

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN
DIPLOMATURA EN ARQUITECTURA TÉCNICA



PROYECTO FINAL DE CARRERA

ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DEL CLORURO SÓDICO E HIDRÓXIDO CÁLCICO EN LA CORROSIÓN DE ACERO CORRUGADO

ALUMNO: JULIAN MORITZ RUBEN HOFFMANN
DIRECTOR: MARCOS LANZÓN TORRES
CURSO 2012 - 2013

Estudio sobre el comportamiento, en cuanto a la corrosión, de piezas de acero expuestas a ambientes controlados con presencia exclusiva de cloruro sódico e/o hidróxido cálcico en cantidades variables. Conlleva el desarrollo de un método de ensayo preciso y reproducible forzando la corrosión y otro a largo plazo.



ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DEL CLORURO SÓDICO E HIDRÓXIDO CÁLCICO EN LA CORROSIÓN DE ACERO CORRUGADO



ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA





UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN



ALUMNO: JULIAN MORITZ RUBEN HOFFMANN
DIRECTOR ACADÉMICO: MARCOS LANZÓN TORRES



ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA





AGRADECIMIENTOS:

En primer lugar quiero agradecer a mi director académico, Marcos Lanzón, su gran apoyo en la realización del proyecto, también la dedicación y el entusiasmo con las que se ha implicado en su labor de tutela y la gran confianza que depositó en mí cuando aceptó mi propuesta de proyecto, ya que sin él, no me habría sido posible llevar a cabo esta tarea.

Quiero dar las gracias también al personal del SAIT, por la instrucción en el uso de las herramientas y la maquinaria de laboratorio y las pruebas realizada por ellos.

Agradezco a Encarnación Martínez, mi compañera de laboratorio, por ayudarme cuando lo necesitaba y hacer más llevaderas las largas jornadas de trabajo. También quiero agradecer a Gabriel Ros la ayuda con la maquinaria de laboratorio.

También estoy muy agradecido con mi familia por haberme apoyado en todo momento y haber colaborado siempre que les fuera posible.



ÍNDICE GENERAL:

1 Capítulo I: Introducción y Objetivo

1.1 Introducción

1.2 Normativa

1.3 Objetivos

2 Capítulo II: Materiales y Métodos

2.1 Introducción

2.2 Materiales

2.2.1 Equipos y maquinaria

2.2.2 Preparación de ambientes químicos

2.2.3 Preparación de probetas

2.2.4 Otros materiales

2.3 Ensayos de corrosión forzada

2.3.1 Preparación de probetas para ensayos de corrosión forzada

2.3.2 Preparación del ambiente químico para ensayos de corrosión forzada

2.3.3 Método de ensayo de corrosión forzada

2.3.4 Obtención de resultados para ensayos de corrosión forzada



2.4 Ensayos a largo plazo

2.4.1 Materiales y equipos empleados en ensayos a largo plazo

2.4.2 Preparación de las probetas para ensayos a largo plazo

2.4.3 Preparación del ambiente para ensayos a largo plazo

2.4.4 Método de ensayo a largo plazo

2.4.5 Obtención de resultados para ensayos a largo plazo

3 Capítulo III: Resultados obtenidos con los ensayos de corrosión forzada

3.1 Series de ensayos

3.1.1 VB-T10-C00-SXXX

3.1.2 VN-T05-C00-SXXX

3.1.3 VN-T10-C00-SXXX

3.1.4 VN-T10-C05-SXXX

3.1.5 VN-T10-C10-SXXX

3.1.6 VN-T20-C00-SXXX

3.1.7 VN-T3D-C00-SXXX

3.2 Resultados medidos

3.2.1 VB-T10-C00-SXXX

3.2.2 VN-T05-C00-SXXX

3.2.3 VN-T10-C00-SXXX

3.2.4 VN-T10-C05-SXXX

3.2.5 VN-T10-C10-SXXX

3.2.6 VN-T20-C00-SXXX

3.2.7 VN-T3D-C00-SXXX

3.3 Resumen de resultados de ensayos de corrosión forzada

4 Capítulo IV: Resultados obtenidos con los ensayos a largo plazo

4.1 Características de los ensayos

4.2 Variación de masa

4.3 Documentación fotográfica de los ensayos a largo plazo

4.4 Características electroquímicas de los ambientes

4.5 Resumen de resultados de ensayos a largo plazo

5 Capítulo V: Conclusiones finales

ANEXO I: Glosario químico y físico

ANEXO II: Bibliografía



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN





ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA



PROYECTO
FIN DE CARRERA

ALUMNO: JULIAN MORITZ RUBEN HOFFMANN
DIRECTOR: MARCOS LANZÓN TORRES



CAPÍTULO I:

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA



CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción:

La corrosión presenta uno de los problemas más frecuentes en el sector de la construcción ya que en numerosos métodos de construcción se emplean metales de algún tipo, sea como elemento principal en estructuras metálicas o instalaciones de agua o gas, o como elemento auxiliar en forma de tornillos, armaduras, etc...

Hay varios tipos de corrosión, si las diferenciamos por su causa, pero aquí tratamos solo la oxidación. Es toda aquella causada por oxígeno y la más frecuente.

La oxidación se produce cuando una superficie metálica expone a un ambiente que contiene moléculas de oxígeno diatómico. La reacción se produce entre el oxígeno del ambiente y el principal componente del acero, los átomos de hierro. Los compuestos más frecuentes que se forman por la oxidación del hierro son:

Óxido de hierro (III) o Hematita:

Se forma con oxígeno y hierro de valencia tres: $4 \cdot Fe + 3 \cdot O_2 \rightarrow 2 \cdot FeO_3$



Figura 1.1 ¹

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Iron%28III%29_oxide

Óxido de hierro (II, III) o Magnetita:

Se forma con oxígeno y hierro de valencia dos y tres: $3 \cdot Fe + 2 \cdot O_2 \rightarrow Fe_3O_4$



Figura 1.2 ²

Oxi-hidróxido de hierro (III) o Goethita:

Se forma con agua y hematita: $FeO_3 + H_2O \rightarrow 2 \cdot FeO(OH)$



Figura 1.3 ³

² <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetite>

³ <http://en.wikipedia.org/wiki/Goethite>

Oxi-hidróxido de hierro (III) n-hidratado o Limonita:

Se forma con agua y hematita y se hidrata con agua: $FeO(OH) \cdot nH_2O$



Figura 1.4 ⁴

Aunque técnicamente no se trata de un óxido diferente a la goethita se ha mencionado aquí porque es más probable encontrar el compuesto hidratado que deshidratado en los ensayos que se desarrollarán en los siguientes capítulos III y IV, puesto que se llevan a cabo en ambientes líquidos creados la mayoría en base a agua destilada.

El cloruro sódico, al disolverlo en agua, se separa en cationes de sodio (Na^{1+}) y aniones de cloro (Cl^{1-}). La presencia de esos iones da lugar a la formación de compuestos diferentes a los antes óxidos mencionados.

No obstante, los compuestos que se forman con hierro y cloro son cloruros y no óxidos de hierro, ya que no contienen átomos de hidrógeno. Por ese motivo, esos compuestos no son realmente producto final de un proceso de oxidación. Se mencionan aquí de todos modos, porque son productos estables que contienen acero y que suelen constituir un paso intermedio en la formación de los óxidos de hierro.

⁴ <http://en.wikipedia.org/wiki/Limonite>

Cloruro de hierro (II) tetrahidratado:

Se forma con cloro y hierro de valencia dos: $Fe + 2 \cdot Cl + 4 \cdot H_2O \rightarrow FeCl_2 \cdot 4H_2O$



Figura 1.5 ⁵

Cloruro de hierro (III) hexahidratado:

Se forma con cloro y hierro de valencia tres: $Fe + 3 \cdot Cl + 6 \cdot H_2O \rightarrow FeCl_3 \cdot 6H_2O$



Figura 1.6 ⁶

⁵ http://img.alibaba.com/photo/126828659/Iron_II_chloride_FeCl2_33_35_.jpg

⁶ http://es.wikipedia.org/wiki/Cloruro_de_hierro_%28III%29



1.2 Normativa:

Las diferentes normativas aplicables a la construcción hacen, entre otras, las siguientes menciones sobre la corrosión:

A) CTE-DB-SE: Documento básico Seguridad Estructural

I) CTE-DB-SE 3: Cimientos:

5.3.3 Cimentaciones profundas; Análisis y dimensionado; Otras consideraciones:

“Aparte de la consideración de los estados límite citados en los apartados precedentes, se tendrán en cuenta otros efectos que pueden afectar a la capacidad portante o aptitud de servicio de la cimentación. Entre los posibles problemas que puedan presentarse se hará una consideración expresa de los siguientes: [...]

b) ataques del medio ambiente al material del pilote con la consiguiente merma de capacidad. Se debe prestar una atención especial al efecto de la corrosión del acero en las zonas batidas por la carrera de marea o por las oscilaciones del nivel freático.”⁷

5.3.5 Cimentaciones profundas; Análisis y dimensionado; Cálculo de la resistencia al arrancamiento:

“2 En los pilotes sometidos a tracción se debe prestar un especial cuidado a los problemas de posible corrosión.”⁸

⁷ Código Técnico de la Edificación, Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación; Documento Básico SE-C: Seguridad estructural Cimientos; Capítulo 5: Cimentaciones profundas; Subcapítulo 5.3: Análisis y dimensionado; Apartado 5.3.3: Otras consideraciones

⁸ Código Técnico de la Edificación, Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación; Documento Básico SE-C: Seguridad estructural Cimientos; Capítulo 5: Cimentaciones profundas; Subcapítulo 5.3: Análisis y dimensionado; Apartado 5.3.5: Cálculo de la resistencia al arrancamiento



II) CTE-DB-SE 4: Aceros:

3 Durabilidad:

“1 Ha de prevenirse la corrosión del acero mediante una estrategia global que considere en forma jerárquica al edificio en su conjunto (situación, uso, etc.), la estructura (exposición, ventilación, etc.), los elementos (materiales, tipos de sección, etc.) y, especialmente, los detalles, evitando:

a) La existencia de sistemas de evacuación de aguas no accesibles para su conservación que puedan afectar a elementos estructurales.

b) la formación de rincones, en nudos y en uniones a elementos no estructurales, que favorezcan el depósito de residuos o suciedad.

c) el contacto directo con otros metales (el aluminio de las carpinterías de cerramiento, muros cortina, etc.).

d) el contacto directo con yesos.

2 En el proyecto de edificación se indicarán las protecciones adecuadas a los materiales para evitar su corrosión, de acuerdo con las condiciones ambientales internas y externas del edificio. A tal fin se podrá utilizar la norma UNE-ENV 1090-1: 1997, tanto para la definición de ambientes, como para la definición de las especificaciones a cumplir por las pinturas y barnices de protección, así como por los correspondientes sistemas de aplicación. [...]

8 Se definirán y cuidarán especialmente las superficies que deban resistir y transmitir esfuerzos por rozamiento, superficies de soldaduras y para el soldeo, superficies inaccesibles y expuestas exteriormente, superficies en contacto con el hormigón, la terminación de las superficies de aceros resistentes a la corrosión atmosférica, el sellado de espacios en contacto con el ambiente agresivo y el tratamiento de los elementos de fijación. Para todo ello se podrá utilizar la norma UNE-ENV 1090-1: 1997.”⁹

⁹ Código Técnico de la Edificación, Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación; Documento Básico SE-A: Seguridad estructural Acero; Capítulo 3: Durabilidad



B) Instrucciones de hormigón estructural “EHE”:

I) Capítulo II: PRINCIPIOS GENERALES Y MÉTODO DE LOS ESTADOS LÍMITE

Artículo 8: Bases de cálculo

Tabla 8.2.2. Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras:

10

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
no agresiva		I	ninguno	<ul style="list-style-type: none"> interiores de edificios, no sometidos a condensaciones elementos de hormigón en masa 	<ul style="list-style-type: none"> interiores de edificios, protegidos de la intemperie
normal	humedad alta	IIa	corrosión de origen diferente de los cloruros	<ul style="list-style-type: none"> interiores sometidos a humedades relativas medias altas (>65%) o a condensaciones exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm elementos enterrados o sumergidos. 	<ul style="list-style-type: none"> sótanos no ventilados cimentaciones tableros y pilas de puentes en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm elementos de hormigón en cubiertas de edificios
	humedad media	IIb	corrosión de origen diferente de los cloruros	<ul style="list-style-type: none"> exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm 	<ul style="list-style-type: none"> construcciones exteriores protegidas de la lluvia tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm
marina	aérea	IIIa	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km) 	<ul style="list-style-type: none"> edificaciones en las proximidades de la costa puentes en las proximidades de la costa zonas aéreas de diques, pantalanos y otras obras de defensa litoral instalaciones portuarias
	sumergida	IIIb	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar 	<ul style="list-style-type: none"> zonas sumergidas de diques, pantalanos y otras obras de defensa litoral cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar
	en zona de mareas	IIIc	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> elementos de estructuras marinas situadas en la zona de carrera de mareas 	<ul style="list-style-type: none"> zonas situadas en el recorrido de marea de diques pantalanos y otras obras de defensa litoral zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea
con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas 	<ul style="list-style-type: none"> piscinas pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve estaciones de tratamiento de agua

¹⁰ Instrucción de Hormigón Estructural “EHE” REAL DECRETO 2661/1998, de 11-DIC, del Ministerio de Fomento; Capítulo II: PRINCIPIOS GENERALES Y MÉTODO DE LOS ESTADOS LÍMITE; Artículo 8º: Bases de cálculo; Subartículo 8.2: Bases de cálculo orientadas a la durabilidad; Apartado 8.2.2 Clases generales de exposición ambiental en relación con la corrosión de armaduras

II) Capítulo VII: DURABILIDAD

- **Artículo 37: Durabilidad del hormigón y de las armaduras**

37.4 Corrosión de las armaduras:

“Las armaduras deberán permanecer exentas de corrosión durante todo el período de vida útil de la estructura. La agresividad del ambiente en relación con la corrosión de las armaduras, viene definida por las clases generales de exposición según 8.2.2.

Para prevenir la corrosión, se deberán tener en cuenta todas las consideraciones relativas a los espesores de recubrimiento, indicadas en 37.2.4.

Con respecto a los materiales empleados, se prohíbe poner en contacto las armaduras con otros metales de muy diferente potencial galvánico.

Asimismo, se recuerda la prohibición de emplear materiales componentes que contengan iones despasivantes, como cloruros, sulfuros y sulfatos, en proporciones superiores a las indicadas en los Artículos 27º, 28º y 29º.”¹¹

Aunque es evidente que la normativa ha sido elaborada con la intención de evitar los riesgos y daños causados o derivados de la corrosión, ya que indica las medidas preventivas que se han de tomar para evitar la corrosión, teniendo en cuenta las circunstancias y características de la obra en cuestión, no hay mención sobre la posibilidad de predecir o cuantificar como afectará la corrosión al acero debido a las variables de entorno.

¹¹ Instrucción de Hormigón Estructural “EHE” REAL DECRETO 2661/1998, de 11-DIC, del Ministerio de Fomento; Capítulo VII: DURABILIDAD; Artículo 37º: Durabilidad del hormigón y de las armaduras; Subartículo 37.4: Corrosión de las armaduras



1.3 Objetivos:

1. Inicialmente se trata de desarrollar un método de ensayo que permita identificar y cuantificar los efectos que determinadas variables del entorno tienen en la corrosión del acero.
2. Establecer un método de cuantificación de la corrosión que permita comparar numéricamente los resultados obtenidos por el método de ensayo desarrollado.
3. Aplicar los métodos desarrollados para cuantificar la influencia del cloruro sódico sobre la corrosión del acero.
4. Comprobar el efecto inhibitor que un ambiente básico tiene sobre la corrosión del acero corrugado.
5. Comprobar el efecto que determinadas variables (tiempo, reactivos y potencial eléctrico) tienen sobre la corrosión del acero corrugado.
6. Contrastar la degradación del acero corrugado en ensayos de corrosión forzada y ensayos a largo plazo bajo condiciones controladas.



ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA





CAPÍTULO II:

MATERIALES Y MÉTODOS



ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA



CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción:

Dado que el objetivo del ensayo era predecir en un tiempo relativamente corto la corrosión que producirían diferentes ambientes de exposición en el acero, se planteó un método inicial en el que el proceso de corrosión fuese acelerado con corriente eléctrica, ya que el aporte de energía aumenta considerablemente y de manera constante el ritmo al que se producen las reacciones químicas.

Como criterio de medición de los resultados, es decir, para cuantificar la corrosión que se produce a lo largo de un ensayo, se planteó la medición de la pérdida de masa que se producía en una pieza de acero durante el ensayo.

2.2 Materiales:

2.2.1 Equipos y maquinaria:

A) Cortadora de acero:



Figura 2.1

Esta herramienta permite cortar barras de diferentes secciones de acero en trozos de longitud definida, permitiendo así crear todas las probetas necesarias de características geométricas suficientemente similares.

B) Estufa de secado (para método de ensayo de corrosión forzada):



Figura 2.2

Crea en su interior una atmósfera a temperatura estable, que puede ser regulada, y a humedad constante, permitiendo así un secado controlado y uniforme.

C) Báscula normal:



Figura 2.3

El Modelo PB8001-S de Mettler Toledo permite medir masas hasta 8100g con una precisión de $\pm 0,1g$.

D) Báscula de precisión:



Figura 2.4

El Modelo AB304-S de Mettler Toledo permite medir masas hasta 320g con una precisión de $\pm 10^{-4}g$.

E) Agitador magnético:



Figura 2.5

El Agitador magnético crea un campo magnético rotatorio que permite inducir giro en el núcleo magnético si se sitúa encima de la plataforma superior del agitador.

F) Fuente de alimentación eléctrica:



Figura 2.6

La fuente de alimentación transforma la corriente eléctrica de la red en una corriente eléctrica cuya intensidad y voltaje pueden ser regulados, permitiendo así la creación de un circuito estable y definido.

G) Sensor de intensidad, potencia y voltaje y conector USB:



Figura 2.7

El sistema PASPORT de PASCO®, compuesto por el conector USB y el sensor permite registrar, de forma automática en el programa dataStudio, intensidad de corriente, potencia eléctrica y diferencial de potencial de un circuito eléctrico a una frecuencia máxima de 1kHz.

2.2.2 Ambiente químico:

A) Sal marina:



Figura 2.8

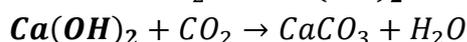
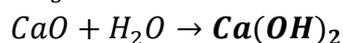
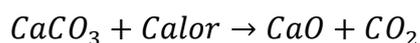
En nuestros ensayos, la sal marina es la fuente que aporta el cloruro sódico, ya que esta compuesta casi exclusivamente por él.

B) Hidróxido cálcico:



Figura 2.9

Es un componente del hormigón y principal responsable de la protección contra la corrosión ya que crea un ambiente muy alcalino (pH muy elevado), pasivando las armaduras. Es parte del llamado ciclo de la cal:



C) Agua destilada:



Figura 2.10

El agua destilada, no contiene ningún componente químico que pueda causar o alterar el proceso de la corrosión aisladamente. Por ello es la base perfecta para crear ambientes químicos controlados, necesarios para el estudio aislado de una variable.

2.2.3 Probetas:

A) Barras de acero B500-SD de Ø12:

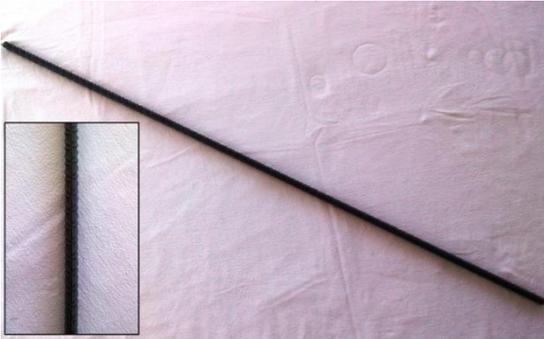


Figura 2.11

Las barras de acero B500-SD de Ø12 tienen unas características geométricas y una composición bien definidas por el Código Técnico de la Edificación. Además son empleadas frecuentemente en la elaboración de armaduras para hormigón.

B) Pintura anticorrosiva:



Figura 2.12

La pintura anticorrosiva en spray protege cualquier superficie metálica de la corrosión hasta una temperatura de 75°C.

La aplicación en spray es homogénea y no precisa el uso de herramientas que pudiesen contaminar pintura o acero.

C) Cepillo de acero:



Figura 2.13

La dureza de este cepillo se encuentra en un punto intermedio por encima del acero corroído pero por debajo del acero puro. Por ello permite limpiar una superficie metálica de cualquier resto macroscópico de corrosión sin dañarla.

2.2.4 Otros Materiales:

A) Vasos y varilla de cristal:



Figura 2.14

Las herramientas de cristal para la manipulación del ambiente químico son necesarias ya que son inertes antes los componentes del mismo.

Eso lleva a que no pueden ser dañadas por un ambiente agresivo ni tampoco contaminarlo.

B) Frascos de cristal autosellantes:



Figura 2.15

Los frascos de cristal autosellantes permiten la conservación de un líquido, protegiéndolo de las influencias químicas de su entorno y manteniéndolo inalterado.

C) Soporte de acero:



Figura 2.16

El soporte ajustable permite la correcta sujeción de las probetas durante todo el ensayo.

2.3 Ensayos de corrosión forzada:

2.3.1 Preparación de probetas para ensayos de corrosión forzada:

2.3.1.1 Planteamiento inicial de la preparación de probetas para ensayos de corrosión forzada:

Inicialmente se planteó usar barras de acero del mismo tipo, cortadas en probetas de la misma longitud y sumergidas en el ambiente químico hasta la misma cota, para garantizar una superficie expuesta idéntica.

El primer paso consiste en cortar de una barra de acero con las características deseadas una probeta de la longitud necesaria para el ensayo, que en nuestro caso



Figura 2.17:
6 barras después (izq.) a comparación de 6 antes (der.) de cepillar

quedó establecida en 19,5cm, ya que es la longitud mínima para poder sumergir la probeta correctamente quedando sujeta al soporte y conectada al circuito.

Como preparativo, la probeta se limpia con un cepillo de acero hasta quedar totalmente libre de cualquier resto de suciedad o corrosión anterior que pudiese tener, para después marcarla con una identificación inequívoca en una zona que no afecte al ensayo. A continuación, la barra se seca durante dos días en la estufa a una temperatura controlada de 62°C para

garantizar que esté totalmente libre de humedad.

El día del ensayo se extrae de la estufa y se deja enfriar hasta temperatura ambiente, para posteriormente pesarla con la báscula de precisión y registrar dicho peso junto con la identificación de la probeta.

Para el ensayo de corrosión se sujeta la probeta en el soporte, se conecta al circuito eléctrico sin funcionar y se sumerge a una profundidad fijada para garantizar la superficie de exposición antes citada que fue idéntica en todos los ensayos.

2.3.1.2 Limitaciones de la preparación inicial de probetas para ensayos de corrosión forzada:

La principal limitación del método inicialmente propuesto para la preparación de las probetas consiste en que, en la práctica, resultaba imposible sumergir las probetas con la precisión necesaria para garantizar una superficie expuesta igual para todos los ensayos.

Sin embargo, aunque eso hubiese sido viable, dado que se empleaba un agitador durante el ensayo para mantener en movimiento el líquido que constituía el ambiente químico, la superficie de esta solución se encontraba en continuo movimiento, provocando así que la profundidad de inmersión de la probeta, y con ella superficie expuesta, variara continuamente de forma impredecible a lo largo de cada ensayo.

También se observó que posiblemente dos probetas obtenidas en base a barras diferentes podrían tener composiciones químicas y/o geometrías diferentes llevando así a resultados poco reproducibles.

2.3.1.3 Optimización de la preparación de probetas para ensayos de corrosión forzada:

Para garantizar una mayor reproducibilidad de los ensayos se optó por adquirir barras de acero del mismo fabricante y lote de fabricación. Además, para cada serie de ensayos se usaron probetas resultantes del corte de la misma barra.

Como solución al problema de la superficie de exposición no constante, se decidió aplicar una capa de pintura antioxidante a las probetas.



Figura 2.18:
Barras preparadas con cinta para el pintado

Se dejan expuestos 8cm a lo largo de la barra, a aproximadamente 0,5 cm de distancia del extremo que se sumerge durante el ensayo, garantizando una superficie expuesta controlada e igual para todos los ensayos.

Tampoco se pintan la superficie de corte superior y los dos centímetros contiguos para poder conectar las pinzas del circuito.

De modo que, tras cortar las probetas de la barra y limpiarlas, se envuelven con cinta adhesiva todas las zonas que deben quedar expuestas, es decir libres de pintura [Figura 2.18]. A continuación, las probetas de acero corrugado protegidas con cinta se pintan íntegramente con pintura anticorrosiva en spray [Figura 2.19:].



Figura 2.19:
Barras recién pintadas antes del secado



Figura 2.20:
Barras pintadas y secadas antes de ensayar

Después la probeta pintada se seca a temperatura ambiente durante 48h. Posteriormente se retira toda la cinta, dejando bien definidas la superficie de exposición al ensayo de corrosión y de conexión al circuito. A continuación procede un secado de las probetas en estufa a 62°C durante una semana para eliminar cualquier humedad [Figura 2.20:].

El día del ensayo, las probetas se extraen de la estufa de secado y se dejan enfriar el tiempo suficiente hasta alcanzar la temperatura ambiente del laboratorio. Posteriormente se pesan en la báscula de precisión y se registran sus pesos junto con sus respectivas identificaciones.

Para el ensayo se sujeta la probeta en el soporte, se conecta al circuito eléctrico sin funcionar y se sumerge de tal forma que la superficie expuesta, libre de pintura, quede al menos 1cm por debajo de la superficie del líquido. Se asegura así que quede completamente sumergida, y por tanto expuesta, durante toda la duración del ensayo.



2.3.2 Preparación del ambiente químico para ensayos de corrosión forzada:

En primer lugar se miden las cantidades necesarias de cloruro sódico (sal marina) y/o hidróxido cálcico en la báscula de precisión. También se miden 1000g agua destilada con la báscula normal. A continuación se mezclan todos los componentes en un vaso de cristal, idéntico para todos los ensayos. La disolución se mezcla con el agitador magnético, siempre a la misma velocidad y con el mismo núcleo, durante 10 minutos, para asegurar una disolución completa de los componentes y, por tanto, un ambiente más homogéneo.

2.3.3 Método de ensayo de corrosión forzada:

2.3.3.1 Planteamiento inicial del método de ensayo de corrosión forzada:

Inicialmente se planteó un método de ensayo muy sencillo. Una vez preparada la probeta, sujeta debidamente el soporte y sumergida correctamente en la solución, se conecta la probeta al circuito eléctrico y se enciende la fuente durante un tiempo que se registra junto a la identificación de la probeta y la composición química de la solución empleada en el ensayo.

