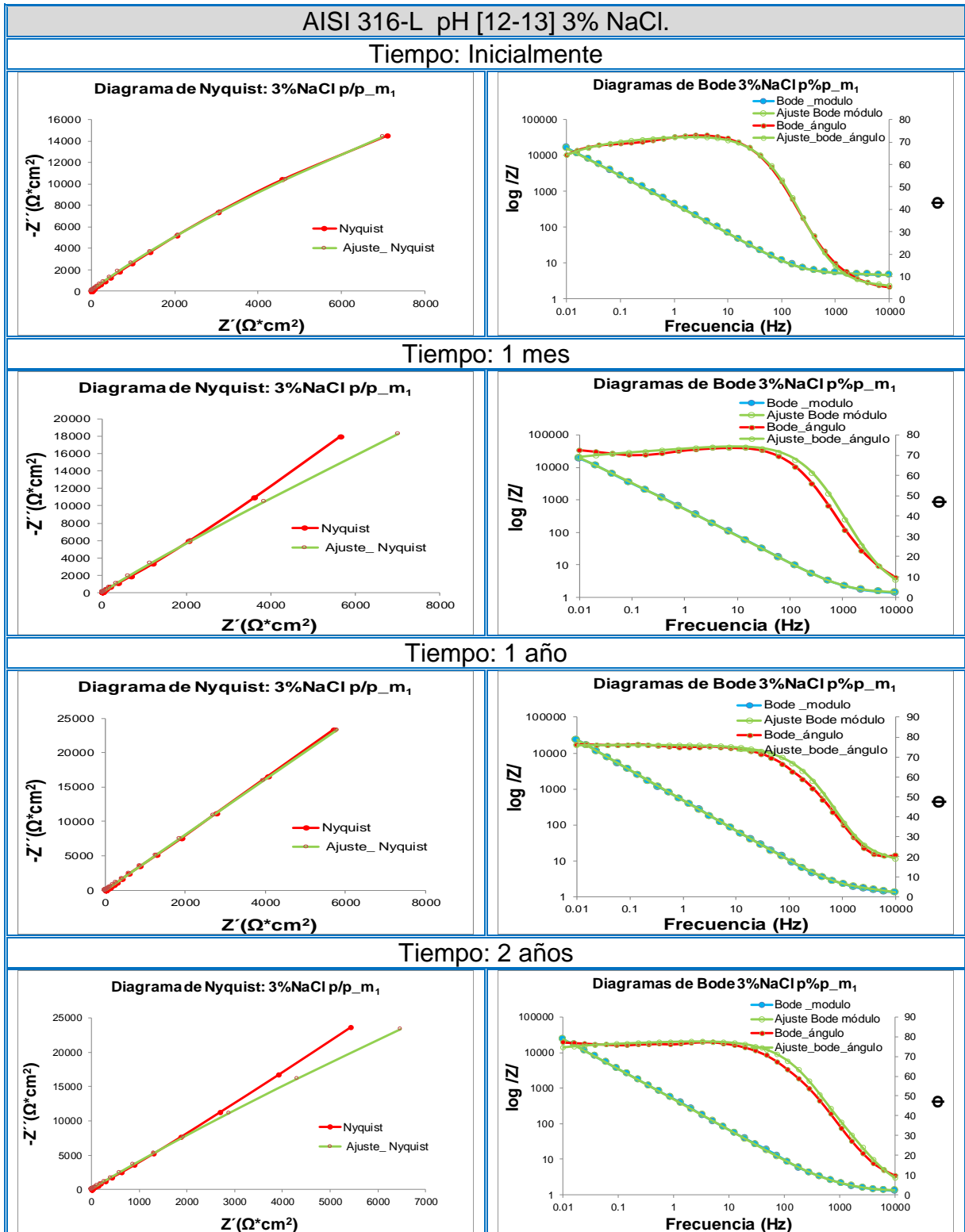


Tiempo: 1 año



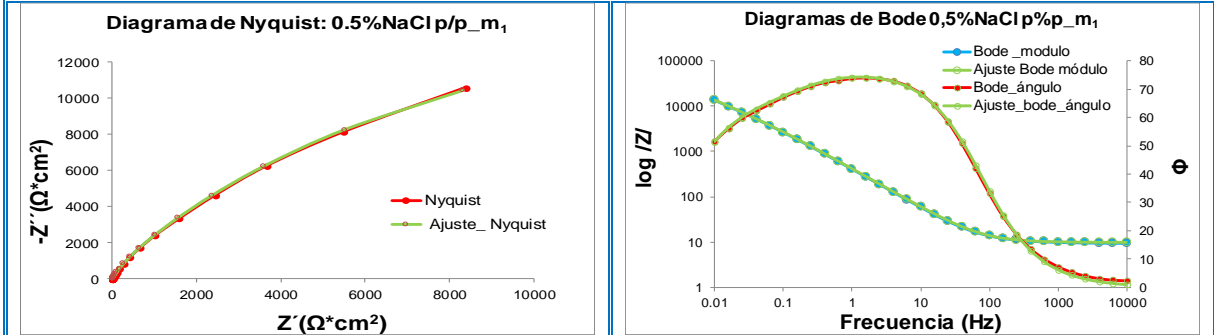
Tiempo: 2 años



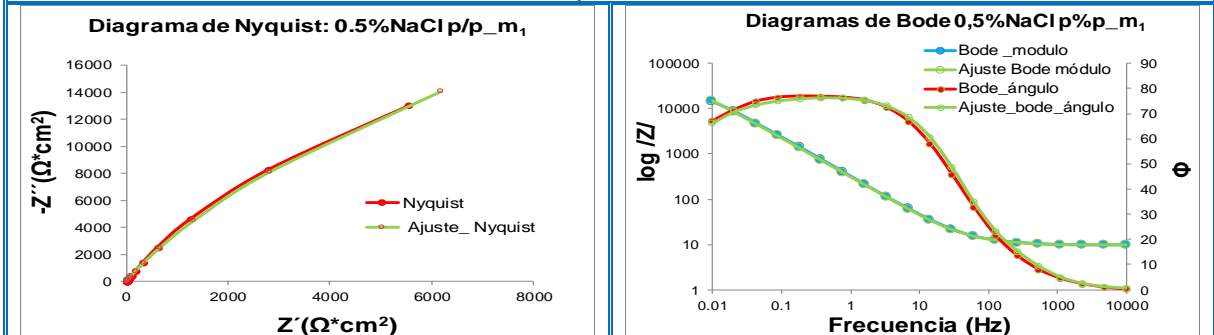


AISI 304-L pH [6-8] 0,5% NaCl.

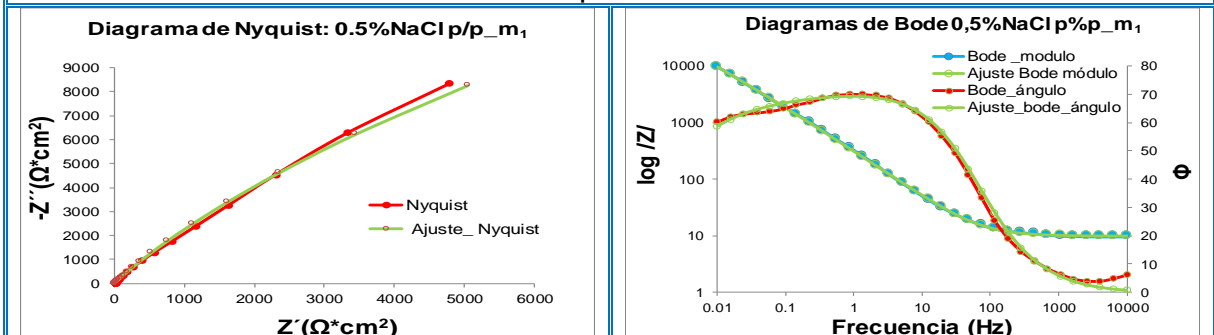
Tiempo: Inicialmente



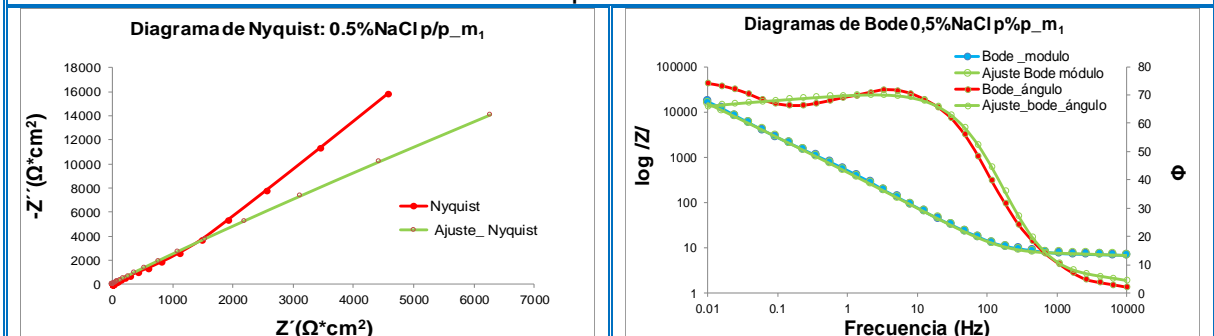
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

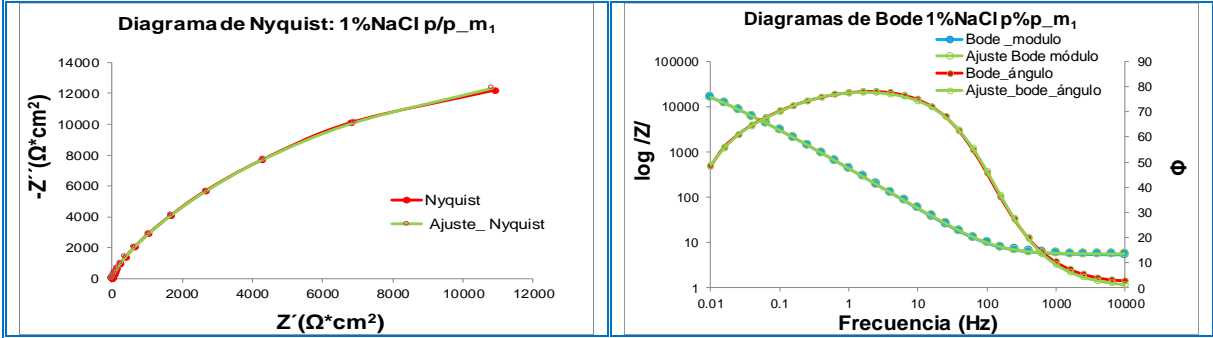


Tiempo: 2 años

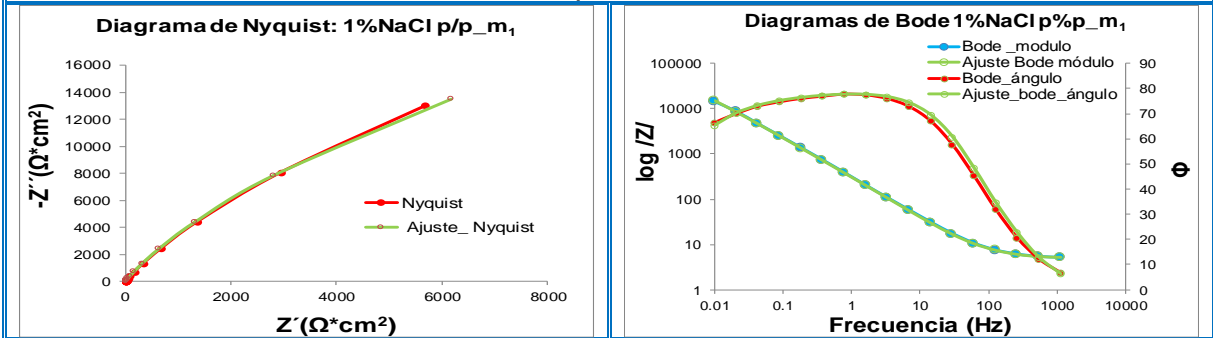


AISI 304-L pH [6-8] 1% NaCl.

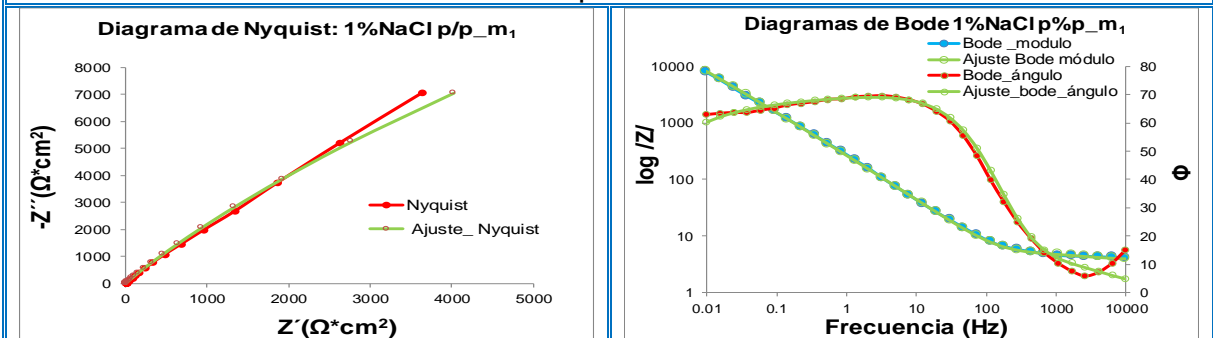
Tiempo: Inicialmente



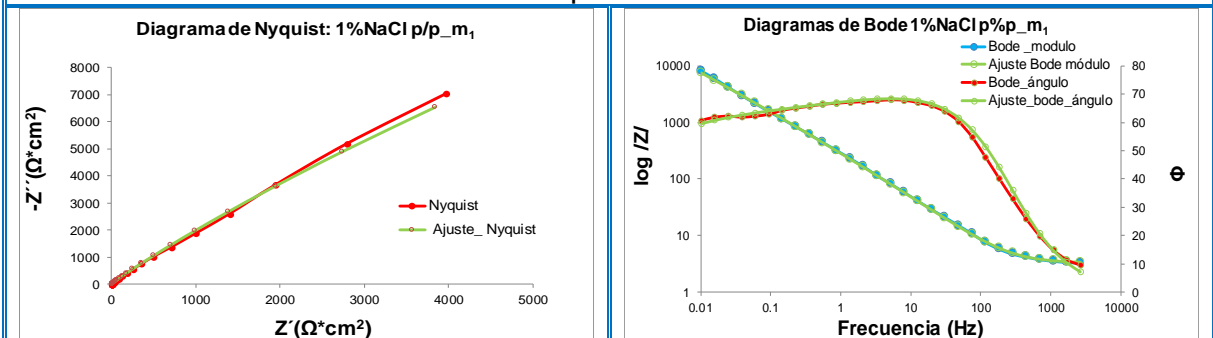
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

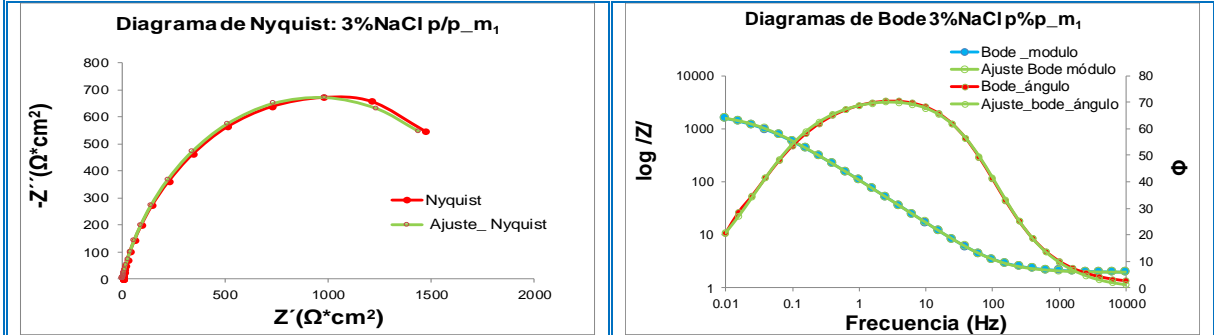


Tiempo: 2 años

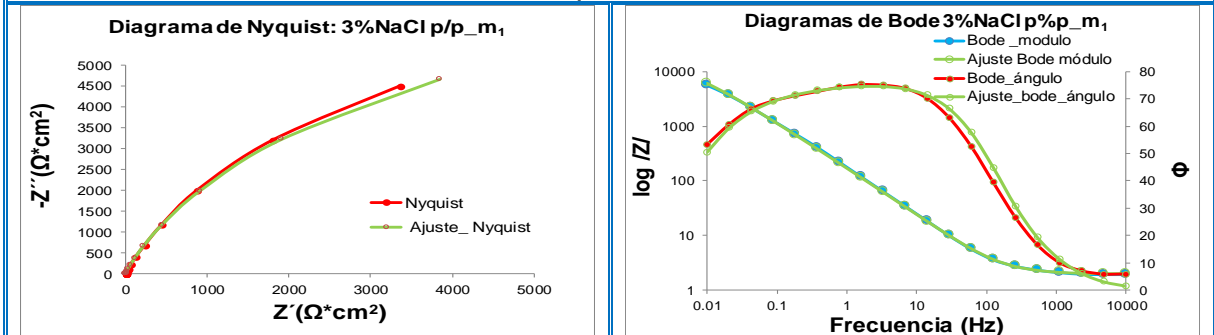


AISI 304-L pH [6-8] 3% NaCl.

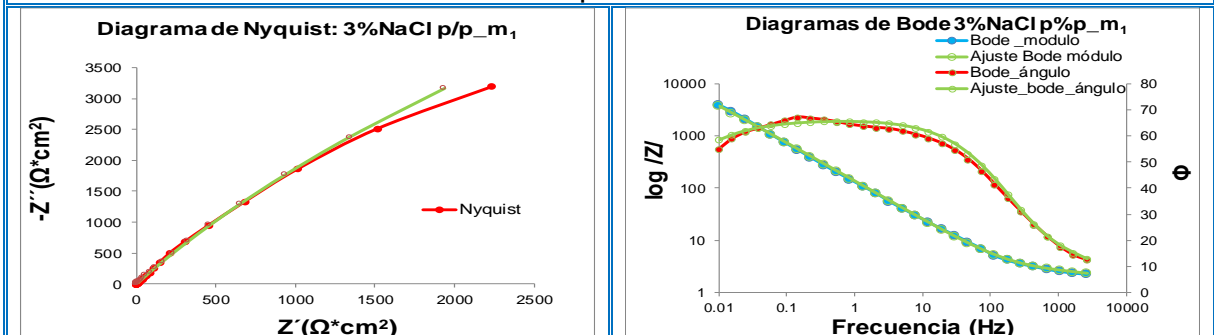
Tiempo: Inicialmente



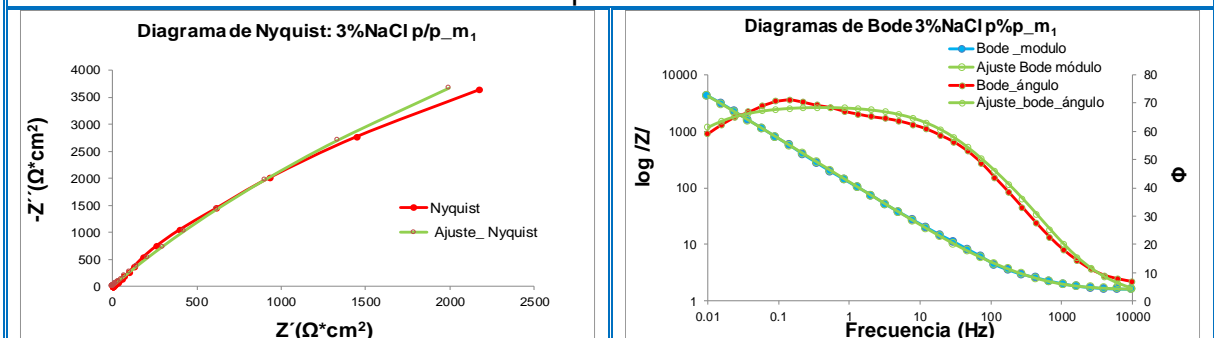
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

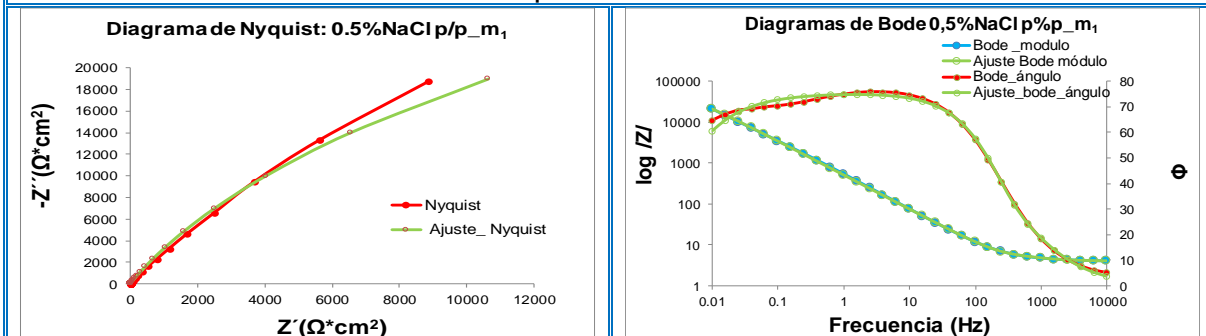


Tiempo: 2 años

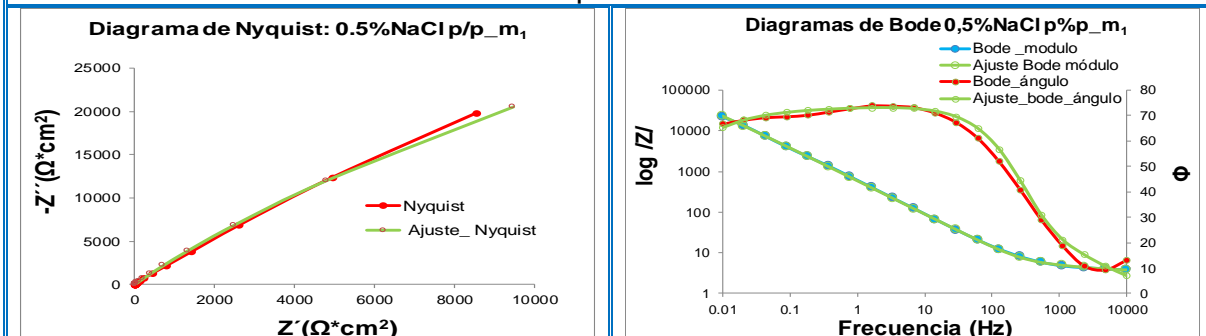


AISI 304-L pH [12-13] 0,5% NaCl.

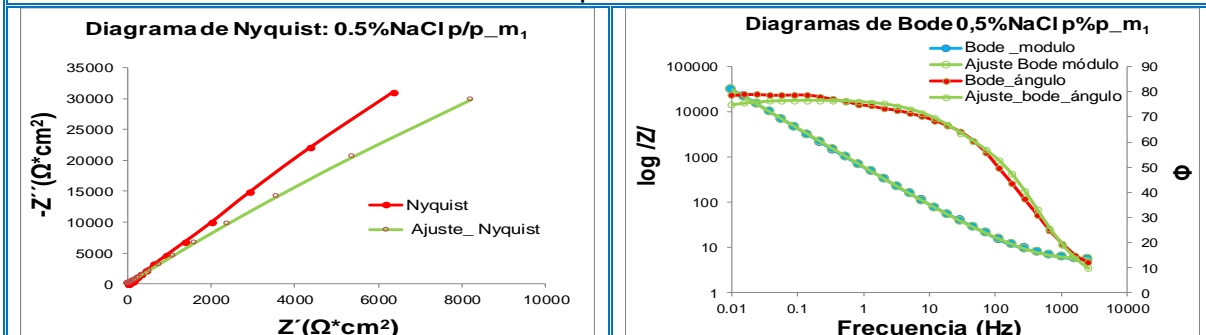
Tiempo: Inicialmente



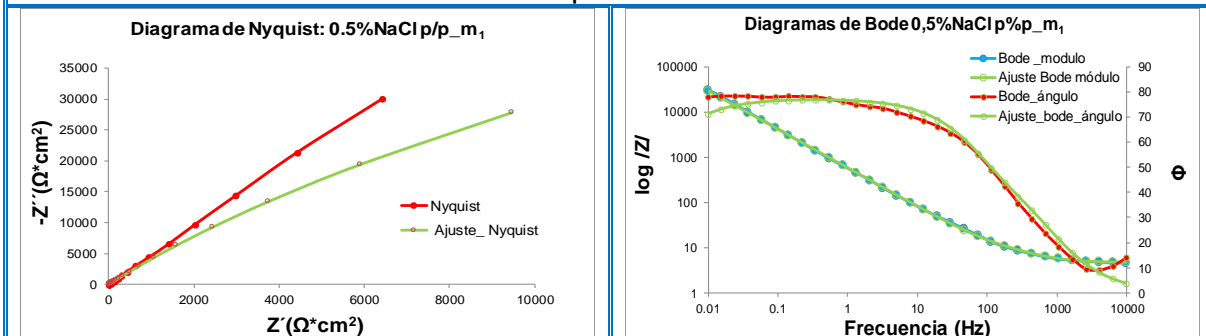
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

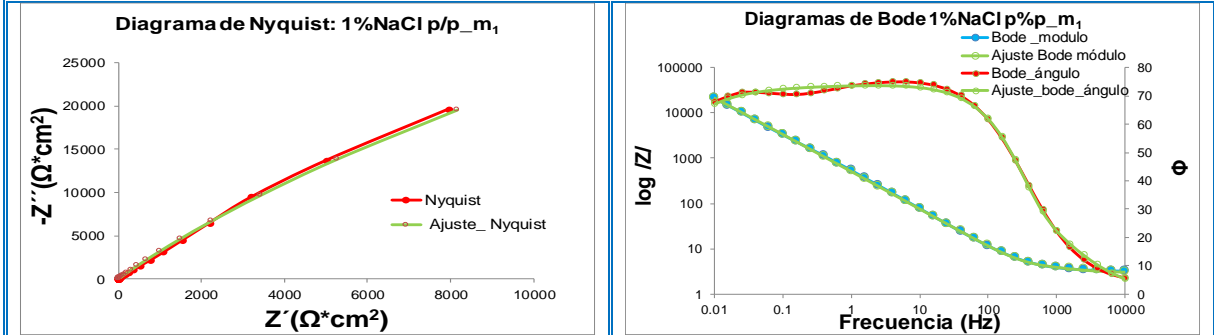


Tiempo: 2 años

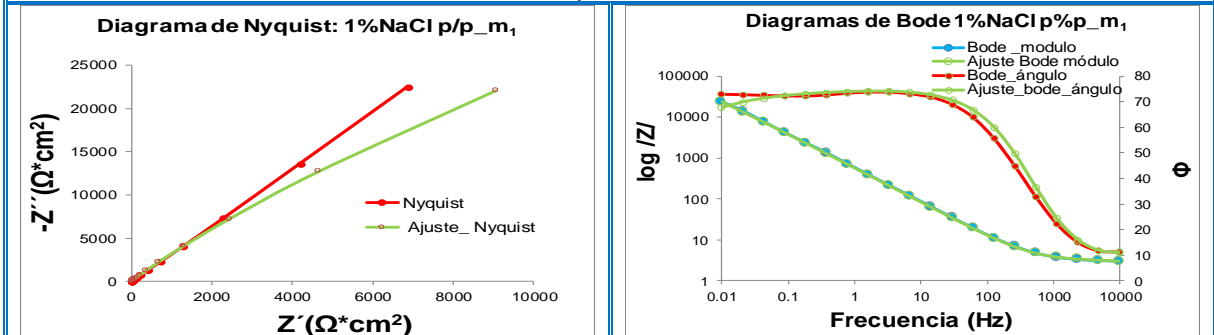


AISI 304-L pH [12-13] 1% NaCl.