Cuando se acaba el tiempo de ensayo, se desconecta la fuente de alimentación y se extrae la probeta de la solución, limpiándola con un papel limpio y seco hasta secarla al tacto, para almacenarla sobre una rasilla cerámica e introducirla en el horno de secado, registrando la hora del comienzo de secado.

2.3.3.2 Limitaciones del método inicial de ensayo de corrosión forzada:

La primera limitación observada fue una variación inesperada del diferencial de potencial del circuito a lo largo del tiempo de ensayo, que podía tener dos posibles explicaciones. Por un lado, dado que el ambiente se alteraba visiblemente durante el ensayo era lógico suponer que también se produjese una alteración química de la solución y, por tanto, variara su conductividad eléctrica. Por otra parte, la alteración también podría producirse por la polarización de los electrodos debido a la acumulación local de cargas en la superficie de los mismos.

Aunque existan dos o más causas de la variación de potencial, las condiciones de ensayo fueron siempre las mismas entre experimentos, por lo que los resultados obtenidos son comparables. Por otra parte, la modificación del ambiente químico de la celda producido por las reacciones químicas forma parte del experimento y resulta por tanto inevitable que se produzcan tales variaciones. No obstante, el problema se resolvió en parte empleando un agitador magnético para mantener en movimiento la solución y así impedir la acumulación de cargas (polarización).

Para mejorar la precisión de la medida, la fuente de alimentación se usó solo como celda de potencial y se conectó un sensor adicional de intensidad, potencia y voltaje al circuito para monitorizar de forma más precisa la evolución del circuito. Al final de cada experimento, se agitó la mezcla con los óxidos formados y se recogieron alícuotas de entre 50-100 ml para estudiar la composición de los sólidos formados.

2.3.3.3 Optimización de método de ensayo de corrosión forzada:



Figura 2.21:
Celda de corrosión en funcionamiento

En el método corregido, una vez colocada la muestra, se enciende el agitador magnético con la misma potencia para todos los ensayos usando el mismo núcleo. Se inicia el sensor de intensidad, potencia y voltaje entre cinco y diez segundos antes de encender la fuente de alimentación, para asegurar la captación correcta de todos los datos.

Una vez finalizado el tiempo de ensayo, se desconecta la fuente de alimentación y, con un retraso prudencial de entre cinco y diez segundos, se detiene el sensor de intensidad, potencia y voltaje. Después se extrae la probeta de la solución, limpiándola con un papel seco y limpio hasta dejarla seca al tacto, para almacenarla sobre una rasilla cerámica e introducirla en la estufa, registrando el momento del comienzo de secado. De manera análoga, al final de cada experimento se recogieron alícuotas para estudiar la composición de los sólidos formados.

2.3.3.4 Nomenclatura para probetas y series de ensayos:

El nombre de todas las probetas, con el fin de facilitar la identificación de sus respectivas condiciones de ensayo, se ajusta siempre al siguiente patrón:

V [W] -T [XX] -C [YY] -S [ZZZ]

[W]: N=voltaje máximo de la fuente; B= voltaje reducido

[XX]: 05=tiempo de ensayo 5min; 10= tiempo de ensayo 10min; 20= tiempo de ensayo 20min; 3D= tiempo de ensayo 3días (4320min)

[YY]: Concentración de hidróxido cálcico en la solución multiplicado por 100 expresado con dos dígitos.

[ZZZ]: Concentración de cloruro sódico en la solución multiplicado por 1000 expresado con tres dígitos.

El nombre de las series de ensayo, con el fin de facilitar la identificación sus condiciones de ensayo comunes y su variable a estudiar, se ajusta siempre al siguiente patrón:

V [W] -T [XX] -C [YY] -S [ZZZ]

[W]: N=voltaje máximo de la fuente; B= voltaje reducido

[XX]: 05=tiempo de ensayo 5min; 10= tiempo de ensayo 10min; 20= tiempo de ensayo 20min; 3D= tiempo de ensayo 3días (4320min); XX=variable a estudiar

[YY]: Concentración de hidróxido cálcico en la solución multiplicado por 100 expresado con dos dígitos, si es la variable a estudiar, se sustituirá por XX.

[ZZZ]: Concentración de cloruro sódico en la solución multiplicado por 1000 expresado con tres dígitos, si es la variable a estudiar, se sustituirá por XXX.



2.3.4 Obtención de resultados para ensayos de corrosión forzada:

2.3.4.1 Planteamiento inicial de medición de resultados para ensayos de corrosión forzada:

El proceso de obtención inicial de resultados preveía extraer las probetas previamente ensayadas del horno tras una semana de secado, asegurando así que hubiesen perdido toda la humedad y registrar la variación (aumento o pérdida) de masa que podría producirse al oxidar el metal.

2.3.4.2 Limitaciones de la medición inicial de resultados de ensayos de corrosión forzada:

Las probetas no aumentaban su masa después del secado con respecto a antes del ensayo, sino que esta disminuía en la mayoría de los casos. Esto se atribuye principalmente a los desprendimientos de acero oxidado durante el ensayo y, en menor grado, al manejo posterior de las probetas por muy cuidadoso que fuese.

2.3.4.3 Optimización de medición de resultados de ensayos de corrosión forzada:

Se estableció que una semana de secado en la estufa fue suficiente para alcanzar un peso estable de las probetas. Después de secar las probetas se registraron sus masas en la báscula de precisión, se identificaron y se cepillaron para desprender cualquier resto de corrosión sin dañar la pintura anexa. A continuación, la probeta se vuelve a pesar en la misma báscula (peso seco final limpio).

En cuanto a las muestras de los ambientes alterados, se pudo observar por el color y tipo de sedimentación (velocidad y tamaño coloidal) que se trataba básicamente de tres óxidos diferentes. Por tanto, tras finalizar todas las series de ensayos se recogió una muestra de cada tipo, que contuviese suficiente compuesto sedimentado para proceder a su análisis por espectroscopia de rayos X y una observación con microscopio electrónico de barrido.

2.3.4.4 Nomenclatura para resultados:

Para las propiedades electroquímicas de los ensayos se ha optado por la siguiente nomenclatura:

- o La Intensidad eléctrica promedia medida durante un ensayo se denominará **Intensidad media** y se abreviará como I_{med}
- o La Potencia eléctrica promedia medida durante un ensayo se denominará **Potencia media** y se abreviará como P_{med}
- o El diferencial de potencial promedio medido durante un ensayo se denominará **Voltaje medio** y se abreviará como V_{med}
- o La Resistencia eléctrica promedia deducida durante un ensayo se denominará **Resistencia media** y se abreviará como R_{med}
- o El porcentaje de cloruro sódico contenido en el ambiente se abreviará en las fórmulas como $S_{\%}$

Para los pesos y sus variaciones se ha optado por la siguiente nomenclatura:

- o El peso seco inicial de las probetas medido, después de pintarlas y secarlas, antes del ensayo se denominará **Peso seco inicial** y se abreviará como P_{SI}
- o El peso seco de la probeta medido después del secado posterior al ensayo, pero antes de eliminar los óxidos producidos por ensayo y secado se denominará **Peso seco final corroído** se abreviará como P_{SFC}
- o El peso seco de la probeta medido una vez eliminados todos los óxidos que se han producido durante ensayo y secado se denominará **Peso seco final limpio** y se abreviará como P_{SFL}
- o La variación real de peso que se atribuye a la oxidación durante el ensayo, y que es la diferencia entre el peso seco inicial y el peso seco final corroído, se denominará **peso de óxidos no adheridos** y se abreviará como P_{CNA}
- o La variación real de peso que se atribuye a la oxidación durante el secado, y que es la diferencia entre el peso seco final corroído y el peso seco final limpio, se denominará **peso de óxidos adheridos** y se abreviará como P_{CA}



- o La variación real de peso total de la probeta, que es la diferencia entre el peso seco inicial y el peso seco final limpio, se denominará **peso de óxidos total** y se abreviará como P_{CT}
- o El peso seco de la zona expuesta, el cual se empleará como base para todos los cálculos de variación de peso relativa, se estima igual para todas las probetas. Este planteamiento se justifica dado que las diferencias de sus pesos secos iniciales se deben a que con la cortadora de acero no es viable cortar todas las probetas a exactamente la misma longitud, sin embargo, las zonas expuestas de todas las probetas si pueden suponerse todas idénticas, dado que su longitud de 80mm se ha determinado con una precisión mucho mayor y es un múltiplo exacto del patrón de corrugas de las barras de acero, cuya longitud es 16mm. Este peso se denominará **peso seco inicial expuesto** y se abreviará como P_{SIE} . Se ha calculado como el promedio de los pesos secos iniciales de todas las probetas multiplicado por el cociente de la longitud de la zona expuesta entre la longitud promedia de todas las probeta, estimada en 195mm.

$$P_{SI} = \frac{80}{195} \cdot \sum_{i=0}^{n=66} P_{SI_i} \cdot \frac{1}{n} = \frac{80}{195} \cdot 11308,9397g \cdot \frac{1}{66} \Rightarrow P_{SIE} = 70,2964g$$

- o El peso seco de la zona expuesta después del secado posterior al ensayo, pero antes de eliminar los óxidos producidos por ensayo y secado se denominará **Peso seco final corroído expuesto** se abreviará como P_{SFCE} , se calculará restando al peso seco inicial expuesto el peso de óxidos no adheridos de la probeta, ya que se considera que toda la pérdida de masa se produce en la zona expuesta.
- o El peso seco de la probeta medido una vez eliminados todos los óxidos que se han producido durante ensayo y secado se denominará **Peso seco final limpio expuesto** y se abreviará como P_{SFLE} , se calculará restando al peso seco inicial expuesto el peso de óxidos total de la probeta, ya que se considera que toda la pérdida de masa se produce en la zona expuesta.
- o La variación relativa de peso que se atribuye a la oxidación durante el ensayo, y que es el cociente del peso de óxidos no adheridos entre el peso seco inicial expuesto se denominará **variación por óxidos no adheridos** y se abreviará como Δ_{CNA}
- o La variación relativa de peso que se atribuye a la oxidación durante el secado, y que es el cociente del peso de óxidos adheridos entre el peso seco

inicial expuesto se denominará **variación por óxidos adheridos** y se abreviará como Δ_{CA}

- o La **variación relativa total de peso**, que es el cociente del peso de óxidos total entre el peso seco inicial expuesto se denominará **variación por óxidos total** y se abreviará como Δ_{CT}

2.4 Ensayos a largo plazo:

2.4.1 Materiales empleados para ensayos a largo plazo:

A) Báscula de alta precisión:



Figura 2.22

El Modelo XP56 de Mettler Toledo permite medir masas de hasta 52g con una precisión de $\pm 10^{-6}$ g.

B) Probeta graduada de cristal:



Figura 2.23

La probeta graduada permite por su forma esbelta y alargada medir pequeños volúmenes de líquido con gran precisión.

Siendo de cristal, es inerte ante los diferentes ambientes, por tanto ni se degrada ni los contamina.

C) Agitador Vórtex o mezclador de vórtice:



Figura 2.24

El agitador Vórtex permite agitar el líquido contenido en pequeños viales de cristal y así conseguir una mezcla homogénea de sus componentes.

D) Placas Petri:



Figura 2.25

Las placas Petri permiten almacenar pequeñas cantidades de líquidos o sólidos, protegiéndolos de las influencias del entorno químico. Además, por ser transparentes permiten observar su contenido sin necesidad de extraerlo ni exponerlo.

E) Estufa de secado (para método de ensayo a largo plazo):



Figura 2.26

Crea en su interior una atmósfera a temperatura estable, que puede ser regulada, y a humedad constante, permitiendo así un secado controlado y uniforme.

F) Conductímetro:



Figura 2.27

Permite determinar la conductividad eléctrica de una disolución o mezcla.

G) pH-metro:



Figura 2.28

Permite determinar el pH de una disolución o mezcla, identificando así su carácter ácido, neutro o alcalino.

2.4.2 Preparación de las probetas:

Las probetas para este ensayo son cortes de barras de acero corrugado de geometría muy similar a una moneda de grosor aproximado 2mm y que fueron todas cortadas consecutivas de la misma barra de acero. Previo al corte, la barra se limpia de cualquier resto de corrosión o suciedad y se repite el proceso de limpieza una vez cortadas las monedas.

Después del corte las probetas se secan en estufa durante una semana para eliminar cualquier humedad residual. Tras el secado las probetas se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se marcaron y pesaron registrando todos los pesos secos iniciales con la báscula de alta precisión.

2.4.3 Preparación del ambiente:

El ambiente químico de corrosión se simuló mediante la preparación de 50ml de agua destilada con cloruro sódico y/o hidróxido cálcico. Para tener una precisión suficiente en las medidas de las cantidades de cloruro sódico e hidróxido cálcico a esta escala tan pequeña de valores, se emplea la báscula de alta precisión.

Una vez obtenidas las cantidades necesarias de todos los componentes, estos se mezclan en un vial de cristal, asegurando una disolución homogénea con un agitado durante dos minutos con la agitadora Vórtex y vertiendo inmediatamente después todo el líquido en una placa de Petri previamente etiquetada con la composición correspondiente.

También se realizaron tres ensayos con ambientes no elaborados sino obtenidos directamente de agua de mar y de red, para los cuales sencillamente se empleaba una cantidad de 50ml medida directamente en la probeta graduada.

2.4.4 Desarrollo del ensayo:

La cortadora de acero con la que se elaboraron las probetas en forma de moneda no resultó una herramienta lo suficientemente precisa para asegurar una aceptable homogeneidad de las mismas. Por lo tanto, se optó por preparar el doble número de probetas que de ambientes previstos (dos probetas por placa Petri). Se controló que la relación acero/disolución fuera constante. Las probetas quedaron totalmente sumergidas en las soluciones y se anotaron las identificaciones de las probetas en la tapadera de la placa correspondiente. Durante el ensayo las placas permanecieron cerradas (no selladas) para evitar la contaminación del ambiente creado permitiendo la entrada de oxígeno.

El comienzo de ensayo se registra con la fecha y hora a la que se introducen las probetas en el ambiente y después se almacenan todas las placas Petri en laboratorio y en un entorno que garantice su correcta conservación.



2.4.5 Obtención de resultados:

2.4.5.1 Medición de resultados de ensayos a largo plazo:

La medición de los resultados en los ensayos a largo plazo se divide en dos tareas fundamentales: La medición de la corrosión producida en las probetas y la alteración sufrida en el líquido que genera el ambiente de corrosión durante el ensayo.

En cuanto a la medición de la corrosión producida se aplica el mismo método que en el ensayo principal, secando la probeta en la estufa durante siete días a 62°C. Una vez finalizado el tiempo de secado, las probetas se extraen de la estufa y se dejan enfriar hasta temperatura ambiente, para después proceder a registrar sus pesos con la báscula de alta precisión, limpiarlas con el cepillo de acero hasta dejarlas libres de cualquier resto de corrosión y volver a registrar sus pesos.

Con respecto a la medida de la alteración de las disoluciones usadas para generar los ambientes corrosivos, se registró únicamente la conductividad eléctrica y el pH de las disoluciones, empleando para ello el Conductímetro y pH-metro, arriba descritos.

2.4.5.2 Nomenclatura de resultados de ensayos a largo plazo:

El nombre de las probetas que se emplearon en ensayos con ambientes preparados en el laboratorio, con el fin de facilitar la identificación de sus respectivas condiciones de ensayo, se ajusta siempre al siguiente patrón:

C [Y] -S [ZZZ] - [N]

[Y]: Concentración de hidróxido cálcico en la solución multiplicado por 10 expresado con un dígito.

[ZZZ]: Concentración de cloruro sódico en la solución multiplicado por 1000 expresado con tres dígitos.

[N]: Numeración de la probeta dentro del ensayo, 1= probeta de menor peso, 2= probeta de mayor peso.

Las probetas con ambientes de otras fuentes llevan nombres especiales, aunque conservan el término [N], con el mismo significado.



En este caso, dado el reducido número de ensayos, no se han definido series de ensayos.

La nomenclatura para los pesos secos son las siguientes:

- o **P_{ipsi}**: Peso seco inicial de la probeta justo antes del ensayo
- o **P_{ipsfc}**: Peso seco de la probeta después del secado posterior al ensayo sin haber eliminado los óxidos
- o **P_{ipsfl}**: Peso seco de la probeta después del secado posterior al ensayo una vez eliminados los óxidos

Como los pesos secos iniciales de las probetas para los ensayos a largo plazo son muy diferentes entre sí, debido a la imposibilidad de confeccionar probetas geométricamente idénticas, las variaciones de masa se han modificado multiplicándolas con un coeficiente de corrección. Dicho coeficiente atiende a las diferentes superficies de exposición de las probetas. Se obtiene dividiendo la superficie de exposición promedia de todas las probetas de los ensayos a largo plazo entre la superficie de exposición de la probeta cuya variación de masa se calcula.

Para el cálculo de las superficies de exposición de las probetas se ha asumido una forma cilíndrica perfecta con un diámetro de doce milímetros. Por lo tanto, la superficie expuesta de cada probeta es la suma de sus dos superficies de corte circulares, idénticas para todas las probetas, y su superficie lateral.

Cada superficie de corte, iguales para todas las probetas, responde a la siguiente expresión:

$$S_c = \pi \cdot (6mm)^2 = 113,0973 \text{ mm}^2$$

La superficie lateral se calcula en función del peso de la probeta, asumiendo que la densidad del material es constante. Se asume que el peso seco inicial expuesto (P_{SIE}), calculado para los ensayos de corrosión forzada, corresponde a ocho centímetros de longitud.

De esta forma, la altura de cada probeta es el resultado de multiplicar su peso se inicial por 80mm y dividirlo entre el peso seco inicial expuesto de los ensayos de corrosión forzada, es decir:

$$h_i = P_{SI_i} \cdot \frac{80mm}{70,2964g}$$

Como consecuencia, la superficie lateral de cada probeta se obtiene con la siguiente expresión:

$$S_{L_i} = 2 \cdot \pi \cdot h_i$$

Teniendo en cuenta todo lo anterior, la superficie expuesta de cada probeta se describe esta expresión matemática:

$$S_{E_i} = 2 \cdot S_C + 2 \cdot \pi \cdot h_i = 2 \cdot \pi \cdot (6mm)^2 + P_{SI_i} \cdot \frac{80mm}{70,2964g}$$

Por tanto, el coeficiente de corrección por superficie de exposición responde a la expresión:

$$C_{CSE_i} = \frac{S_{E_i}}{\bar{S}_E} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (6mm)^2 + P_{SI_i} \cdot \frac{80mm}{70,2964g}}{\sum S_{E_i} / 22}$$

Atendiendo a esta explicación, la nomenclatura para las variaciones de masa en los ensayos a largo plazo son las siguientes:

- o **P_{lpcna}**: Peso de los óxidos que no permanecieron adheridos a la probeta
 $P_{lpcna_i} = C_{CSE_i} \cdot (P_{lpsi_i} - P_{lpsfc_i})$
- o **P_{lpct}**: Peso total de todos los óxidos $P_{lpct_i} = C_{CSE_i} \cdot (P_{lpsi_i} - P_{lpsfl_i})$
- o **P_{lpca}**: Peso de los óxidos que permanecieron adheridos a la probeta $P_{lpca_i} = C_{CSE_i} \cdot (P_{lpct_i} - P_{lpcna_i}) = C_{CSE_i} \cdot (P_{lpsfcr_i} - P_{lpsflr_i})$

Modificar las variaciones de masa de las probetas con su correspondiente coeficiente de corrección es equivalente a extrapolar siempre una variación de masa equivalente para una probeta promedia de todas las probetas.

Por lo tanto, las variaciones de masa relativas han de calcularse tomando como base el peso seco inicial promedia de todas las probetas a largo plazo, que es el siguiente:

$$\bar{P}_{lpsi} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n=22} P_{lpsi_i} = \frac{64574,514 \text{ mg}}{22} = 2935,205g$$

Como consecuencia, las pérdidas de masa relativa tienen la siguiente nomenclatura:

- o Δ_{lpcna} : Pérdida porcentual de masa por óxidos que no permanecieron adheridos $\Delta_{lpcna} = \frac{P_{lpcna}}{\bar{P}_{lpsi}}$
- o Δ_{lpct} : Pérdida porcentual de masa por todos los óxidos $\Delta_{lpct} = \frac{P_{lpct}}{\bar{P}_{lpsi}}$
- o Δ_{lpcna} : Pérdida porcentual de masa por óxidos que permanecieron adheridos $\Delta_{lpcna} = \frac{P_{lpcna}}{\bar{P}_{lpsi}}$

Para acabar este capítulo, la nomenclatura de las características electroquímicas de los ensayos a largo plazo es la siguiente:

- o **C_e**: Conductividad eléctrica de la mezcla resultante del ambiente tras el ensayo
- o **pH**: pH de la mezcla resultante del ambiente tras el ensayo



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN





ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA





CAPÍTULO III:

RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE CORROSIÓN FORZADA



ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA





CAPÍTULO III: RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE CORROSIÓN FORZADA

3.1 Series de ensayos:

En la presentación de resultados se ha optado por agrupar los ensayos en varios grupos. Se mantienen siempre constantes todas las variables del entorno, excepto aquella cuya influencia se estudia. Los grupos formados son los siguientes:

3.1.1 VB-T10-C00-SXXX:

Incluye todos los ensayos que se han llevado a cabo con el diferencial de potencial inferior al máximo que puede generar la fuente de alimentación, tienen una duración de 10min, no tienen hidróxido cálcico en la composición de su ambiente químico y tienen un contenido variable de cloruro sódico en su ambiente.

Tabla 3.01: Condiciones de ensayo para probetas de la serie VB-T10-C00-SXXX

NOMBRE	V _i [V]	t _e [min]	Ca(OH) ₂ [%]	NaCl [%]
VB-T10-C00-S000	7,5	10	0,00%	0,000%
VB-T10-C00-S005	7,5	10	0,00%	0,005%
VB-T10-C00-S010	7,5	10	0,00%	0,010%
VB-T10-C00-S020	7,5	10	0,00%	0,020%
VB-T10-C00-S030	7,5	10	0,00%	0,030%
VB-T10-C00-S040	7,5	10	0,00%	0,040%
VB-T10-C00-S050	7,5	10	0,00%	0,050%
VB-T10-C00-S060	7,5	10	0,00%	0,060%
VB-T10-C00-S070	7,5	10	0,00%	0,070%
VB-T10-C00-S080	7,5	10	0,00%	0,080%
VB-T10-C00-S090	7,5	10	0,00%	0,090%
VB-T10-C00-S100	7,5	10	0,00%	0,100%

3.1.2 VN-T05-C00-SXXX:

Incluye todos los ensayos que se han llevado a cabo con el diferencial de potencial más elevado que puede generar la fuente de alimentación, tienen una duración de 5min, no tienen hidróxido cálcico en la composición de su ambiente químico y tienen un contenido variable de cloruro sódico en su ambiente.

Tabla 3.02: Condiciones de ensayo para probetas de la serie VN-T05-C00-SXXX

NOMBRE	V_i [V]	t_e [min]	$Ca(OH)_2$ [%]	NaCl [%]
VN-T05-C00-S040	31,0	5	0,00%	0,040%
VN-T05-C00-S050	31,0	5	0,00%	0,050%
VN-T05-C00-S060	31,1	5	0,00%	0,060%
VN-T05-C00-S070	31,1	5	0,00%	0,070%
VN-T05-C00-S080	30,7	5	0,00%	0,080%
VN-T05-C00-S090	27,3	5	0,00%	0,090%
VN-T05-C00-S100	24,9	5	0,00%	0,100%



3.1.3 VN-T10-C00-SXXX:

Incluye todos los ensayos que se han llevado a cabo con el diferencial de potencial más elevado que puede generar la fuente de alimentación, tienen una duración de 10min, no tienen hidróxido cálcico en la composición de su ambiente químico y tienen un contenido variable de cloruro sódico en su ambiente.

Tabla 3.03: Condiciones de ensayo para probetas de la serie VN-T10-C00-SXXX

NOMBRE	V_i [V]	t_e [min]	Ca(OH)₂ [%]	NaCl [%]
VN-T10-C00-S000	31,2	10	0,00%	0,000%
VN-T10-C00-S005	31,2	10	0,00%	0,005%
VN-T10-C00-S010	31,1	10	0,00%	0,010%
VN-T10-C00-S020	31,0	10	0,00%	0,020%
VN-T10-C00-S030	31,0	10	0,00%	0,030%
VN-T10-C00-S035	31,0	10	0,00%	0,035%
VN-T10-C00-S040	31,0	10	0,00%	0,040%
VN-T10-C00-S050	31,0	10	0,00%	0,050%
VN-T10-C00-S060	31,1	10	0,00%	0,060%
VN-T10-C00-S070	31,0	10	0,00%	0,070%
VN-T10-C00-S080	29,8	10	0,00%	0,080%
VN-T10-C00-S090	27,4	10	0,00%	0,090%
VN-T10-C00-S100	23,9	10	0,00%	0,100%
VN-T10-C00-S110	22,8	10	0,00%	0,110%
VN-T10-C00-S120	21,8	10	0,00%	0,120%
VN-T10-C00-S130	19,6	10	0,00%	0,130%
VN-T10-C00-S140	18,8	10	0,00%	0,140%
VN-T10-C00-S150	17,7	10	0,00%	0,150%

3.1.4 VN-T10-C05-SXXX:

Incluye todos los ensayos que se han llevado a cabo con el diferencial de potencial más elevado que puede generar la fuente de alimentación, tienen una duración de 10min, tienen un 0,05% de hidróxido cálcico en la composición de su ambiente químico y tienen un contenido variable de cloruro sódico en su ambiente.

Tabla 3.04: Condiciones de ensayo para probetas de la serie VN-T10-C05-SXXX

NOMBRE	V_i [V]	t_e [min]	$Ca(OH)_2$ [%]	NaCl [%]
VN-T10-C05-S005	21,3	10	0,05%	0,005%
VN-T10-C05-S010	20,6	10	0,05%	0,010%
VN-T10-C05-S020	19,7	10	0,05%	0,020%
VN-T10-C05-S030	17,4	10	0,05%	0,030%
VN-T10-C05-S040	17,2	10	0,05%	0,040%
VN-T10-C05-S050	16,2	10	0,05%	0,050%
VN-T10-C05-S060	15,2	10	0,05%	0,060%
VN-T10-C05-S070	14,7	10	0,05%	0,070%
VN-T10-C05-S080	13,7	10	0,05%	0,080%
VN-T10-C05-S090	13,7	10	0,05%	0,090%
VN-T10-C05-S100	13,7	10	0,05%	0,100%



3.1.5 VN-T10-C10-SXXX:

Incluye todos los ensayos que se han llevado a cabo con el diferencial de potencial más elevado que puede generar la fuente de alimentación, tienen una duración de 10min, tienen un 0,10% de hidróxido cálcico en la composición de su ambiente químico y tienen un contenido variable de cloruro sódico en su ambiente.