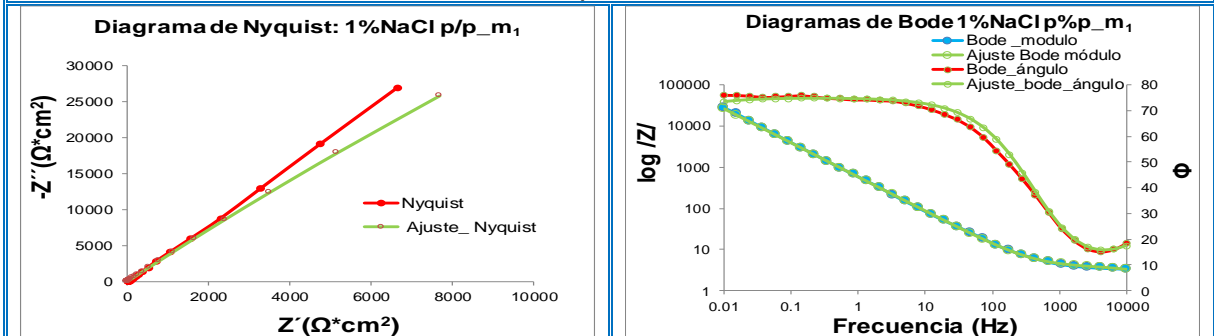
Tiempo: Inicialmente



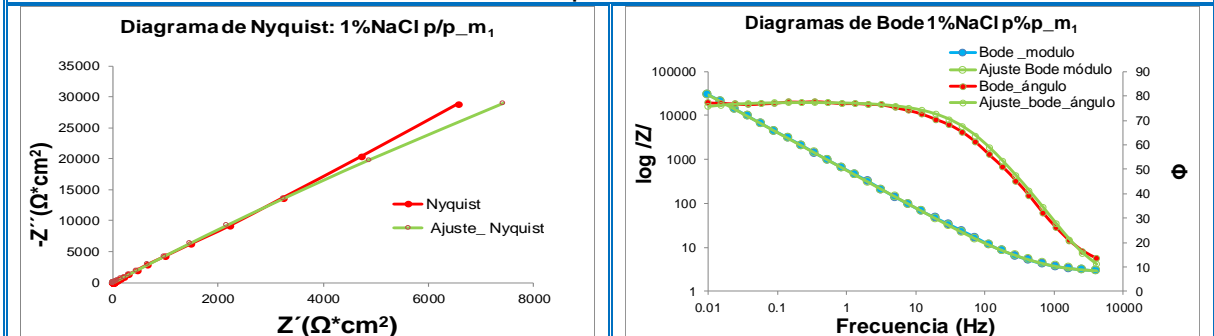
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

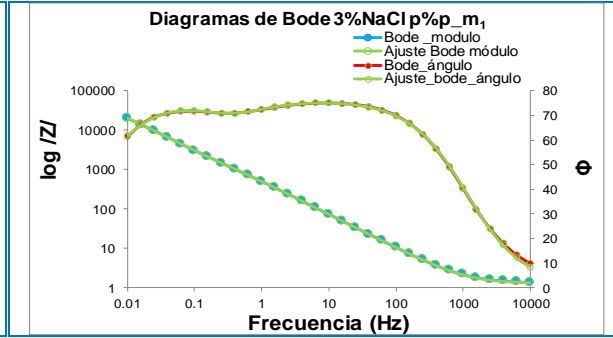
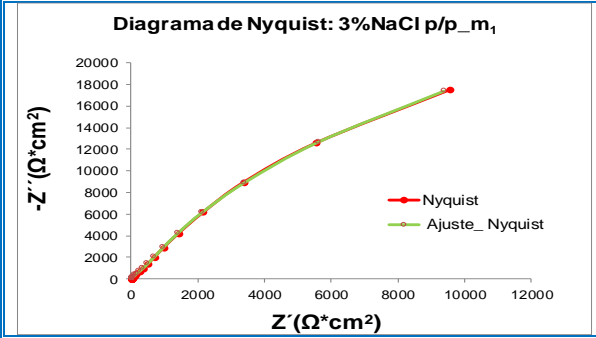


Tiempo: 2 años

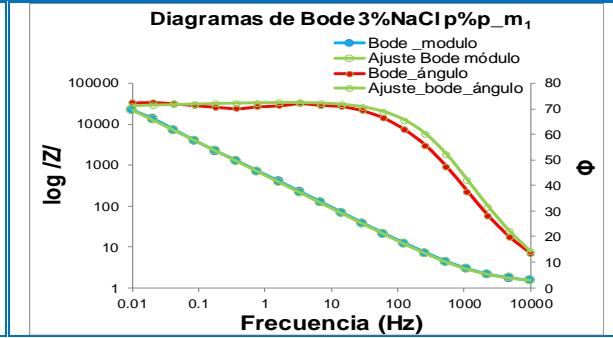
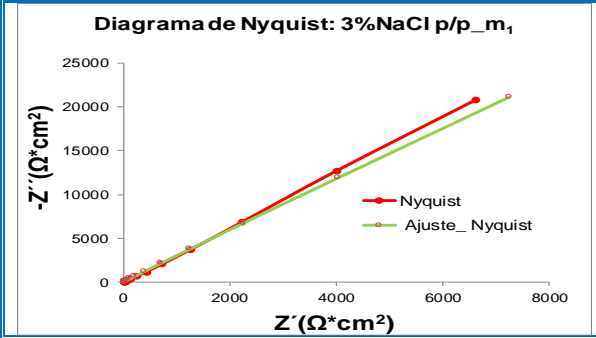


AISI 304-L pH [12-13] 3% NaCl.

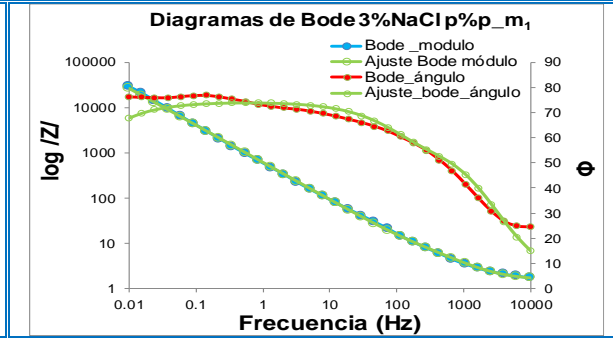
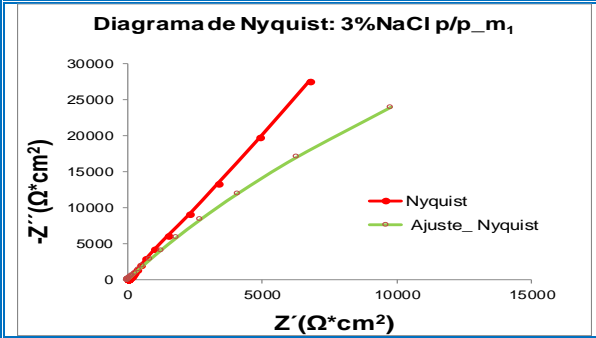
Tiempo: Inicialmente



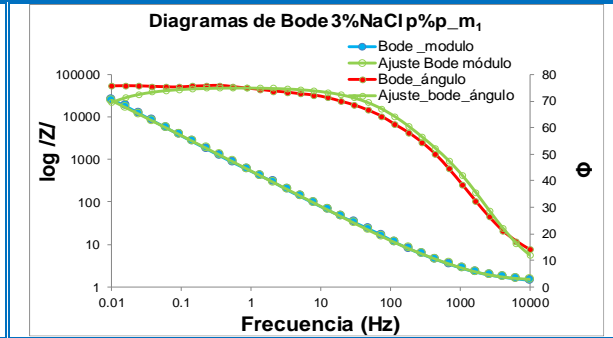
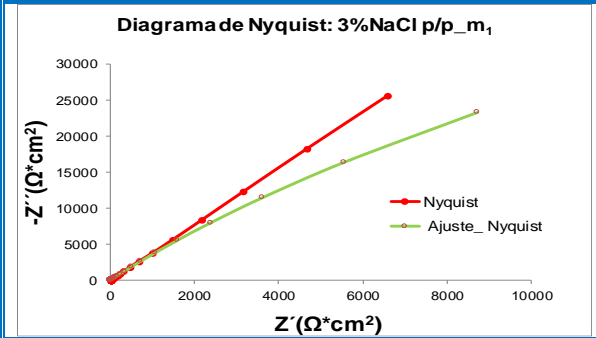
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

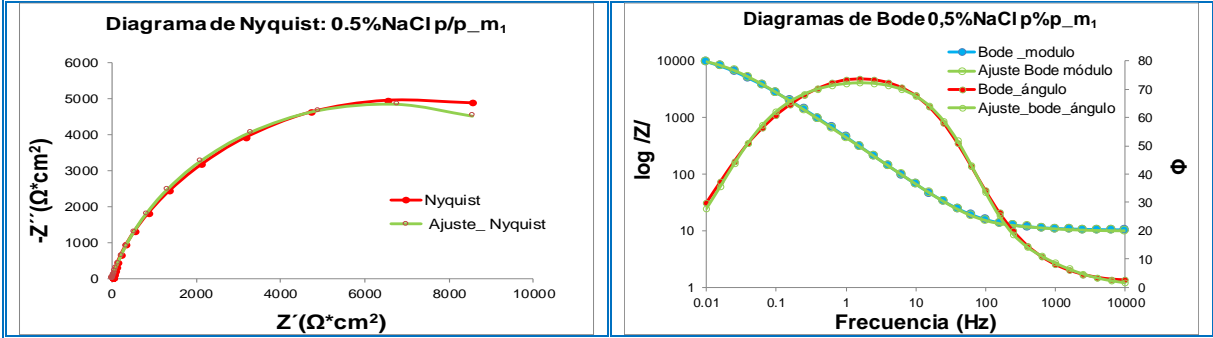


Tiempo: 2 años

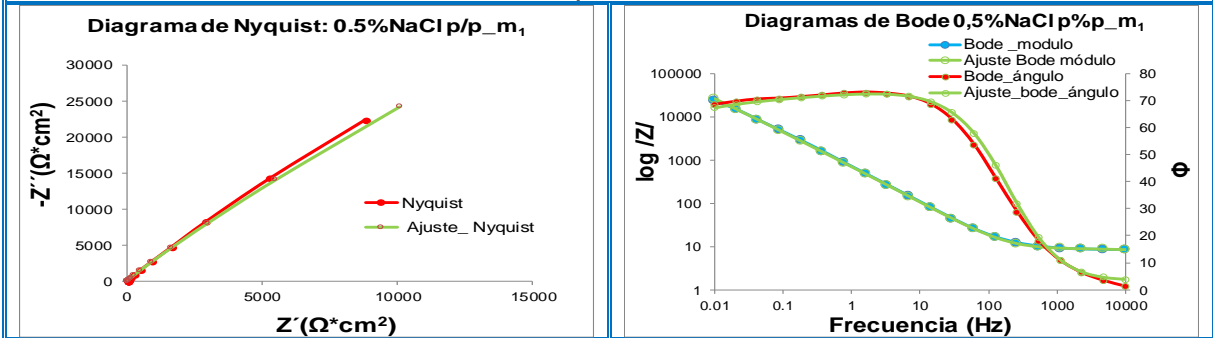


2304 pH [6-8] 0,5% NaCl.

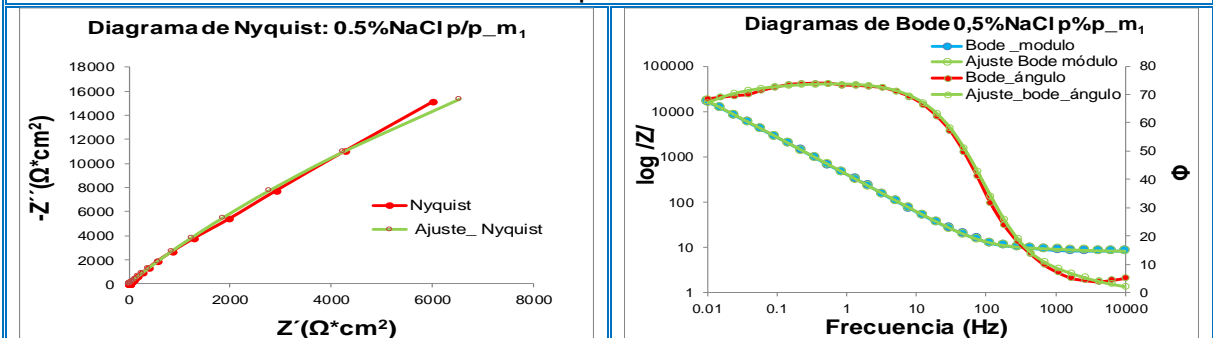
Tiempo: Inicialmente



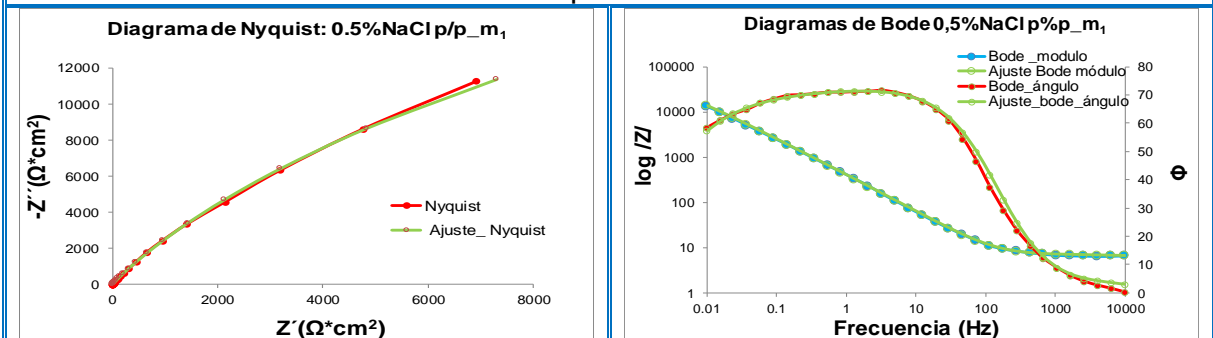
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

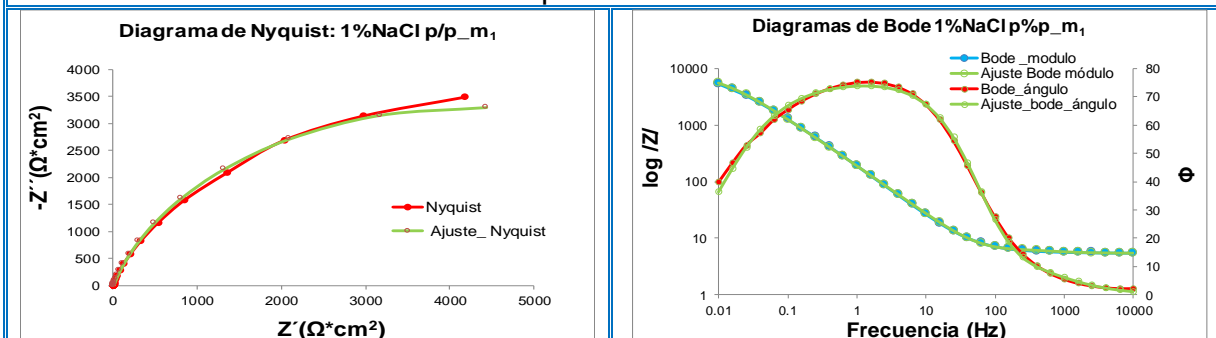


Tiempo: 2 años

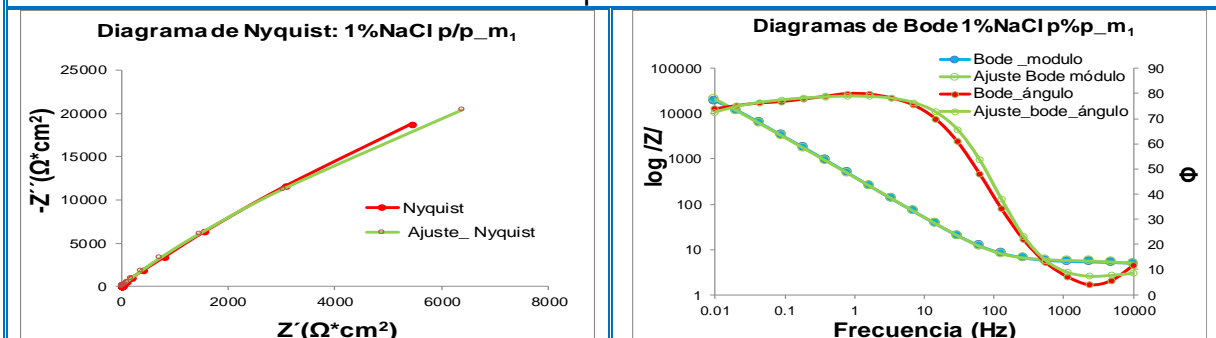


2304 pH [6-8] 1% NaCl.

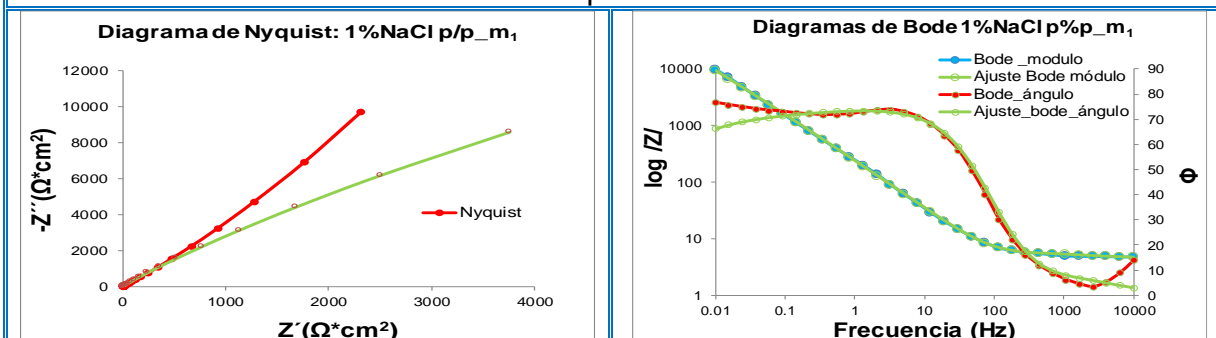
Tiempo: Inicialmente



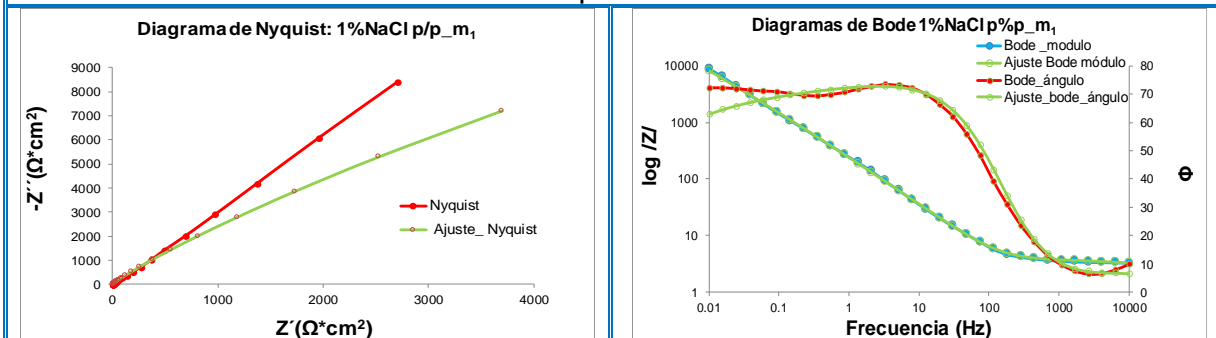
Tiempo: 1 mes



Tiempo: 1 año

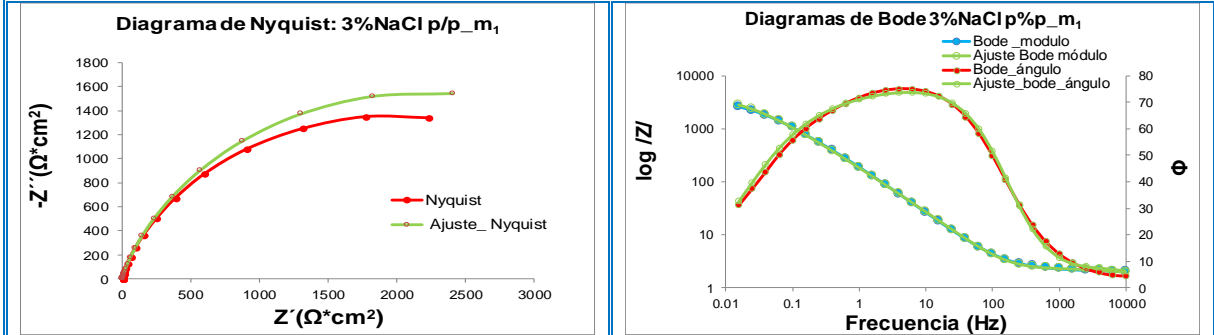


Tiempo: 2 años

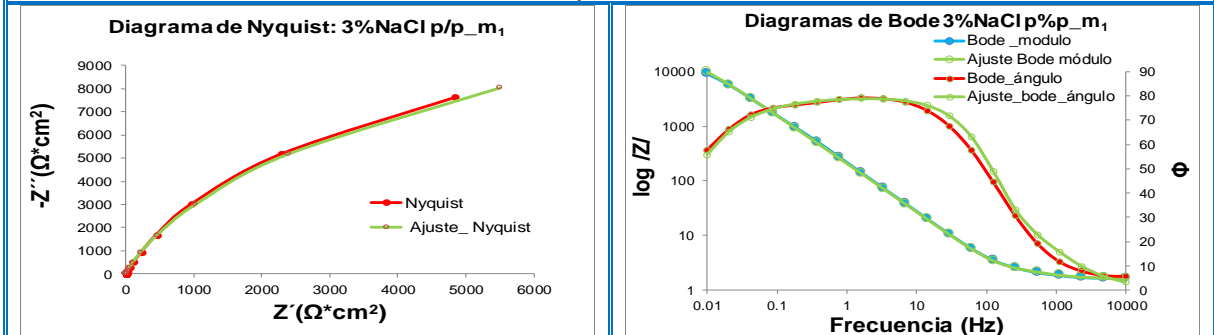


2304 pH [6-8] 3% NaCl.