Tabla 3.05: Condiciones de ensayo para probetas de la serie VN-T10-C10-SXXX

NOMBRE	V_i [V]	t_e [min]	Ca(OH)₂ [%]	NaCl [%]
VN-T10-C10-S000	13,7	10	0,10%	0,000%
VN-T10-C10-S005	13,5	10	0,10%	0,005%
VN-T10-C10-S010	12,8	10	0,10%	0,010%
VN-T10-C10-S020	12,3	10	0,10%	0,020%
VN-T10-C10-S030	11,5	10	0,10%	0,030%
VN-T10-C10-S040	12,3	10	0,10%	0,040%
VN-T10-C10-S050	11,0	10	0,10%	0,050%
VN-T10-C10-S060	10,3	10	0,10%	0,060%
VN-T10-C10-S070	10,0	10	0,10%	0,070%
VN-T10-C10-S080	9,5	10	0,10%	0,080%
VN-T10-C10-S090	9,2	10	0,10%	0,090%
VN-T10-C10-S100	9,0	10	0,10%	0,100%

3.1.6 VN-T20-C00-SXXX:

Incluye todos los ensayos que se han llevado a cabo con el diferencial de potencial más elevado que puede generar la fuente de alimentación, tienen una duración de 20min, no tienen hidróxido cálcico en la composición de su ambiente químico y tienen un contenido variable de cloruro sódico en su ambiente.

Tabla 3.06: Condiciones de ensayo para probetas de la serie VN-T20-C00-SXXX

NOMBRE	V_i [V]	t_e [min]	Ca(OH)₂ [%]	NaCl [%]
VN-T20-C00-S005	30,9	20	0,00%	0,005%
VN-T20-C00-S010	31,0	20	0,00%	0,010%
VN-T20-C00-S020	30,9	20	0,00%	0,020%
VN-T20-C00-S030	31,0	20	0,00%	0,030%

3.1.7 VN-T3D-C00-SXXX:

Incluye todos los ensayos que se han llevado a cabo con el diferencial de potencial más elevado que puede generar la fuente de alimentación, tienen una duración de 3 días (4320min), no tienen hidróxido cálcico en la composición de su ambiente químico y tienen un contenido variable de cloruro sódico en su ambiente.

Tabla 3.07: Condiciones de ensayo para probetas de la serie VN-T3D-C05-SXXX

NOMBRE	V_i [V]	t_e [min]	Ca(OH)₂ [%]	NaCl [%]
VN-T3D-C00-S005	31,0	4320	0,00%	0,005%
VN-T3D-C00-S010	31,2	4320	0,00%	0,010%

3.2 Resultados medidos:

3.2.1 VB-T10-C00-SXXX:

3.2.1.1 Características electroquímicas de los ensayos:

VB-T10-C00-SXXX: Intensidad de Corriente

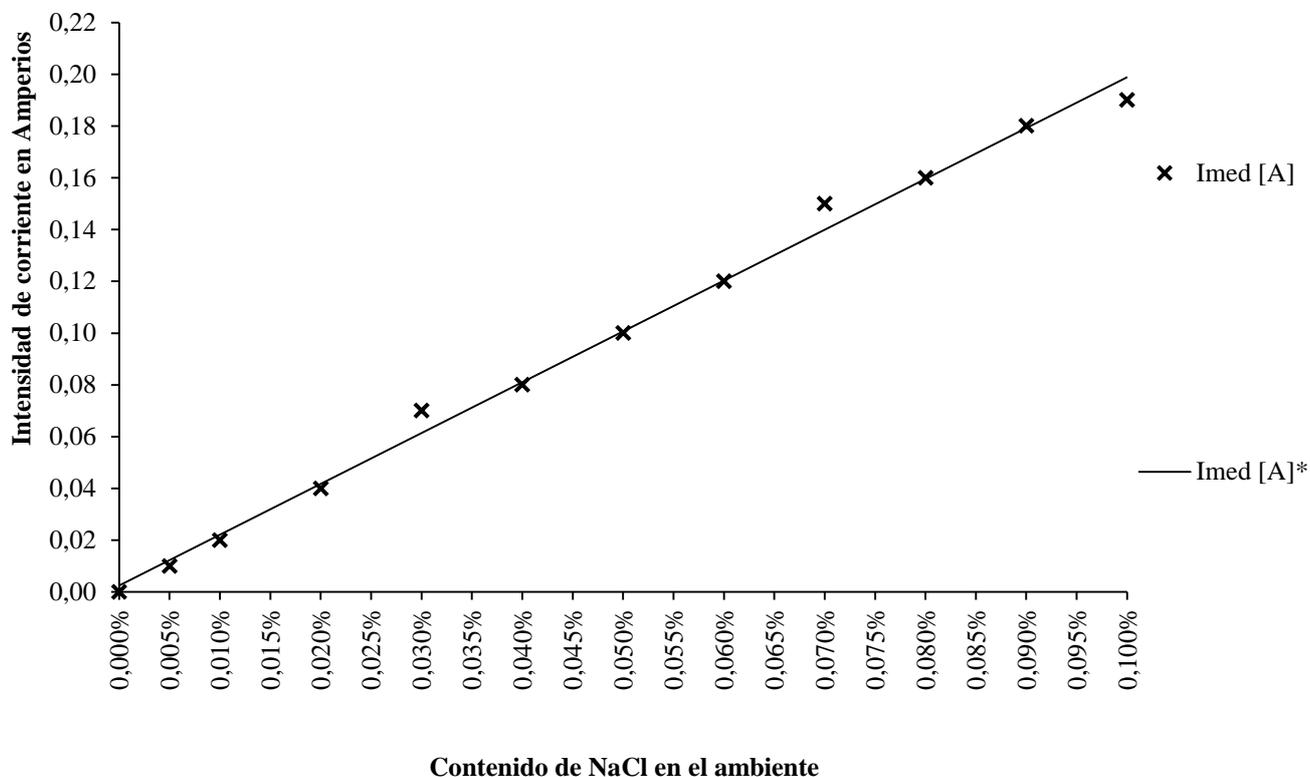


Figura 3.1

La Intensidad media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $I_{med} = -196,4025 \cdot S_{\%} + 0,0025$ y $R^2 = 0,9945$.

VB-T10-C00-SXXX: Potencia eléctrica

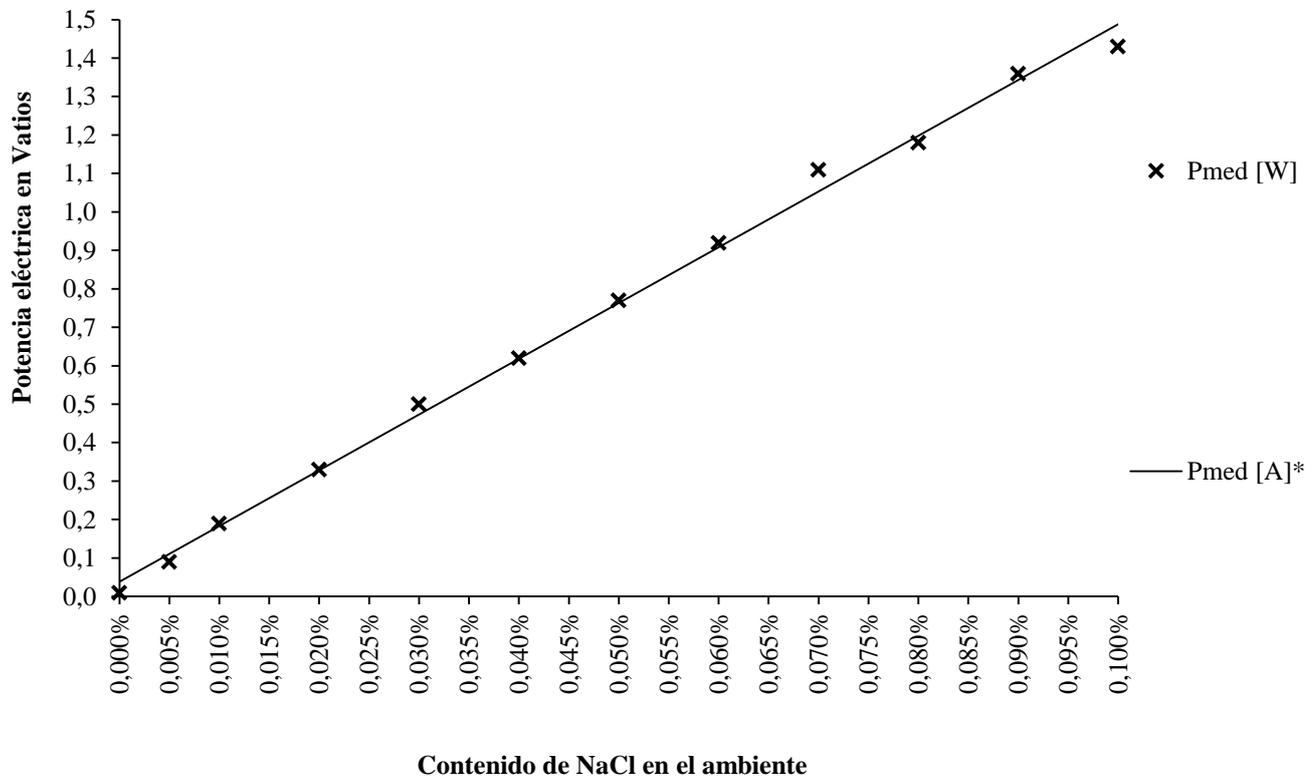


Figura 3.2

La potencia media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{med} = 1449,5868 \cdot S_{\%} + 0,0387$ y $R^2 = 0,9965$.

VB-T10-C00-SXXX: Diferencial de potencial

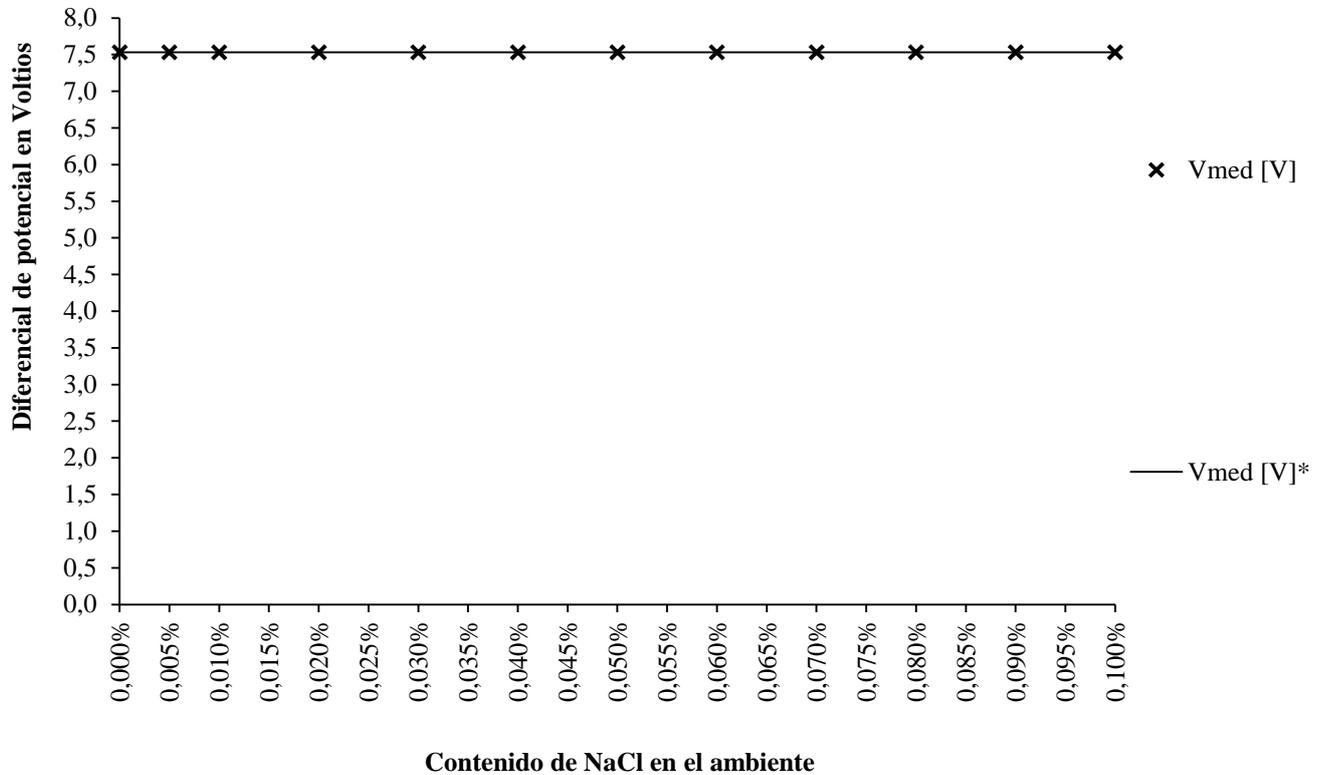


Figura 3.3

El voltaje medio para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $V_{med} = 7,5216$ y $R^2 = 0$.

VB-T10-C00-SXXX: Resistencia eléctrica

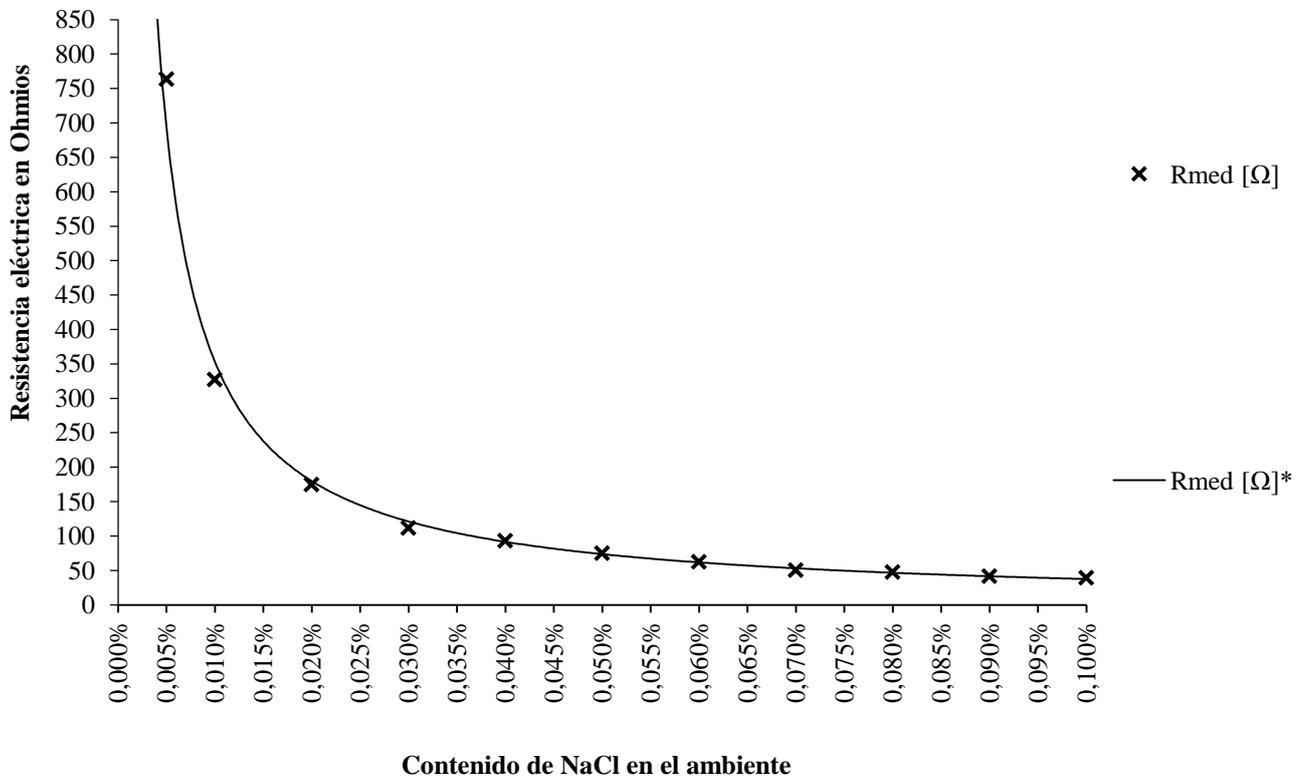


Figura 3.4

La resistencia media para esta serie de ensayos corresponde a la regresión potencial con la ecuación $R_{med} = 0,0450 \cdot S_{\%}^{-0,9735}$ y $R^2 = 0,9967$.

Se observa el aumento de la concentración de cloruro sódico en el ambiente aumenta su conductividad eléctrica de forma directamente proporcional.



3.2.1.2 Variaciones de masa:

Tabla 3.08: Pesos secos medidos para las probetas de la serie VB-T10-C00-SXXX

NOMBRE	P_{si} [g]	P_{sfc} [g]	P_{sfl} [g]
VB-T10-C00-S000	171,8722	171,8745	171,8648
VB-T10-C00-S005	172,6521	172,6458	172,6404
VB-T10-C00-S010	172,9337	172,9282	172,9209
VB-T10-C00-S020	172,1002	172,0917	172,0880
VB-T10-C00-S030	173,0034	172,9892	172,9823
VB-T10-C00-S040	173,4329	173,4175	173,4106
VB-T10-C00-S050	172,8889	172,8703	172,8650
VB-T10-C00-S060	173,6740	173,6525	173,6458
VB-T10-C00-S070	172,9995	172,9708	172,9668
VB-T10-C00-S080	172,9997	172,9695	172,9664
VB-T10-C00-S090	172,3546	172,3234	172,3181
VB-T10-C00-S100	173,2015	173,1693	173,1576

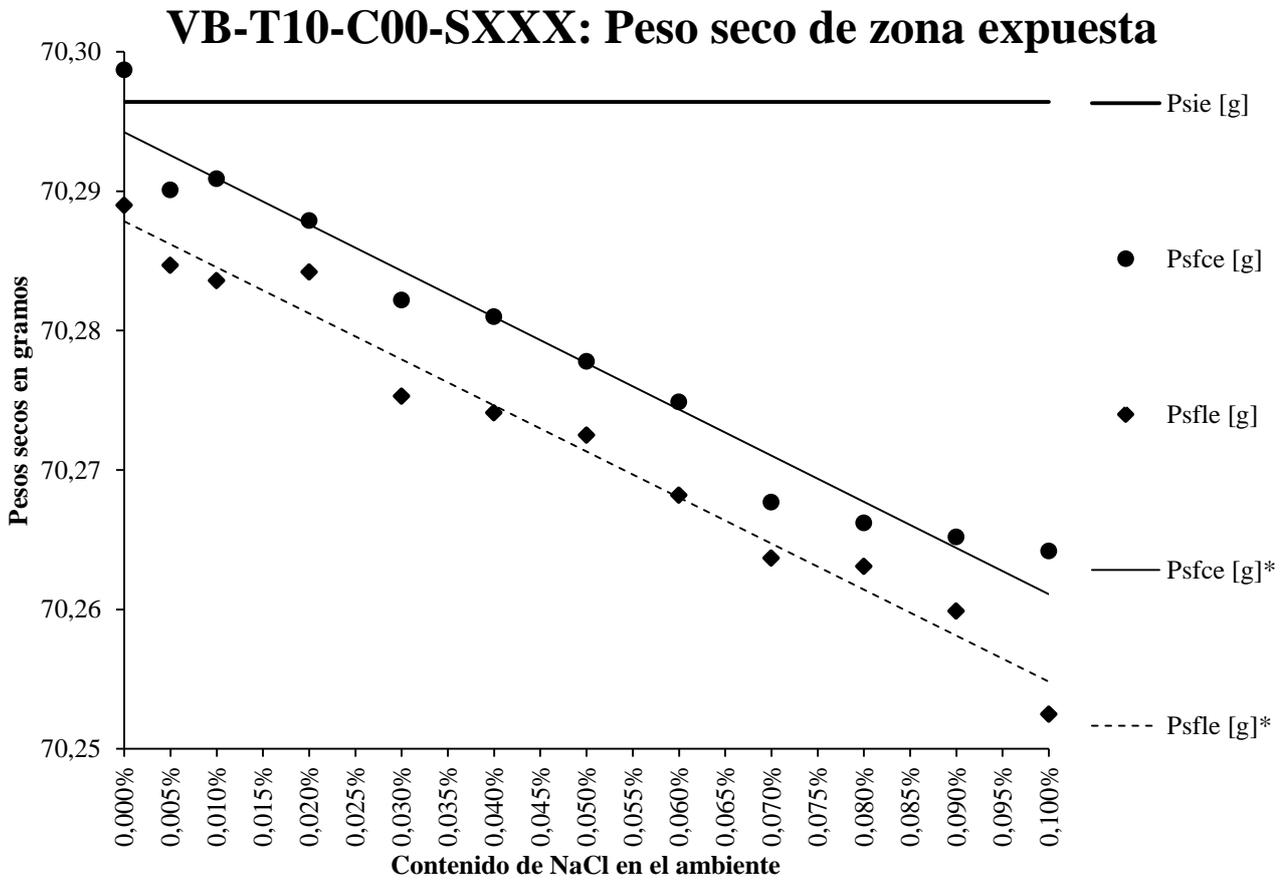


Figura 3.5

El peso seco final corroído expuesto para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFCE} = -33,1279 \cdot S_{\%} + 70,2942$ y $R^2 = 0,9628$.

El peso seco final limpio expuesto para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFLE} = -33,0034 \cdot S_{\%} + 70,2878$ y $R^2 = 0,9761$.

VB-T10-C00-SXXX: Variaciones de masa relativa

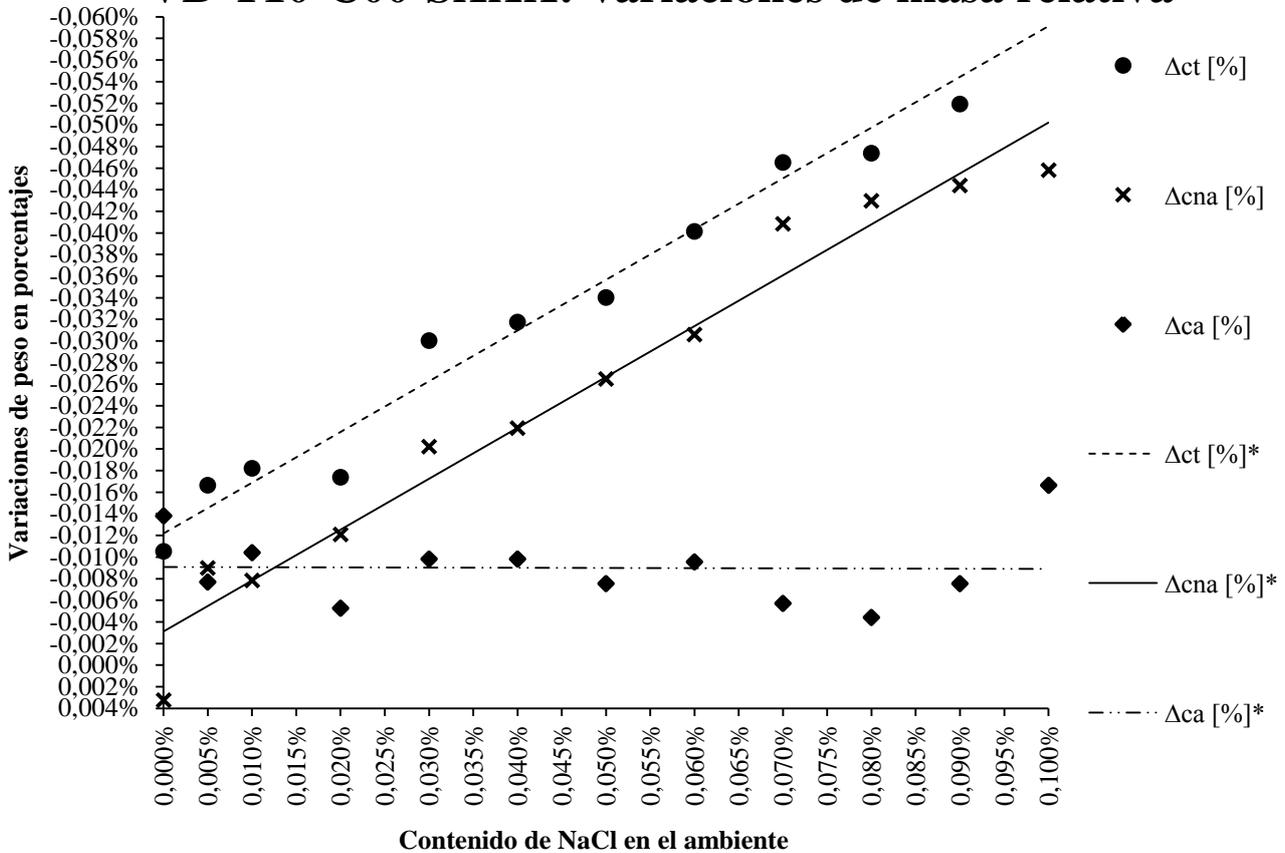


Figura 3.6

La variación por óxidos total para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $\Delta_{CT} = -0,469489 \cdot S_{\%} - 0,000122$ y $R^2 = 0,976124$.

La variación por óxidos no adheridos para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $\Delta_{CNA} = -0,471260 \cdot S_{\%} - 0,000031$ y $R^2 = 0,962754$.

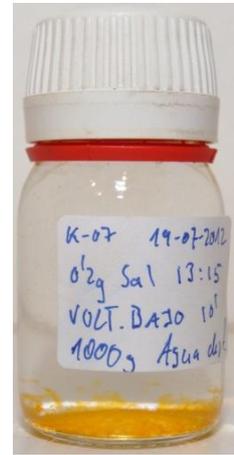
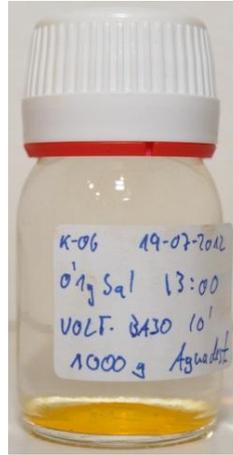
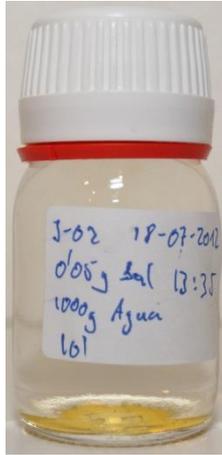
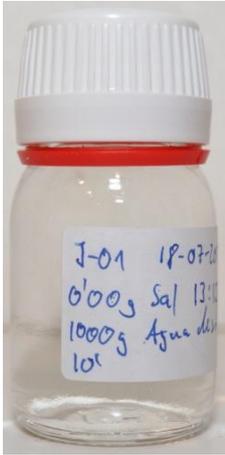
La variación por óxidos adheridos para esta serie de ensayos responde a la recta de regresión con la ecuación $\Delta_{CA} = 0,001770 \cdot S_{\%} - 0,000091$ y $R^2 = 0,000294$.