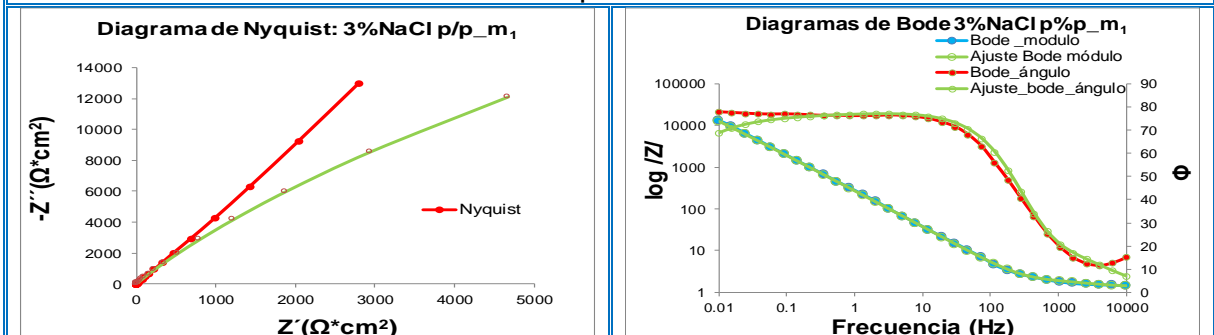
Tiempo: Inicialmente



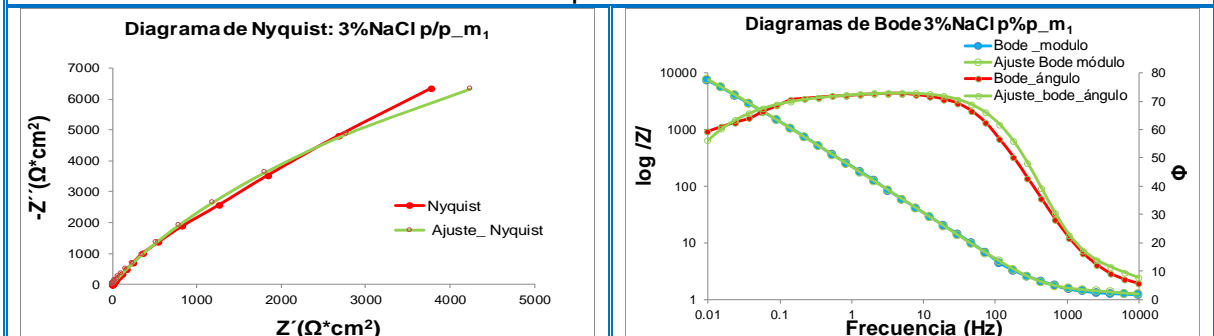
Tiempo: 1 mes

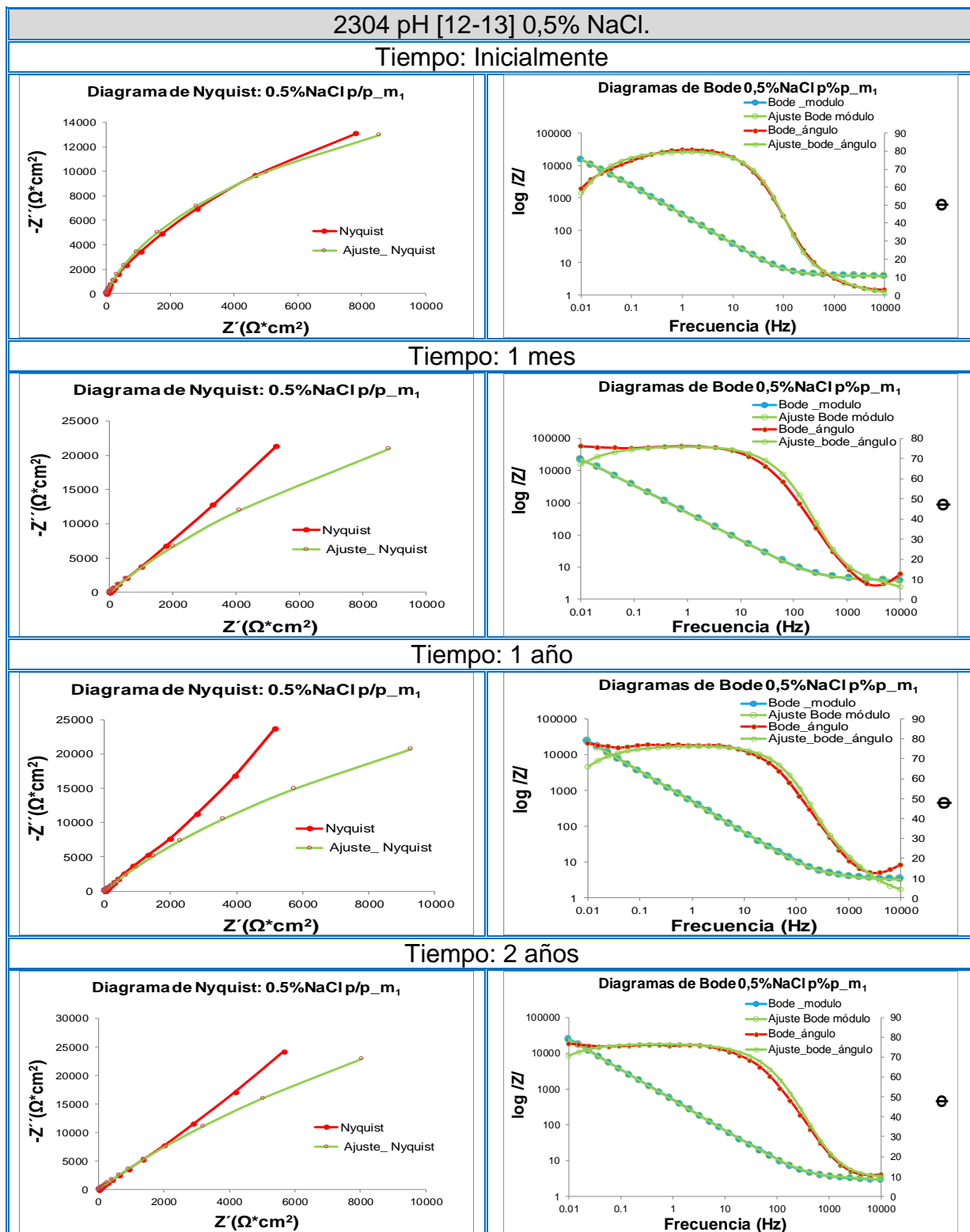


Tiempo: 1 año



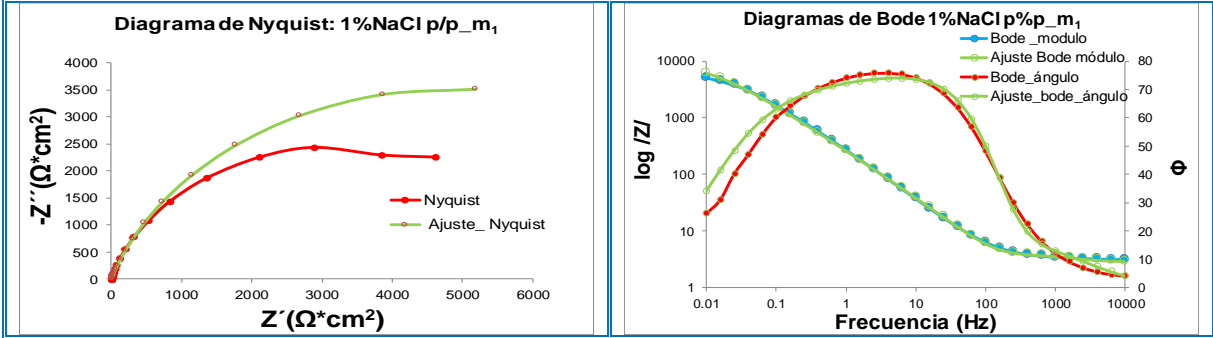
Tiempo: 2 años



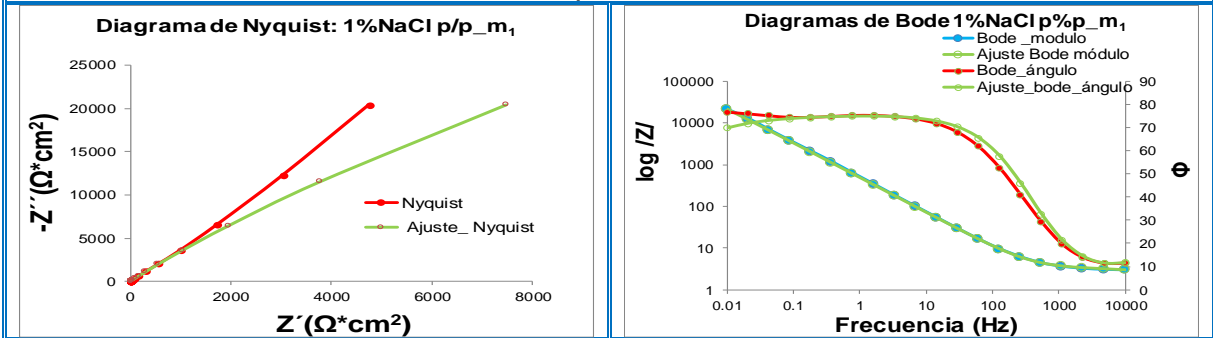


2304 pH [12-13] 1% NaCl.

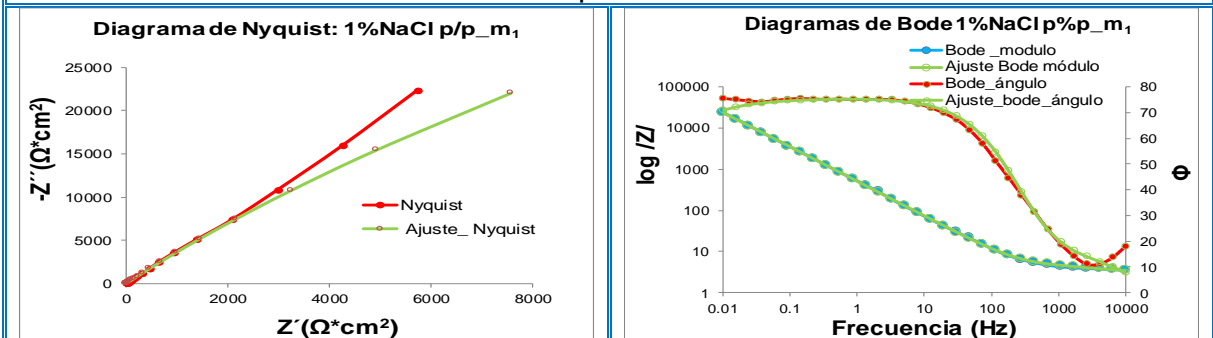
Tiempo: Inicialmente



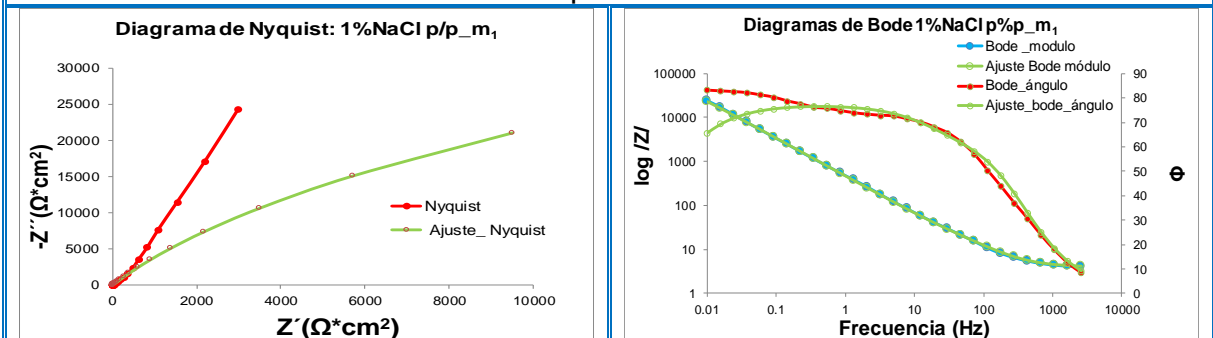
Tiempo: 1 mes

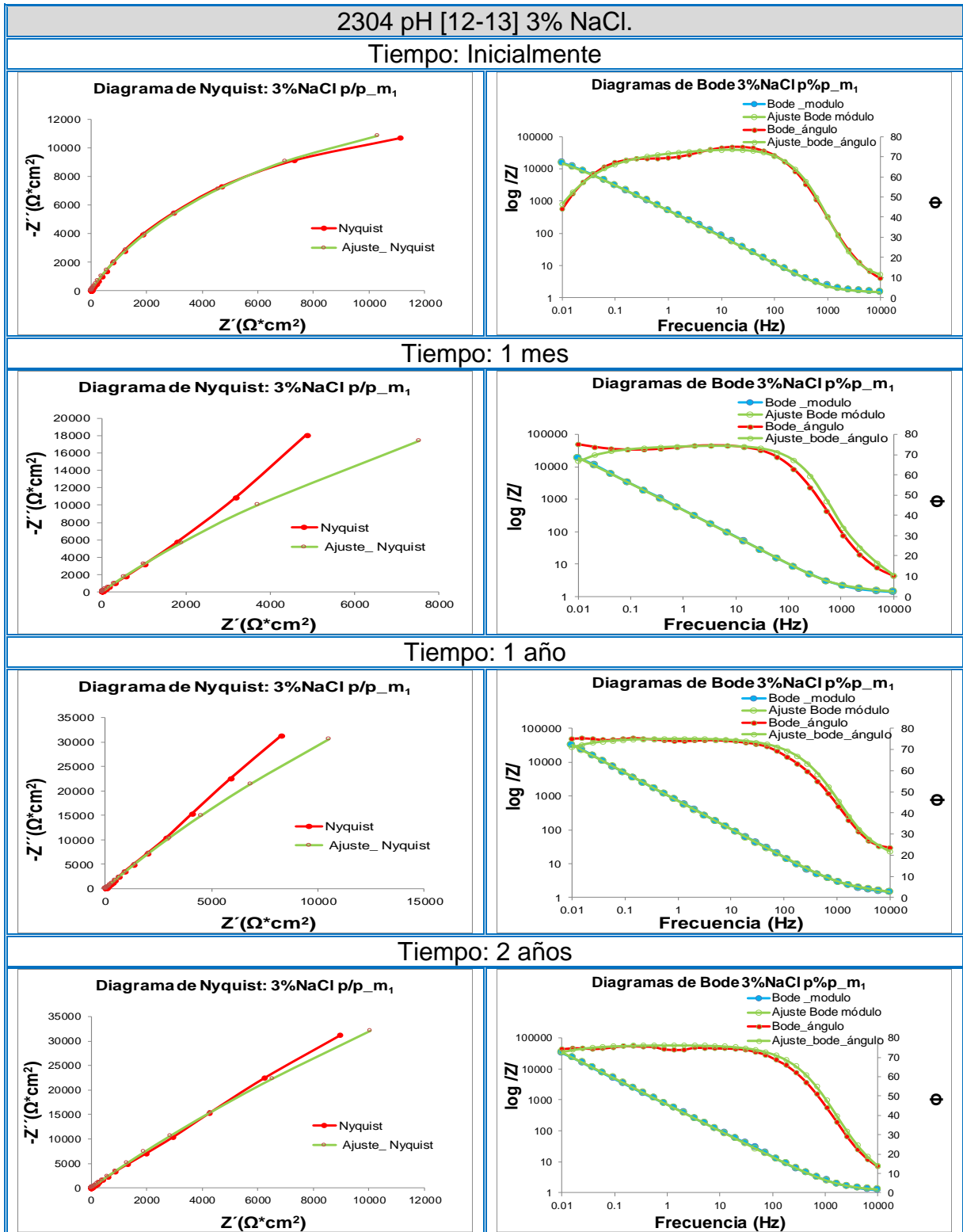


Tiempo: 1 año



Tiempo: 2 años





ANEXO 5

Anexo 5. Parámetros de ajustes a circuito equivalente.

Tabla 47. Acero inoxidable de calidad 2001. Concentración de NaCl 0,5% p/p y pH [6-8].

2001 pH[6-8] 0,5%NaCl p/p																
Tiempo	Cero								Cero							
Muestra	m_1								m_2							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	72.4	14.9	1	17.5	91.9	0.85	116772	0.015	68.4	23.1	1	31.3	84.6	0.76	82940	0.161
% Error	3	3	12	39	19	2	14	3	36	7	54	11	23	17		
Tiempo	Un mes								Un mes							
Muestra	m_1								m_2							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	73.1	15.1	1	19.3	91.6	0.85	82940	0.025	63.4	53.2	0.93	108.3	33.0	0.81	82940	0.173
% Error	2	4	17	18	27	3	14	5	17	4	23	3	1	80		
Tiempo	Un año								Un año							
Muestra	m_1								m_1							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	67.6	11.0	1	13.7	108.6	0.80	54398	0.028	56.2	48.0	0.96	345.0	87.1	0.67	211648	0.047
% Error	2	10	3	18	32	6	11	2	6	21	64	4	22	14		
Tiempo	Dos años								Dos años							
Muestra	m_1								m_2							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	50.2	18.8	1	20.6	97.1	0.75	84689	0.025	39.3	136.7	0.78	95328.2	148.5	1	212741	0.108
% Error	2	8	23	39	2	8	17	4	4	1	39	9	21	75		

Tabla 48. Acero inoxidable de calidad 2001. Concentración de NaCl 0,5% p/p y pH [12-13].

2001 pH[12-13] 0,5%NaCl p/p																
Tiempo	Cero								Cero							
Muestra	m_1								m_1							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	35.7	7.4	1	12.1	58.2	0.82	1168926	0.005	4.7	7.4	1	12.1	58.2	0.82	1168926	0.005
% Error	0.8	1	7	9	10	2	11	0.8	1	7	9	10	2	11		
Tiempo	Un mes								Un mes							
Muestra	m_1								m_2							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	33.5	3.9	1	7.9	57.9	0.83	2435420	0.039	4.9	25.2	0.95	18.1	37.5	0.75	2435420	0.016
% Error	4	7	35	28	29	6	57	4	38	54	61	21	10	57		
Tiempo	Un año								Un año							
Muestra	m_1								m_1							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	20.5	2.1	0.83	31.1	47.1	0.82	8294000	0.057	1.8	0.7	0.89	29.9	48.5	0.84	7690800	0.040
% Error	3	28	8	26	20	3	146	5	13	16	19	3	0.7	127		
Tiempo	Dos años								Dos años							
Muestra	m_1								m_2							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	35.9	2.1	1	17.8	53.3	0.84	4418440	0.042	3.4	1.2	0.93	16.9	46.4	0.85	7540000	0.039
% Error	0.8	2	7	9	3	1	415	9	26	9	12	9	11	400		

Tabla 49. Acero inoxidable de calidad 2205. Concentración de NaCl 0,5% p/p y pH [6-8].

2205 pH[6-8] 0,5%NaCl p/p																
Tiempo	Cero								Cero							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	79.5	18.9	1	24.8	100	0.79	16935	0.014	89.0	12.8	1	32.9	64.4	0.79	1000000	0.014
% Error	1	7	14	25	2	4	1		1	5	15	26	1	5	17	
Tiempo	Un mes								Un mes							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	67.7	5.6	1	32.0	52.9	0.76	8000000	0.037	72.9	11.5	0.98	36.7	53.8	0.77	8000000	0.031
% Error	3	8	6	24	5	10	199		3	6	6	24	9	7	205	
Tiempo	Un año								Un año							
Muestra	m ₁								m ₁							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	64.3	65.2	0.82	35823	22.9	0.76	8000000	0.030	70.3	76.3	0.82	46024	19.1	0.81	8000000	0.039
% Error	1	4	1	12	16	13	219		1	4	1	24.	18	12	4202	
Tiempo	Dos años								Dos años							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	54.1	76.1	0.75	67.9	3.1	1	8000000	0.082	53.2	84.6	0.76	86.4	2.9	1	8000000	0.060
% Error	15	14	0.635	37	9	3	384		3	5	2	27	10	1	293	

Tabla 50. Acero inoxidable de calidad 2205. Concentración de NaCl 0,5% p/p y pH [12-13].

2205 pH[12-13] 0,5%NaCl p/p																
Tiempo	Cero								Cero							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	28.9	53.2	0.79	34.2	6.1	0.99	9123400	0.012	27.6	26.2	0.66	11.8	35.3	0.88	912340	0.006
% Error	2	7	1	11	2	5	90		15	2	8	2	0.9	2	10	
Tiempo	Un mes								Un mes							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	31.1	8.2	0.99	14.8	52.4	0.76	2886387	0.079	33.8	5.9	1	11.5	51.5	0.78	829400	0.070
% Error	6	9	8	42	11	15	108		6	10	9	56	9	12	27181	
Tiempo	Un año								Un año							
Muestra	m ₁								m ₁							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	15.8	2.0	0.86	20.7	45.4	0.82	9952800	0.041	15.1	1.8	0.87	20.1	45.6	0.83	10035740	0.051
% Error	12	18	7	8	19	2	127		15	10	11	10	5	3	148	
Tiempo	Dos años								Dos años							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	31.6	23.7	0.89	92.9	22.5	0.78	3393000	0.038	24.05	5.96	0.87	12.06	40.84	0.85	4976400	0.061
% Error	11	7	14	19	8	1	42		15	6	4	14	15	13	75	

Tabla 51. Acero inoxidable de calidad AISI-316-L. Concentración de NaCl 0,5% p/p y pH [6-8].

AISI-316-L pH[6-8] 0,5%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	16.3	33.7	0.87	10.5	26.5	0.86	829400	0.034	15.5	64.1	0.83	8.9	14.7	0.98	829400	0.032
% Error	4	17	18	19	21	20	14		5	23	3	17	3	7	23	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	64.9	10.7	1	43.6	52.9	0.79	8294000	0.075	63.6	14.1	1	35.3	66.7	0.83	8294000	0.034
% Error	5	9	7	32	12	10	32		3	6	18	27	11	3	24	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	52.8	50.9	0.85	17.8	52.8	0.78	829400	0.090	57.4	27.3	0.93	23.1	56.8	0.76	8294000	0.061
% Error	4	12	14	48	13	9	64		2	7	13	41	5	9	280	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	43.4	17.4	0.98	11.3	80.8	0.77	829400	0.118	43.3	6.6	1	6.2	79.9	0.79	8294000	0.164
% Error	3	6	9	49	13	15	42		45	13	13	41	9	11	44	

Tabla 52. Acero inoxidable de calidad AISI-316-L. Concentración de NaCl 0,5% p/p y pH [12-13].

AISI-316-L pH[12-13] 0,5%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	10.3	45.8	0.81	13.6	17.9	0.83	7807670	0.029	33.0	41.9	0.78	13.6	16.9	0.98	988871	0.024
% Error	7	8	3	19	20	10	118		5	20	3	9	1	4	20	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	27.9	33.7	0.72	16.8	28.6	0.88	829400	0.0458	23.7	11.5	0.74	16.3	43.2	0.89	2984709	0.094
% Error	5	7	9	21	6	6	40		11	11	18	9	19	5	65	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	15.7	4.7	0.75	28.7	47.6	0.83	1248247	0.044	23.5	1.9	0.85	24.3	44.9	0.85	8294000	0.062
% Error	13	11	17	8	13	2	30		12	23	10	11	23	3	131	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	16.8	6.8	0.69	26.8	45.7	0.85	8294000	0.052	32.2	26.9	0.87	58.7	19.8	0.86	8294000	0.065
% Error	20	7	19	13	3	2	1399		5	10	18	17	13	1	123	

Tabla 53. Acero inoxidable de calidad AISI-304-L. Concentración de NaCl 0,5% p/p y pH [6-8].

AISI-304-L pH[6-8] 0,5%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	72.2	66.4	0.86	74261.5	34.9	0.73	204590.3	0.008	87.8	63.3	0.82	71132.4	85.2	0.75	83611.1	0.011
% Error	0.75	3	0.78	11	5	14	7		0.76	2	0.47	18	16	13	8	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	73.9	15.9	1	44.3	70.8	0.82	666287.2	0.024	105.6	12.1	0.97	36.5	63.7	0.76	693370.9	0.015
% Error	2	11	17	16	3	4	19		2	5	6	18	7	5	20	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	74.8	30.8	0.94	42.5	73.3	0.70	477757.0	0.049	68.6	14.9	0.93	20.4	78.1	0.71	833547	0.066
% Error	2	3	5	37	10	21	18		3	5	6	30	7	7	35	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	45.2	56.6	0.72	17.6	12.6	0.97	6635200	0.108	49.0	78.5	0.72	60.6	1.7	1	1963416	0.087
% Error	8	3	8	24	7	14	259		4	7	4	39	13	20	79	

Tabla 54. Acero inoxidable de calidad AISI-304-L. Concentración de NaCl 0,5% p/p y pH [12-13].

AISI-304-L pH[12-13] 0,5%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	29.5	53.8	0.83	99.3	1.5	1	643478.7	0.108	30.9	68.3	0.77	81.4	2.4	1	1357200	0.009
% Error	4	8	2	31	11	7	10		1	3	0.80	13	4	7	14	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	26.5	45.2	0.78	40.7	6.5	0.98	1409980	0.059	12.1	14.3	0.62	27.4	50.7	0.82	2691780	0.049
% Error	7	16	2	26	8	11	37		6	9	6	14	13	1	93	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	40.4	33.8	0.85	717.9	11.1	0.85	5805800	0.056	40.7	40.8	0.82	213.8	17.4	0.81	3317600	0.029
% Error	4	3	10	19	12	2	85		3	4	12	15	10	1	50	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	35.1	28.6	0.86	141.2	18.3	0.85	2073500	0.134	34.5	34.6	0.83	73.1	22.5	0.84	2073500	0.089
% Error	6	7	15	18	12	20	47		3.51	8.76	10	17	13	17	49	

Tabla 55. Acero inoxidable de calidad 2304. Concentración de NaCl 0,5% p/p y pH [6-8].

2304 pH[6-8] 0,5%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m_1							m_2								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2	CPE ₁			CPE ₂			R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2
Parámetro	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N			R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N		
Valor de ajuste	75.5	57.9	0.80	79.2	6.6	1	97741.0	0.017	83.6	167.4	0.74	39.7	14.6	1	34141.1	0.002
% Error	1	7	1	15	3	6	2		0.56	4	1	9	1	5	1	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m_1							m_2								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2	CPE ₁			CPE ₂			R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2
Parámetro	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N			R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N		
Valor de ajuste	58.7	27.7	0.72	13.6	15.9	0.92	5918900	0.043	75.6	93.8	0.84	88.9	27.2	0.90	307473.7	0.023
% Error	19	5	20	22	5	15	115		2	9	4	33	4	18	18	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m_1							m_1								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2	CPE ₁			CPE ₂			R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2
Parámetro	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N			R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N		
Valor de ajuste	59.8	61.5	0.79	34.5	11.9	0.97	1131000	0.022	67.8	76.5	0.79	41.5	15.8	0.99	829400	0.069
% Error	2	14	2	17	3	6	18		2	12	2	16	3	6	28	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m_1							m_2								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2	CPE ₁			CPE ₂			R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2
Parámetro	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N			R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N		
Valor de ajuste	47.4	62.9	0.75	10.8	14.2	0.97	443615.9	0.039	46.3	22.9	0.72	8.4	58.2	0.86	3340220	0.061
% Error	5	2	6	22	4	11	20		11	4	11	13	18	12	87	

Tabla 56. Acero inoxidable de calidad 2304. Concentración de NaCl 0,5% p/p y pH [12-13].

2304 pH[12-13] 0,5%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m_1							m_2								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2	CPE ₁			CPE ₂			R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2
Parámetro	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N			R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N		
Valor de ajuste	29.0	76.8	0.87	32.6	7.0	1	298591.5	0.021	29.3	56.9	0.85	54.9	6.5	0.98	675961	0.006
% Error	2	7	1	17	4	6	5		0.96	5	0.45	11	2	3	6	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m_1							m_2								
Elemento	R_0 (Ω^*cm^2)	CPE ₁		R_1 (Ω^*cm^2)	CPE ₂		R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2	R_0 (Ω^*cm^2)	CPE ₁		R_1 (Ω^*cm^2)	CPE ₂		R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2
Parámetro	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N		R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)			N	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	
Valor de ajuste	26.9	33.3	0.80	14.5	23.9	0.90	1132131	0.079	12.4	23.5	0.67	13.7	49.9	0.89	1628640	0.052
% Error	14	15	6	26	16	13	37		13	6	12	16	12	6	66	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m_1							m_1								
Elemento	R_0 (Ω^*cm^2)	CPE ₁		R_1 (Ω^*cm^2)	CPE ₂		R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2	R_0 (Ω^*cm^2)	CPE ₁		R_1 (Ω^*cm^2)	CPE ₂		R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2
Parámetro	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N		R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)			N	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	
Valor de ajuste	24.7	51.1	0.83	74.3	6.2	0.98	758901	0.227	32.3	27.9	0.83	38.3	21.2	0.85	1786980	0.128
% Error	5	19	2	31	12	19	30		6	13	15	22	17	1	45	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m_1							m_2								
Elemento	R_0 (Ω^*cm^2)	CPE ₁		R_1 (Ω^*cm^2)	CPE ₂		R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2	R_0 (Ω^*cm^2)	CPE ₁		R_1 (Ω^*cm^2)	CPE ₂		R_2 (Ω^*cm^2)	χ^2
Parámetro	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N		R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)			N	R_0 (Ω^*cm^2)	Y_1 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	R_1 (Ω^*cm^2)	Y_2 ($\mu F^* cm^2 * s^{(1-n)}$)	N	
Valor de ajuste	18.1	9.0	0.87	8.5	47.1	0.85	1651260	0.055	26.1	5.0	0.86	13.3	42.8	0.84	2480660	0.076
% Error	11	4	3	13	16	3	29		20	9	5	8	14	17	47	

Tabla 57. Acero inoxidable de calidad 2001. Concentración de NaCl 1% p/p y pH [6-8].

2001 pH[6-8] 1%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	40.7	9.3	1	20.7	56.1	0.82	312812	0.019	37.3	5.35	1	7.54	70.66	0.84	470187	0.032
% Error	2	82	8	29	13.7	1	6		2	6	27	23	22	4	14	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	26.4	0.7	1	5.6	104.2	0.88	88444	0.039	32.9	62.5	0.82	58.3	9.5	0.95	874640	0.057
% Error	14	109	3	8	2	0.5	14		9	5	3	39	22	18	112	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	25.3	126.5	0.72	13.6	11.9	1	105658	0.126	25.3	126.5	0.72	13.6	11.9	1	105658	0.126
% Error	6	10	5	20	6	10	18		6	10	5	20	6	10	18	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	18.3	86.9	0.72	13.6	29.9	0.94	80542	0.073	23.8	130.9	0.72	13.6	11.9	1	89002	0.163
% Error	10	21	5	10	3	6	8		7	15	6	28	7	16	18	

Tabla 58. Acero inoxidable de calidad 2001. Concentración de NaCl 1% p/p y pH [12-13].

2001 pH[12-13] 1%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	25.9	75.5	0.86	21330	180.8	0.65	11181	0.010	25.6	56.4	0.89	64127.7	8.8	0.78	2900000000	0.012
% Error	1	2	0.6	24	15	20	16		0.8	2	0.46	54	16	12	50	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	68.1	23.6	1	30.8	84.1	0.76	82940	0.159	19.9	60.2	0.84	58.4	9.6	0.80	957580	0.045
% Error	4	7	8	56	11	29	16		3	3	0.8	100	40	15	40	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	19.1	28.8	0.80	24.5	19.9	0.83	4147000	0.067	6.4	1.7	0.82	22.9	46.4	0.84	4147000	0.074
% Error	7	9	5	15	12	9	76		11	18	1	14	7	5	116	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	18.5	27.9	0.82	27.8	20.9	0.84	9500400	0.054	24.6	28.7	0.84	21.5	18.4	0.85	12000000	0.066
% Error	5	9	7	25	11	10	143		4	13	12	24	3	18	193	

Tabla 59. Acero inoxidable de calidad 2205. Concentración de NaCl 1% p/p y pH [6-8].

2205 pH[6-8] 1%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	41.6	10.5	1	11.8	76.5	0.82	595864	0.008	35.1	11.4	1	14.6	72.7	0.81	177250	0.014
% Error	0.9	2	9	11	13	2	10		1	2	10	13	17	3	4	
Tiempo	Un mes								Un mes							
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	54.3	10.5	1	192.5	56.6	0.77	8000000	1.332	22.6	4.6	1	9.9	62.6	0.87	725944	0.029
% Error	11	29	19	114	12	20	1377		3	20	20	12	14	2	40	
Tiempo	Un año								Un año							
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	34.3	79.6	0.79	24694	20.9	0.92	8000000	0.109	26.2	84.4	0.83	29693	24.0	0.85	8000000	0.137
% Error	3	7	2	24	13	17	409		3	7	1	29	14	17	501	
Tiempo	Dos años								Dos años							
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	22.6	94.6	0.72	11.9	8.2	0.99	9000000	0.246	17.8	98.8	0.72	15.9	11.5	1	9000000	0.156
% Error	17	7	13	49	9	8	854		9	16	5	20	6	12	713	

Tabla 60. Acero inoxidable de calidad 2205. Concentración de NaCl 1% p/p y pH [12-13].

2205 pH[12-13] 1%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	23.8	49.2	0.77	13.9	11.4	0.88	1000000	0.012	26.3	63.4	0.76	29.1	4.2	1	404227	0.015
% Error	6	2	3	17	6	10	105		3	8	2	15	3	9	9	
Tiempo	Un mes								Un mes							
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	21.3	1.7	0.96	12.9	52.7	0.78	110000	0.023	22.7	3.5	0.92	13.7	55.6	0.78	829400	0.113
% Error	16	17	16	12	6		41		17	14	21	14	15	2	55	
Tiempo	Un año								Un año							
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	21.3	8.5	0.81	31.8	35.1	0.79	1000000	0.105	28.9	19.6	0.82	78.4	25.1	0.82	9000000	0.165
% Error	13	5	4	15	10	19	225		9	17	2	14	12	20	238	
Tiempo	Dos años								Dos años							
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	36.9	28.1	0.83	283.9	15.8	0.80	661000	0.025	28.9	26.1	0.86	257.7	16.6	0.84	6000000	0.036
% Error	6	3	17	22	6	1	51		6	3	14	18	5	17	63	

Tabla 61. Acero inoxidable de calidad AISI-316-L. Concentración de NaCl 1% p/p y pH [6-8].

AISI-316-L pH[6-8] 1%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	0.7	10.3	0.44	58.5	55.2	0.87	829400	0.006	40.8	8.9	0.51	1.1	62.3	0.9	829400	0.064
% Error	40	16	16	9	3	0.6	7	2	16	23	47	4	2	33		
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	48.5	21.9	1	17.9	96.6	0.80	253057	0.066	22.3	8.4	0.65	13.7	98.5	0.89	829400	0.042
% Error	4	8	9	40	14	9	24	4	23	18	6	21	2	41		
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	40.2	26.5	1	19.2	114.5	0.77	424751	0.017	26.7	29.3	0.81	5.7	66.9	0.85	829400	0.163
% Error	2	5	19	16	1	8	14	11	5	24	23	16	12	48		
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	33.3	70.7	0.92	44.4	63.4	0.67	347911	0.076	23.2	82.8	0.86	16376.9	21.4	0.81	829400	0.189
% Error	2	24	20	113	25	11	20	3	14	3	27	18	12	45		

Tabla 62. Acero inoxidable de calidad AISI-316-L. Concentración de NaCl 1% p/p y pH [12-13].

AISI-316-L pH[12-13] 1%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	21.1	55.2	0.79	13.6	11.9	0.98	867100	0.013	25.7	46.7	0.82	7.5	11.9	0.97	1885000	0.007
% Error	3	12	2	9	1	4	14	2	12	1	9	1	3	17		
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	17.9	44.0	0.79	22.9	23.3	0.89	8294000	0.150	19.6	16.7	0.88	18.2	45.4	0.83	3196960	0.040
% Error	7	7	3	21	11	7	234	8	5	4	16	15	6	76		
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	46.9	26.3	0.80	144.2	47.2	0.82	8294000	0.188	53.8	26.5	0.81	333.1	42.7	0.86	8294000	0.190
% Error	7	8	20	16	6	1	451	7	8	12	15	6	9	927		
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	33.0	24.7	0.84	66.7	48.4	0.84	8294000	0.189	40.8	28.2	0.83	117.9	44.6	0.83	8294000	0.269
% Error	8	4	3	19	11	15	371	8	5	3	17	14	17	552		

Tabla 63. Acero inoxidable de calidad AISI-304-L. Concentración de NaCl 1% p/p y pH [6-8].

AISI-304-L pH[6-8] 1%NaCl p/p																
Tiempo	Cero								Cero							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²
Valor de ajuste	41.9	58.5	0.88	98675.9	35.1	0.82	158068.6	0.007	45.1	56.0	0.82	24.1	18.1	0.91	1485350	0.004
% Error	0.6	1	0.3	18	5	15	5		1	11	0.7	9	1	2	14	
Tiempo	Un mes								Un mes							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²
Valor de ajuste	39.6	17.9	1	45.8	71.1	0.81	611614.6	0.021	27.8	1.6	0.92	15.2	89.1	0.87	1696500	0.045
% Error	5	5	3	16	7	6	18		19	25	9	7	12	2	56	
Tiempo	Un año								Un año							
Muestra	m ₁								m ₁							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²
Valor de ajuste	28.3	105.7	0.72	20.4	17.4	0.98	516663.4	0.077	39.3	12.5	1	11.6	98.4	0.76	4214860	0.108
% Error	6	17	5	16	4	10	29		11	9	8	51	2	1	287	
Tiempo	Dos años								Dos años							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²
Valor de ajuste	24.8	22.9	0.97	11.4	100	0.67	829400	0.043	28.7	29.9	0.98	7.5	121.9	0.70	829400	0.048
% Error	5	4	5	49	6	15	41		4	4	5	50	7	16	49	

Tabla 64. Acero inoxidable de calidad AISI-304-L. Concentración de NaCl 1% p/p y pH [12-13].

AISI-304-L pH[12-13] 1%NaCl p/p																
Tiempo	Cero								Cero							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²
Valor de ajuste	22.5	55.9	0.81	54.3	1.9	1	1470300	0.042	25.9	63.3	0.76	54.3	2.8	1	1553240	0.031
% Error	3	4	1	19	7	4	21		3	5	1	16	6	10	29	
Tiempo	Un mes								Un mes							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²
Valor de ajuste	3.9	8.6	0.63	21.5	42.3	0.85	2601300	0.039	3.8	16.9	0.58	25.3	43.4	0.84	3762460	0.063
% Error	14	10	7	16	9	4	59		20	8	19	19	10	5	146	
Tiempo	Un año								Un año							
Muestra	m ₁								m ₁							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²
Valor de ajuste	12.4	2.8	0.85	17.7	46.2	0.83	7464600	0.053	16.8	3.8	0.84	18.5	51.9	0.81	2488200	0.078
% Error	11	15	7	8	6	6	116		5	13	7	16	6	7	56	
Tiempo	Dos años								Dos años							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂	χ ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	χ ²
Valor de ajuste	21.0	32.9	0.86	127.1	14.6	0.84	7049900	0.036	24.4	31.2	0.82	35.1	24.3	0.84	3611660	0.095
% Error	6	4	10	16	10	18	84		4	18	9	17	3	17	85	

Tabla 65. Acero inoxidable de calidad 2304. Concentración de NaCl 1% p/p y pH [6-8].

2304 pH[6-8] 1%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	40.5	134.4	0.81	25.2	14.9	1	65429.1	0.023	37.4	86.9	0.81	94.6	7.9	1	64205.4	0.009
% Error	2	8	2	17	3	7	4		1	4	0.56	12	3	5	2	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	27.8	17.2	0.72	17.4	49.6	0.92	2435420	0.056	22.0	11.7	0.74	14.3	84.6	0.87	422654.7	0.036
% Error	8	15	17	18	4	3	67		13	10	18	21	4	3	19	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	34.2	98.8	0.76	14.4	27.2	0.99	836940	0.151	30.6	132.7	0.79	31.1	11.9	1	162434.2	0.039
% Error	7	4	6	22	8	11	62		2	5	1	17	5	6	10	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	20.1	75.7	0.67	9.3	57.0	0.92	784160	0.123	17.0	44.8	0.68	10.4	74.4	0.87	1183780	0.086
% Error	5	4	12	18	3	6	61		5	7	13	14	3	4	62	

Tabla 66. Acero inoxidable de calidad 2304. Concentración de NaCl 1% p/p y pH [12-13].

2304 pH[12-13] 1%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	21.3	104.1	0.77	19.3	9.5	1	74646	0.247	21.3	54.9	0.84	13.0	14.6	0.93	192782.7	0.006
% Error	7	11	4	26	9	11	11		2	15	0.91	11	1	3	2	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	8.7	9.9	0.69	16.4	48.8	0.86	2375100	0.060	9.8	44.9	0.82	23.1	1.9	1	2375100	0.071
% Error	7	12	7	16	18	4	69		11	15	4	36	12	5	60	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	23.7	31.4	0.80	20.4	24.8	0.89	2450500	0.079	16.9	14.8	0.84	17.4	32.1	0.85	4109300	0.084
% Error	7	7	3	15	7	6	51		9	12	18	15	6	10	78	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	29.7	44.7	0.86	707.9	13.4	0.85	829400	0.271	15.8	24.9	0.86	32.3	22.7	0.84	1658800	0.095
% Error	13	9	19	46	11	6	37		11	8	20	13	9	19	33	

Tabla 67. Acero inoxidable de calidad 2001. Concentración de NaCl 3% p/p y pH [6-8].

2001 pH[6-8] 3%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	14.9	83.0	0.81	13.6	13.7	0.99	70702.6	0.034	12.9	71.1	0.85	13.6	11.9	0.98	84055	0.093
% Error	4	14	2	16	3	7	4		6	4	3	38	16	12	5	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	12.1	131.3	0.82	15.8	14.9	1	73349.1	0.072	12.9	11.3	1	4.8	135.3	0.83	64451.9	0.083
% Error	4	9	2	16	5	7	25		4	9	5	22	5	7	24	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	9.6	18.0	0.98	5.4	129.9	0.77	82940	0.186	10.5	15.3	1	3.8	148.8	0.74	165473	0.163
% Error	7	9	7	29	9	8	13		9	10	9	46	9	25	69	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	9.4	10.9	1	4.8	167.1	0.72	129417	0.064	8.4	622015	1	4.7	157.8	0.73	516565	0.104
% Error	4	8	12	24	7	4	20		0.05	10	11	32	7	4	50	

Tabla 68. Acero inoxidable de calidad 2001. Concentración de NaCl 3% p/p y pH [12-13].

2001 pH[12-13] 3%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	11.5	49.1	0.83	27.7	14.5	0.83	506884	0.042	11.4	71.6	0.82	27.6	2.4	1	630744	0.012
% Error	5	10	10	30	35	32	12		2	3	0.9	14	4	8	10	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	10.0	50.3	0.81	144.5	6.4	0.89	1508000	0.052	9.0	55.9	0.80	84.4	11.9	0.75	2593760	0.047
% Error	5	24	2	4	12	24	40		14	12	9	82	9	5	84	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	56.6	0.4	0.95	87.0	32.5	0.64	8294000	1.124	30.5	58.4	0.64	830000000000	28.2	0.7	279402	4.023
% Error	15	20	13	15	12	5	1489		21	7	2	1.4E+09	23	8	1.93E+17	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² +s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	30.2	41.8	0.65	417.7	40.3	0.55	83000000	0.405	21.1	59.5	0.67	1862.4	31.9	0.62	83000000	0.245
% Error	3	11	17	37	13	17	11912		3	6	9	29	14	13	8974	

Tabla 69. Acero inoxidable de calidad 2205. Concentración de NaCl 3% p/p y pH [6-8].

2205 pH[6-8] 3%NaCl p/p																
Tiempo	Cero								Cero							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	23.7	10.6	1	2.6	199.1	0.76	8557.9	0.0033	21.2	18.0	1	9.9	104.8	0.79	113145	0.058
% Error	1	15	20	9	0.8	0.6	0.8		3	5	4	23	5	8	10	
Tiempo	Un mes								Un mes							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	54.3	4.6	1	9.9	62.6	0.87	725944	0.260	15.1	4.8	1	4.9	77.5	0.84	8000000	0.041
% Error	14	2020.7	21	12	14	3	40		8	22	3	29	7	3	277	
Tiempo	Un año								Un año							
Muestra	m ₁								m ₁							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	18.5	91.8	0.82	12562	40.9	0.85	8000000	0.071	12.7	95.6	0.83	7472.1	48.7	0.83	8000000	0.137
% Error	2	5	1	13	15	9	390		3	8	1	17	18	10	623	
Tiempo	Dos años								Dos años							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	10.5	121.3	0.71	13.3	7.8	1	9000000	0.191	9.3	137.1	0.73	7.5	8.2	1	9000000	0.256
% Error	11	11	5	22	8	15	1057		8	777	4	48	13	5	1250	

Tabla 70. Acero inoxidable de calidad 2205. Concentración de NaCl 3% p/p y pH [12-13].

2205 pH[12-13] 3%NaCl p/p																
Tiempo	Cero								Cero							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	10.8	67.8	0.82	34.7	0.8	1	206506	0.026	10.4	47.2	0.84	5.1	22.5	0.85	726283	0.015
% Error	3	4	1	42	13	5	6		3	18	4	18	1	0.4	7	
Tiempo	Un mes								Un mes							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	10.9	6.4	0.99	13.9	51.0	0.78	8000000	0.048	12.2	17.9	0.90	15.2	61.5	0.75	220598	0.032
% Error	14	7	7	161	11	6	237		6	9	13	17	4	3	14	
Tiempo	Un año								Un año							
Muestra	m ₁								m ₁							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	11.5	28.8	0.79	214.2	17.9	0.8	9000000	0.148	11.1	47.7	0.82	2138	7.0	0.94	9000000	0.113
% Error	11	4	13	16	8	20	262		3	15	2	27	14	5	239	
Tiempo	Dos años								Dos años							
Muestra	m ₁								m ₂							
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	10.2	31.3	0.81	281.4	12.9	0.81	6000000	0.082	9.7	49.2	0.83	4524	5.6	0.94	6000000	0.069
% Error	8	3	11	18	10	2	111		3	12	2	30	141	6	114	

Tabla 71. Acero inoxidable de calidad AISI-316-L. Concentración de NaCl 3% p/p y pH [6-8].

AISI-316-L pH[6-8] 3%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	73.5	8.2	1	34.6	50.9	0.79	829400	0.021	76.7	11.4	1	28.7	57.1	0.83	829400	0.015
% Error	1	3	15	174	23	4	15		1	2	8	13	16	1	12	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	7.5	18.4	0.55	5.9	112.9	0.88	301012		12.1	2.6	1	3.1	78.5	0.85	829400	0.082
% Error	4	14	16	6	23	3	20		3	25	6	27	23	5	39	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	12.3	2.4	1	0.60	152.5	0.79	829400	0.138	10.0	7.8	1	3.1	114.2	0.77	829400	0.233
% Error	18	30	22	82	25	7	133		11	14	9	46	6	11	79	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	8.8	134.1	0.83	535	32.5	0.75	8294000	0.066	8.1	54.2	0.9	407.2	125.6	0.65	8294000	0.185
% Error	2	9	2	29	8	10	507		10	6	20	35	5	22	2702	

Tabla 72. Acero inoxidable de calidad AISI-316-L. Concentración de NaCl 3% p/p y pH [12-13].

AISI-316-L pH[12-13] 3%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	30.5	42.9	0.72	11.5	26.8	0.9	1236560	0.008	12.7	60.2	0.85	25.7	3.1	1	1191320	0.005
% Error	7	1	4	12	1	3	12		1	5	0.71	15	3	7	10	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	10.5	16.3	0.95	17.5	43.5	0.74	8294000	0.055	12.5	10.5	1	12.5	58.3	0.80	6951880	0.055
% Error	6	4	4	42	12	14	258		5	6	4	28	7	9	219	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	7.0	12.6	0.86	8.1	44.8	0.84	83000000	0.049	7.3	13.1	0.86	8.6	42.0	0.84	83000000	0.049
% Error	14	4	2	7	14	10	1424		13	3	2	17	14	13	1347	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	9.5	14.9	0.96	18.0	42.0	0.81	8294000	0.065	10.6	30.2	0.93	20.4	27.5	0.84	8294000	0.063
% Error	4	6	7	14	3	1	157		3	7	5	25	8	3	144	

Tabla 73. Acero inoxidable de calidad AISI-304-L. Concentración de NaCl 3% p/p y pH [6-8].

AISI-304-L pH[6-8] 3%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	14.9	47.1	1	5.7	239.7	0.75	14416.5	0.0057	19.1	8.8	1	8.1	72.9	0.78	302896.9	0.006
% Error	0.87	3	11	20	0.98	5	2		1	2	9	10	12	2	20	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	15.2	29.8	1	9.1	139.3	0.78	116726.7	0.065	15.9	8.2	1	4.9	112.6	0.82	308423.7	0.049
% Error	5	7	7	41	11	17	15		7	13	10	21	8	4	21	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	15.1	3.8	1	5.5	252.2	0.73	192285.1	0.061	13.9	85.5	0.76	14.5	84.2	0.72	95381	0.139
% Error	6	20	4	12	5	3	24		7	3	14	35	3	9	20	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	11.8	179.7	0.77	85.7	73.3	0.75	210999.4	0.067	14.5	188.3	0.74	2103.7	13.5	0.92	318165.4	0.044
% Error	5	6	12	23	15	2	23		2	17	3	33	17	12	93	

Tabla 74. Acero inoxidable de calidad AISI-304-L. Concentración de NaCl 3% p/p y pH [12-13].

AISI-304-L pH[12-13] 3%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	9.8	53.3	0.85	43060.9	14.8	0.91	502065.9	0.002	9.8	54.6	0.78	14853.8	15.4	0.82	1862380	0.007
% Error	0.5	0.8	0.2	10	4	3	4		1	2	0.4	19	8	3	18	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	10.3	21.5	0.86	21.2	32.2	0.75	82940000	0.049	9.7	44.6	0.79	180.9	13.7	0.67	5308160	0.041
% Error	13	9	9	61	8	2	2446		7	6	9	86	7	11	151	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	11.3	31.6	0.82	159.1	16.6	0.82	1658800	0.184	10.2	30.6	0.78	158.8	24.7	0.79	1915160	0.128
% Error	9	5	16	19	11	2	52		12	4	13	173	5	15	60	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂				CPE ₁			CPE ₂					
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ⁻² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Valor de ajuste	10.6	39.5	0.83	125.6	12.7	0.83	1786980	0.079	8.7	41.8	0.79	225.7	14.6	0.84	2367560	0.117
% Error	4	6	10	23	5	2	42		4	4	5	18	12	15	68	

Tabla 75. Acero inoxidable de calidad 2304. Concentración de NaCl 3% p/p y pH [6-8].

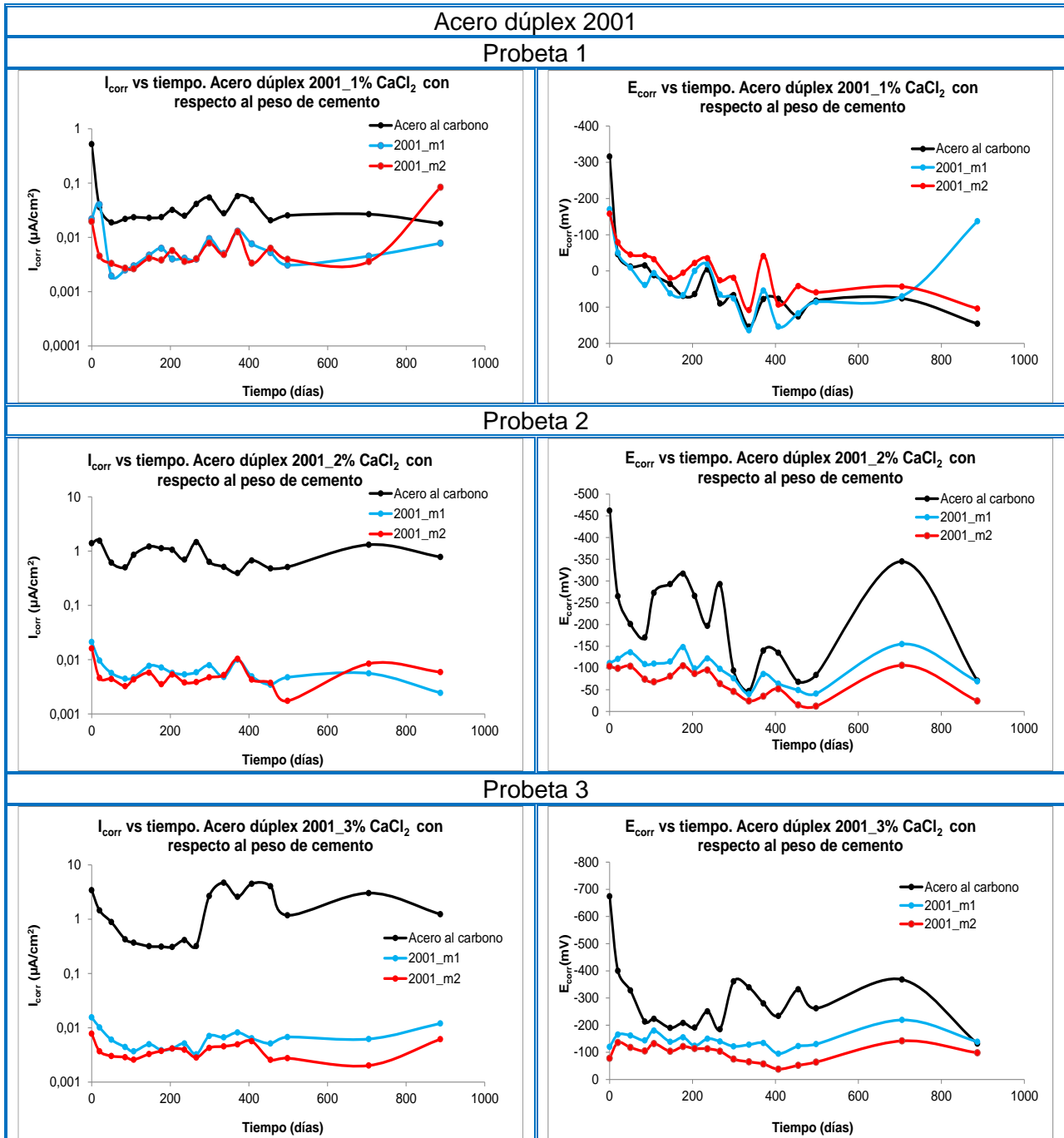
2304 pH[6-8] 3%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	13.2	118.0	0.71	6.3	45.6	0.98	34216.5	0.305	14.7	20.0	0.98	70.8	81.4	0.82	324340.6	0.0057
% Error	7	6	15	21	8	12	16		1	1	4	8	10	0.82	11	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	12.2	115.8	0.85	26.2	11.9	1	189661.2	0.056	12.6	118.8	0.84	18.9	26.8	0.97	123279	0.041
% Error	3	10	1	28	10	10	15		44	6	2	28	18	12	26	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	9.9	81.2	0.81	10.9	20.8	0.98	844480	0.127	6.8	8.4	0.82	8.7	121.9	0.80	874640	0.134
% Error	7	20	2	19	5	7	42		17	13	11	13	10	10	64	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	8.4	121.6	0.77	6.8	16.7	0.98	211821.2	0.084	9.7	159.7	0.75	3023.5	38.9	0.85	224028.5	0.051
% Error	8	2	5	21	7	12	20		4	15	3	17	8	20	26	

Tabla 76. Acero inoxidable de calidad 2304. Concentración de NaCl 3% p/p y pH [12-13].