La pérdida de masa por óxidos no adheridos es proporcional a la concentración de cloruro sódico con un coeficiente de correlación (R^2) próximo a uno.

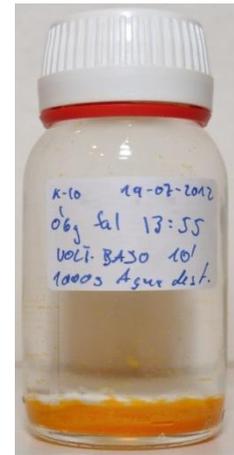
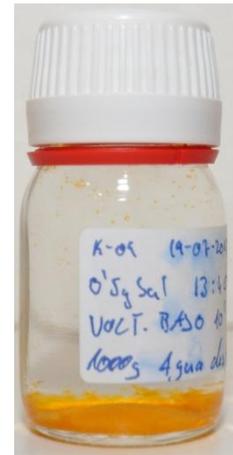
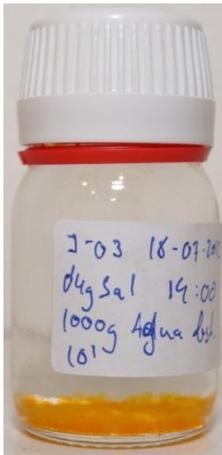
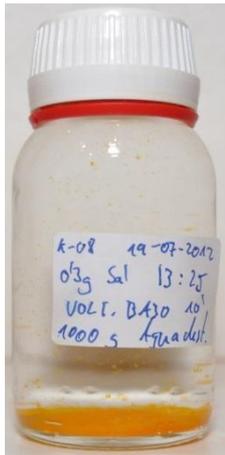
La pérdida por óxidos adheridos parece no depender de la concentración de cloruro sódico por su reducido coeficiente de correlación.

3.2.1.3 Fotografías de los ambientes resultantes:

VB-T10-C00-S000 VB-T10-C00-S005 VB-T10-C00-S010 VB-T10-C00-S020



VB-T10-C00-S030 VB-T10-C00-S040 VB-T10-C00-S050 VB-T10-C00-S060



VB-T10-C00-S070 VB-T10-C00-S080 VB-T10-C00-S090 VB-T10-C00-S100

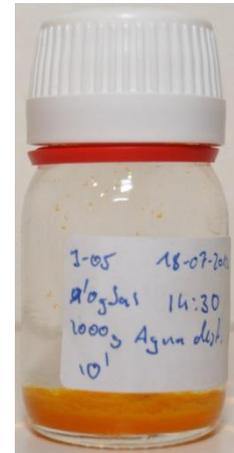
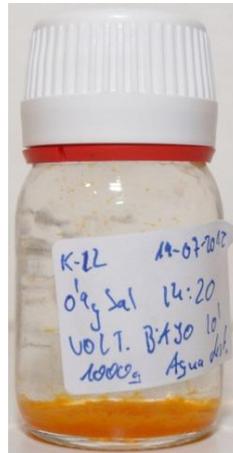
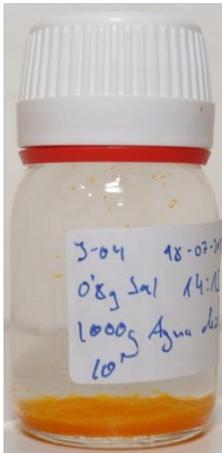
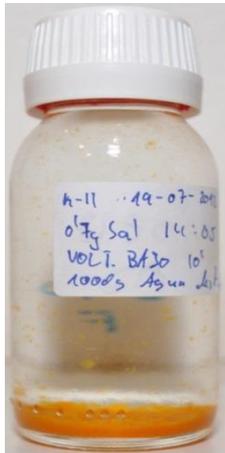


Figura 3.7: Ambientes resultantes de ensayos de la serie VB-T10-C00-SXXX



Las fotografías confirman los resultados de las pérdidas de masa observados anteriormente. Se observa que a medida que aumenta la concentración de cloruro sódico en el ambiente, también lo hace la cantidad generada de óxido de hierro en la celda de corrosión.

Otra observación es que en todos los ensayos parece haberse formado el mismo tipo de óxido, tratándose probablemente de limonita o cloruro de hierro (III) hexahidratado.

3.2.2 VN-T05-C00-SXXX:

3.2.2.1 Características electroquímicas de los ensayos:

VN-T05-C00-SXXX: Intensidad de Corriente

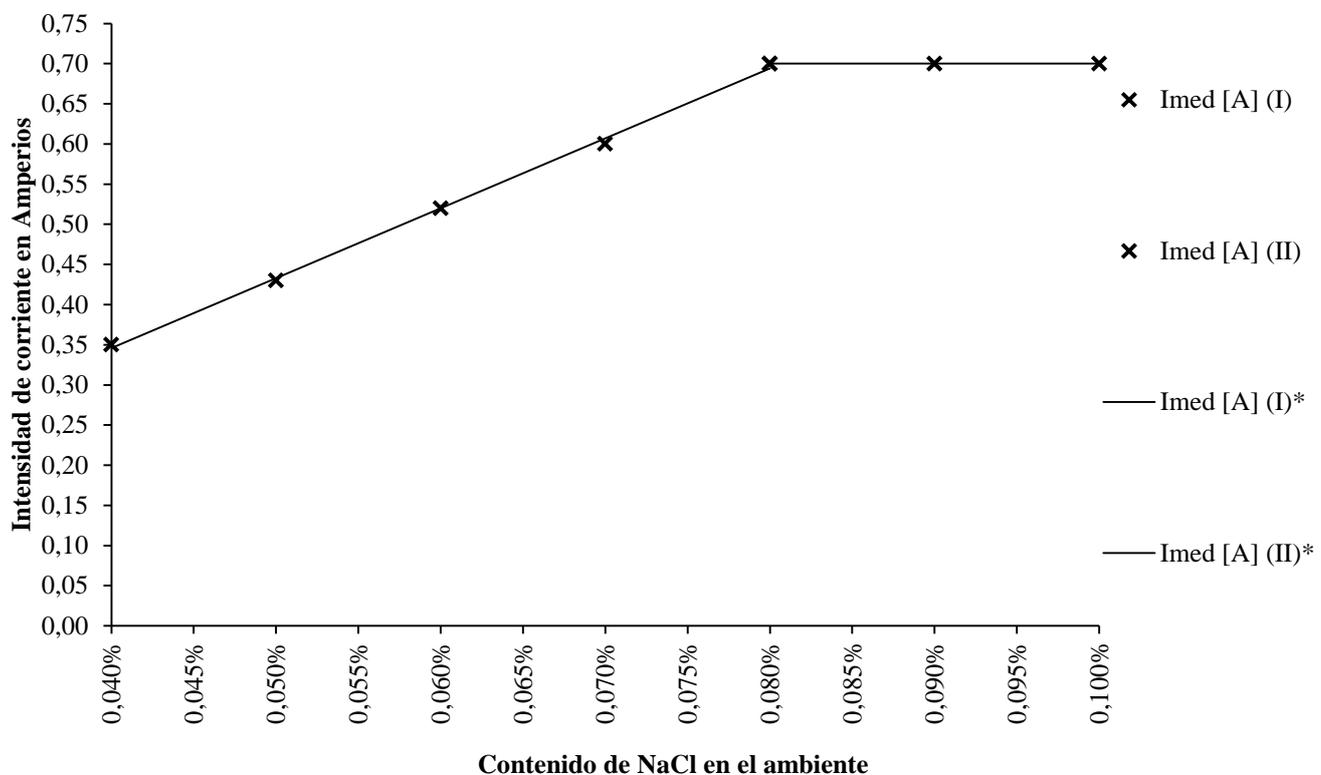


Figura 3.8

La intensidad media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $I_{med} = 870,0000 \cdot S_{\%} - 0,0020$ y $R^2 = 0,9985$, hasta $S_{\%} = 0,08\%$, valor a partir del cual se mantiene constante en **0,70 A**.

VN-T05-C00-SXXX: Potencia eléctrica

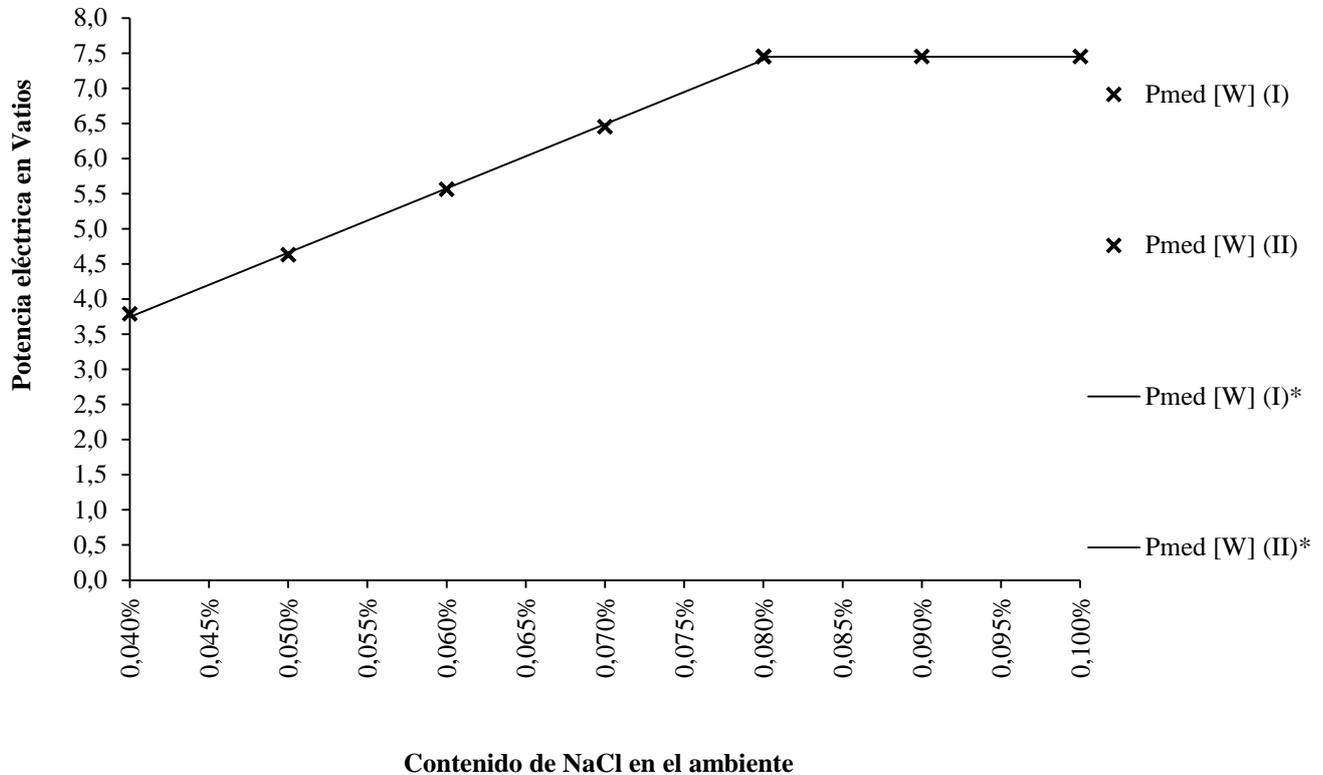


Figura 3.9

La potencia media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{med} = 9140,0000 \cdot S_{\%} + 0,0920$ y $R^2 = 0,9992$, hasta $S_{\%} = 0,08\%$, valor a partir del cual se mantiene constante en **7,45 W**.

VN-T05-C00-SXXX: Diferencial de potencial

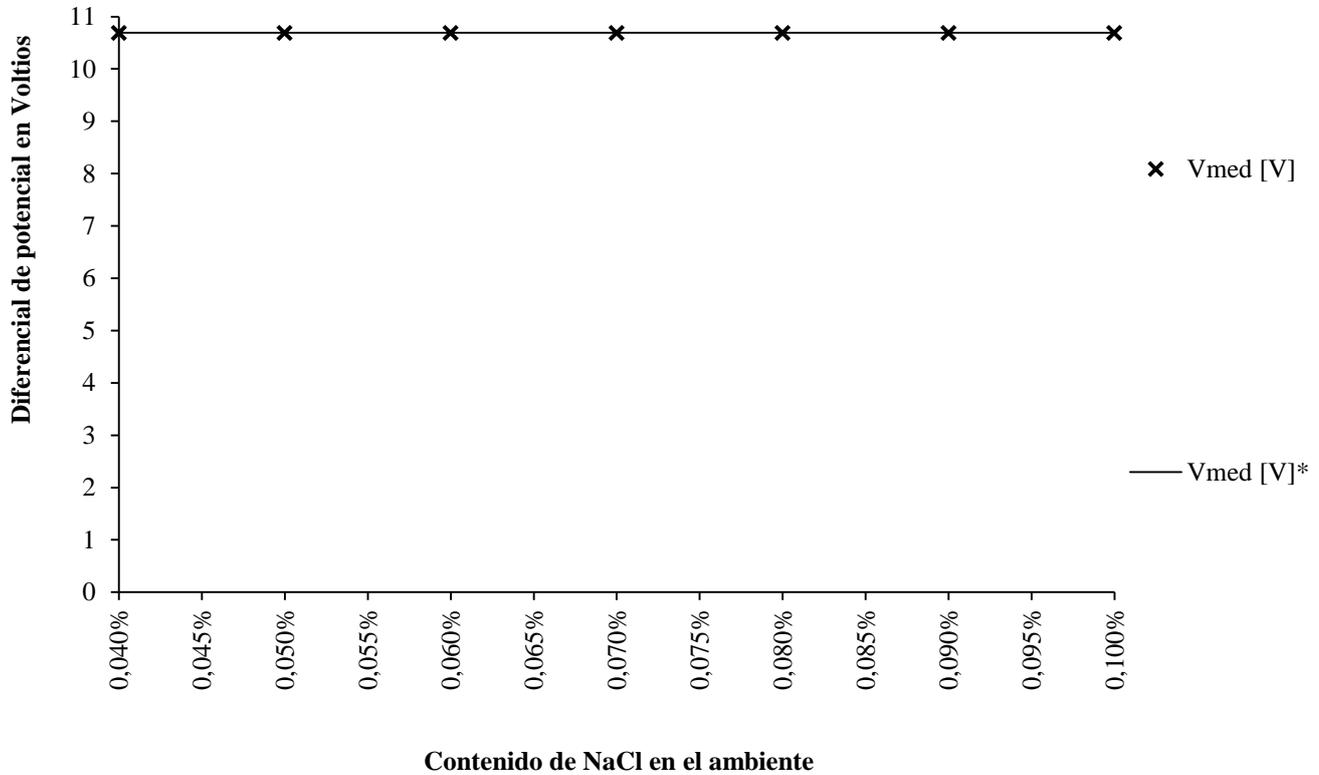


Figura 3.10

El voltaje medio para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $V_{med} = 10,6900$ y $R^2 = 0$, es decir, se mantiene constante para todos los ensayos.

VN-T05-C00-SXXX: Resistencia eléctrica

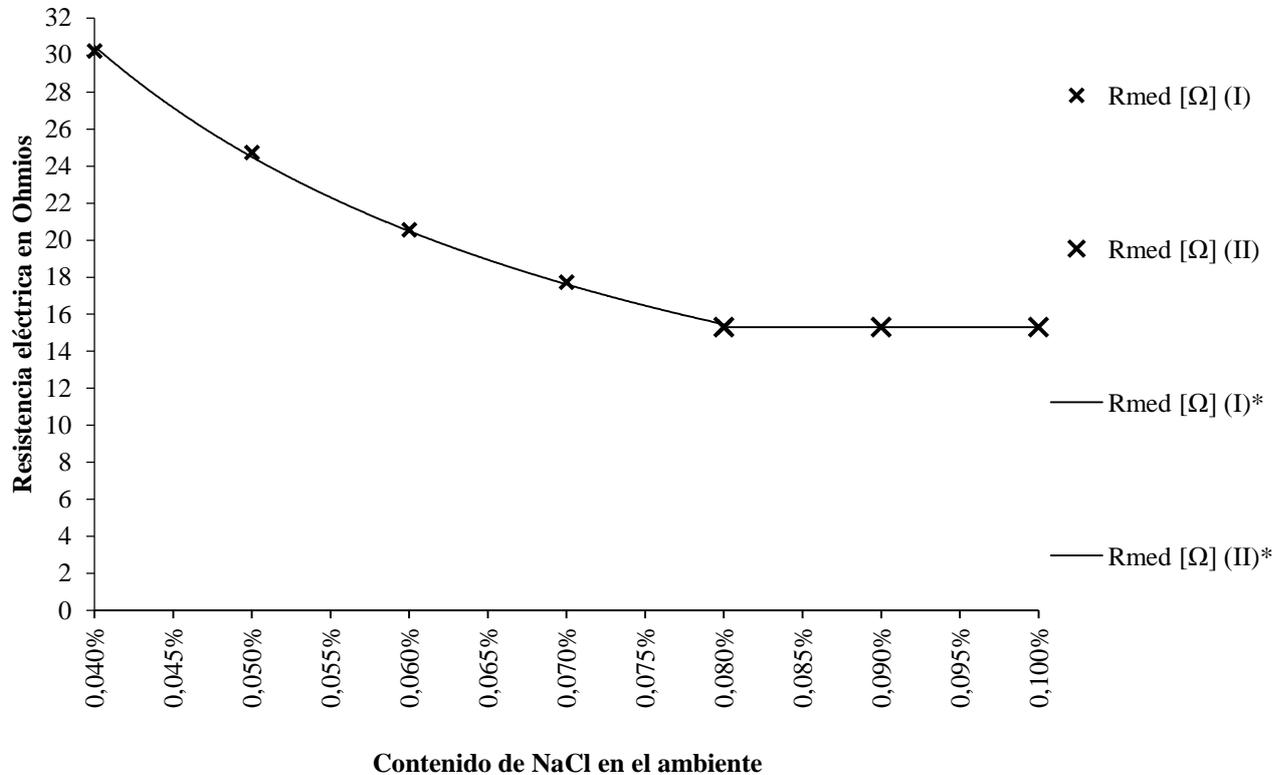


Figura 3.11

La resistencia media para esta serie de ensayos corresponde a la regresión potencial con la ecuación $R_{med} = 0,0143 \cdot S_{\%}^{-0,9796}$ y $R^2 = 0,9999$, hasta $S_{\%} = 0,08\%$, valor a partir del cual se mantiene constante en **15,30Ω**.

A diferencia de la anterior serie, en esta serie la proporcionalidad entre contenido de cloruro sódico y conductividad solo se mantiene hasta cierto punto. Consideramos que a partir de allí el circuito eléctrico está en rendimiento máximo. Este rendimiento máximo queda limitado por factores como la fuente de alimentación, la disposición geométrica de las probetas y la longitud de los cables, ajenos al proceso de corrosión.

3.2.2.2 Variaciones de masa:

Tabla 3.09: Pesos secos medidos para las probetas de la serie VN-T05-C00-SXXX

NOMBRE	P_{si} [g]	P_{sfc} [g]	P_{sfl} [g]
VN-T05-C00-S040	171,1730	171,1402	171,1325
VN-T05-C00-S050	171,2271	171,1877	171,1807
VN-T05-C00-S060	170,2563	170,2084	170,2010
VN-T05-C00-S070	169,5129	169,4609	169,4528
VN-T05-C00-S080	170,3722	170,3193	170,3116
VN-T05-C00-S090	170,3493	170,2983	170,2903
VN-T05-C00-S100	169,9752	169,9135	169,9065

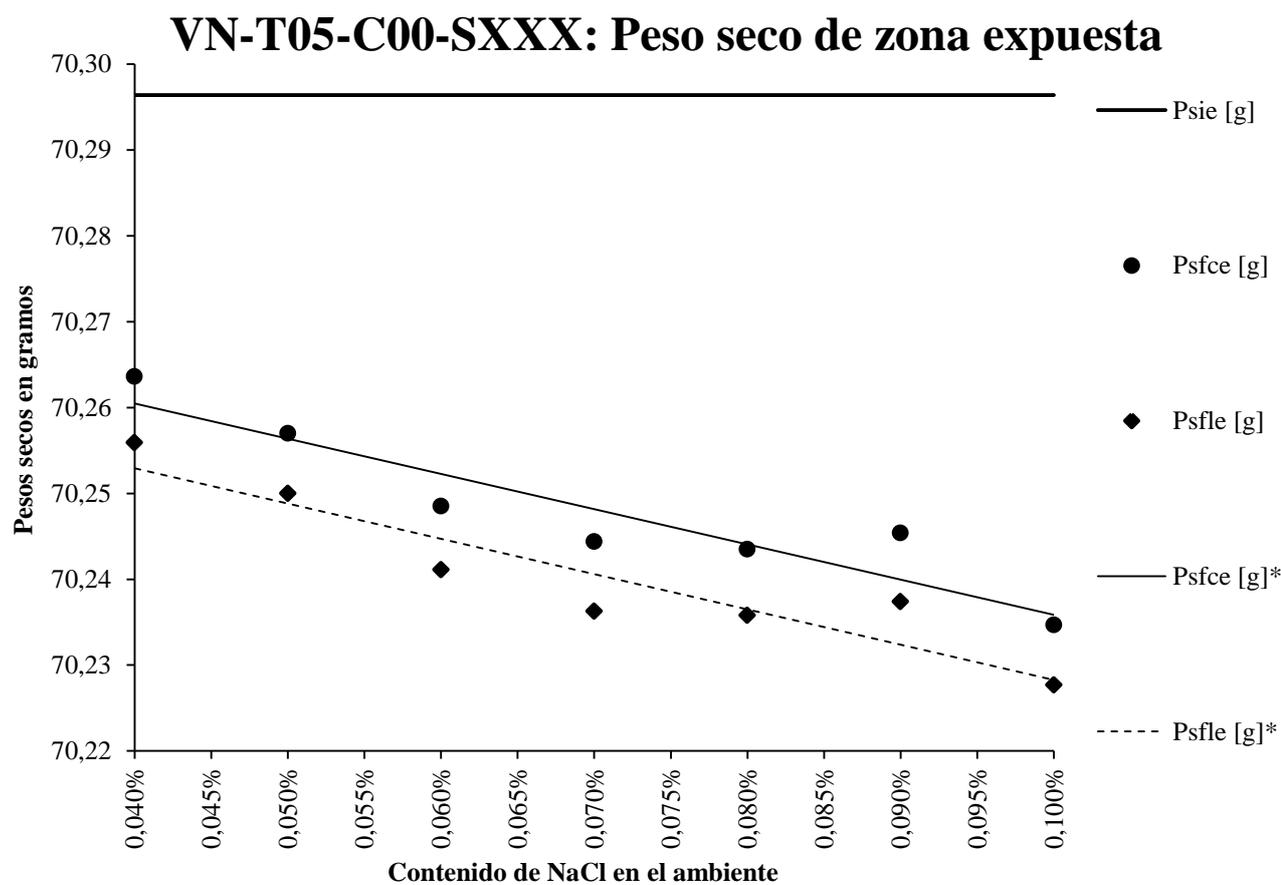


Figura 3.12

El peso seco final corroído expuesto para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFCE} = -41,0357 \cdot S_{\%} + 70,2769$ y $R^2 = 0,8711$.

El peso seco final limpio expuesto para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFCE} = -41,1071 \cdot S_{\%} + 70,2694$ y $R^2 = 0,8748$.

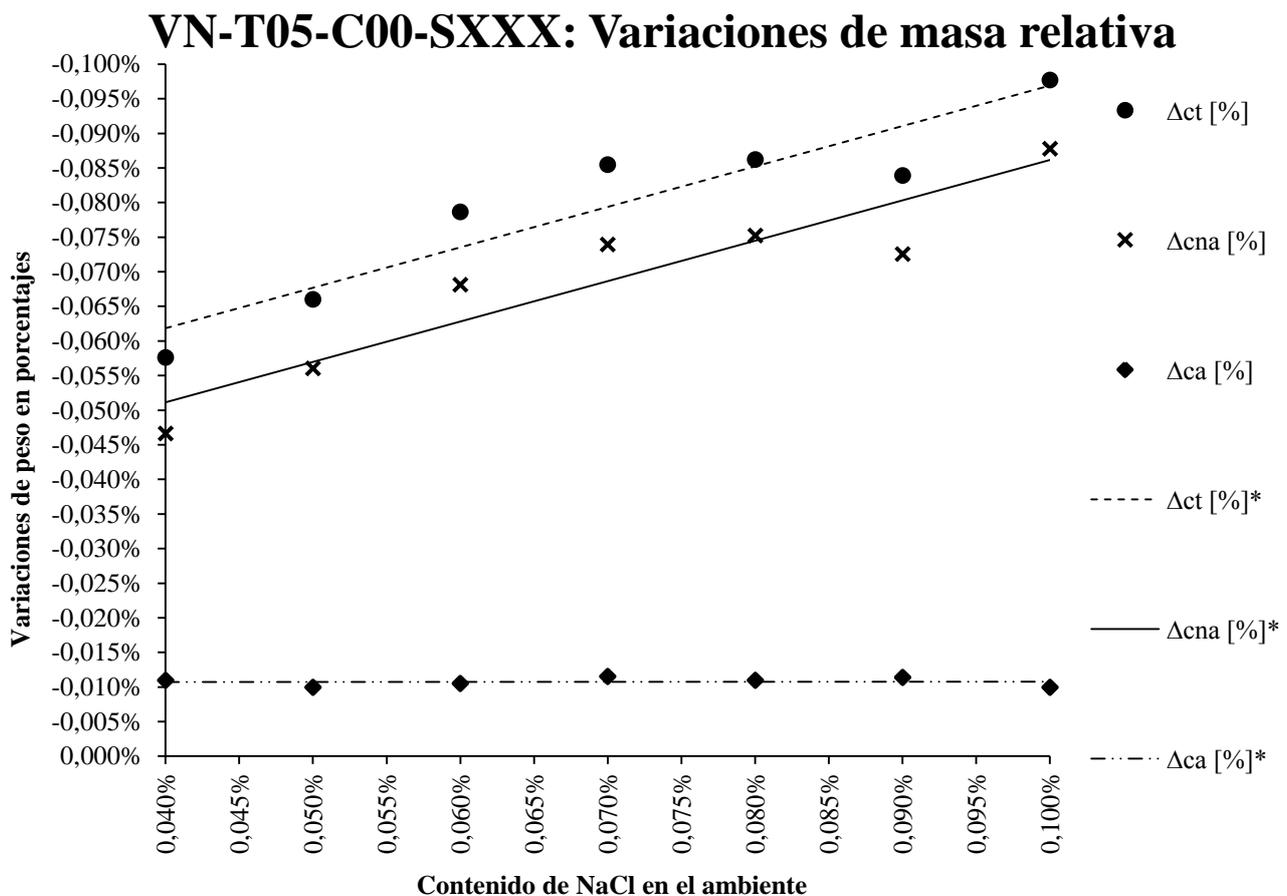


Figura 3.13

La variación por óxidos total para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $\Delta_{CT} = -0,584769 \cdot S_{\%} - 0,000348$ y $R^2 = 0,874766$.