2304 pH[12-13] 3%NaCl p/p																
Tiempo	Cero							Cero								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	9.1	51.1	0.75	6.3	8.9	0.98	265845.3	0.029	9.9	48.0	0.81	4.3	20.3	0.85	484331.9	0.020
% Error	9	16	4	10	2	7	9		19	5	5	24	11	13	999	
Tiempo	Un mes							Un mes								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	9.7	61.8	0.81	32.6	2.8	1	1146080	0.079	38.9	255.3	0.76	113.3	21.1	1	147278.8	0.031
% Error	8	12	3	38	13	5	45		8	17	4	27	11	5	21	
Tiempo	Un año							Un año								
Muestra	m ₁							m ₁								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	7.2	18.4	0.81	11.1	22.0	0.85	3279900	0.053	7.8	12.9	0.85	10.1	38.3	0.84	4109300	0.055
% Error	20	8	4	13	6	4	45		20	18	1	12	5	15	75	
Tiempo	Dos años							Dos años								
Muestra	m ₁							m ₂								
Elemento	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²	CPE ₁			CPE ₂			R ₂ (Ω*cm ²)	X ²
Parámetro	R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N			R ₀ (Ω*cm ²)	Y ₁ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N	R ₁ (Ω*cm ²)	Y ₂ (μF*cm ² *s ⁽¹⁻ⁿ⁾)	N		
Valor de ajuste	8.5	25.9	0.86	14.2	14.2	0.80	4177160	0.078	9.04	43.4	0.80	13.6	11.9	0.92	6718140	0.233
% Error	15	13	9	47	5	15	60		17	6	4	30	16	12	206	

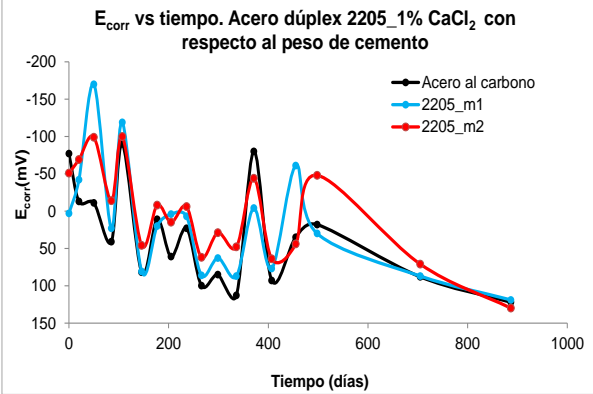
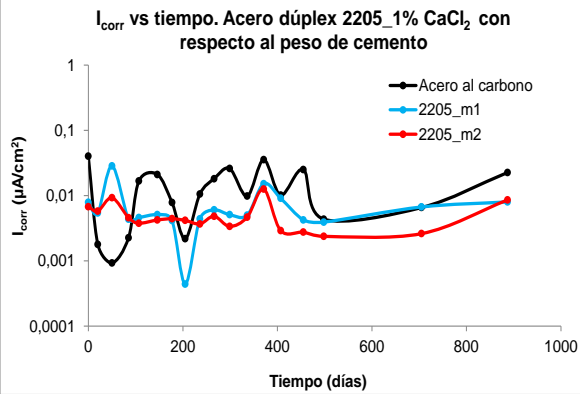
ANEXO 6

Anexo 6. Probetas de mortero con distintas concentraciones de cloruros en % en peso de cemento obtenido a partir de CaCl_2 . Representación de valores de E_{corr} e I_{corr} frente al tiempo. Gráficas de m₁, m₂ y acero al carbono.

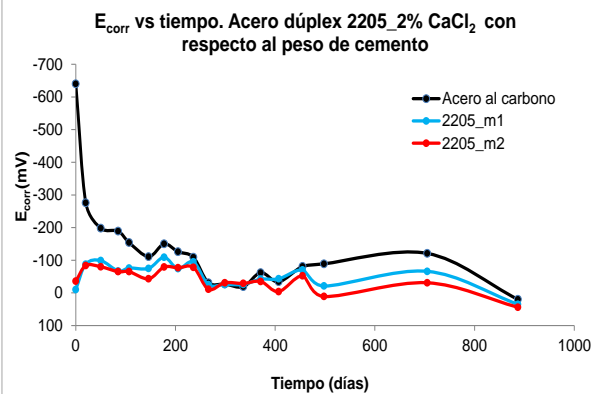
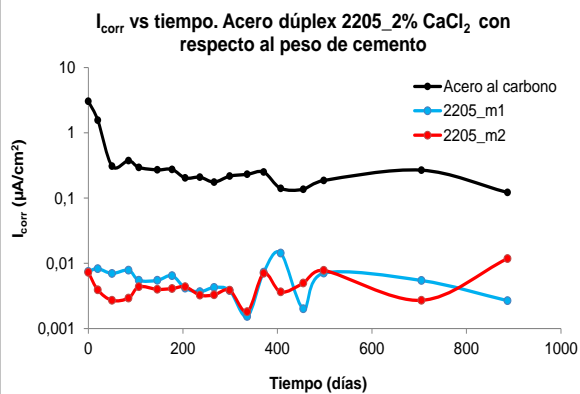


Acero dúplex 2205

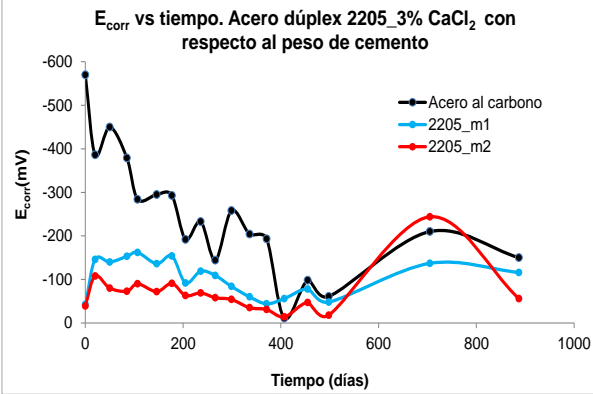
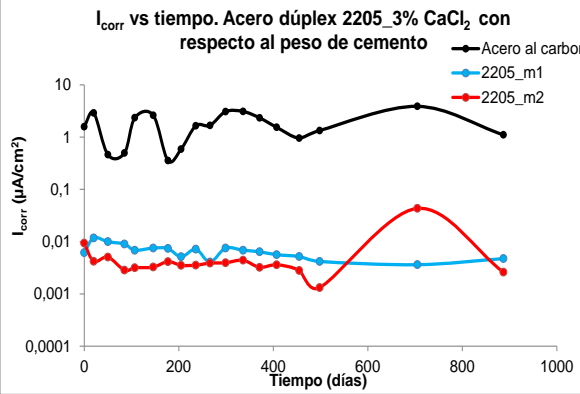
Probeta 4



Probeta 5

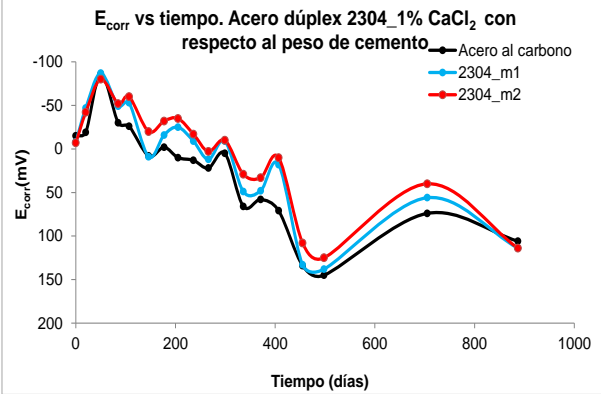
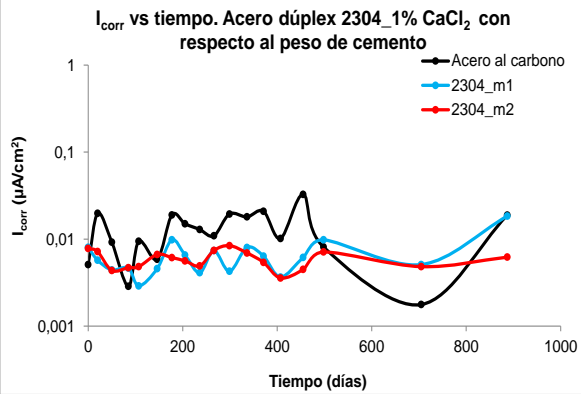


Probeta 6

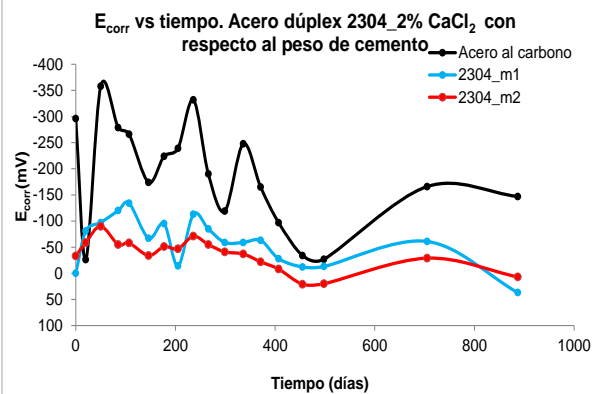
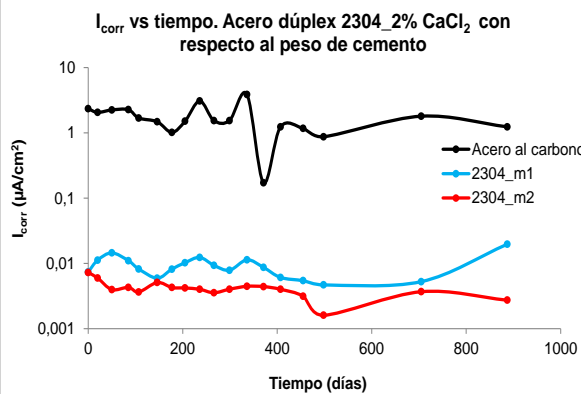


Acero dúplex 2304

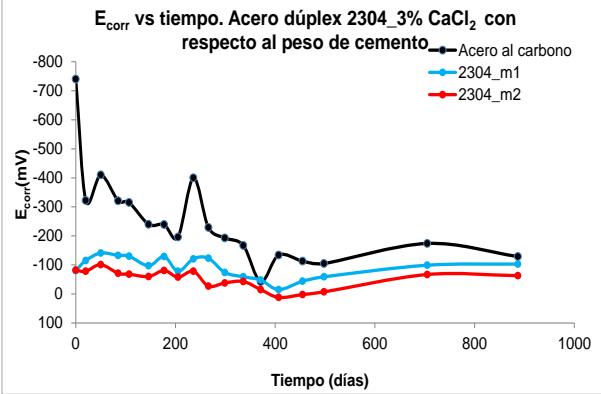
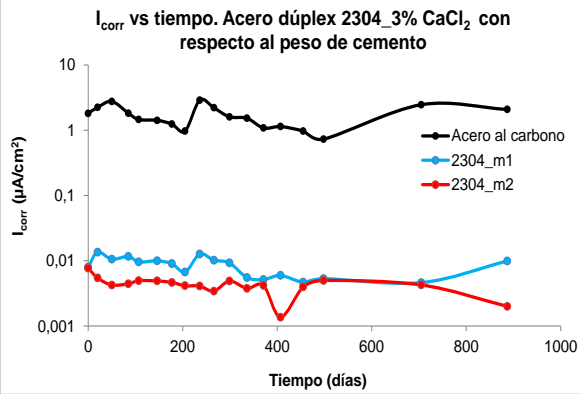
Probeta 7



Probeta 8

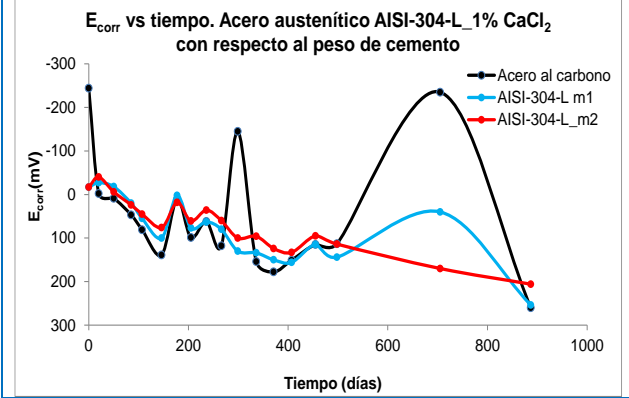
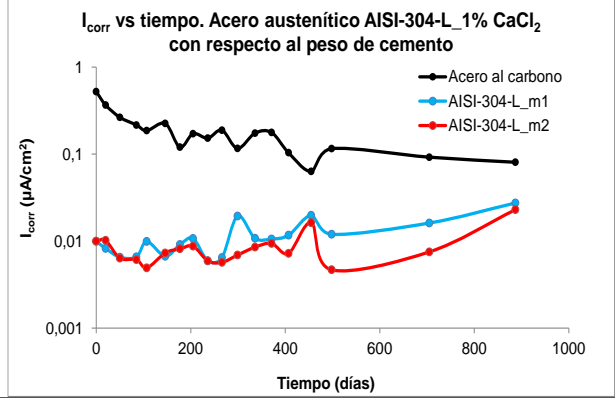


Probeta 9

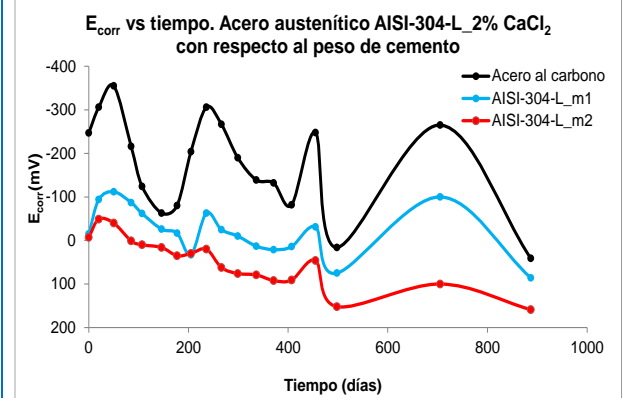
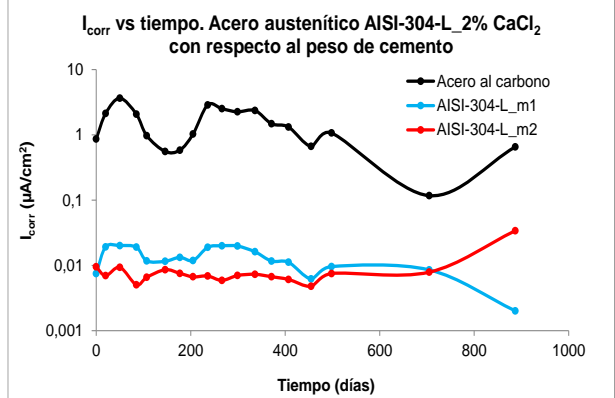


Acero austenítico AISI-304-L

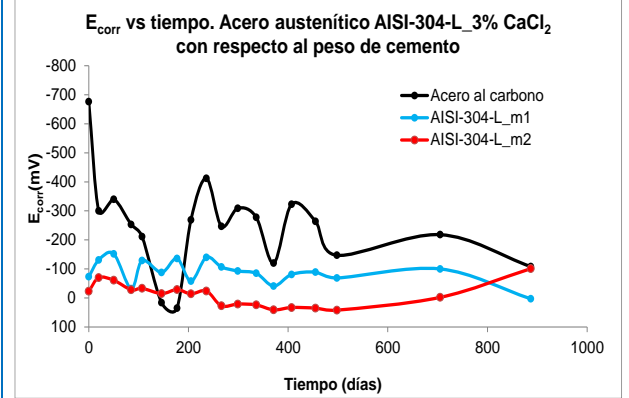
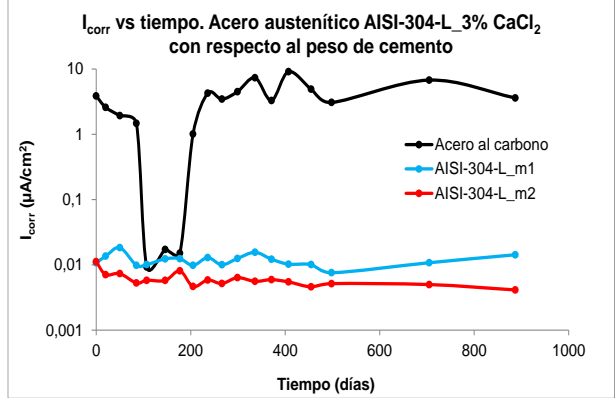
Probeta 10



Probeta 11

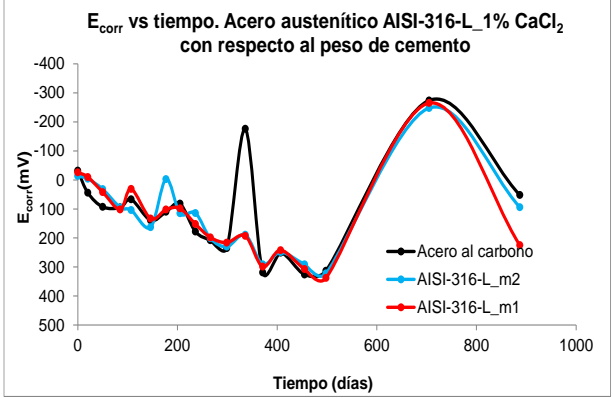
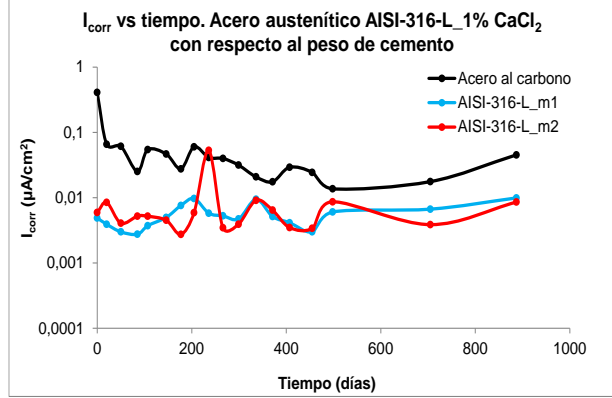


Probeta 12

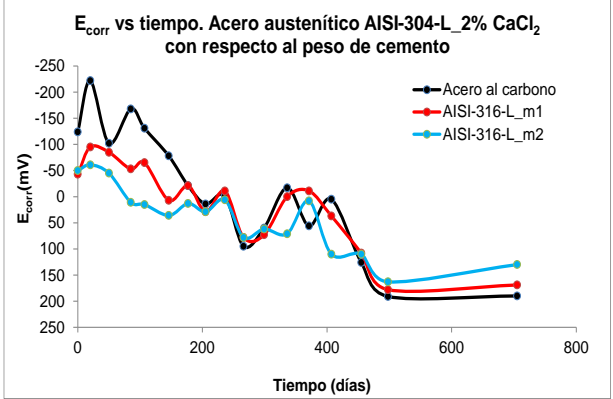
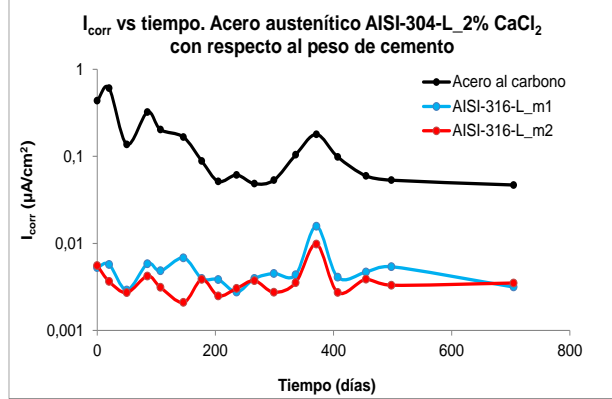


Acero austenítico AISI-316-L

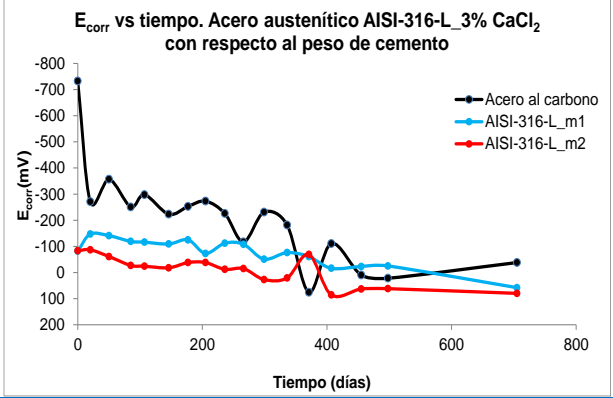
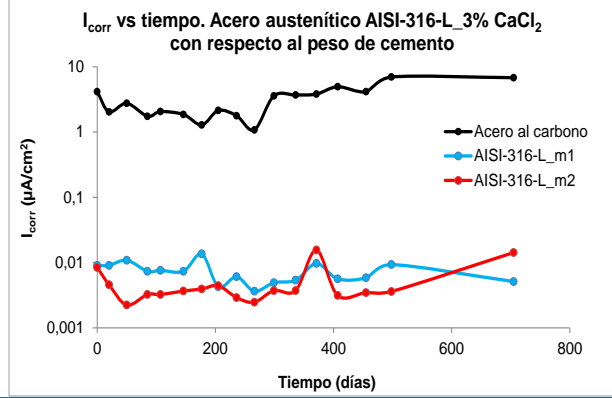
Probeta 13



Probeta 14



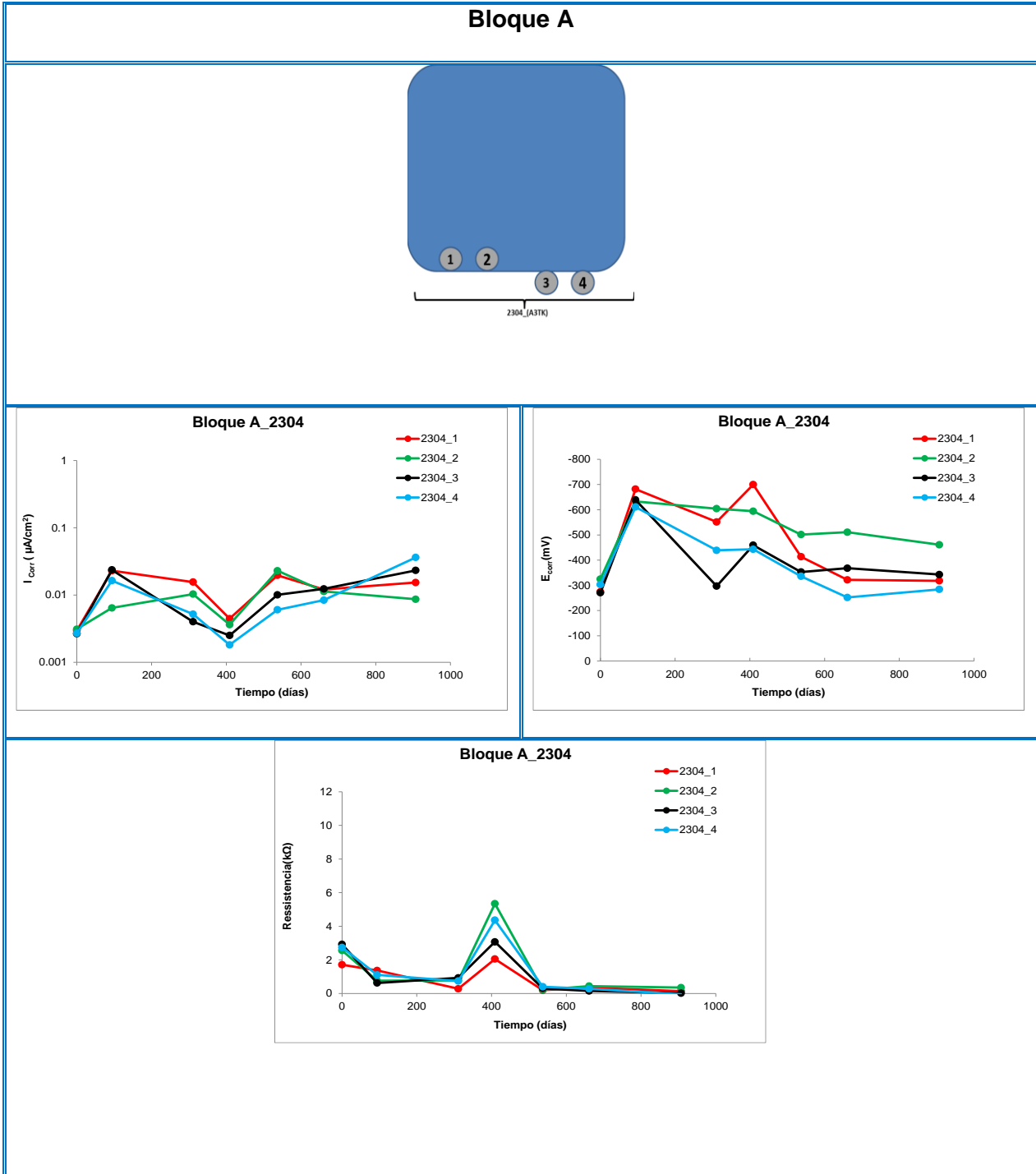
Probeta 15

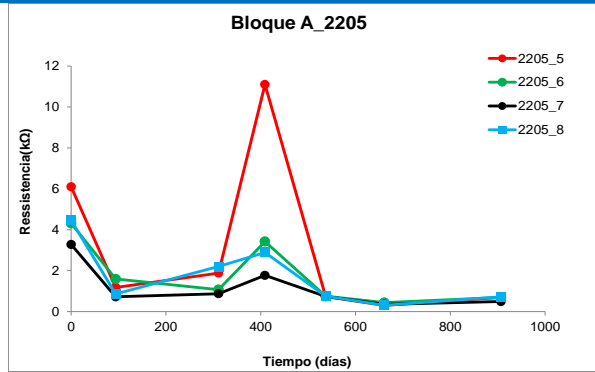
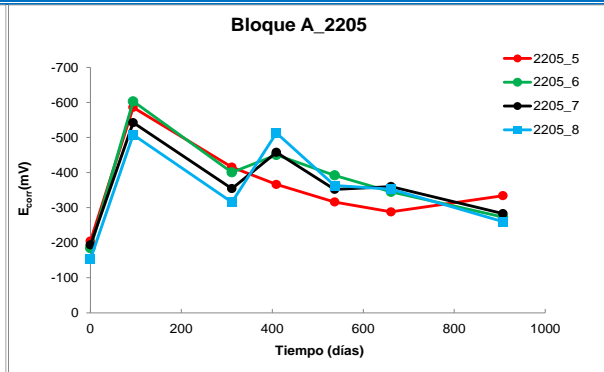
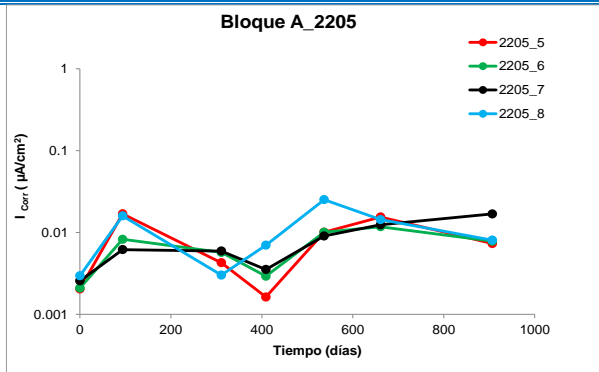
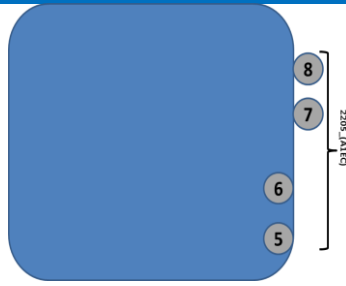