La variación por óxidos no adheridos para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $\Delta_{CNA} = -0,583753 \cdot S_{\%} - 0,000278$ y $R^2 = 0,871056$.

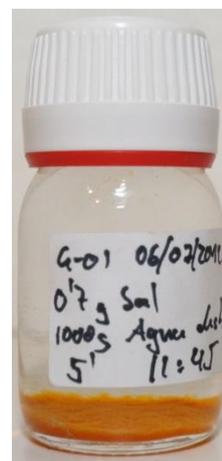
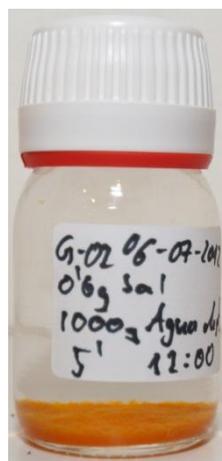
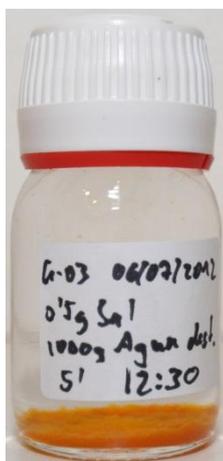
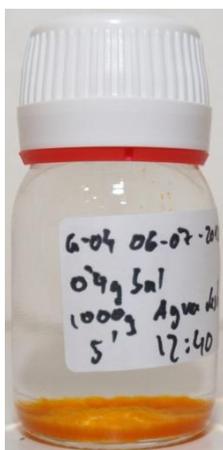
La variación por óxidos adheridos para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $\Delta_{CA} = -0,001214 \cdot S_{\%} - 0,000107$ y $R^2 = 0,001214$.

El análisis matemático de la variación de masa por óxidos no adheridos vuelve a presentar resultados muy parecidos a los de la serie anterior, siendo proporcional a la concentración de cloruro sódico, con un coeficiente de correlación cercano a uno, demostrando su dependencia de la variable estudiada.

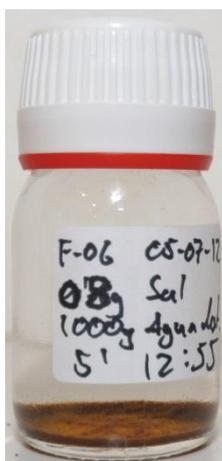
La variación por óxidos adheridos es un valor casi constante y el coeficiente de correlación de la recta de regresión correspondiente es muy próximo a cero. Esto indica que es poco probable que esté relacionado con la variable a estudiar.

3.2.2.3 Fotografías de los ambientes resultantes:

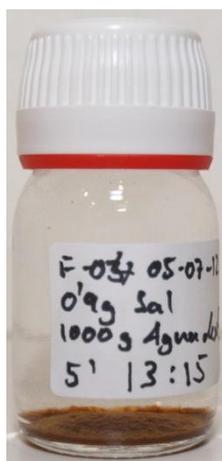
VN-T05-C00-S040 VN-T05-C00-S050 VN-T05-C00-S060 VN-T05-C00-S070



VN-T05-C00-S080



VN-T05-C00-S090



VN-T05-C00-S090

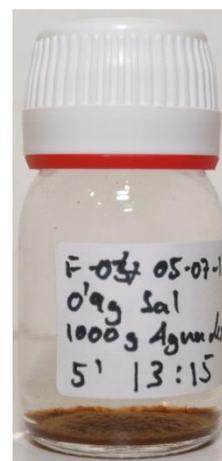


Figura 3.14: Ambientes resultantes de ensayos de la serie VN-T05-C00-SXXX



En las fotografías de esta serie de ensayos no hay diferencia visual clara entre los ambientes de los cuatro primeros ensayos.

No obstante, en el quinto, sexto y séptimo ensayo, los ambientes resultantes son muy diferentes a los anteriores.

Mientras que en los cuatro primeros parecen haberse formado solamente limonita y/o cloruro de hierro (III) hexahidratado, en las tres últimas se aprecia la formación de cierta cantidad de un óxido magnético negro (probablemente magnetita) y una cantidad menor de los óxidos naranjas.

Finalmente destaca, que el cambio en los ambientes resultantes se produce en los ensayos en los que el circuito estaba funcionando en su límite de rendimiento máximo (máxima de intensidad de corriente; 0.7A).

3.2.3 VN-T10-C00-SXXX:

3.2.3.1 Características electroquímicas de los ensayos:

VN-T10-C00-SXXX: Intensidad de Corriente

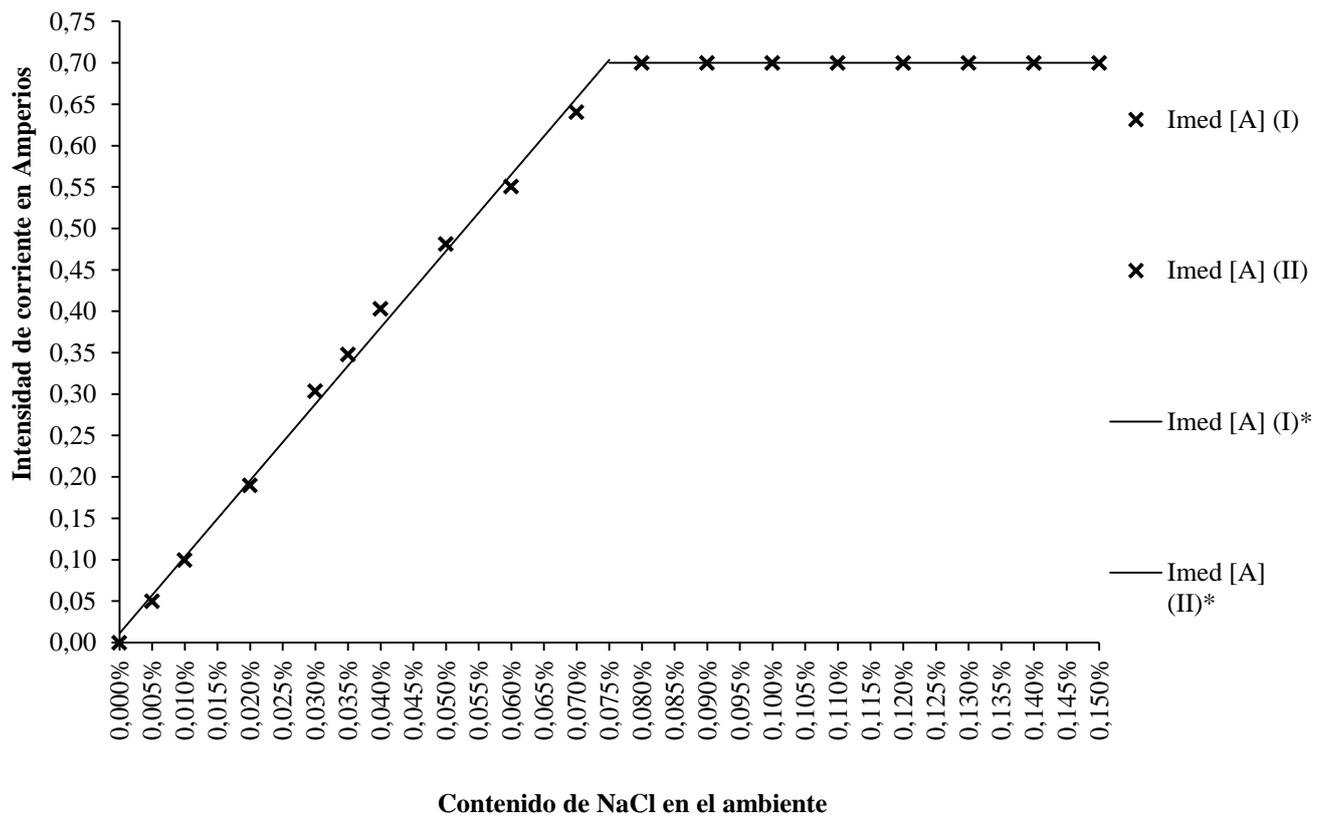


Figura 3.15

La intensidad media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $I_{med} = 923,2949 \cdot S_{\%} + 0,01113$ y $R^2 = 0,9960$, hasta $S_{\%} = 0,08\%$, valor a partir del cual se mantiene constante en **0,70 A**.

VN-T10-C00-SXXX: Potencia eléctrica

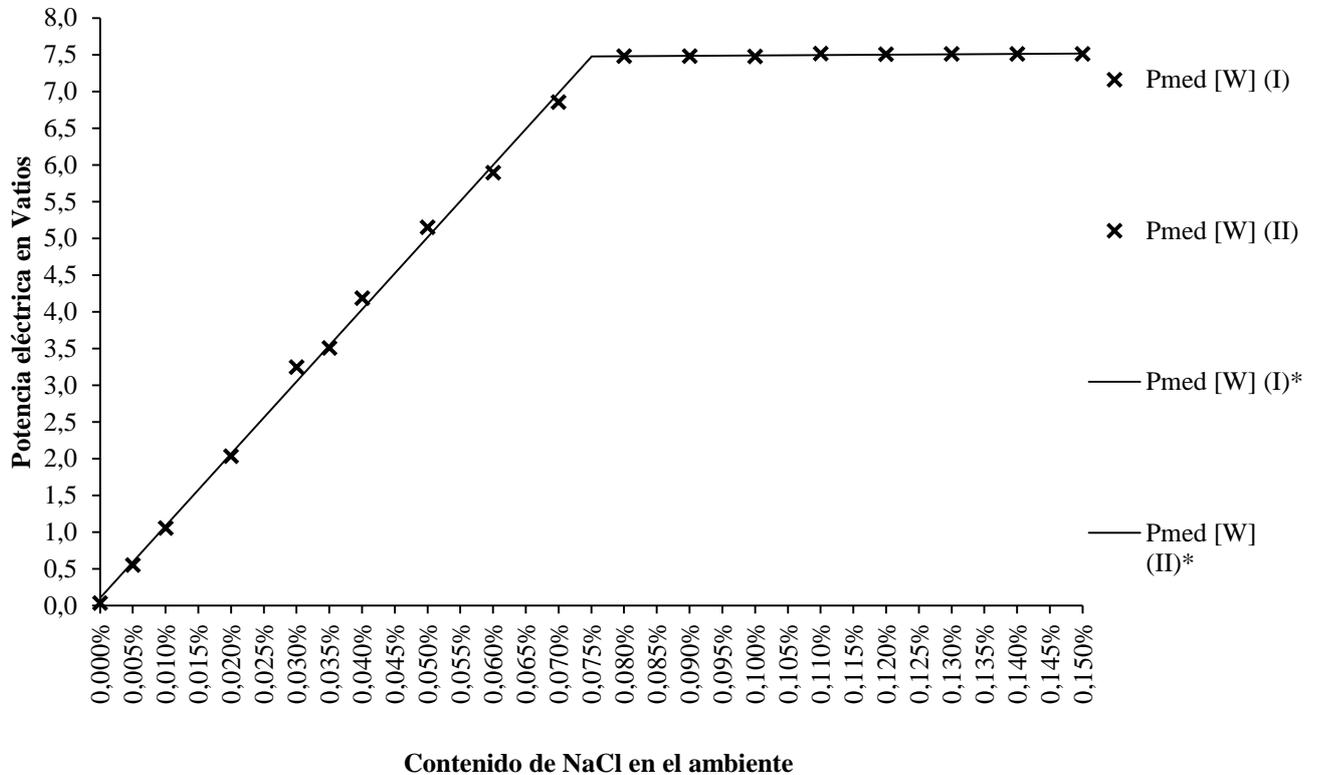


Figura 3.16

La potencia media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{med} = 9821,0188 \cdot S_{\%} + 0,1088$ y $R^2 = 0,9976$, hasta $S_{\%} = 0,08\%$, valor a partir del cual se mantiene constante en **7,45 W**.

VN-T10-C00-SXXX: Diferencial de potencial

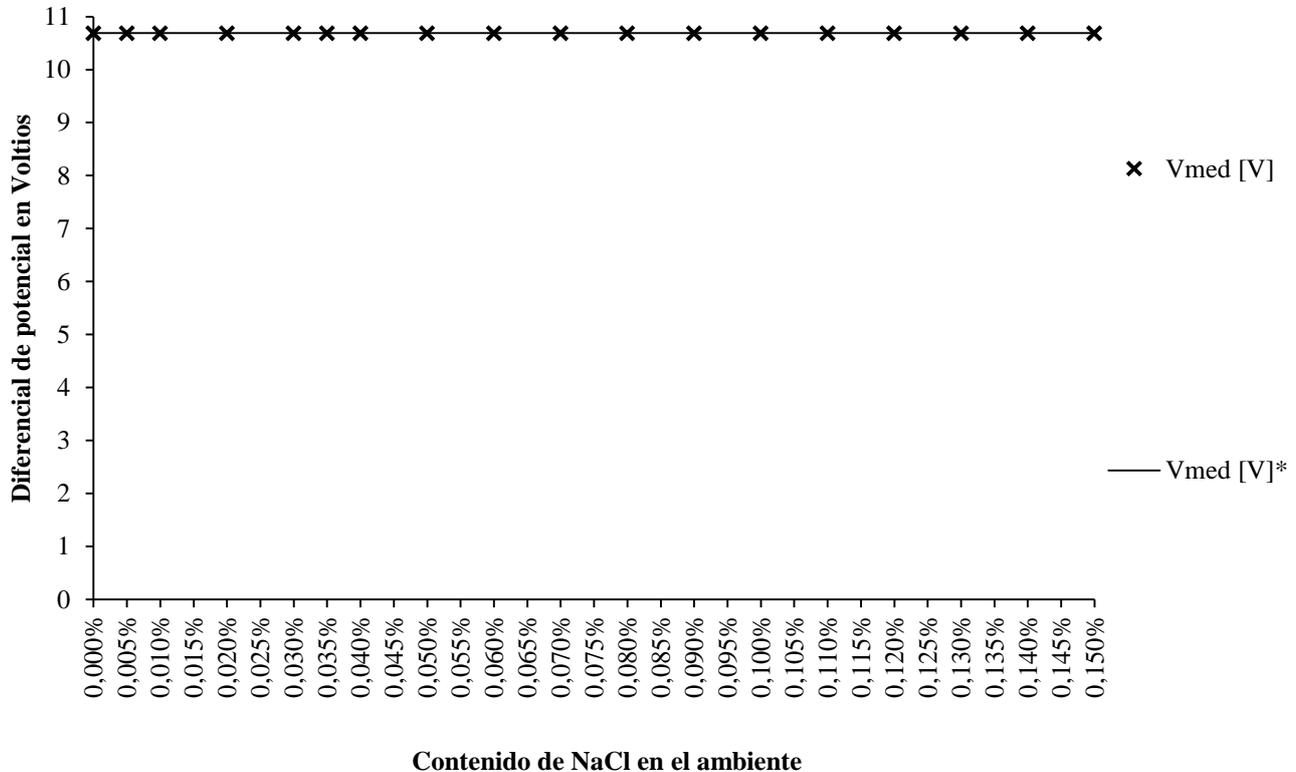


Figura 3.17

El voltaje medio para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la siguiente ecuación $V_{med} = 10,6900$ y $R^2 = 0$, es decir, se mantiene constante para todos los ensayos.

VN-T10-C00-SXXX: Resistencia eléctrica

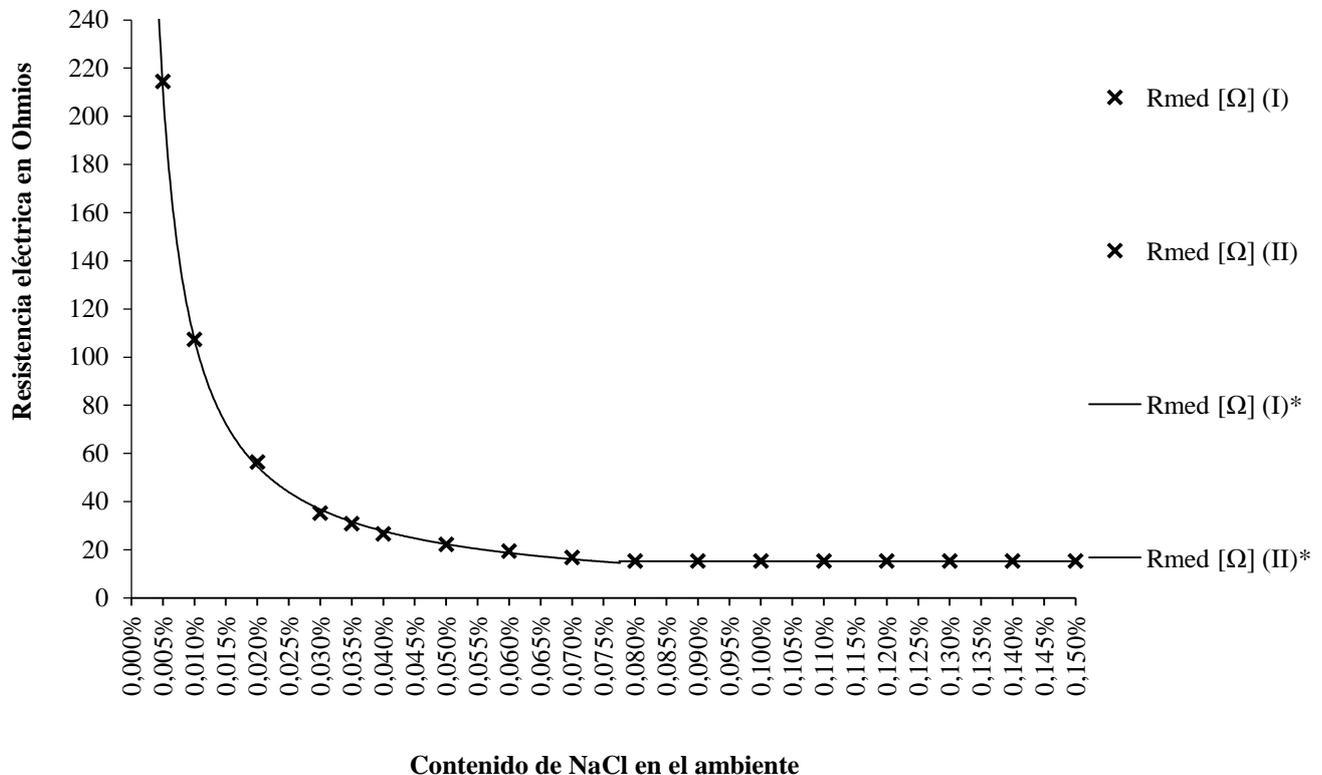


Figura 3.18

La resistencia media para esta serie de ensayos corresponde a la regresión potencial con la siguiente ecuación $R_{med} = 0,0134 \cdot S_{\%}^{-0,9758}$ y $R^2 = 0,9985$, hasta $S_{\%} = 0,08\%$, valor a partir del cual se mantiene constante en $15,27\Omega$.

Tal como se pudo observar también en la anterior serie de ensayos, en esta serie la proporcionalidad entre contenido de cloruro sódico y conductividad solo se mantiene hasta alcanzar el límite de rendimiento máximo del circuito.

En el gráfico se puede observar con facilidad que la resistencia media no se puede reducir por debajo de cierto límite, en este caso $15,27\Omega$. Esta probablemente es la resistencia de los demás componentes del circuito.

3.2.3.2 Variaciones de masa:

Tabla 3.10: Pesos secos medidos para las probetas de la serie VN-T10-C00-SXXX

NOMBRE	P_{si} [g]	P_{sfc} [g]	P_{sfl} [g]
VN-T10-C00-S000	170,5126	170,5096	170,4940
VN-T10-C00-S005	170,7878	170,7764	170,7738
VN-T10-C00-S010	170,1660	170,1478	170,1398
VN-T10-C00-S020	170,0810	170,0486	170,0402
VN-T10-C00-S030	170,0757	170,0276	170,0196
VN-T10-C00-S035	169,9034	169,8470	169,8315
VN-T10-C00-S040	170,1346	170,0627	170,0496
VN-T10-C00-S050	170,4346	170,3552	170,3387
VN-T10-C00-S060	170,1784	170,0816	170,0721
VN-T10-C00-S070	170,7577	170,6486	170,6346
VN-T10-C00-S080	170,5654	170,4446	170,4297
VN-T10-C00-S090	169,4397	169,3190	169,3078
VN-T10-C00-S100	170,4435	170,3211	170,3050
VN-T10-C00-S110	170,3561	170,2351	170,2187
VN-T10-C00-S120	170,3360	170,2132	170,1953
VN-T10-C00-S130	170,5478	170,4206	170,4048
VN-T10-C00-S140	170,5116	170,3892	170,3705
VN-T10-C00-S150	170,1797	170,0565	170,0418

VN-T10-C00-SXXX: Peso seco de zona expuesta

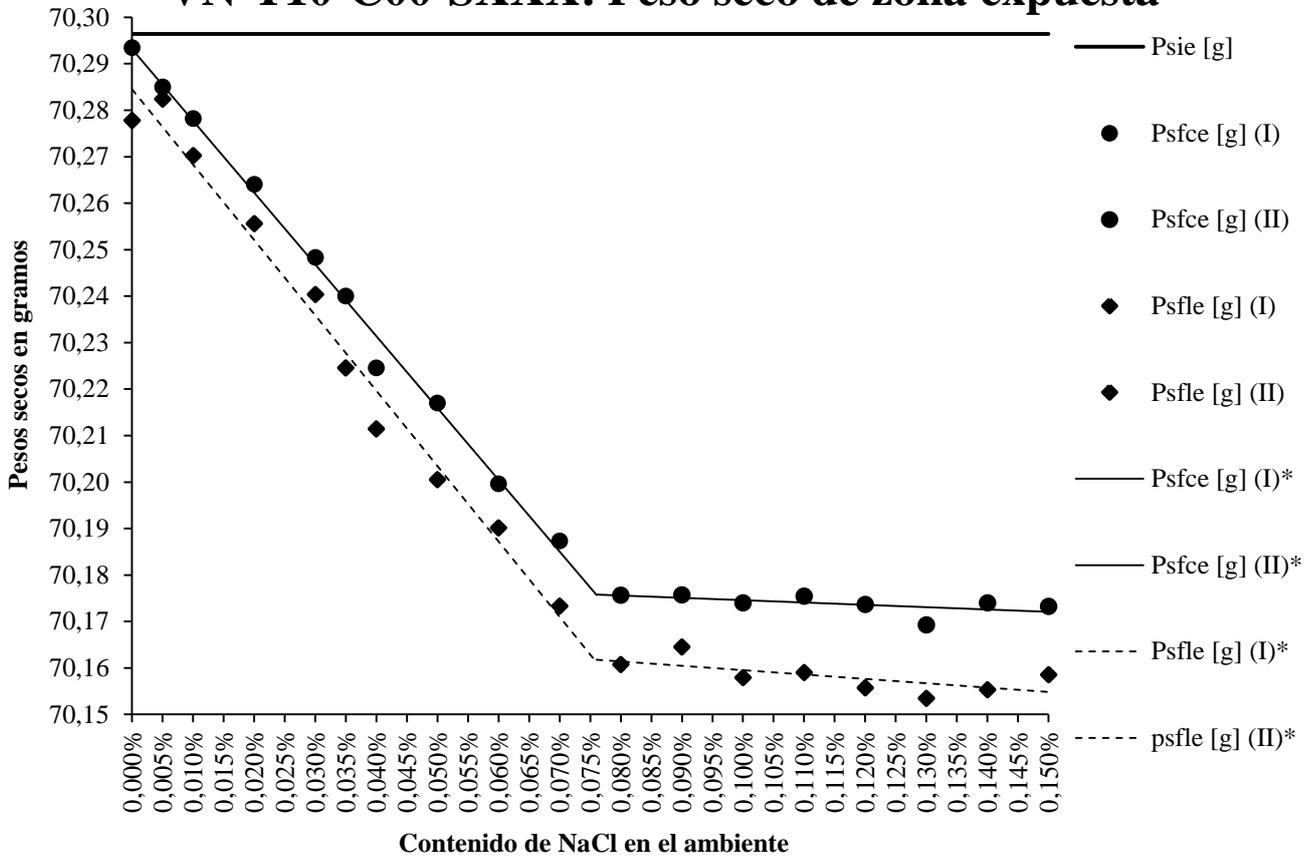


Figura 3.19

El peso seco final corroído expuesto para esta serie de ensayos responde a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFCE} = -154,5030 \cdot S_{\%} + 70,2932$ con $R^2 = 0,9949$, hasta $S_{\%} = 0,08\%$, valor a partir del cual la ecuación correspondiente es $P_{SFCE} = -4,9405 \cdot S_{\%} + 70,1795$ con $R^2 = 0,3303$.

El peso seco final limpio expuesto para esta serie de ensayos responde a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFLE} = -162,1697 \cdot S_{\%} + 70,2845$ con $R^2 = 0,9838$, hasta $S_{\%} = 0,08\%$, valor a partir del cual la ecuación correspondiente es $P_{SFLE} = -9,3095 \cdot S_{\%} + 70,1688$ con $R^2 = 0,4312$.

VN-T10-C00-SXXX: Variaciones de masa relativa

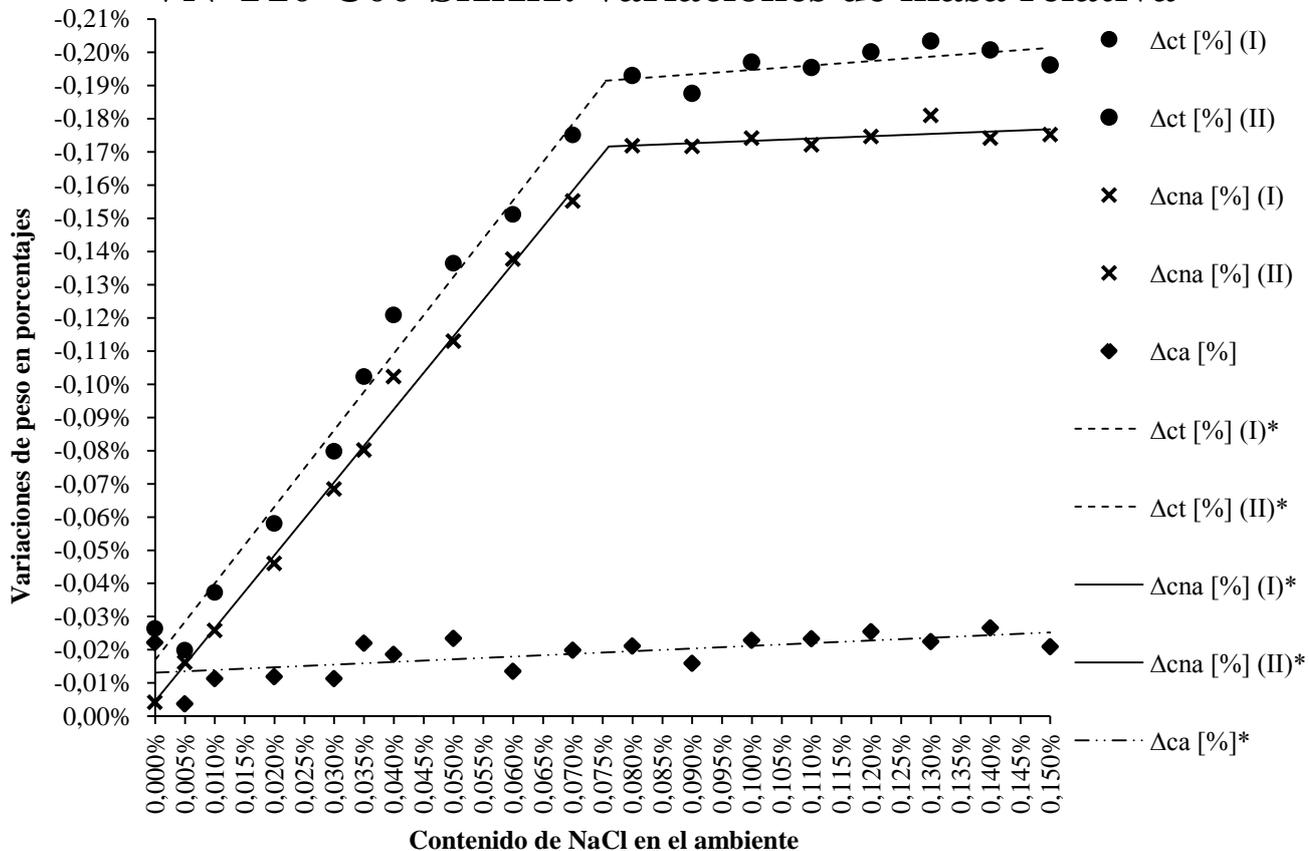


Figura 3.20

La variación por óxidos total para esta serie de ensayos responde a la recta de regresión con la siguiente ecuación $\Delta_{CT} = -2,306941 \cdot S_{\%} - 0,000169$ con $R^2 = 0,983758$, hasta $S_{\%} = 0,08\%$, valor a partir del cual la ecuación correspondiente es $\Delta_{CT} = -0,132432 \cdot S_{\%} - 0,001815$ con $R^2 = 0,431206$.

La variación por óxidos no adheridos para esta serie de ensayos responde a la recta de regresión con la siguiente ecuación $\Delta_{CNA} = -2,197879 \cdot S_{\%} - 0,000046$ con $R^2 = 0,994942$, hasta $S_{\%} = 0,08\%$, valor a partir del cual la ecuación correspondiente es $\Delta_{CNA} = -0,070281 \cdot S_{\%} - 0,001663$ con $R^2 = 0,330280$.

La variación por óxidos adheridos para esta serie de ensayos responde a la recta de regresión con la siguiente ecuación $\Delta_{CA} = -0,080783 \cdot S_{\%} - 0,000132$ con $R^2 = 0,410839$.

Tal como se esperaba, la pérdida de masa por óxidos no adheridos aumenta de manera directamente proporcional a la cantidad de cloruro sódico en el ambiente

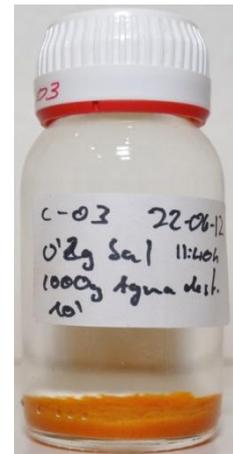
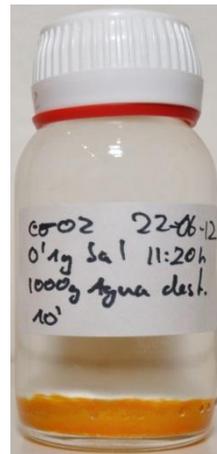
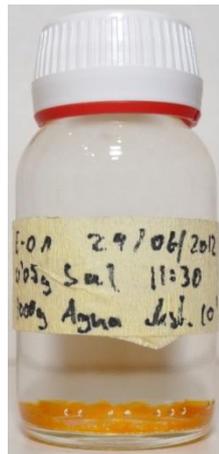
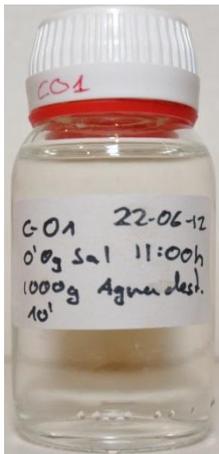
químico y con un coeficiente de correlación próximo a uno para las concentraciones bajas de cloruro sódico.

No obstante, para las concentraciones más altas (superiores al 0,070%), la pendiente y el coeficiente de correlación disminuyen significativamente. Ese cambio se produce justo cuando el circuito llega a su límite de rendimiento.

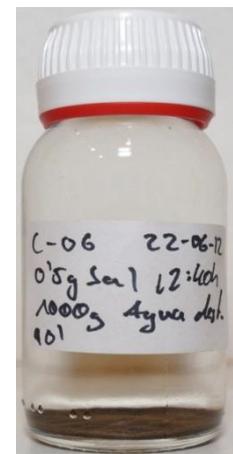
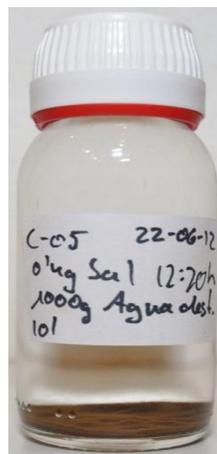
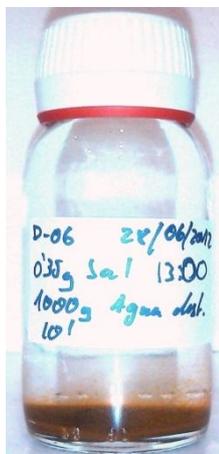
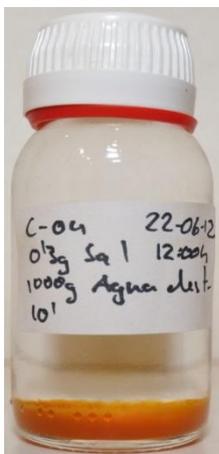
La pérdida de masa por óxidos adheridos mantiene su proporcionalidad independientemente del rendimiento del circuito, aunque es una relación pequeña con un coeficiente de correlación muy bajo.

3.2.3.3 Fotografías de los ambientes resultantes:

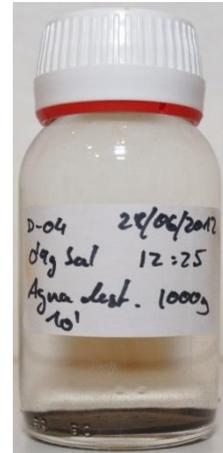
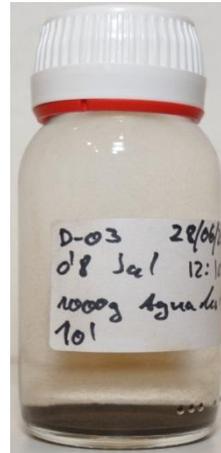
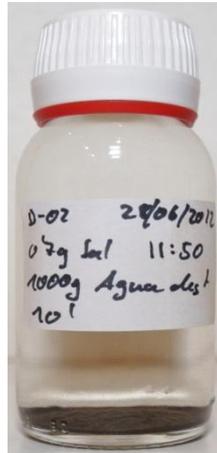
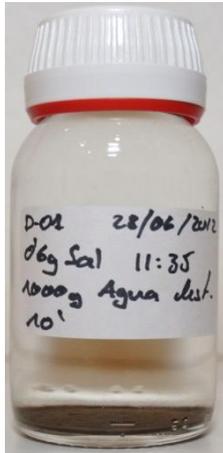
VN-T10-C00-S000 VN-T10-C00-S005 VN-T10-C00-S010 VN-T10-C00-S020



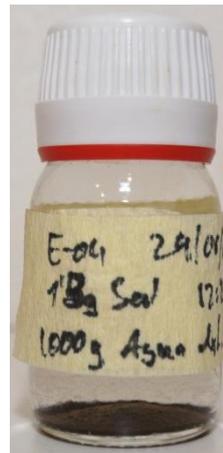
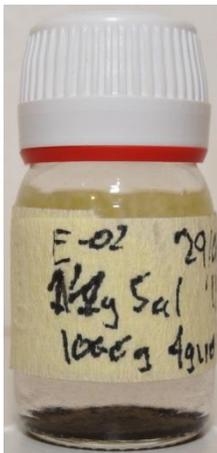
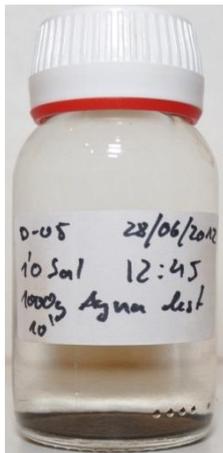
VN-T10-C00-S030 VN-T10-C00-S035 VN-T10-C00-S040 VN-T10-C00-S050



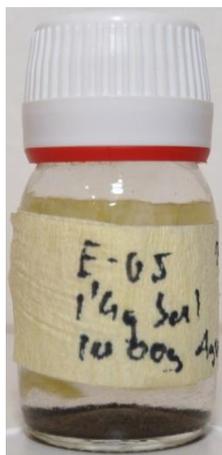
VN-T10-C00-S060 VN-T10-C00-S070 VN-T10-C00-S080 VN-T10-C00-S090



VN-T10-C00-S100 VN-T10-C00-S110 VN-T10-C00-S120 VN-T10-C00-S130



VN-T10-C00-S140



VN-T10-C00-S150

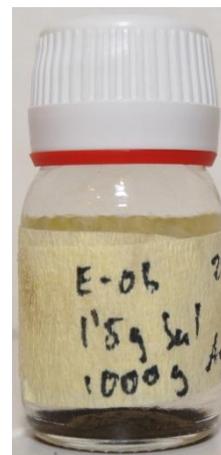


Figura 3.21: Ambientes resultantes de ensayos de la serie VN-T10-C00-SXXX



Las primeras cinco fotografías corroboran los resultados, ya que se puede observar fácilmente que la cantidad de óxidos en el ambiente resultante aumenta con mayores concentraciones de cloruro sódico. No obstante, al igual que en la serie anterior, en esta también se observa que, a partir de cierta cantidad de cloruro sódico, el tipo de óxidos que se forma es muy diferente.

La diferencia entre esta serie y la anterior es que aquí, el cambio de un tipo de óxido a otro se produce para la concentración de 0,035% de cloruro sódico, es decir, bastante por debajo del límite de rendimiento del circuito. Esto podría indicar que el tiempo de inmersión en la celda de corrosión influye en la generación del tipo de óxido.

Se observa, además, que a concentraciones bajas (0,000% - 0,0030%) se forman exclusivamente óxidos de color naranja, probablemente limonita y/o cloruro de hierro (III) hexahidratado. A concentraciones más altas se distingue claramente un óxido magnético de color negro, probablemente magnetita, y una cantidad cada vez menor de los óxidos anaranjados. Finalmente, esa evolución lleva a que a partir de una determinada concentración (0,110%), no se aprecia formación de los óxidos de color naranja.

3.2.4 VN-T10-C05-SXXX:

3.2.4.1 Características electroquímicas de los ensayos:

VN-T10-C05-SXXX: Intensidad de Corriente

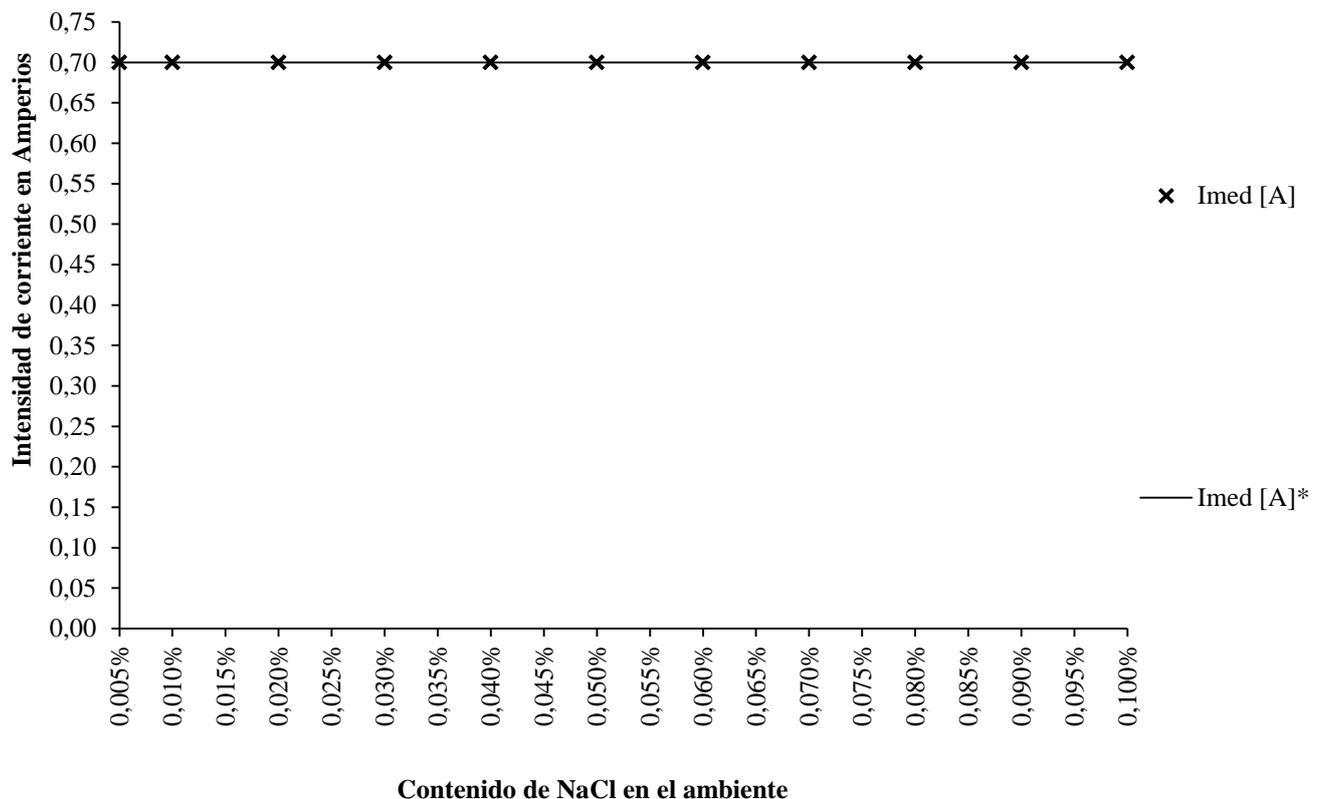


Figura 3.22

La intensidad media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $I_{med} = 0,7000$ y $R^2 = 0$, es decir, la intensidad media se mantiene constante para todos los ensayos de la serie en **0,70 A**, el límite de rendimiento del circuito.

VN-T10-C05-SXXX: Potencia eléctrica

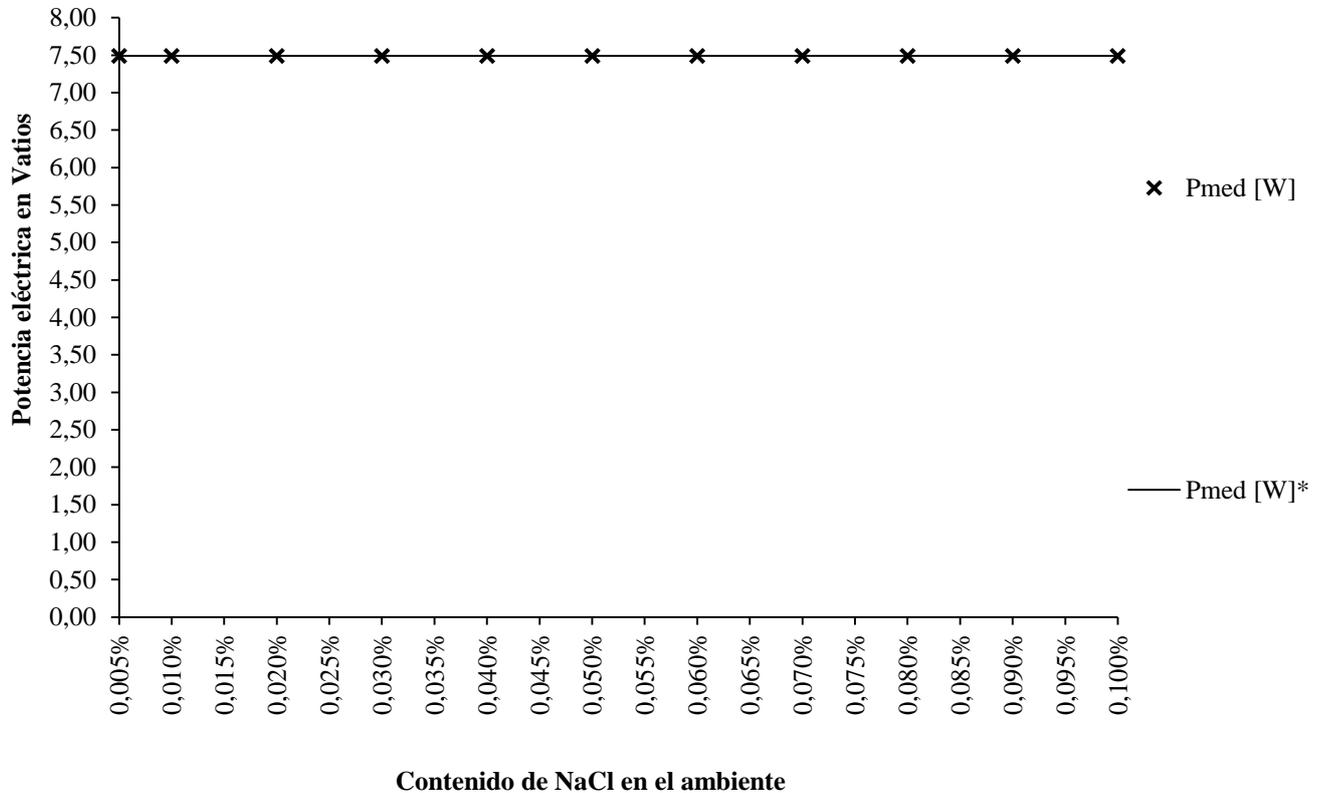


Figura 3.23

La potencia media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{med} = 7,4900$ y $R^2 = 0$, es decir, la potencia media se mantiene constante para todos los ensayos de la serie en **7,49 W**.

VN-T10-C05-SXXX: Diferencial de potencial

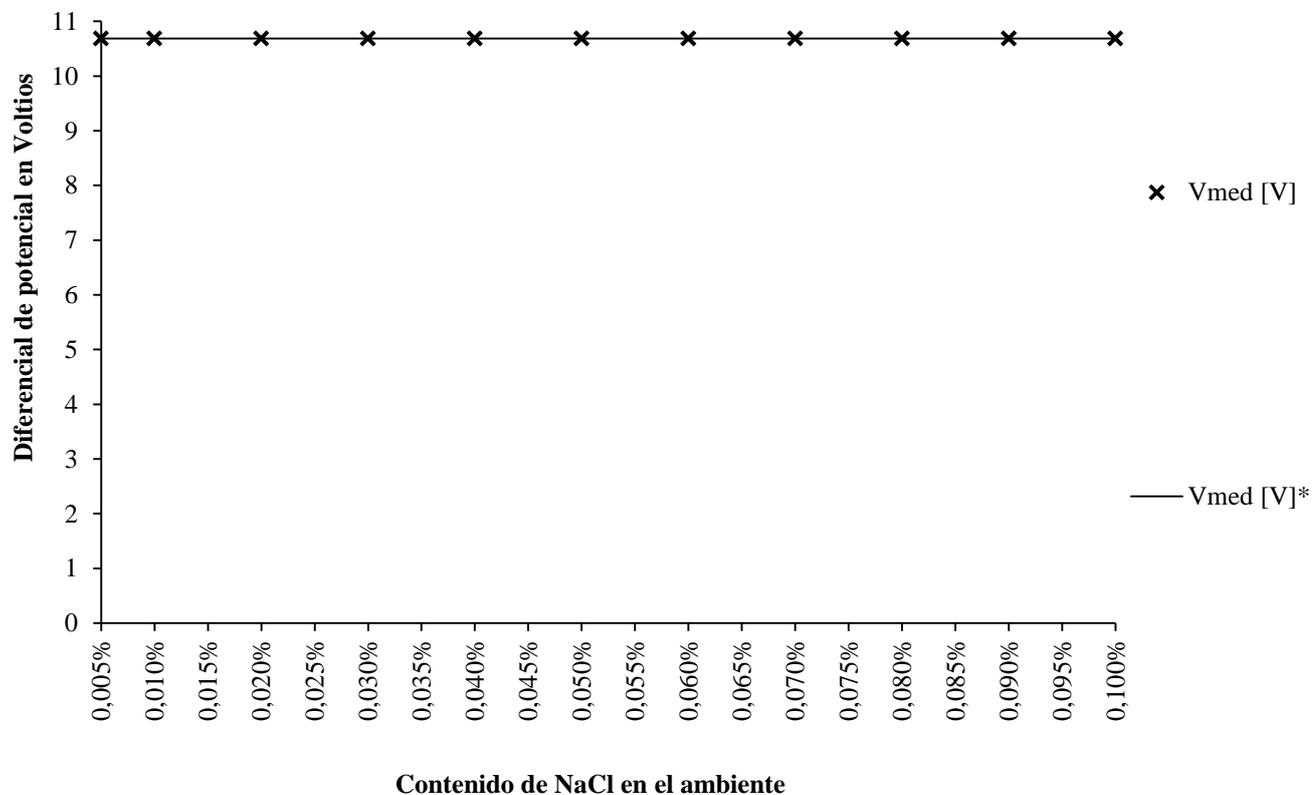


Figura 3.24

El voltaje medio para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $V_{med} = 10,6900$ y $R^2 = 0$, es decir, el voltaje medio se mantiene constante para todos los ensayos de la serie en **10,69 V**.

VN-T10-C05-SXXX: Resistencia eléctrica

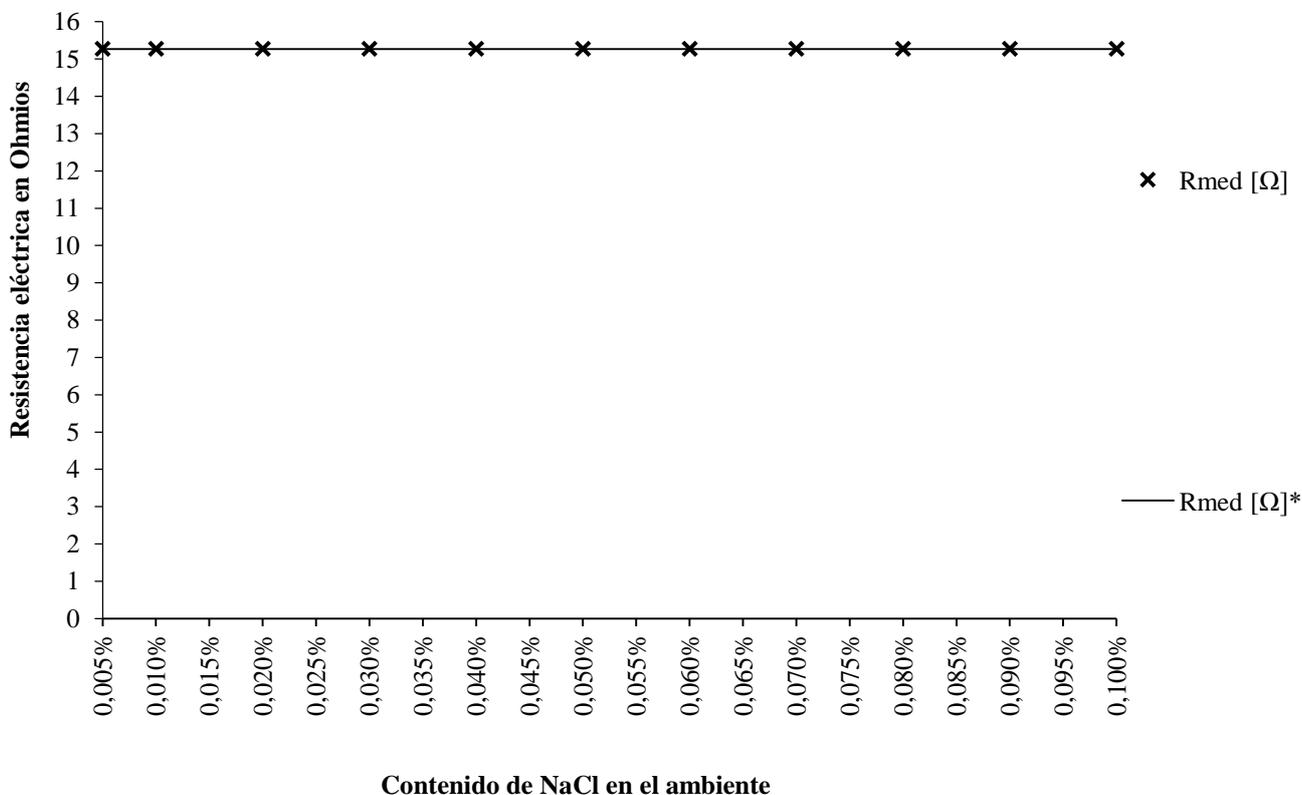


Figura 3.25

La resistencia media para esta serie de ensayos corresponde a la regresión potencial con la ecuación $R_{med} = 15,2700$ y $R^2 = 0$, es decir, la resistencia media se mantiene constante para todos los ensayos de la serie en **15,27 Ω** .

Es evidente que, con la concentración de hidróxido cálcico presente en el ambiente de todos los ensayos, se agota la capacidad del circuito, llegando al límite de rendimiento incluso con las concentraciones más bajas de cloruro sódico.

Esto se debe que al disolver el hidróxido cálcico se libera una gran cantidad de aniones HO^- , que por un lado aumentan considerablemente el pH de la disolución, pero por otro lado tienen una movilidad muy alta y carga negativa, aumentando por ello la conductividad.

Teniendo en cuenta esa información resulta evidente que, para los ensayos de esta serie, las características electroquímicas analizadas aisladamente no aportan información sobre la influencia del cloruro sódico.