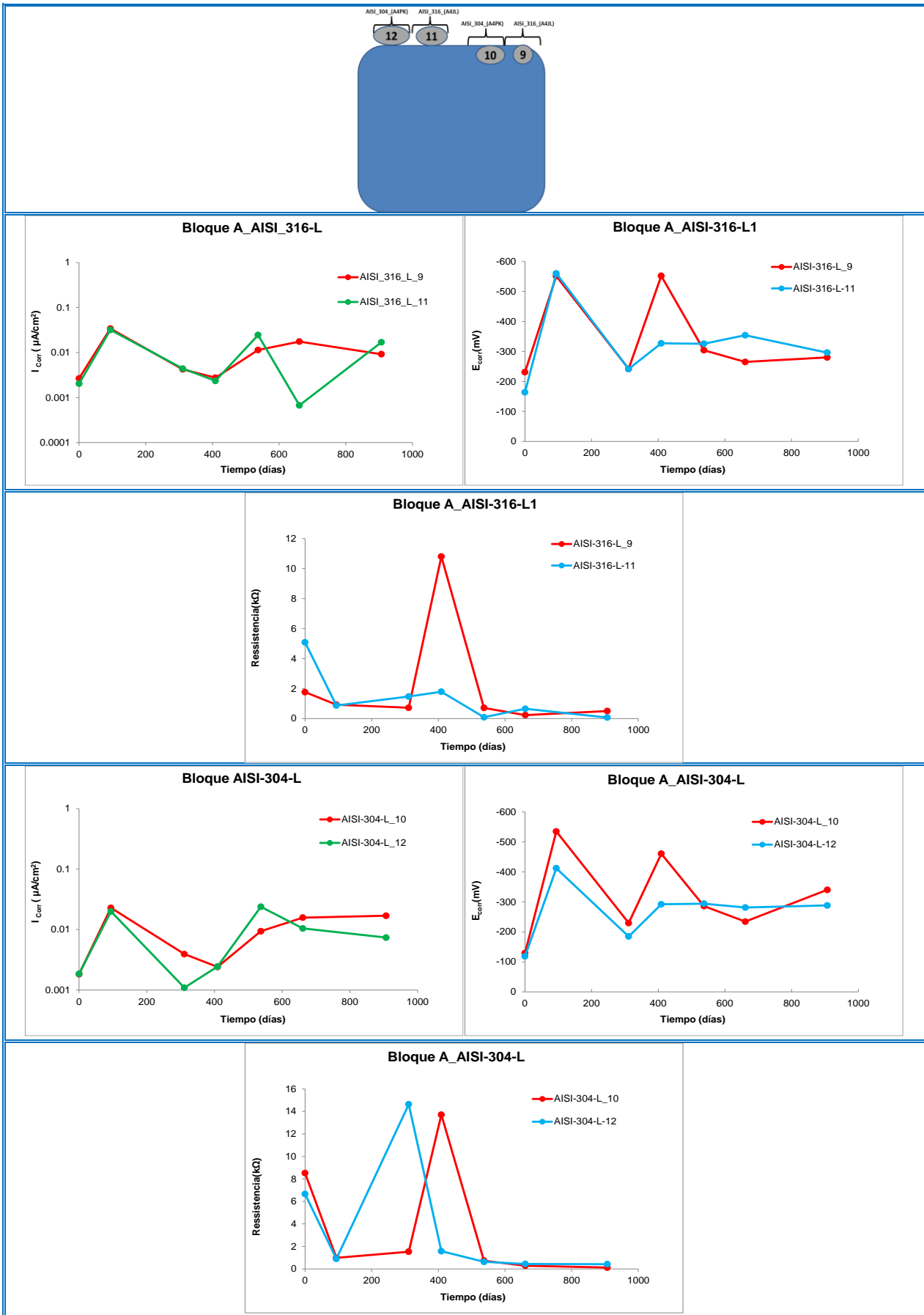
ANEXO 7

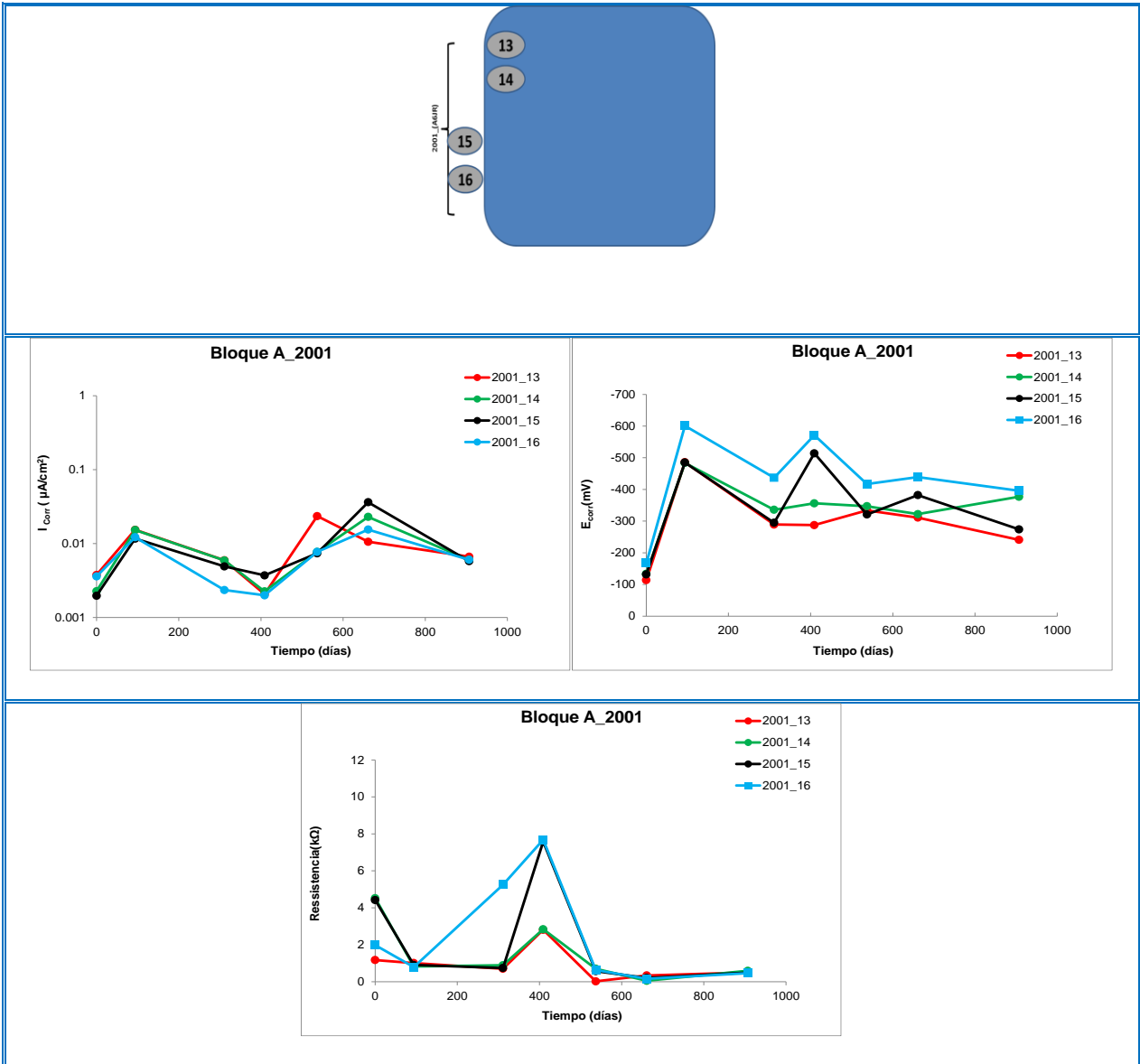
Anexo 7. Bloques de gran tamaño situados en el mar. Representación de E_{corr} e I_{corr} y resistencia para el bloque A y el bloque B por separados.

Para cada calidad de acero, previo a las representaciones gráficas, se muestra un esquema de dónde y cómo se encuentran dispuestas en las caras de los bloques.

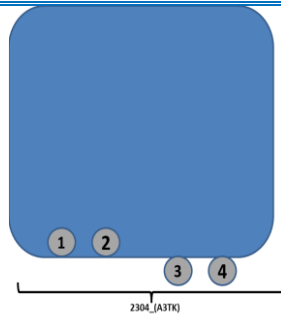




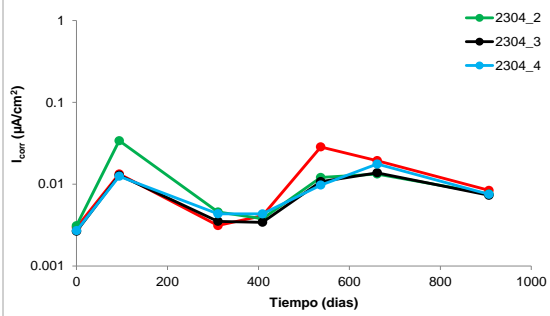




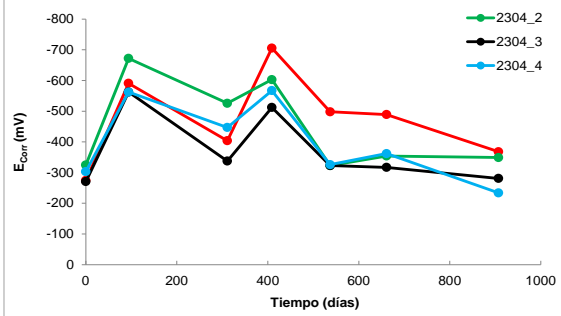
Bloque B



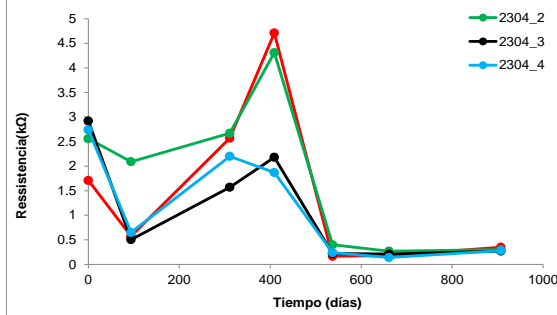
Bloque B_2304

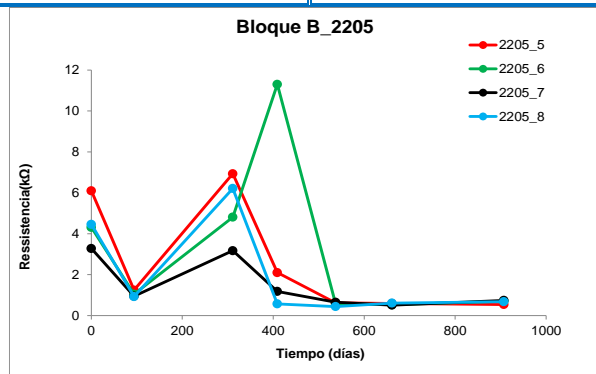
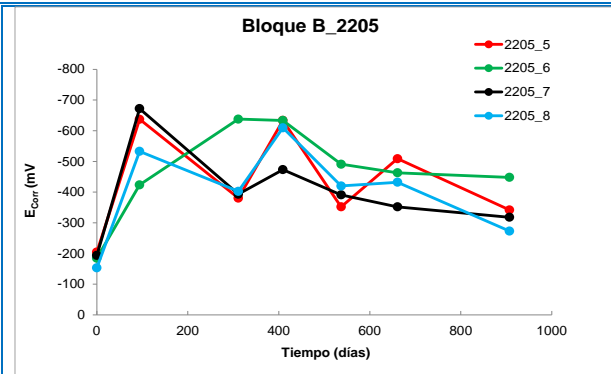
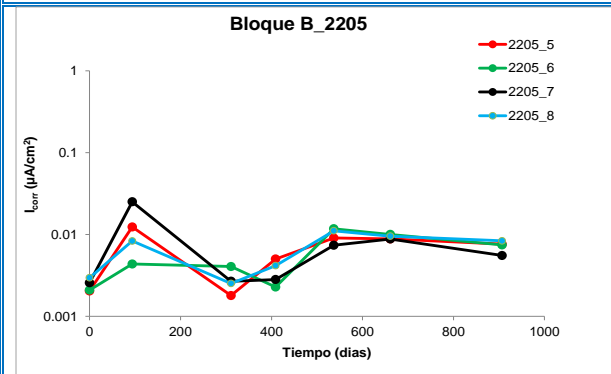
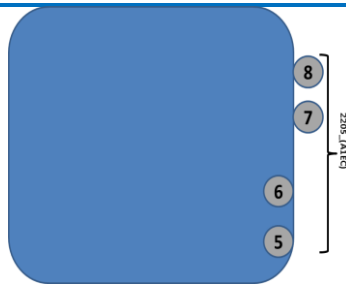


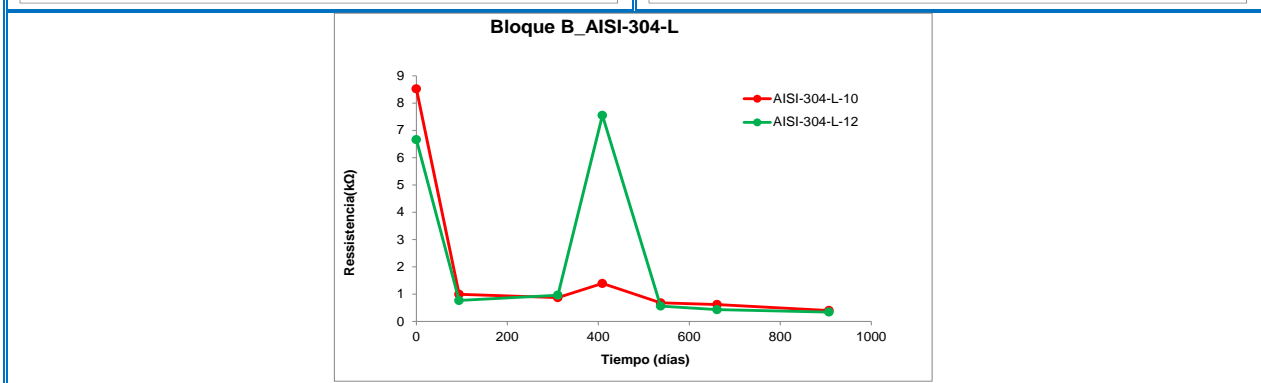
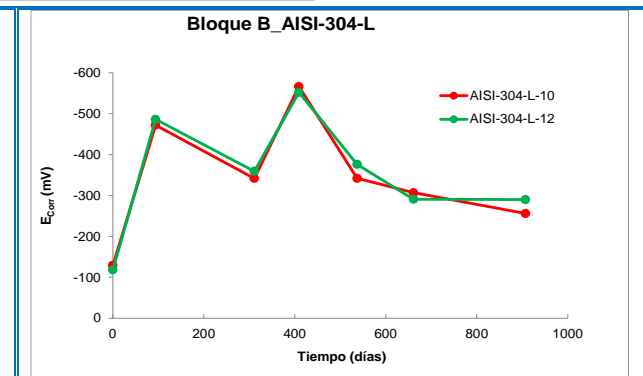
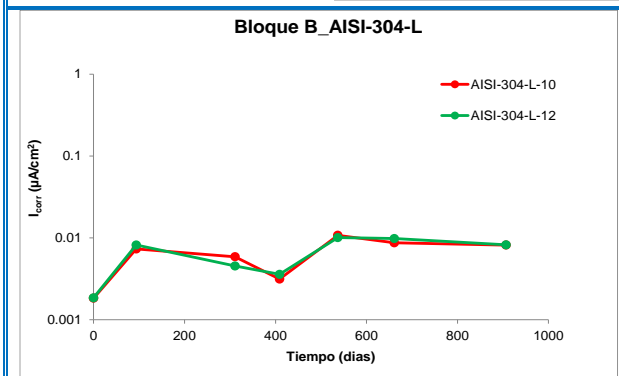
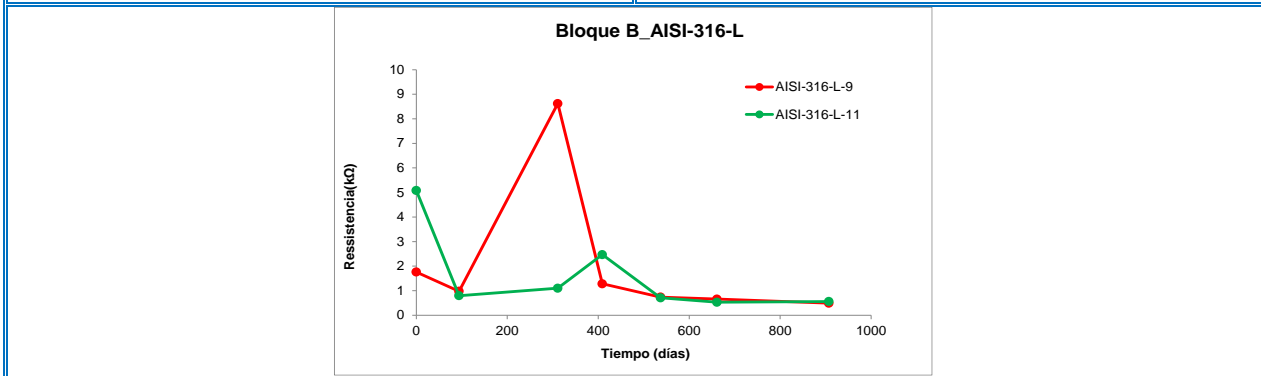
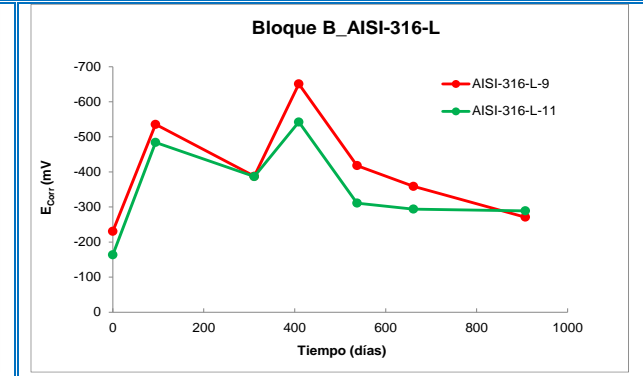
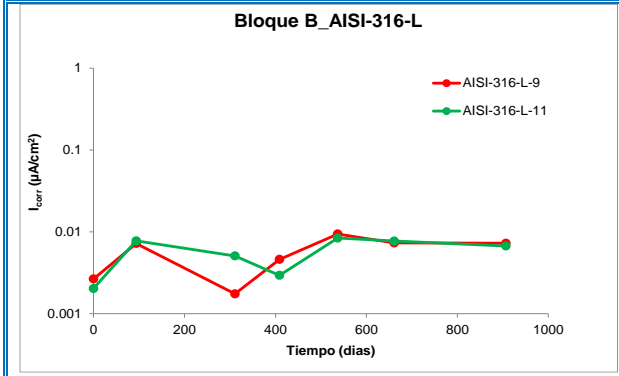
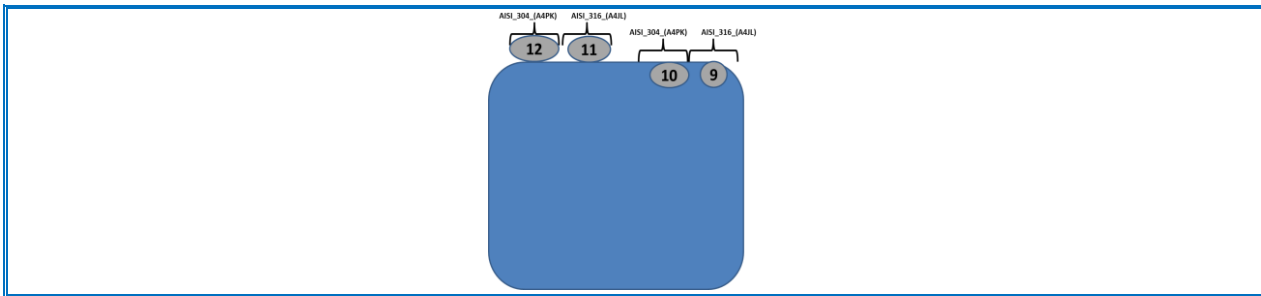
Bloque B_2304

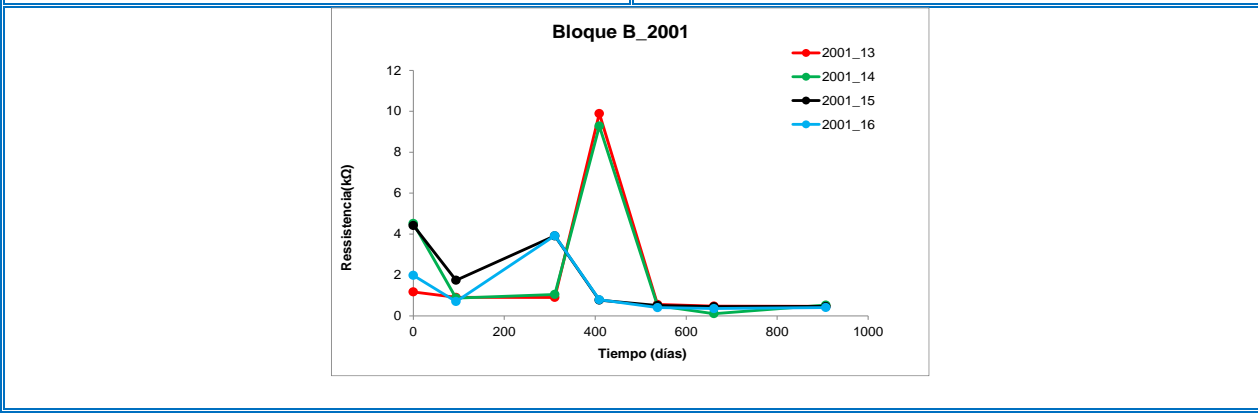
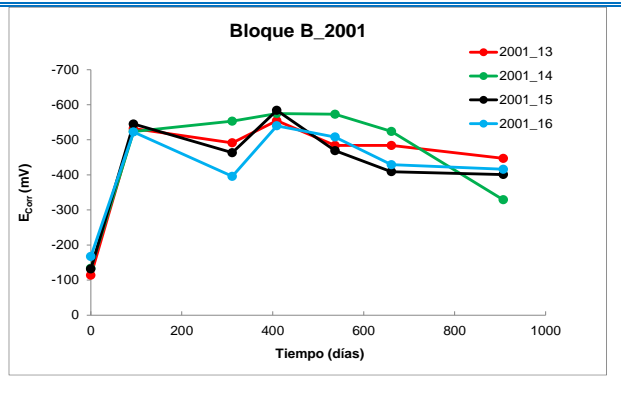
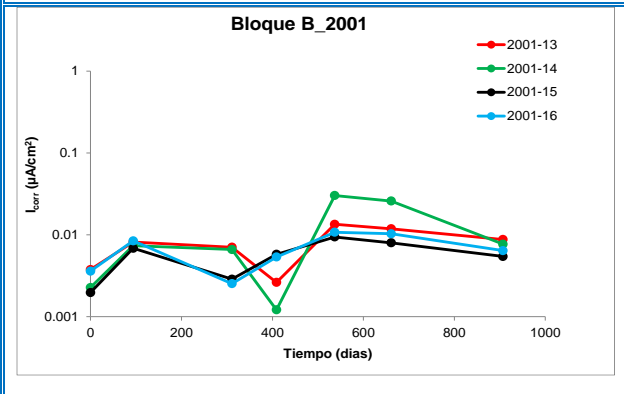
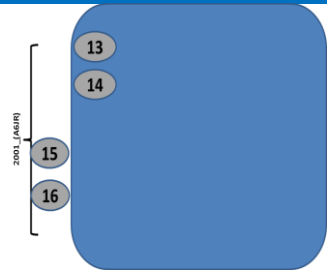


Bloque B_2304





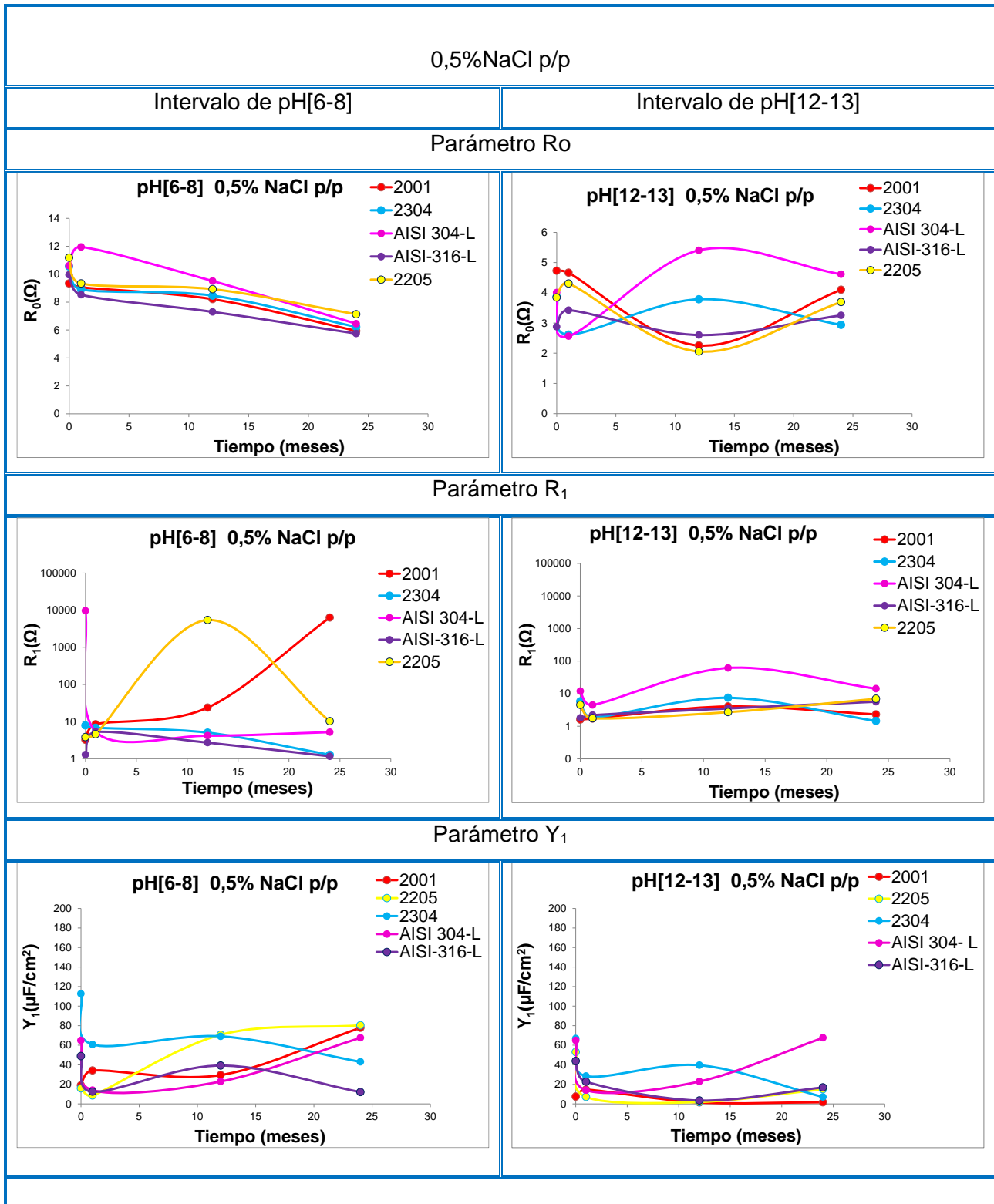


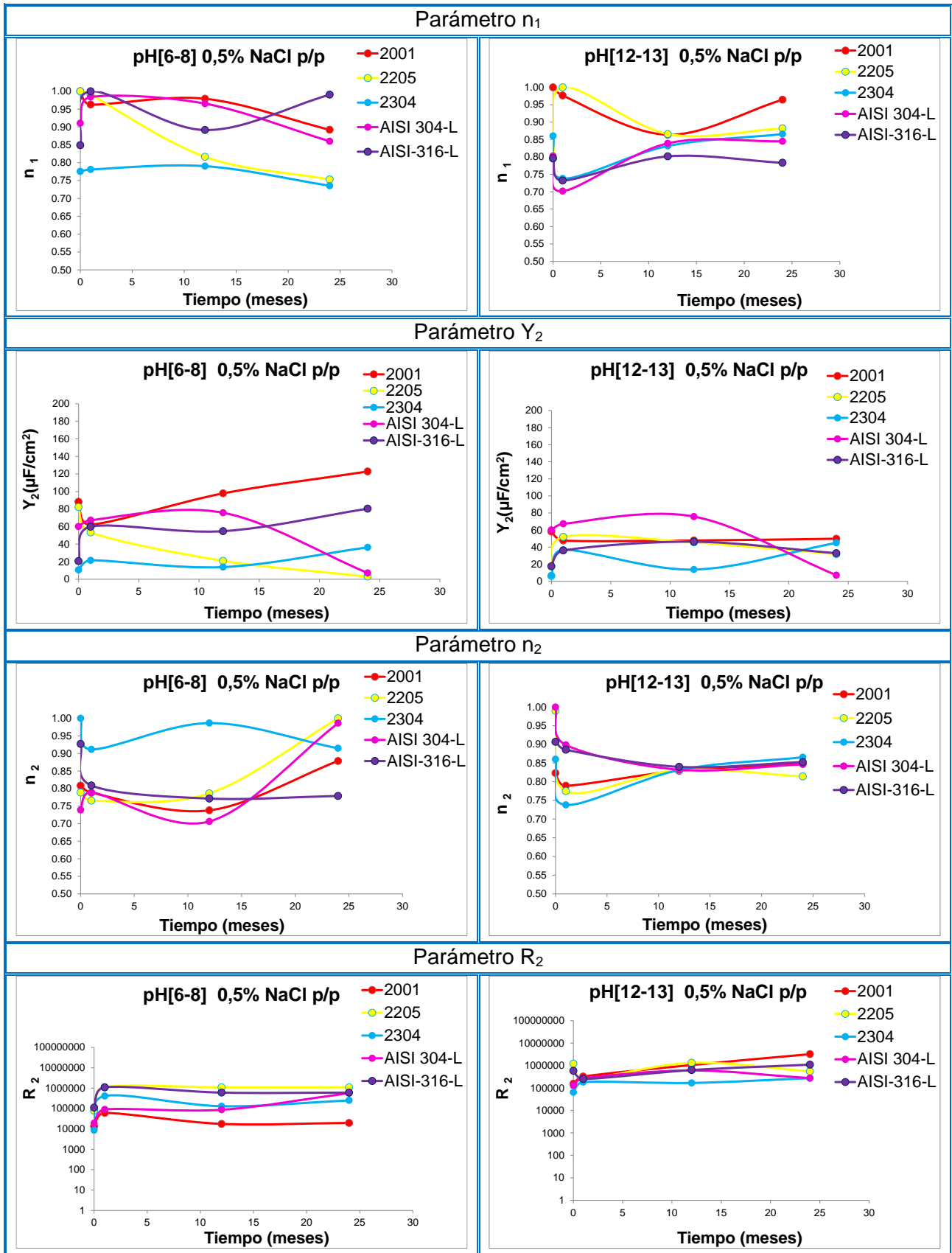


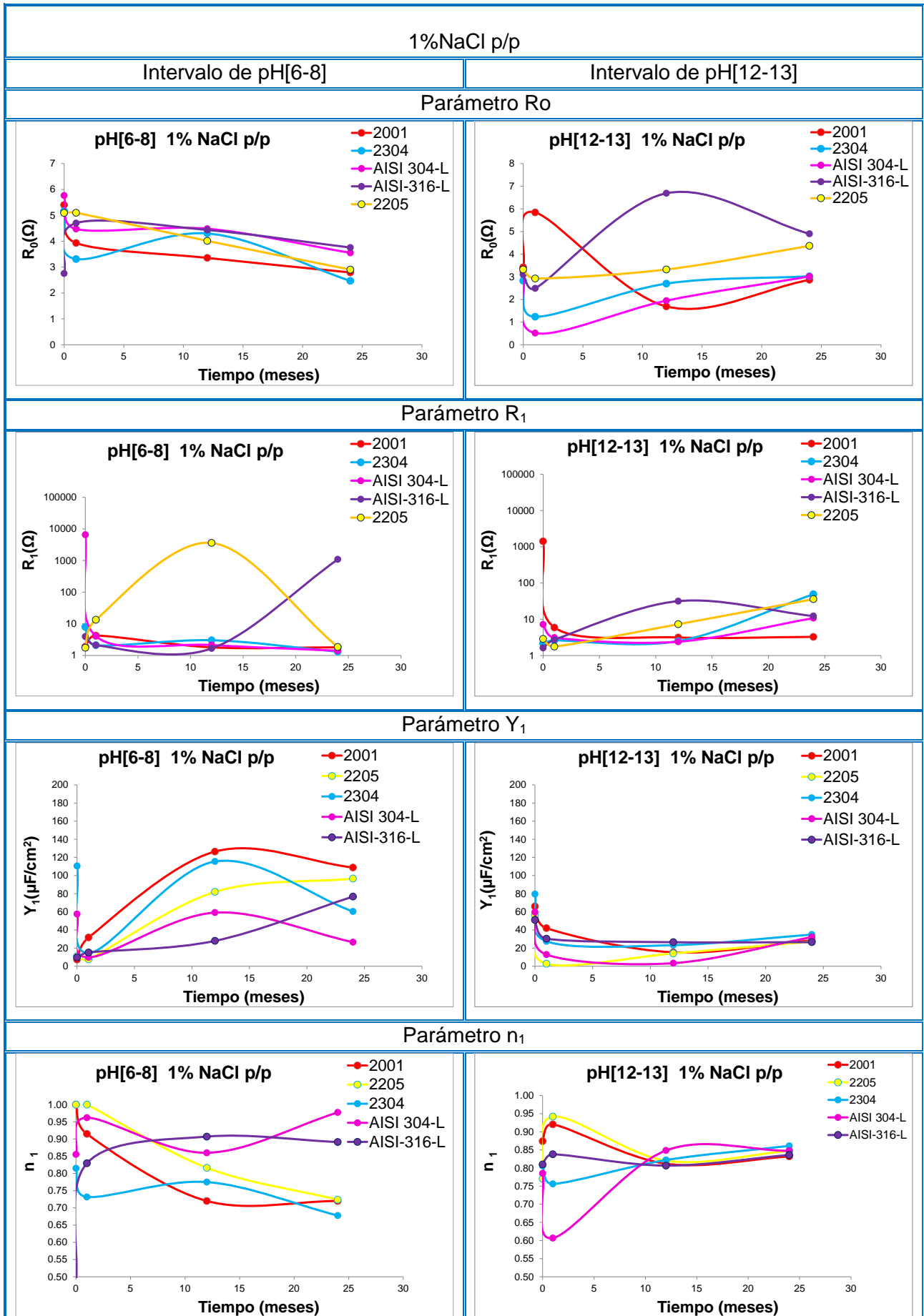
ANEXO 8

Anexo 8. Parámetros obtenidos mediante ajustes al circuito equivalente.
 Representación de los cinco aceros de estudio juntos.

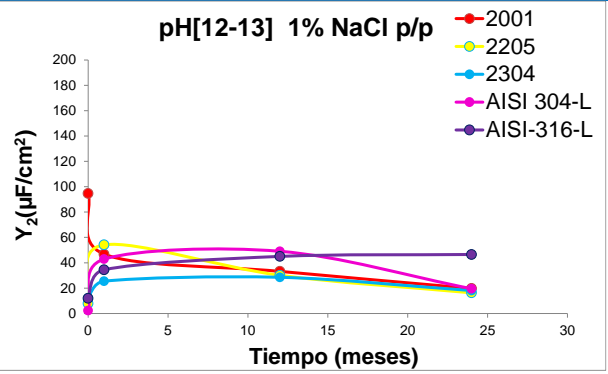
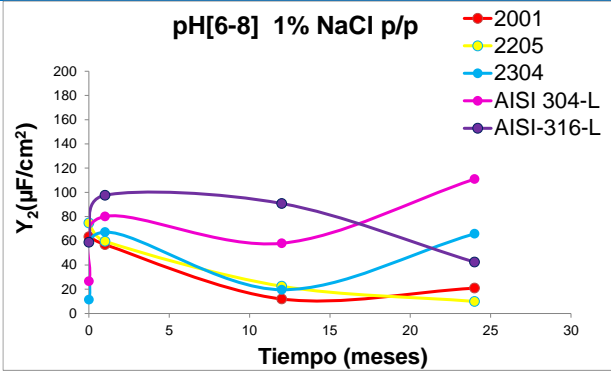
Se muestra una gráfica por cada medio de pH y concentración de cloruros y en cada una se enfrentan las cinco calidades de acero inoxidable de estudio.



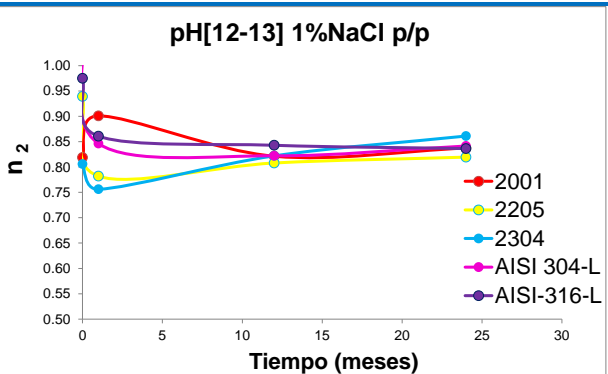
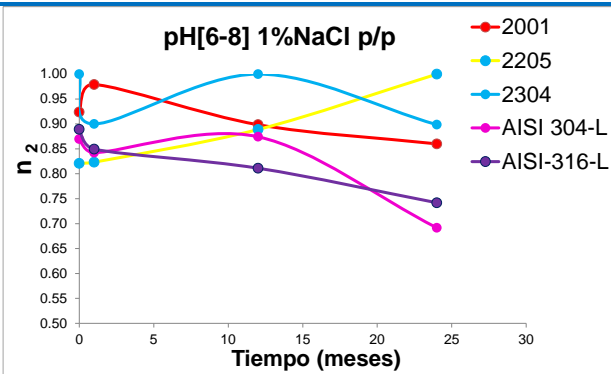




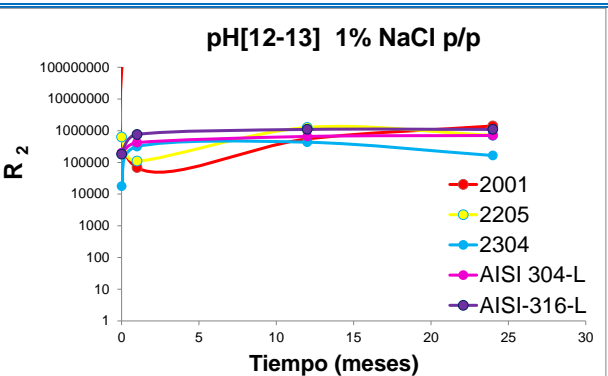
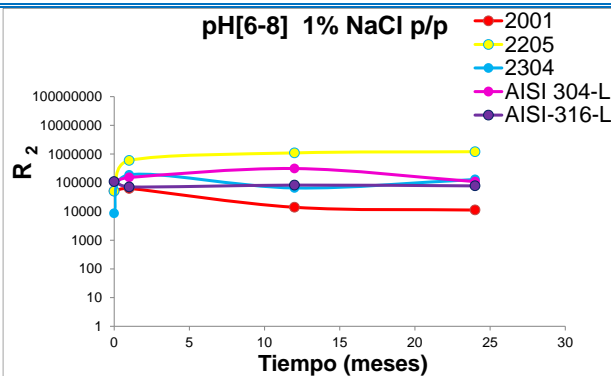
Parámetro Y_2



Parámetro n_2



Parámetro R_2

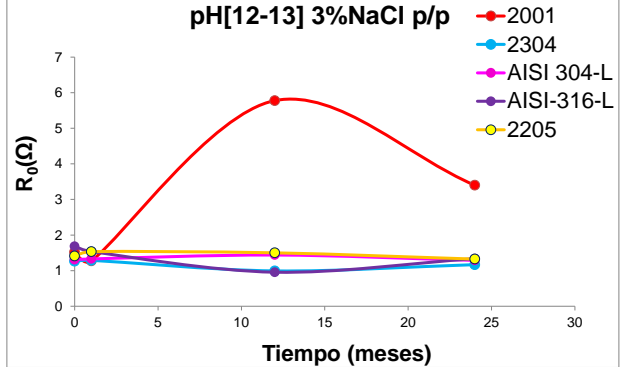
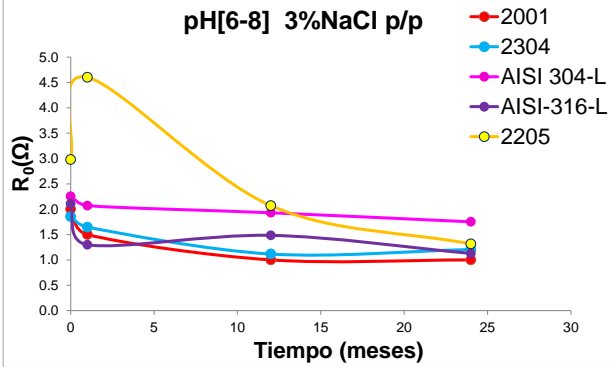


3%NaCl p/p

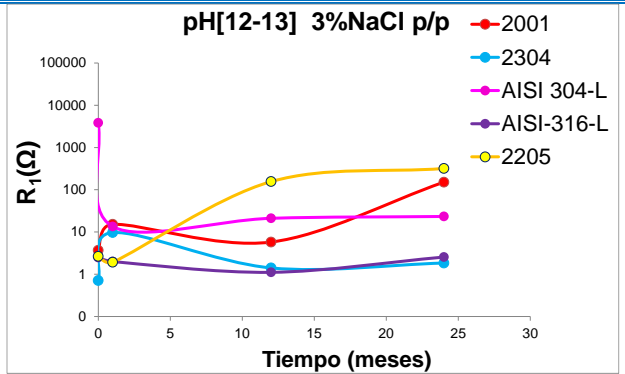
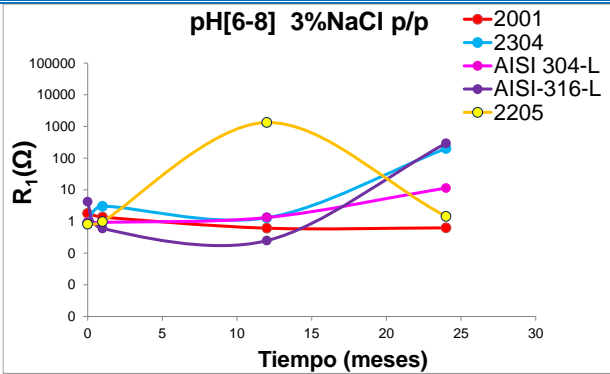
Intervalo de pH[6-8]

Intervalo de pH[12-13]

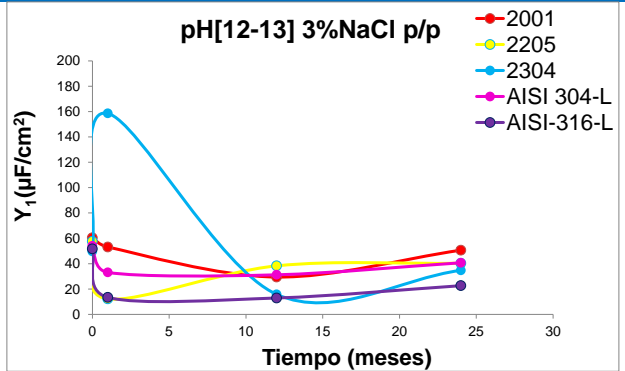
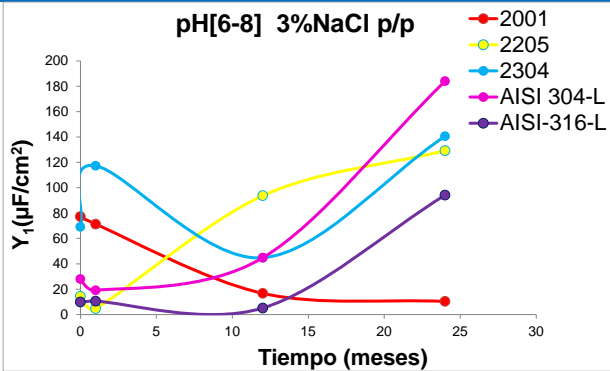
Parámetro R_0



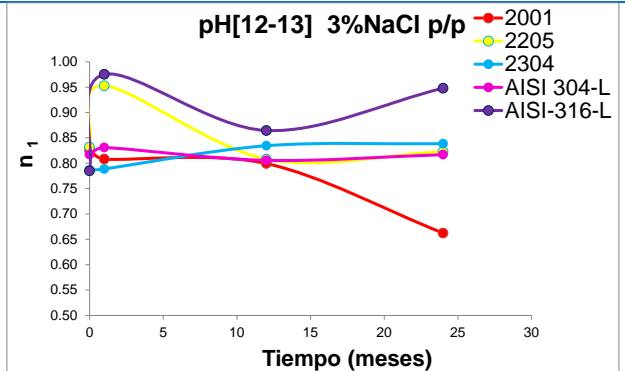
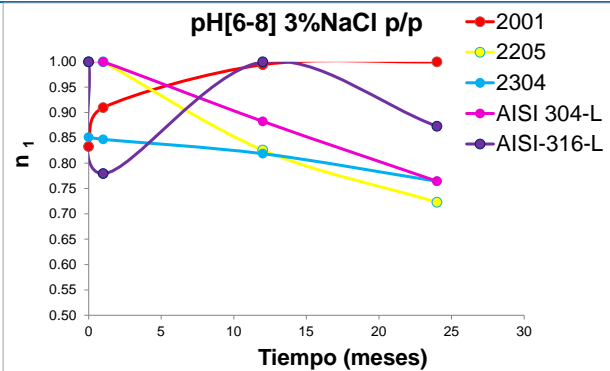
Parámetro R_1



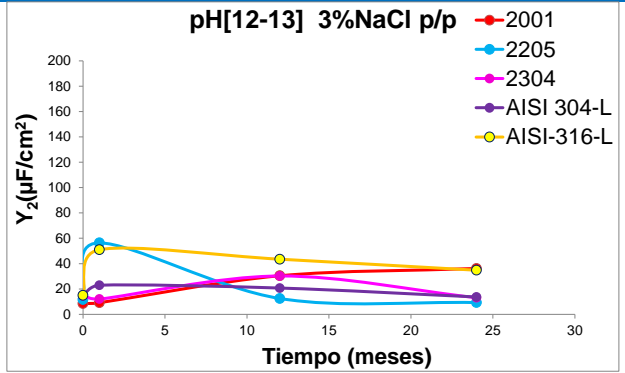
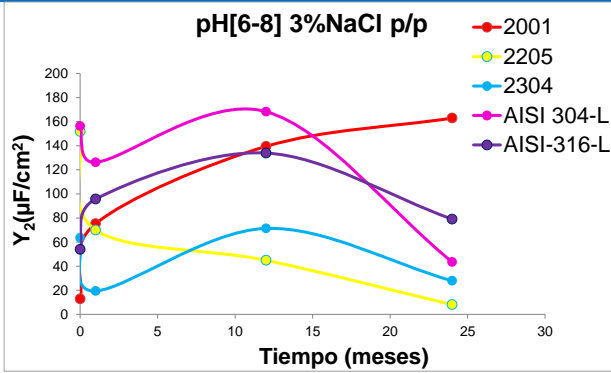
Parámetro Y_1



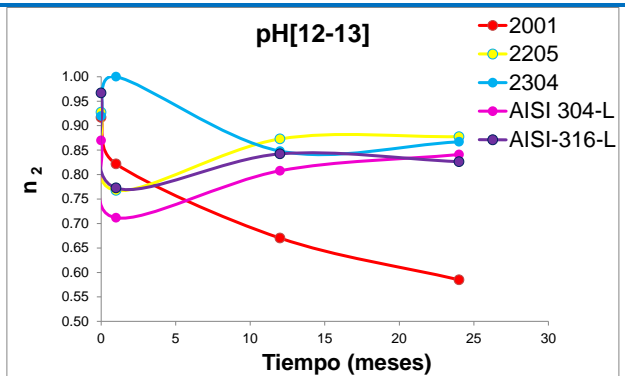
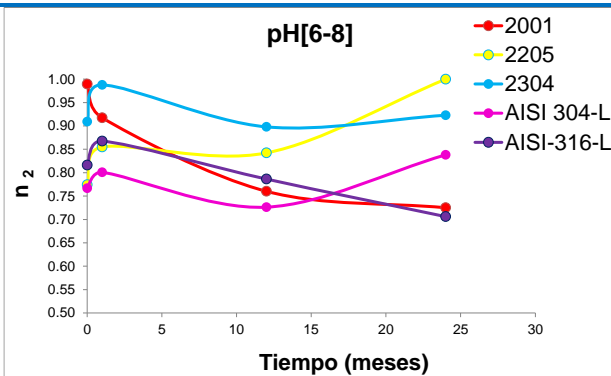
Parámetro n_1



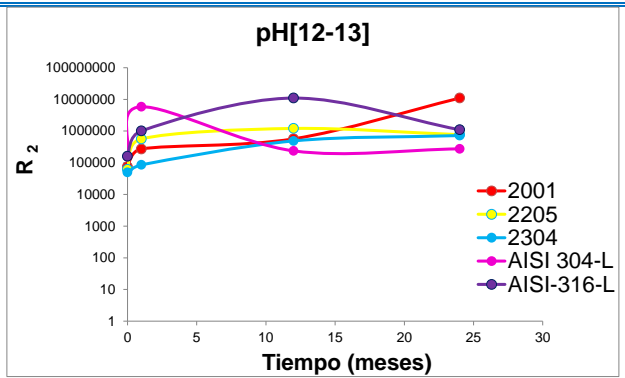
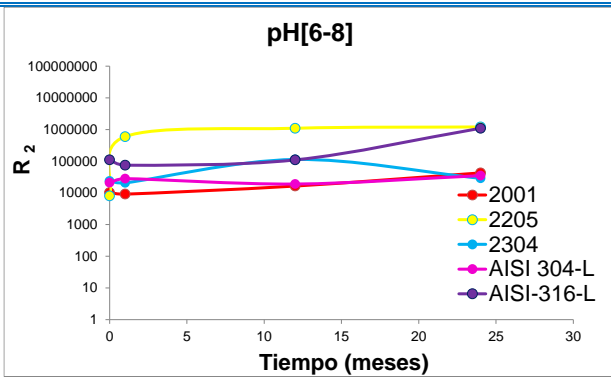
Parámetro Y_2



Parámetro n_2



Parámetro R_2



DIVULGACIONES CIENTÍFICAS

- Pachón. A. (2013). “*Armaduras de acero inoxidable expuestas en medio marino. Caracterización in-situ de la corrosión*”. En Bastidas, Medina. E. *Armaduras de acero inoxidable*. p.p [115-128] .ISBN: 978-84-695-81834. Madrid. Cedinox.
- Pachón. A. (2012). “*Drawn steel surface analysis in contact with saline solution by electrochemical atomic force microscopy (EC-AFM)*”. Andrade. C, Guliker.J and Polder. R. VI International PhD Students Workshop of Durability of Reinforced Concrete. p.p [57-68].ISBN 978-3-319-09920-0 ISBN 978-3-319-09921-7 (eBook). Madrid. Springer.
- Pachón. A. (2014). “*Stainless Steel reinforcement behavior in Marine Environment. Corrosion Characterization In –Situ*”. 1st NACE EUROPEAN CONFERENCE.EXPO 2014. Presentación oral. Madrid.
- Pachón. A. (2014). “*Armaduras de acero inoxidable expuestas en ambiente marino. Caracterización in-situ de la corrosión*”. XIII Congreso Nacional de Materiales. Presentación oral. ISBN - 13978-84-617-0054-7. Barcelona.
- Pachón. A. (2015).:” *Aceros inoxidables de refuerzo frente a la corrosión por cloruros. Austeníticos clásicos y dúplex de reciente introducción al mercado*”. XXXVI Reunión del Grupo de Electroquímica de la Real Sociedad Española de Química y XV Encuentro Ibérico de Electroquímica. Presentación oral. ISBN: 978-84-8158-691-6. p.p. 80. Vigo. Editorial Reprogalicia.
- Pachón. A. (2016). “*Límites de concentración de cloruros necesarios para la despasivación de armaduras de acero inoxidable. Austeníticos clásicos y dúplex de reciente introducción en el mercado*”. XIV Congreso Nacional de Materiales. Presentación oral. Gijón.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ahmad, Z., ed. *Principies of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. 2006.
2. Pedro Garcés Terradillos, M.Á.C.L., Emilio Zornoza Gómez, ed. *Corrosion de armaduras en estructuras de Hormigón Armado*. 2008, Editorial club universitario: Alicante.
3. Davenport, A.J., et al., *The Structure of the Passive Film That Forms on Iron in Aqueous Environments*. Journal of The Electrochemical Society, 2000. **147**(6): p. 2162-2173.
4. Huerta, E.O., *Corrosión y degradación de materiales*. 2012.
5. Izquierdo, D., et al., *Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation: Experimental and statistical study*. Electrochimica Acta, 2004. **49**(17–18): p. 2731-2739.
6. Tuutti, K., *Corrosion of steel in concrete*, in *Division of Building Materials*. 1982, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. p. 468 p.
7. RILEM, *RILEM TC 154-EMC. Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*. 2005, C. Andrade and C. Alonso.
8. Cobb, H.M., *The History of Stainless Steel* 2010, ASM International: USA.
9. Portal, A.J.C., *Estructuras Metalográficas de los Aceros Especiales*. 2010: Madrid.
10. Guillet, L., *Revue de Metallurgie-Cahiers D Informations Techniques*, 3. (1906).
11. Haynes, E., *A cobalt-chromium alloy*. Journal of the Franklin Institute, 1910. **170**(5): p. 406.
12. AENOR, *Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables. UNE-EN 10088-1*. 2015.
13. Gardner, L., *The use of stainless steel in structures*. 2005, Prog. Struct. Engng Mater. p. 45–55.
14. Fajardo, S., et al., *Corrosion behaviour of a new low-nickel stainless steel in saturated calcium hydroxide solution*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(11): p. 4190-4196.
15. Fajardo, S., et al., *Low-nickel stainless steel passive film in simulated concrete pore solution: A SIMS study*. Applied Surface Science, 2010. **256**(21): p. 6139-6143.