3.2.4.2 Variaciones de masa:

Tabla 3.11: Pesos secos medidos para las probetas de la serie VN-T10-C05-SXXX

NOMBRE	P_{si} [g]	P_{sfc} [g]	P_{sfl} [g]
VN-T10-C05-S005	170,0411	169,9321	169,9054
VN-T10-C05-S010	170,0969	169,9837	169,9608
VN-T10-C05-S020	171,7228	171,5976	171,5859
VN-T10-C05-S030	170,7885	170,6781	170,6504
VN-T10-C05-S040	170,3654	170,2543	170,2277
VN-T10-C05-S050	170,5534	170,4343	170,4194
VN-T10-C05-S060	169,8288	169,7115	169,6830
VN-T10-C05-S070	170,6234	170,5077	170,4874
VN-T10-C05-S080	170,4859	170,3635	170,3515
VN-T10-C05-S090	170,8285	170,7043	170,6886
VN-T10-C05-S100	170,6899	170,5649	170,5520

VN-T10-C05-SXXX: Peso seco de zona expuesta

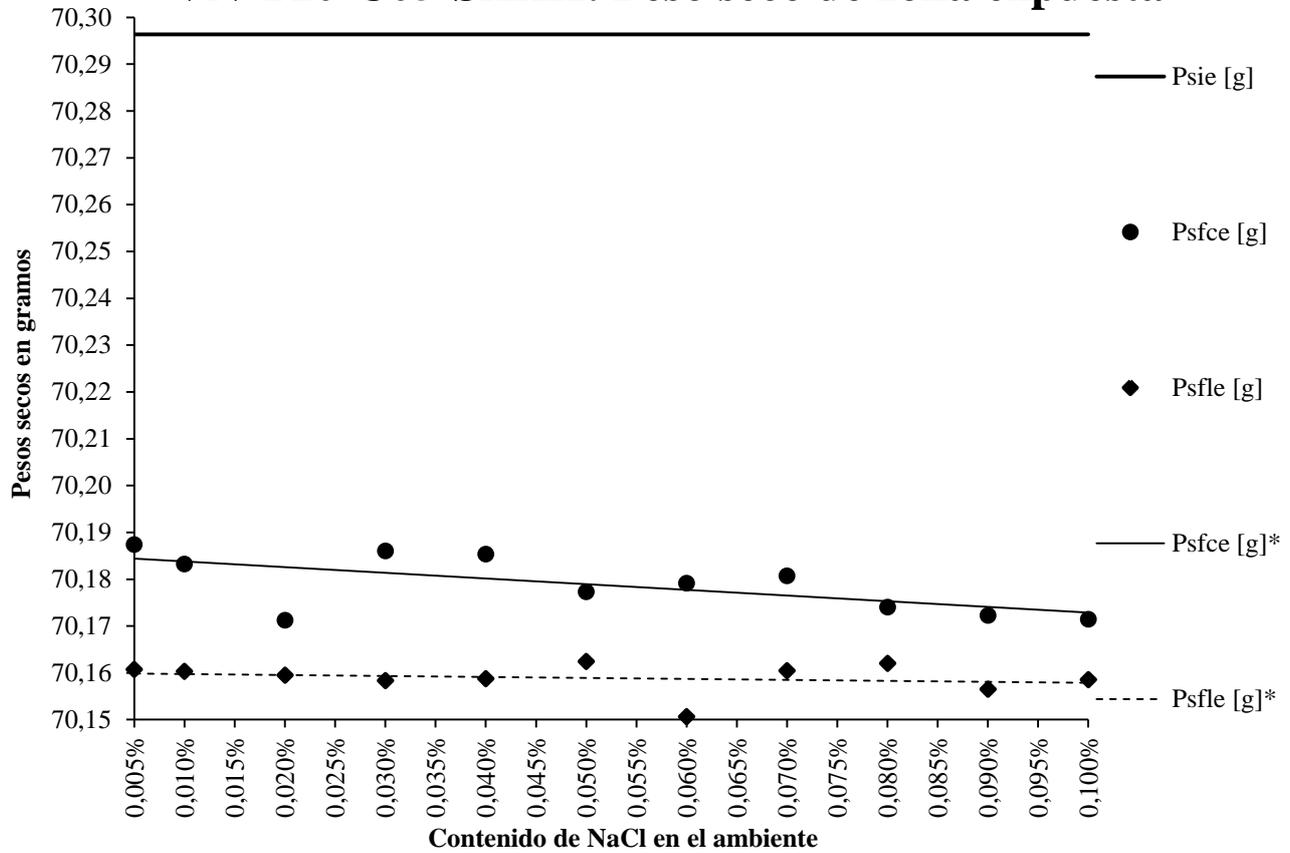


Figura 3.26

El peso seco final corroído expuesto para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFCE} = -12,1780 \cdot S_{\%} + 70,1850$ y $R^2 = 0,4191$.

El peso seco final limpio expuesto para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFLE} = -2,0622 \cdot S_{\%} + 70,1599$ y $R^2 = 0,0427$.

VN-T10-C05-SXXX: Variaciones de masa relativa

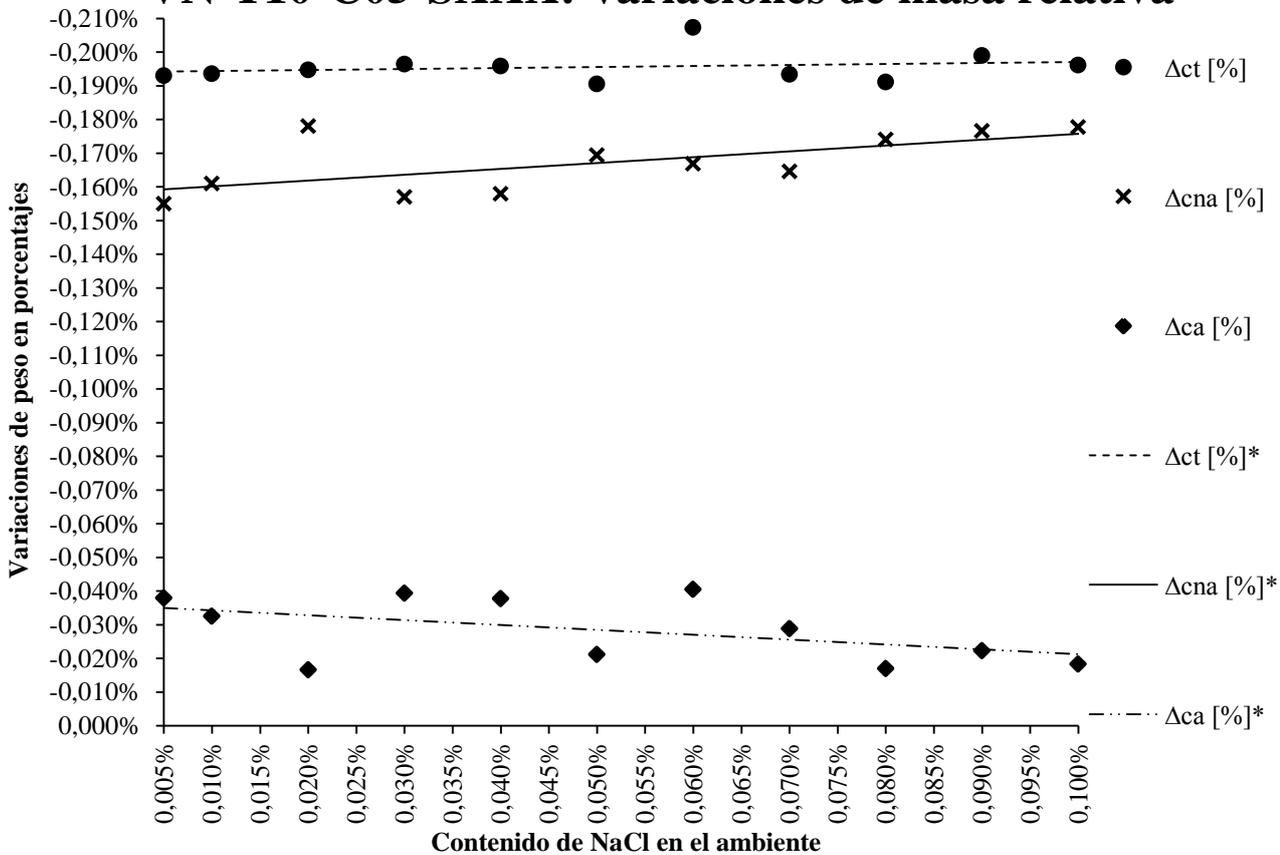


Figura 3.27

La variación por óxidos total para esta serie de ensayos responde a la recta de regresión con la siguiente ecuación $\Delta_{CT} = -0,029336 \cdot S_{\%} - 0,001941$ con $R^2 = 0,042668$.

La variación por óxidos no adheridos para esta serie de ensayos responde a la recta de regresión con la siguiente ecuación $\Delta_{CNA} = -0,173237 \cdot S_{\%} - 0,001584$ con $R^2 = 0,419065$.

La variación por óxidos adheridos para esta serie de ensayos responde a la recta de regresión con la siguiente ecuación $\Delta_{CA} = 0,143902 \cdot S_{\%} - 0,000357$ con $R^2 = 0,235986$.

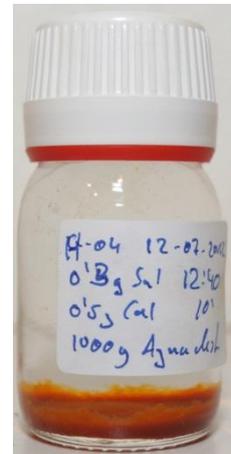
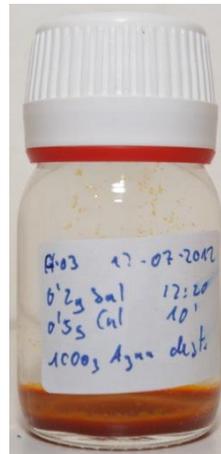
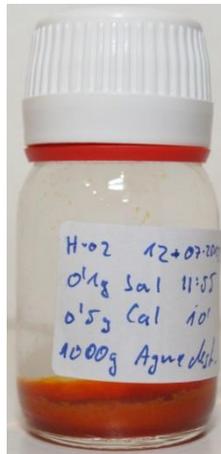
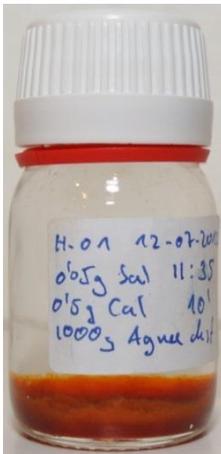
En esta serie de ensayos se puede observar que para las concentraciones bajas de cloruro sódico se registró una pérdida de masa bastante mayor alta. Esto en un principio resulta contradictorio, ya que el pH elevado, causado por la presencia de hidróxido cálcico, pasivaría el acero, protegiéndolo de corrosión.

No obstante, tal como se observó en el análisis de las propiedades electroquímicas, el hidróxido cálcico también aumenta la conductividad eléctrica y por tanto favorece la corrosión inducida por corriente eléctrica.

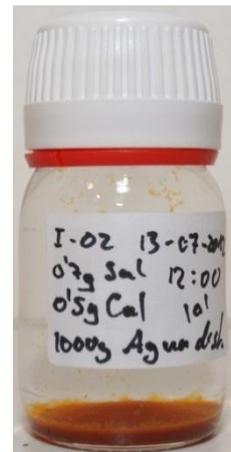
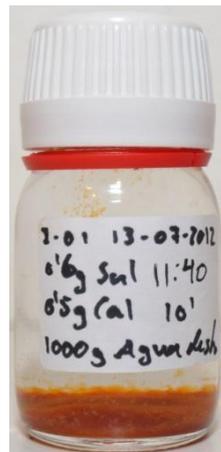
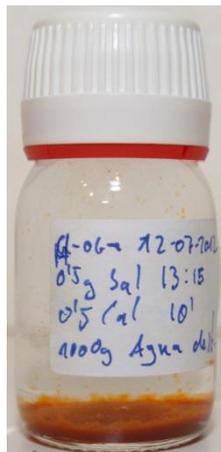
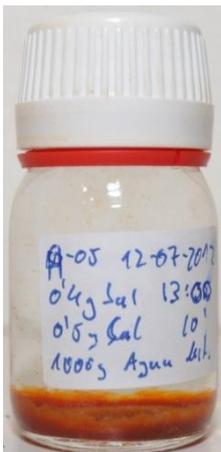
Aun así, la capacidad protectora del hidróxido cálcico se puede deducir observando que el aumento de pérdida de masa en relación al aumento de la concentración de cloruro sódico es más reducida que en las anteriores series.

3.2.4.3 Fotografías de los ambientes resultantes:

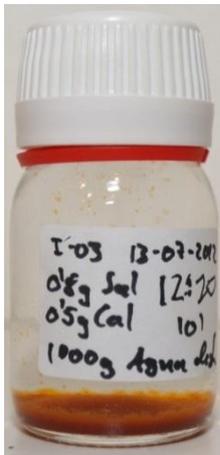
VN-T10-C05-S005 VN-T10-C05-S010 VN-T10-C05-S020 VN-T10-C05-S030



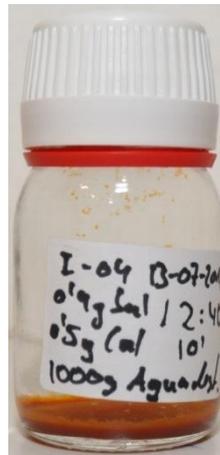
VN-T10-C05-S040 VN-T10-C05-S050 VN-T10-C05-S060 VN-T10-C05-S070



VN-T10-C05-S080



VN-T10-C05-S090



VN-T10-C05-S100

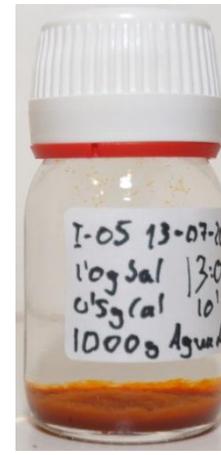


Figura 3.28: Ambientes resultantes de ensayos de la serie VN-T10-C05-SXXX

Se observa que en todos los ensayos parece haberse formado una cantidad muy parecida de un óxido visualmente diferente a todos los óxidos producidos en las series anteriores sin hidróxido cálcico. Dado el color del óxido formado y teniendo en cuenta la abundancia de aniones en el ambiente, probablemente se trate del oxi-hidróxido de hierro (III), ya sea limonita o goethita.

Cabe destacar que, aunque en las anteriores series siempre se producía magnetita cuando se alcanzaba el límite de rendimiento del circuito, en esta serie parece no haberse formado.

3.2.5 VN-T10-C10-SXXX:

3.2.5.1 Características electroquímicas de los ensayos:

VN-T10-C10-SXXX: Intensidad de Corriente

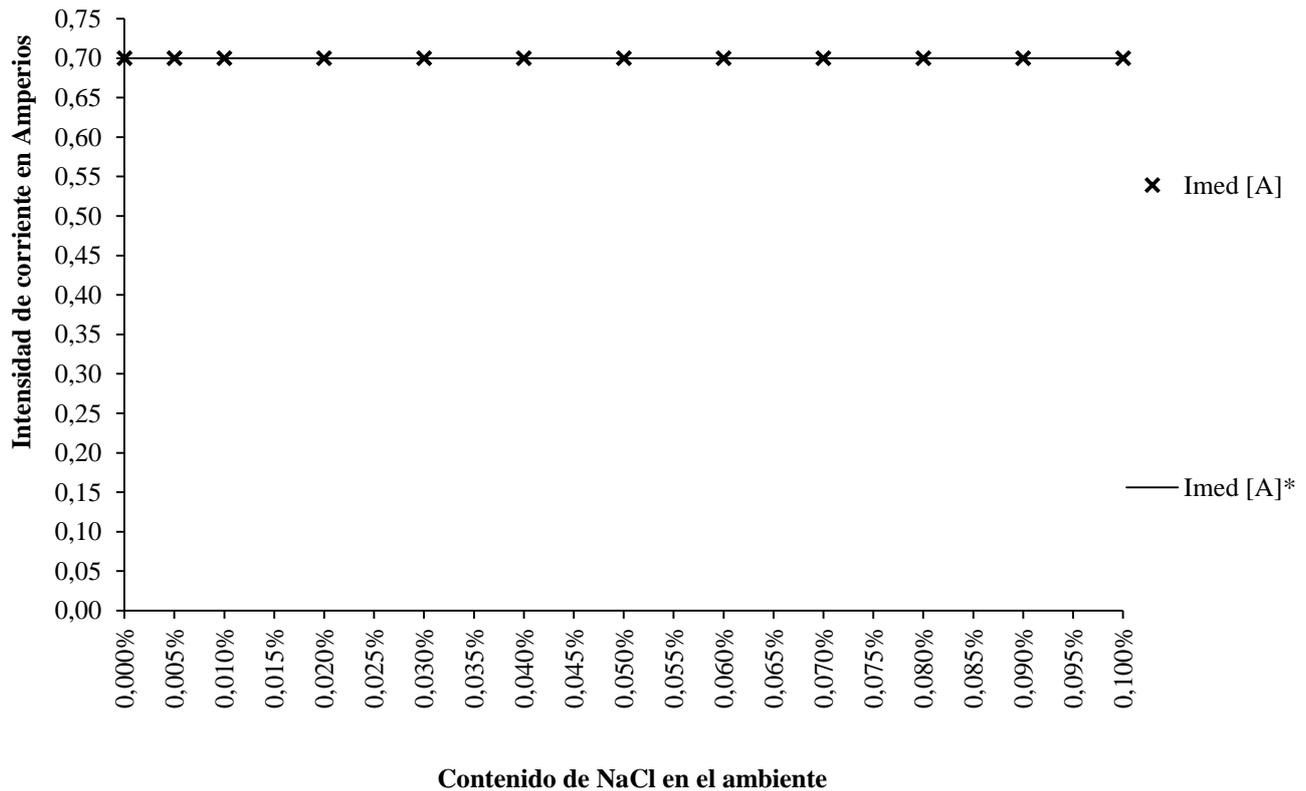


Figura 3.29

La intensidad media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $I_{med} = 0,7000$ y $R^2 = 0$, es decir, la intensidad media es constante para todos los ensayos en **0,70 A**, el límite de rendimiento del circuito.

VN-T10-C10-SXXX: Potencia eléctrica

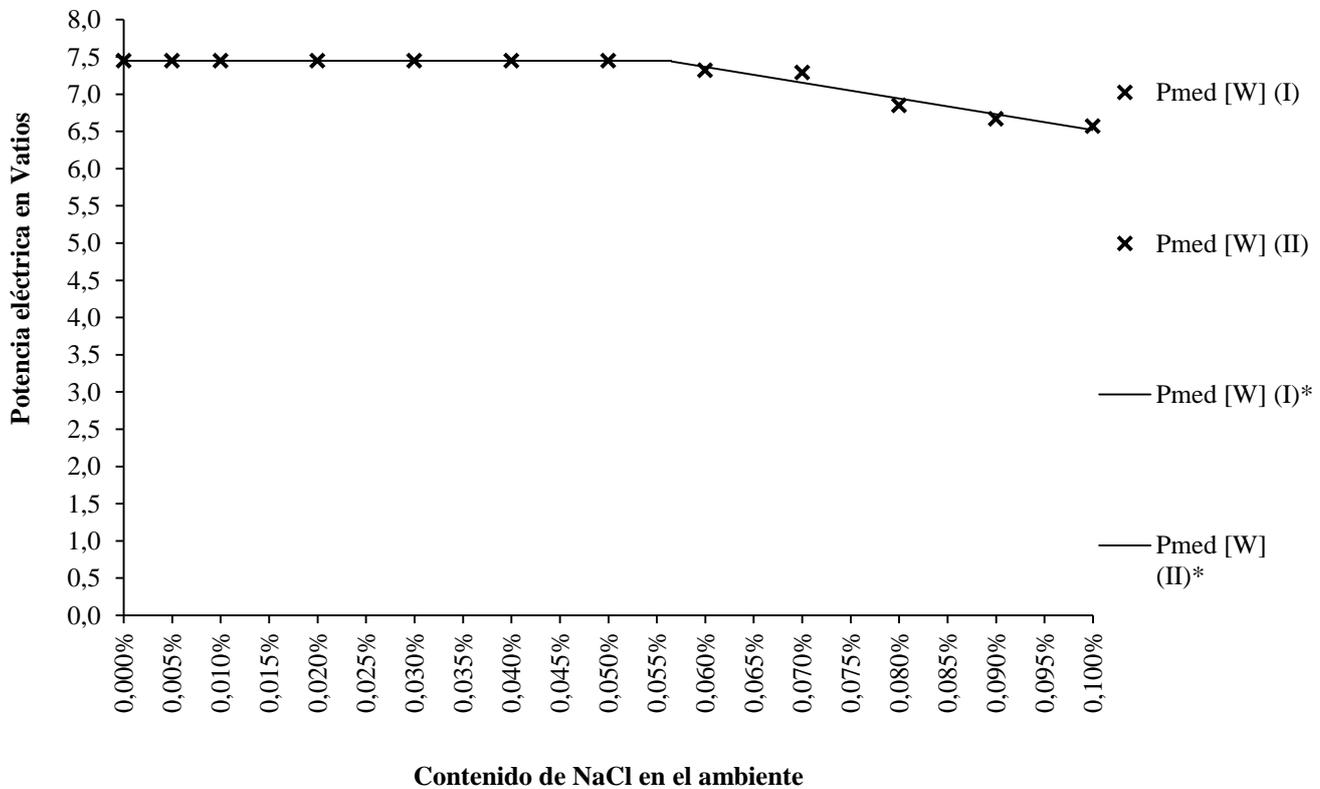


Figura 3.30

La potencia media para esta serie de ensayos corresponde, hasta $S_{\%}=0,05\%$, a la recta de regresión con la ecuación $P_{med} = 7,4500$ y $R^2 = 0$, es decir, la potencia media es constante en **7,45 W**. A partir de $S_{\%}=0,05\%$, corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{med} = -2120,0000 \cdot S_{\%} + 8,6360$ y $R^2 = 0,9271$.

VN-T10-C10-SXXX: Diferencial de potencial

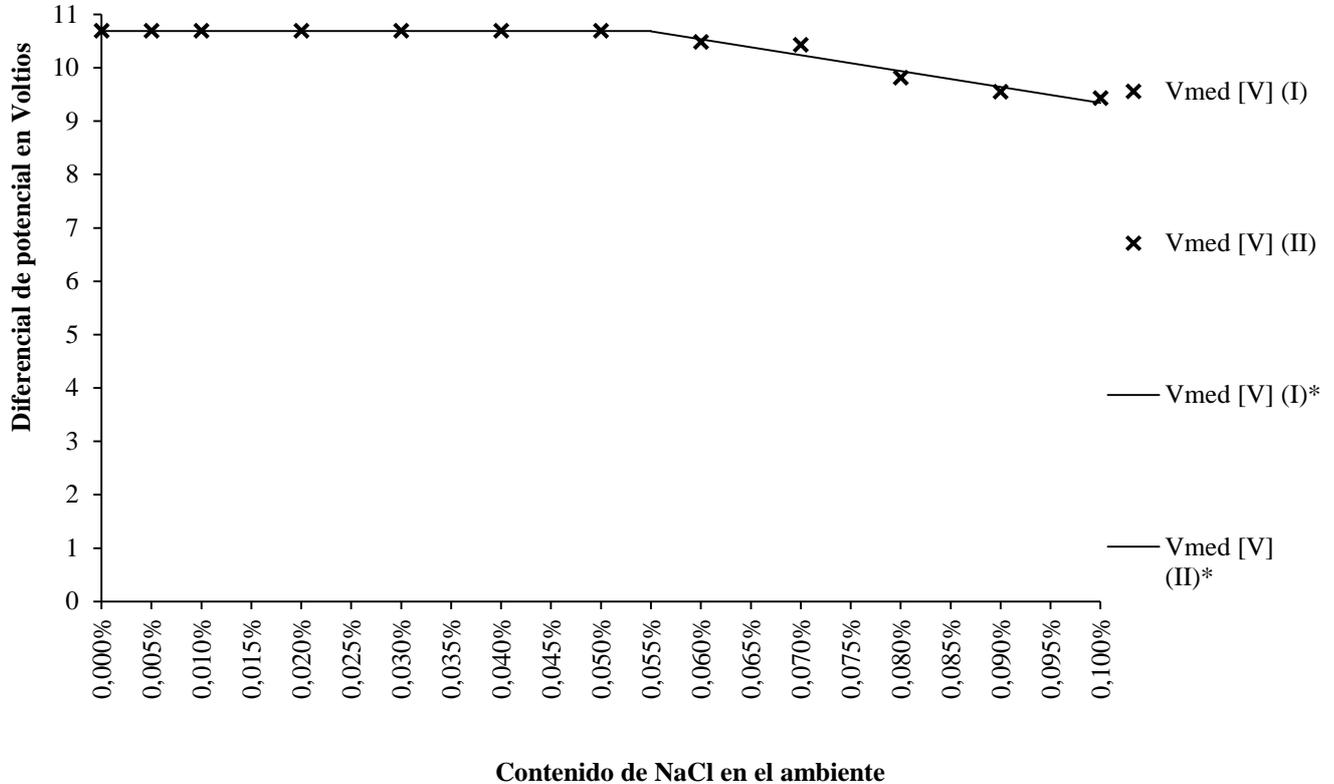


Figura 3.31

El voltaje medio para esta serie de ensayos corresponde, hasta $S\%=0,05$, a la recta de regresión con la ecuación $V_{med} = 10,6900$ y $R^2 = 0$, es decir, el voltaje medio es constante en **10,69 V**. A partir de $S\%=0,05\%$, corresponde a la recta de regresión con la ecuación $V_{med} = -2980,0000 \cdot S_{\%} + 12,3240$ y $R^2 = 0,9243$.