16. *New bridge using stainless steel rebar to last 120 years in corrosion marine and earthquake environment. New materials international.* 2006, Carpenter Technology Corporation.
17. Sakumoto Y, N.T., Matsuzaki A, *High-temperature properties of stainless steel for building structures.* Journal of Structural engineering, 1996. **4**: p. 399-406.
18. Valiente, A. and M. Iordachescu, *Damage tolerance of cold drawn ferritic-austenitic stainless steels wires for prestressed concrete.* Construction and Building Materials, 2012. **36**: p. 874-880.
19. Redaelli, E., Bertolini, Luca and Elsener, Bernhard, *Corrosion of Steel in Concrete :Prevention, Diagnosis, Repair* 2nd edition ed. 2013: John Wiley and Sons.
20. Society, T.C., *Guidance on the Use of Stainless Steel Reinforcement.*, 1998.
21. Hunkeler, F., *Einsatz von nichtrostenden Bewehrungsstaehlen im Betonbau*, T. Federal Department for Environment, Energy and Communications/Federal office for Roads, Editor. 2000: Swiss.
22. Knudsen, a., Jensen, F.M., Klinghoffer, O., and Skovsgaard, T., *Cost effective enhancement of durability of concrete structures by intelligent use of stainless steel reinforcement.* . 1998, Orlando: Int. Conf. on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures
23. Qian, S.a.Q., D. , *Theoretical and experimental study of galvanic coupling effects between carbon steel and stainless steel.* Journal of Applied Electrochemistry, 2010. **40**(2): p. 247-256.
24. R. Cigna, C.A., U. Nürnberger, R. Polder, R. Weydert, and E. Seitz, *Corrosion of steel in reinforced concrete structures* 2003, European Commission, Directorate General for Research , EUR 20599.
25. Group, L.M.E.-A.m.o.H. <https://www.lme.com/>. 2016
26. Acerinox, *Informe anual 2014.* 2014.
27. YINGKAIMO METAL NET CO., L., <http://www.yingkaimo.cn/news-84.htm>. 2012: China
28. ACERINOX. <http://www.acerinox.com/es/index.html>. 2013.
29. CEDINOX. <http://www.cedinox.es/es/acero-inoxidable/producto/producto-largo>. 2014.
30. Galvele, J.R., *Transport Processes and the Mechanism of Pitting of Metals.* J. Electrochem. Soc, 1976. **Vol. 123**, (4): p. 464-474.
31. Alvarez, M.G. and J.R. Galvele, *The mechanism of pitting of high purity iron in NaCl solutions.* Corrosion Science, 1984. **24**(1): p. 27-48.
32. Gonzalez, J.A., ed. *Control de la corrosión: Estudio y medida por técnicas electroquímicas.* Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) ed. 1989: Madrid.

33. (SCI), T.S.C.I., *Design Manual For Structural Stainless Steel*. 2006.
34. Banerji, C.L.B.a.S.K., *Embrittlement of Engineering Alloys*. 2013.
35. Cobb, H.M., *The History of Stainless Steel. Chapter 11. Two New Clases of Stainless Steel*, ed. A. International. 2010
36. Sánchez, D.M.B.a.E.M., *Armaduras de acero inoxidable*. 2013: Madrid.
37. X.R. Nóvoa , M.C.P., *On the role of iron oxides in teh electrochemical behaviour of steel embedded in concrete*. 2011.
38. MacDougall, B.G., Michael J., *Growth and stability of passive films*. Corrosion mechanisms in theory and practice, 2002. **Chapter 6.**: p. 189-217.
39. Park, T.P.a.S.M., *Spectroelectrochemical Studies of Passivation and Transpassive Breakdown Reactions of Stainless Steel*. J. Electrochem. Soc., 1997. **144(10)**: p. 3371-3377.
40. Shibagaki, S., et al., *Chemical reaction path for thin film oxidation of stainless steel*. Thin Solid Films, 1997. **303(1-2)**: p. 101-106.
41. Abreu, C.M., et al., *Comparative study of passive films of different stainless steels developed on alkaline medium*. Electrochimica Acta, 2004. **49(17-18)**: p. 3049-3056.
42. Hultquist, G., M. Seo, and N. Sato, *Selective oxidation of FeCr alloys in the 295-450 K temperature range*. Oxidation of Metals. **25(5)**: p. 363-372.
43. Abreu, C.M., et al., *Long-term behaviour of AISI 304L passive layer in chloride containing medium*. Electrochimica Acta, 2006. **51(8-9)**: p. 1881-1890.
44. Kang, J., et al., *Passivation Behaviors of Super Martensitic Stainless Steel in Weak Acidic and Weak Alkaline NaCl Solutions*. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015. **22(12)**: p. 1156-1163.
45. Galvele, J.R., *Corrosion, Pitting A2 - Veyssiére, K.H. Jürgen Buschow Robert W. Cahn Merton C. Flemings Bernhard Ilchner Edward J. Kramer Subhash Mahajan Patrick*, in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*. 2001, Elsevier: Oxford. p. 1709-1710.
46. Soltis, J., *Passivity breakdown, pit initiation and propagation of pits in metallic materials – Review*. Corrosion Science, 2015. **90**: p. 5-22.
47. Frankel, G.S., *Pitting Corrosion of Metals: A Review of the Critical Factors*. Journal of The Electrochemical Society, 1998. **145(6)**: p. 2186-2198.
48. Böhni, H., *Breakdown of passivity and localized corrosion processes*. Langmuir, 1987. **3(6)**: p. 924-930.
49. Hoar, T.P., D.C. Mears, and G.P. Rothwell, *The relationships between anodic passivity, brightening and pitting*. Corrosion Science, 1965. **5(4)**: p. 279-289.
50. Macdonald, D.D., *The Point Defect Model for the Passive State*. J. Electrochem. Soc., 1992. **139(12)**: p. 3434-3449

51. Cortés, F.J.R., *Corrosión de aceros inoxidables y galvanizados de alta resistencia, como alternativa a los aceros convencionales de pretensado*. 2010.
52. Evans, U.R., *CXL.-The passivity of metals. Part I. The isolation of the protective film*. Journal of the Chemical Society (Resumed), 1927(0): p. 1020-1040.
53. Outokumpu, *Handbook of stainless steel*. 2013, Outokumpu Oij: Finland.
54. Panizo, S.F., *Comportamiento frente a la corrosión de un nuevo acero inoxidable con bajo contenido en níquel en soluciones alcalinas basadas en hidróxido de calcio*, in *Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica*. 2012, Universidad Complutense de Madrid
55. Bardwell, J.A., B. MacDougall, and M.J. Graham, *Use of 180/SIMS and Electrochemical Techniques to Study the Reduction and Breakdown of Passive Oxide Films on Iron*. Journal of The Electrochemical Society, 1988. **135**(2): p. 413-418.
56. Lorang, G., et al., *Chemical Composition of Passive Films on AISI 304 Stainless Steel*. Journal of The Electrochemical Society, 1994. **141**(12): p. 3347-3356.
57. Brooks, A.R., et al., *On the Role of Cr in the Passivity of Stainless Steel*. Journal of The Electrochemical Society, 1986. **133**(12): p. 2459-2464.
58. Talbot, D.T.a.J., *Corrosion Science and Technology*, B. Ralph, Editor. 1998.
59. Arminox, *Reserach and Development. Stainless Steel Reinforcement " State of Art Report " Materials and Maintenance*. 2007.
60. Merello, R., et al., *Influence of chemical composition on the pitting corrosion resistance of non-standard low-Ni high-Mn-N duplex stainless steels*. Corrosion Science, 2003. **45**(5): p. 909-921.
61. Malik, A.U., et al., *The effect of dominant alloy additions on the corrosion behavior of some conventional and high alloy stainless steels in seawater*. Corrosion Science, 1995. **37**(10): p. 1521-1535.
62. Navai, F., *Electrochemical behaviour of a type 302 stainless steel in a stress field*. Journal of Materials Science, 2000. **35**(23): p. 5921-5925.
63. Navai, F., *Effects of tensile and compressive stresses on the passive layers formed on a type 302 stainless steel in a normal sulphuric acid bath*. Journal of Materials Science, 1995. **30**(5): p. 1166-1172.
64. Navai, F. and O. Debbouz, *AES study of passive films formed on a type 316 austenitic stainless-steels in a stress field*. Journal of Materials Science, 1999. **34**(5): p. 1073-1079.
65. Ravi Kumar, B., et al., *Comparison of rolling texture in low and medium stacking fault energy austenitic stainless steels*. Materials Science and Engineering: A, 2005. **394**(1-2): p. 296-301.

66. Rhouma, A.B., et al., *Effects of surface preparation on pitting resistance, residual stress, and stress corrosion cracking in austenitic stainless steels*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2001. **10**(5): p. 507-514.
67. Jang, S.-H., et al., *Effect of Shielding Gas Composition on Phase Transformation and Mechanism of Pitting Corrosion of Hyper Duplex Stainless Steel Welds*. Materials transactions, 2011. **52**(6): p. 1228-1236.
68. S.Bernhardsson, *The corrosion resistance of duplex stainless steels*. 1991.
69. Jargelius-Pettersson, R.F.A., *Application of the Pitting Resistance Equivalent Concept to Some Highly Alloyed Austenitic Stainless Steels*. Corrosion, 1998. **54**(2): p. 162-168.
70. N.Suutala, *Proceeding of international conference of stainless steels*. 1984.
71. J.A, P., *Losas de concreto reforzadas con acero inoxidable de desecho*. Ingeniería de Construcción, 2008. **23**(2).
72. Pérez-Quiroz, J.T., et al., *Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation*. Journal of Constructional Steel Research, 2008. **64**(11): p. 1317-1324.
73. Ravichandran, K., et al., *Predicting the susceptibility of stainless steel materials to localized attack — a new approach*. Journal of Materials Science Letters, 1995. **14**(5): p. 317-318.
74. Pardo, A., et al., *Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions*. Corrosion Science, 2008. **50**(6): p. 1796-1806.
75. Veleva, L., et al., *Voltammetry and surface analysis of AISI 316 stainless steel in chloride-containing simulated concrete pore environment*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2005. **578**(1): p. 45-53.
76. Ha, H.-Y., et al., *Interpretation of the relation between ferrite fraction and pitting corrosion resistance of commercial 2205 duplex stainless steel*. Corrosion Science, 2014. **89**: p. 154-162.
77. Freire, L., et al., *Electrochemical and analytical investigation of passive films formed on stainless steels in alkaline media*. Cement and Concrete Composites, 2012. **34**(9): p. 1075-1081.
78. Perren, R.A., et al., *Corrosion resistance of super duplex stainless steels in chloride ion containing environments: investigations by means of a new microelectrochemical method: II. Influence of precipitates*. Corrosion Science, 2001. **43**(4): p. 727-745.
79. Luo, H., et al., *The electrochemical behaviour of 2205 duplex stainless steel in alkaline solutions with different pH in the presence of chloride*. Electrochimica Acta, 2012. **64**: p. 211-220.
80. Freire, L., et al., *The electrochemical behaviour of stainless steel AISI 304 in alkaline solutions with different pH in the presence of chlorides*. Electrochimica Acta, 2011. **56**(14): p. 5280-5289.

81. Sahoo, G. and R. Balasubramaniam, *On the corrosion behaviour of phosphoric irons in simulated concrete pore solution*. Corrosion Science, 2008. **50**(1): p. 131-143.
82. Sanz, J.L.P., *Estudio de impedancia de la corrosión del acero inoxidable AISI 316L en las regiones pasiva y de picadura*. Revista de Metalurgia, 1999. **35**(6).
83. Salih, S.A., A.N. El-Masri, and A.M. Baraka, *Corrosion behaviour of some stainless steel alloys in molten alkali carbonates (I)*. Journal of Materials Science, 2001. **36**(10): p. 2547-2555.
84. Bautista, A., et al., *Changes in the passive layer of corrugated austenitic stainless steel of low nickel content due to exposure to simulated pore solutions*. Corrosion Science, 2009. **51**(4): p. 785-792.
85. Bautista, A., *Pasivación de aceros inoxidables dúplex en disoluciones que simulan el hormigón contaminado con cloruros*. Materiales de Construcción, 2007. **57**(288).
86. Abreu, C.M., et al., *High frequency impedance spectroscopy study of passive films formed on AISI 316 stainless steel in alkaline medium*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2004. **572**(2): p. 335-345.
87. Sugimoto, K. and Y. Sawada, *The role of molybdenum additions to austenitic stainless steels in the inhibition of pitting in acid chloride solutions*. Corrosion Science, 1977. **17**(5): p. 425-445.
88. Hultquist, G., M. Seo, and N. Sato, *Selective oxidation of FeCr alloys in the 295–450 K temperature range*. Oxidation of Metals, 1986. **25**(5): p. 363-372.
89. Alvarez, S.M., A. Bautista, and F. Velasco, *Corrosion behaviour of corrugated lean duplex stainless steels in simulated concrete pore solutions*. Corrosion Science, 2011. **53**(5): p. 1748-1755.
90. Duarte, R.G., et al., *Corrosion Behavior of Stainless Steel Rebars Embedded in Concrete: an Electrochemical Impedance Spectroscopy Study*. Electrochimica Acta, 2014. **124**: p. 218-224.
91. Abreu, C.M., et al., *Galvanic coupling between carbon steel and austenitic stainless steel in alkaline media*. Electrochimica Acta, 2002. **47**(13–14): p. 2271-2279.
92. Alonso, C., et al., *Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*. Cement and Concrete Research, 2000. **30**(7): p. 1047-1055.
93. Meira, G.R., et al., *Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone*. Construction and Building Materials, 2014. **55**: p. 289-298.
94. Castellote, M., C. Andrade, and C. Alonso, *Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values*. Corrosion Science, 2002. **44**(11): p. 2409-2424.

95. Gastaldi, L.B.a.M., *Corrosion resistance of low-nickel duplex stainless steel rebars*. *Materials and Corrosion*, 2010. **62**(2): p. 120-129.
96. García-Alonso, M.C., et al., *Corrosion behaviour of innovative stainless steels in mortar*. *Cement and Concrete Research*, 2007. **37**(11): p. 1562-1569.
97. Bertolini, L., et al. *Effects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcement in concrete*. in *Int. Conf. on "Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures", Federal Highway Administration, Orlando*. 1998.
98. Pech-Canul, M.A. and P. Castro, *Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere*. *Cement and Concrete Research*, 2002. **32**(3): p. 491-498.
99. Moser, R.D., et al., *Chloride-induced corrosion resistance of high-strength stainless steels in simulated alkaline and carbonated concrete pore solutions*. *Corrosion Science*, 2012. **57**: p. 241-253.
100. Presuel-Moreno, F., *Analysis and Estimation of Service Life of Corrosion Prevention Materials Using Diffusion, Resistivity and Accelerated Curing for New Bridge Structures*. 2013, Florida Department of Transportation Research Center.
101. O.B. McDonald, M.R.S., O.W. Pfeifer, and V.P. Virmani, *Stainless steel reinforcing as corrosion protection*. 1995, Nickel Development Institute (Ni DI).
102. Damborenea, J.V.a.J.J., ed. *Ciencia e ingeniería de las superficies y de los materiales metálicos*. ed. CSIC. 2000, CSIC: Madrid.
103. Sánchez, J.M.P.a.P., *Química electroanalítica: Fundamentos y aplicaciones*. 1999, Síntesis.
104. Andrade, C. and J.A. González, *Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements*. *Materials and Corrosion*, 1978. **29**(8): p. 515-519.
105. Andrade, C., Castelo, V., Alonso, C. and Gonzalez, J., *The Determination of the Corrosion Rate of Steel Embedded in Concrete by the Polarization Resistance and AC Impedance Methods*, in *Corrosion Effect of Stray Currents and the Techniques for Evaluating Corrosion of Rebars in Concrete*. 1984. p. 43-63.
106. *Impedance Spectroscopy : Theory, Experiment, and Applications (2)*. 2005, Hoboken, US: Wiley-Interscience.
107. Polo, J.L., *Modelado de diagramas de impedancia en procesos de corrosión*. 1999, Universidad Pontificia Comillas de Madrid.
108. Macdonald, D.D., E. Sikora, and G. Engelhardt, *Corrosion Characterizing electrochemical systems in the frequency domain*. *Electrochimica Acta*, 1998. **43**(1): p. 87-107.
109. Macdonald, D.D., *Some Advantages and Pitfalls of Electrochemical Impedance Spectroscopy*. *Corrosion*, 1990. **46**(3): p. 229-242.

110. Macdonald, D.D. and M. Urquidi-Macdonald, *Application of Kramers-Kronig Transforms in the Analysis of Electrochemical Systems: I . Polarization Resistance*. Journal of The Electrochemical Society, 1985. **132**(10): p. 2316-2319.
111. Rocchini, G., *The application of the transform of Kramers- Kronig for computing the polarization resistance*. Materials and Corrosion, 1998. **49**(10): p. 764-770.
112. Urquidi-Macdonald, M., S. Real, and D.D. Macdonald, *Application of Kramers-Kronig Transforms in the Analysis of Electrochemical Impedance Data: II . Transformations in the Complex Plane*. Journal of The Electrochemical Society, 1986. **133**(10): p. 2018-2024.
113. Urquidi-Macdonald, M., S. Real, and D.D. Macdonald, *Applications of Kramers—Kronig transforms in the analysis of electrochemical impedance data—III. Stability and linearity*. Electrochimica Acta, 1990. **35**(10): p. 1559-1566.
114. Macdonald, D.D. and M. Urquidi-Macdonald, *Kramers-Kronig Transformation of Constant Phase Impedances*. Journal of The Electrochemical Society, 1990. **137**(2): p. 515-517.
115. van Meirhaeghe, R.L., et al., *On the application of the Kramers-Kronig relations to problems concerning the frequency dependence of electrode impedance*. Electrochimica Acta, 1976. **21**(1): p. 39-43.
116. Boukamp, B.A., *A Linear Kronig-Kramers Transform Test for Immittance Data Validation*. Journal of The Electrochemical Society, 1995. **142**(6): p. 1885-1894.
117. Agarwal, P., M.E. Orazem, and L.H. Garcia-Rubio, *Measurement Models for Electrochemical Impedance Spectroscopy: I . Demonstration of Applicability*. Journal of The Electrochemical Society, 1992. **139**(7): p. 1917-1927.
118. Orazem, M.E., J.M. Esteban, and O.C. Moghissi, *Practical Applications of the Kramers-Kronig Relations*. Corrosion, 1991. **47**(4): p. 248-259.
119. Scully, J.R., Silverman, D. C. and Kendig, M. W, *Electrochemical impedance: analysis and interpretation*. 1993, ASTM.
120. Panizo, S.F., *Comportamiento frente a la corrosión de un nuevo acero inoxidable con bajo contenido en níquel en soluciones alcalinas basadas en hidróxido cálcico*. 2013, Universidad Complutense de Madrid: Madrid.
121. Gabrielli, C., Keddam, M. y Takenouti, H, *Kramers-Kronig transformation in relation to the interface regulating device. Electrochemical Impedance: Analysis and Interpretation*. ASTM STP 1188, 1993: p. 140-153.
122. Roy, S.K., H. Hagelin-Weaver, and M.E. Orazem, *Application of complementary analytical tools to support interpretation of polymer-electrolyte-membrane fuel cell impedance data*. Journal of Power Sources, 2011. **196**(8): p. 3736-3742.
123. ASTM, G.-. *Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys 1*. 2003.

124. Kaneko, M. and H.S. Isaacs, *Effects of molybdenum on the pitting of ferritic and austenitic-stainless steels in bromide and chloride solutions*. Corrosion Science, 2002. **44**(8): p. 1825-1834.
125. Salinas-Bravo, V.M. and R.C. Newman, *An alternative method to determine critical pitting temperature of stainless steels in ferric chloride solution*. Corrosion Science, 1994. **36**(1): p. 67-77.
126. Mazario, E., et al., *Pitting corrosion and stress corrosion cracking study in high strength steels in alkaline media*. Journal of Solid State Electrochemistry, 2015: p. 1-5.
127. Macías, A. and C. Andrade, *Corrosion Rate of Galvanized Steel Immersed in Saturated Solutions of Ca(OH)₂ in the pH Range 12–13*. British Corrosion Journal, 1983. **18**(2): p. 82-87.
128. Blanco, M.T., C. Andrade, and A. Macias, *SEM Study of the Corrosion Products of Galvanized Reinforcements Immersed in Solutions in the pH Range 12.6 to 13.6*. British Corrosion Journal, 1984. **19**(1): p. 41-48.
129. González, J.A., *Valores de la constante B del método de resistencia de polarización para veinte sistemas metal-medio diferentes*. Revista de Metalurgia, 1996. **32**(1).
130. ASTM C1543 - 10a. *Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding*. 2010, ASTM International.
131. C.Andrade and C.Alonso with contributions from J.Gulikers, R.P., R.Cigna, Vennesland, M. Salta, A. Raharinaivo and B. Elsener., *"Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion"*. Materials and Structures, 2004. **37**: p. 623-643.
132. G1-03, A., *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens* 2003.
133. González, J.A., et al., *Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement*. Cement and Concrete Research, 1995. **25**(2): p. 257-264.
134. Andrade, C. and C. Alonso, *On-site measurements of corrosion rate of reinforcements*. Construction and Building Materials, 2001. **15**(2–3): p. 141-145.
135. Andrade, C, A.C., Gonzalez, J.A. and Rodriguez, J, *Remaining Service Life of Corroding Structures*. 1989: Portugal.
136. Andrade, C., et al., *Electrochemical behaviour of steel rebars in concrete: influence of environmental factors and cement chemistry*. Electrochimica Acta, 2001. **46**(24–25): p. 3905-3912.
137. Criado, M., et al., *Aspectos cinéticos de la corrosión y fenómenos de pasividad*. 2013. 2013.
138. UNE 83992-2 . *Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 2: Método integral acelerado*. 2012.

139. Feliu, S., et al., *Determining polarization resistance in reinforced concrete slabs*. Corrosion Science, 1989. **29**(1): p. 105-113.
140. Feliu, S., et al., *On-Site Determination of the Polarization Resistance in a Reinforced Concrete Beam*. Corrosion, 1988. **44**(10): p. 761-765.
141. products”, T.C.C.T.C.a.r., *prEN 12390-11. Testing hardened concrete -Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion*. 2014
142. Andrade, C., ed. *CORROSIÓN DE ARMADURAS: MODELADO Y VIDA ÚTIL*. Vol. Seminario 1. 2015, Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja. CSIC. : Madrid.
143. AENOR, *UNE 83988-1. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo (método de referencia)*. 2008.
144. AENOR, *83988-2. Determinación de la resistividad eléctrica. Método de las cuatro puntas o método de Wernner*. 2014.
145. AENOR, *UNE 83987. Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruros en el hormigón endurecido. Método multirrégimen*. 2014.
146. ISO-1920-11, *Testing of concrete- Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete. Unidirectional diffusion*. 2013.
147. Andrade, C. and R. D’Andrea, *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*. 2011.
148. Cortés, F.J.R., *Corrosión de aceros inoxidables y galvanizados de alta resistencia, como alternativa a los aceros convencionales de pretensado*. 2010, Universidad Autónoma de Madrid: Madrid.
149. Pistorius, P.C. and G.T. Burstein, *Growth of corrosion pits on stainless steel in chloride solution containing dilute sulphate*. Corrosion Science, 1992. **33**(12): p. 1885-1897.
150. Pistorius, P.C. and G.T. Burstein, *Aspects of the effects of electrolyte composition on the occurrence of metastable pitting on stainless steel*. Corrosion Science, 1994. **36**(3): p. 525-538.
151. González-García, Y., et al., *Imaging metastable pits on austenitic stainless steel in situ at the open-circuit corrosion potential*. Electrochemistry Communications, 2004. **6**(7): p. 637-642.
152. Bautista, A., et al., *Corrugated stainless steels embedded in carbonated mortars with and without chlorides: 9-Year corrosion results*. Construction and Building Materials, 2015. **95**: p. 186-196.
153. P. Garcés , M.A.C.a.E.G., *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado* 2008, ECU.
154. Dong, C.F., et al., *Galvanic Corrosion of a Carbon Steel-Stainless Steel Couple in Sulfide Solutions*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011. **20**(9): p. 1631-1637.

155. Fomento, M.d., *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. 2008.
156. Ann, K.Y. and H.-W. Song, *Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete*. Corrosion Science, 2007. **49**(11): p. 4113-4133.
157. Angst, U., et al., *Critical chloride content in reinforced concrete — A review*. Cement and Concrete Research, 2009. **39**(12): p. 1122-1138.
158. C.Andrade, ed. *Manual Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras*. 1989, CSIC: Madrid.
159. Markeset, G., *Critical chloride content and its influence on service life predictions*. Materials and Corrosion, 2009. **60**(8): p. 593-596.