VN-T10-C10-SXXX: Resistencia eléctrica

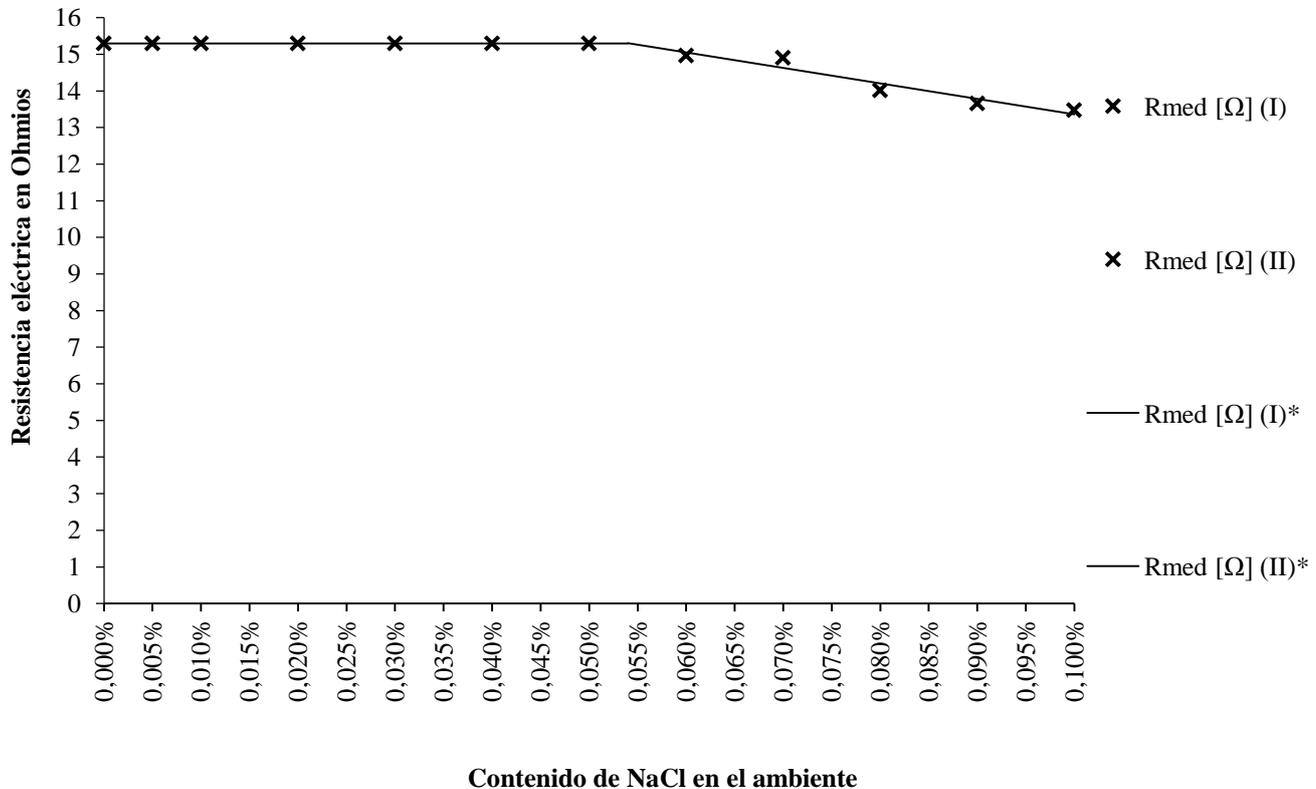


Figura 3.32

La resistencia media para esta serie de ensayos corresponde, hasta $S_{\%}=0,05$, a la regresión potencial con la ecuación $R_{med} = 15,3000$ y $R^2 = 0$, es decir, la resistencia media es constante en **15,30 Ω**. A partir de $S_{\%}=0,05\%$, corresponde a la regresión potencial con la ecuación $R_{med} = -4230,0000 \cdot S_{\%} + 17,5920$ y $R^2 = 0,9228$.

Analizando estos datos confirmamos que, al igual que en la anterior serie de ensayos con hidróxido cálcico, con bajas concentraciones de cloruro sódico, incluso en su ausencia, el circuito llega a su límite de rendimiento debido a la conductividad generada por la presencia de los aniones HO⁻.



3.2.5.2 Variaciones de masa:

Tabla 3.12: Pesos secos medidos para las probetas de la serie VN-T10-C10-SXXX

NOMBRE	P_{si} [g]	P_{sfc} [g]	P_{sfl} [g]
VN-T10-C10-S000	173,5143	173,4998	173,4856
VN-T10-C10-S005	173,0041	173,0082	172,9370
VN-T10-C10-S010	173,5750	173,4984	173,4560
VN-T10-C10-S020	173,4269	173,3782	173,2934
VN-T10-C10-S030	174,1345	174,0714	174,0074
VN-T10-C10-S040	174,2128	174,1501	174,0811
VN-T10-C10-S050	173,1572	173,0909	173,0296
VN-T10-C10-S060	172,9879	172,9073	172,8674
VN-T10-C10-S070	173,2502	173,1821	173,1257
VN-T10-C10-S080	173,0769	173,0142	172,9515
VN-T10-C10-S090	173,0045	172,9228	172,8678
VN-T10-C10-S100	172,9200	172,8562	172,7960

VN-T10-C10-SXXX: Peso seco de zona expuesta

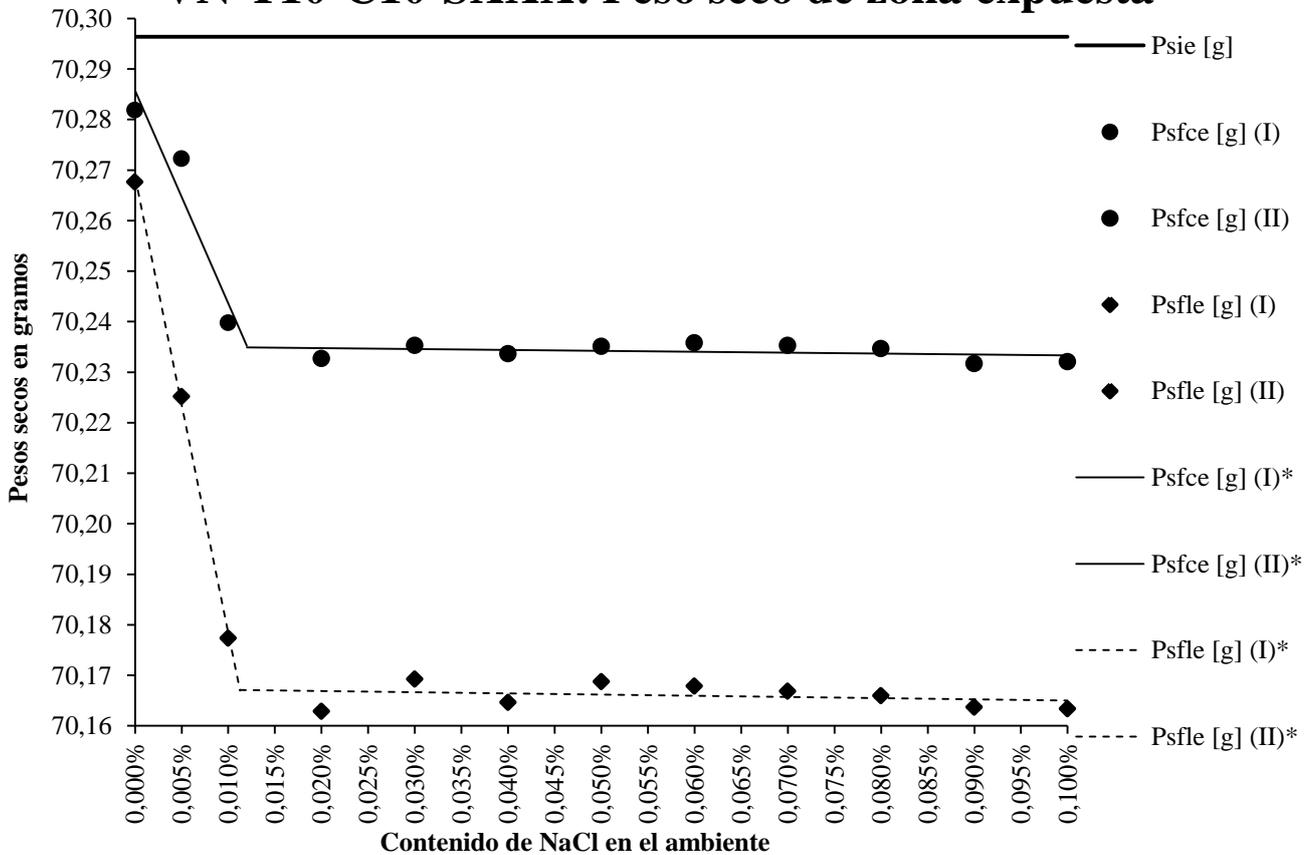


Figura 3.33

El peso seco final corroído expuesto para esta serie de ensayos corresponde, para las tres concentraciones más bajas de cloruro sódico, a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFCE} = -421,0000 \cdot S_{\%} + 70,2857$ y $R^2 = 0,9102$, a partir de este punto, la ecuación correspondiente es $P_{SFCE} = -1,8333 \cdot S_{\%} + 70,2351$ y $R^2 = 0,1062$.

El peso seco final limpio expuesto para esta serie de ensayos corresponde, para las tres concentraciones más bajas de cloruro sódico, a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFLE} = -903,0000 \cdot S_{\%} + 70,2686$ y $R^2 = 0,9989$, a partir de este punto, la ecuación correspondiente es $P_{SFLE} = -2,3500 \cdot S_{\%} + 70,1674$ y $R^2 = 0,0713$.

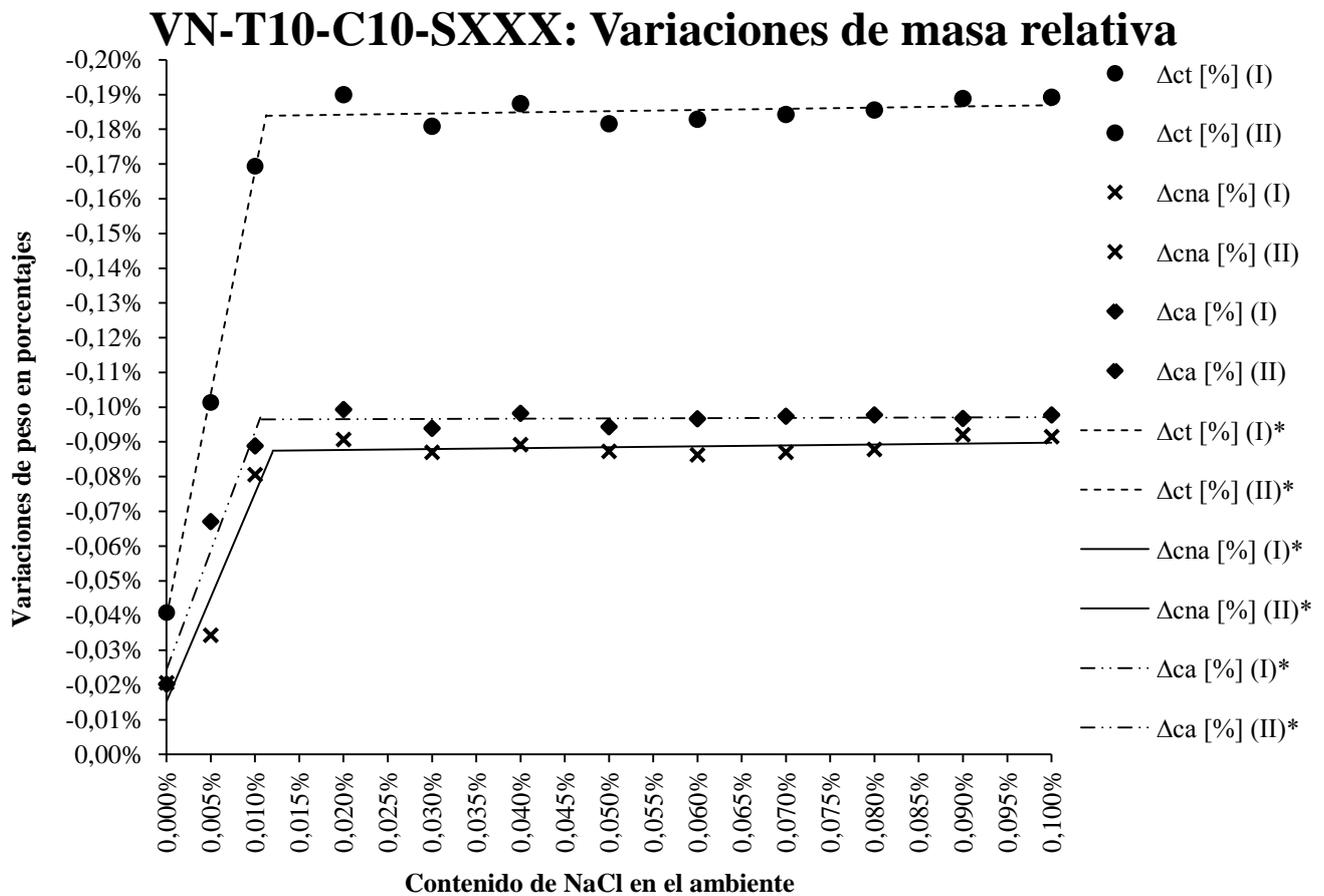


Figura 3.34

La variación por óxidos total para esta serie de ensayos corresponde, para los tres primeros ensayos, a la recta de regresión con la ecuación $\Delta_{CT} = -12,845608 \cdot S_{\%} - 0,000396$ y $R^2 = 0,998853$, a partir de este punto, la ecuación correspondiente es $\Delta_{CT} = 0,033430 \cdot S_{\%} - 0,001836$ y $R^2 = 0,071285$.

La variación por óxidos no adheridos para esta serie de ensayos corresponde, para los tres primeros ensayos, a la recta de regresión con la ecuación $\Delta_{CNA} = -5,988927 \cdot S_{\%} - 0,000152$ y $R^2 = 0,910229$, a partir de este punto, la ecuación correspondiente es $\Delta_{CNA} = -0,026080 \cdot S_{\%} - 0,000871$ y $R^2 = 0,106240$.

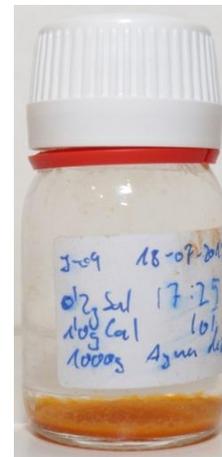
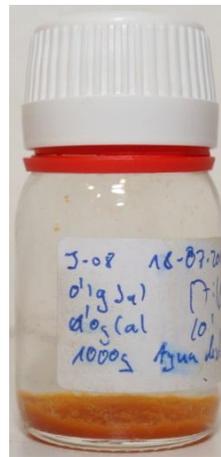
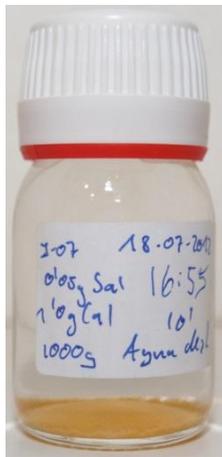
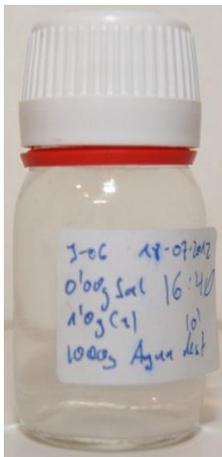
La variación por óxidos adheridos para esta serie de ensayos corresponde, para los tres primeros ensayos, a la recta de regresión con la ecuación $\Delta_{CA} = 6,856681 \cdot S_{\%} - 0,000244$ y $R^2 = 0,957448$, a partir de este punto, la ecuación correspondiente es $\Delta_{CA} = 0,007350 \cdot S_{\%} - 0,000964$ y $R^2 = 0,013119$.

Las pérdidas de masa aumentan proporcional a la cantidad de cloruro sódico en los tres ensayos de concentraciones más bajas a un ritmo muy alto, con unos coeficientes de correlación próximos a uno.

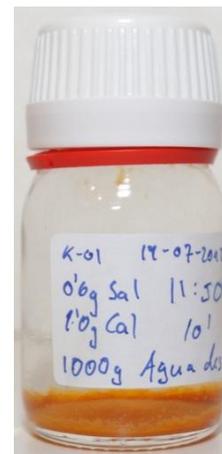
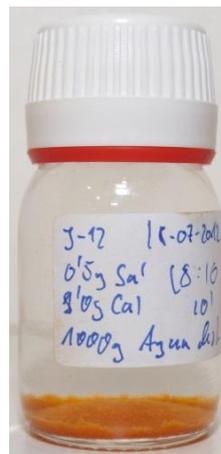
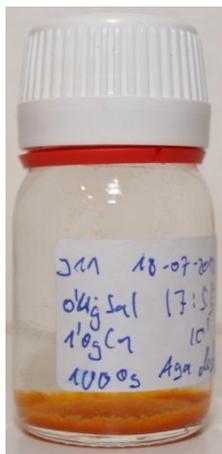
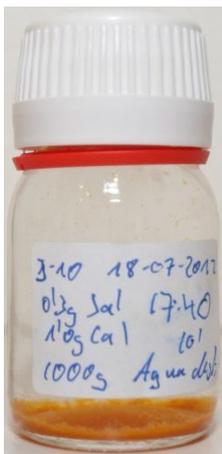
En los demás su aumento es tan pequeño que casi se pueden considerar constantes, dado también que sus coeficientes de correlación son próximos a cero.

3.2.4.3 Fotografías de los ambientes resultantes:

VN-T10-C10-S000 VN-T10-C10-S005 VN-T10-C10-S010 VN-T10-C10-S020



VN-T10-C10-S030 VN-T10-C10-S040 VN-T10-C10-S050 VN-T10-C10-S060



VN-T10-C10-S070 VN-T10-C10-S080 VN-T10-C10-S090 VN-T10-C10-S100

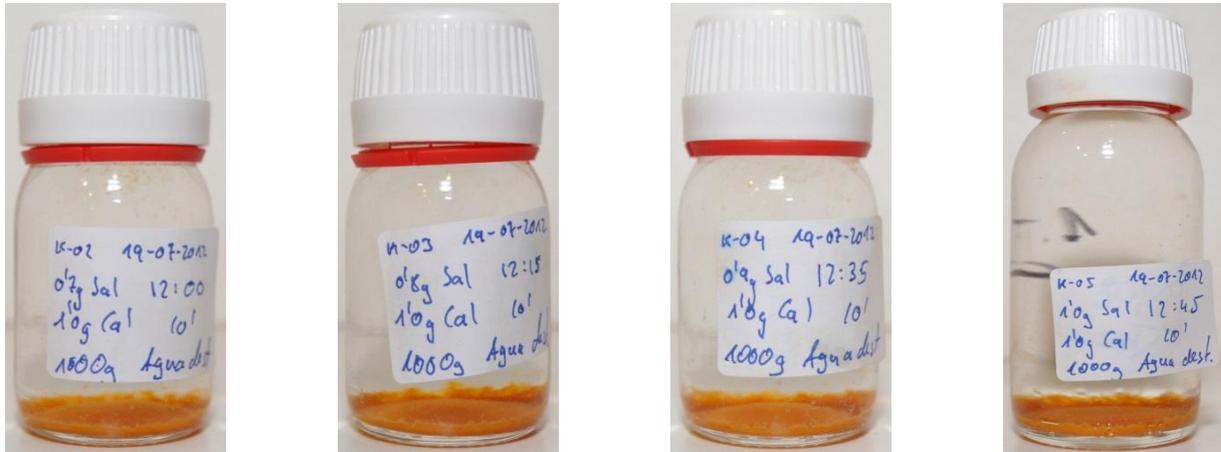


Figura 3.35: Ambientes resultantes de ensayos de la serie VN-T10-C10-SXXX

Al igual que en la anterior serie con hidróxido cálcico, se observa que se ha formado para todos los ensayo, excepto el primero, una cantidad muy similar de un óxido que parece ser limonita.

Es preciso prestar atención a la ausencia de óxidos en el ambiente del primer ensayo de esta serie (0% en NaCl), que indica claramente que el hidróxido cálcico por sí mismo no favorece la corrosión del acero. Aunque el circuito funcionaba en su límite de rendimiento no se produjo oxidación en ausencia de Cl⁻. De modo que se confirma que la oxidación se produce cuando hay conducción eléctrica, solo cuando haya presencia de iones que catalicen la misma directamente.

3.2.6 VN-T20-C00-SXXX:

3.2.6.1 Características electroquímicas de los ensayos:

VN-T20-C00-SXXX: Intensidad de Corriente

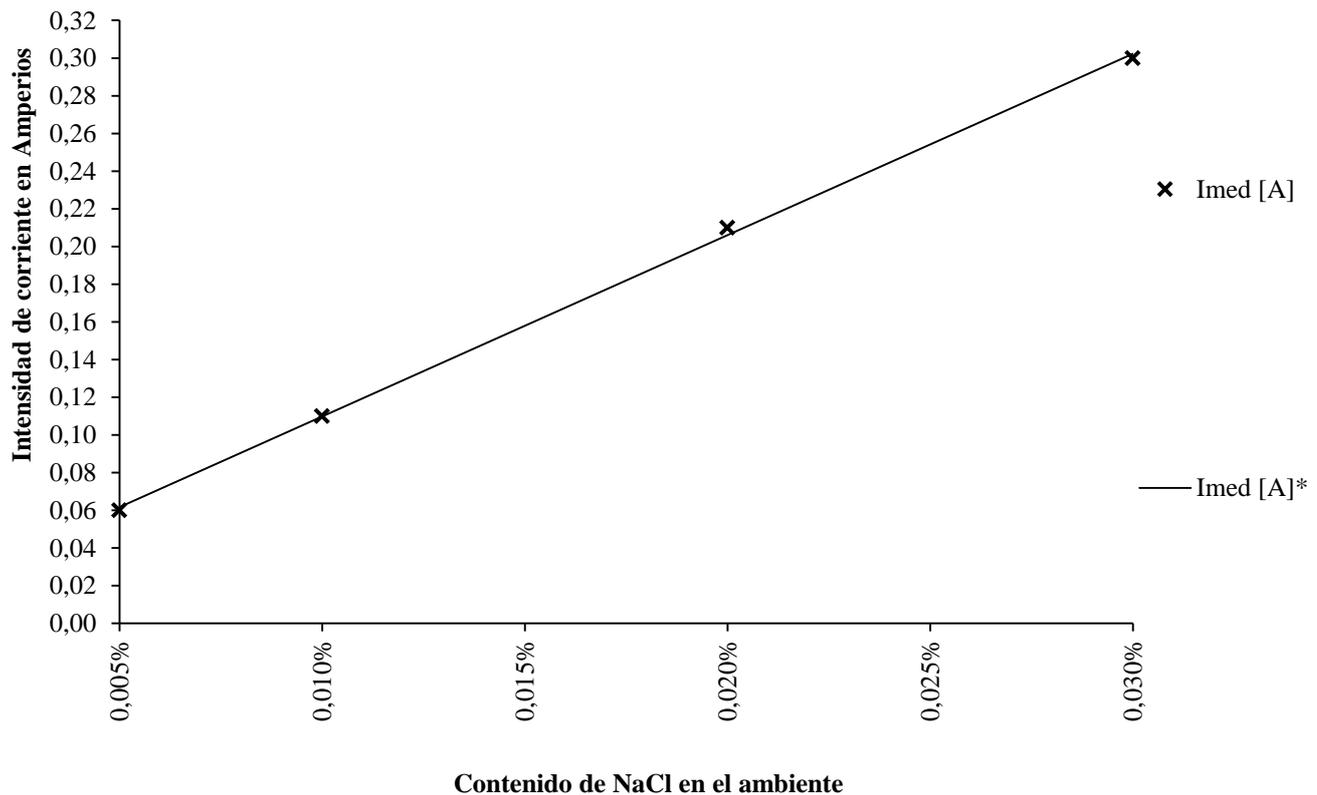


Figura 3.36

La intensidad media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $I_{med} = 962,7119 \cdot S_{\%} + 0,00136$ y $R^2 = 0,9993$.

VN-T20-C00-SXXX: Potencia eléctrica

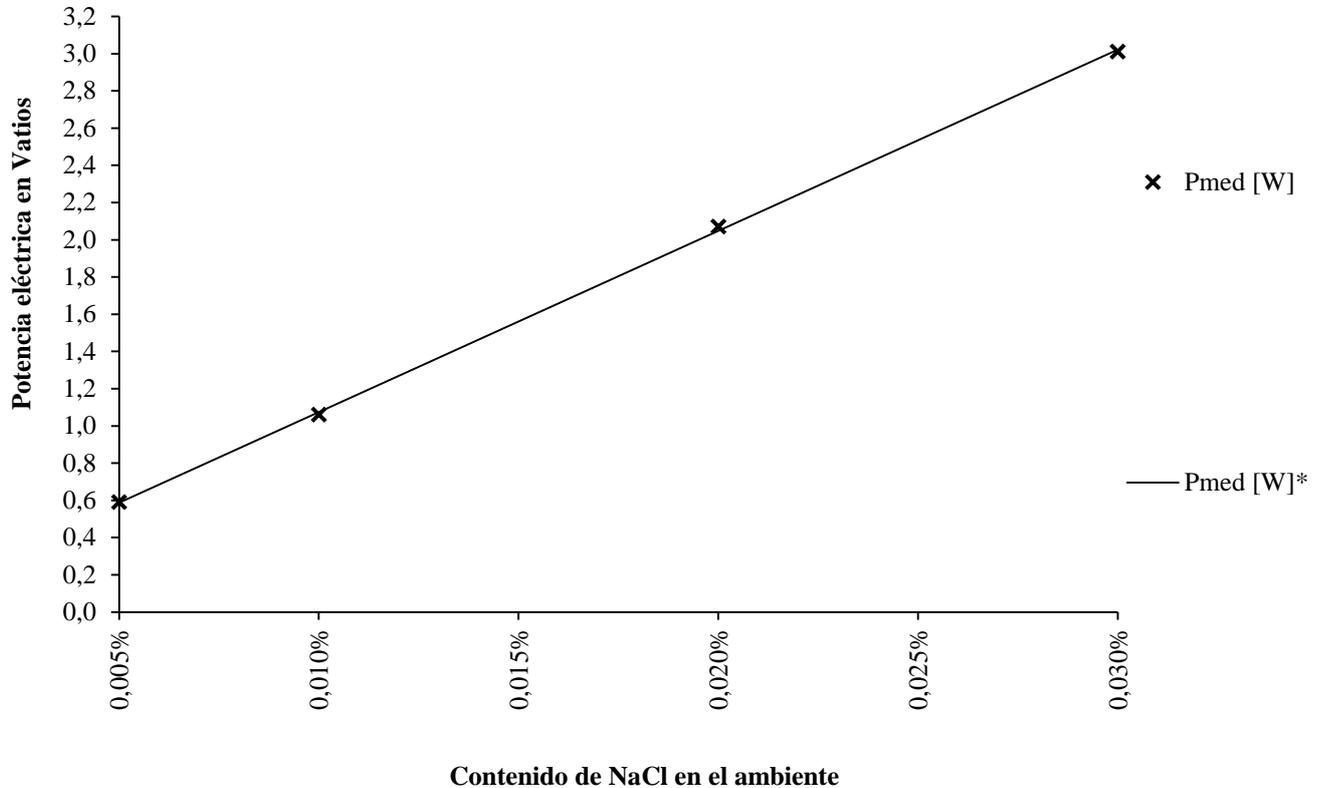


Figura 3.37

La potencia media para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{med} = 9732,2034 \cdot S_{\%} + 0,1010$ y $R^2 = 0,9998$.

VN-T20-C00-SXXX: Diferencial de potencial

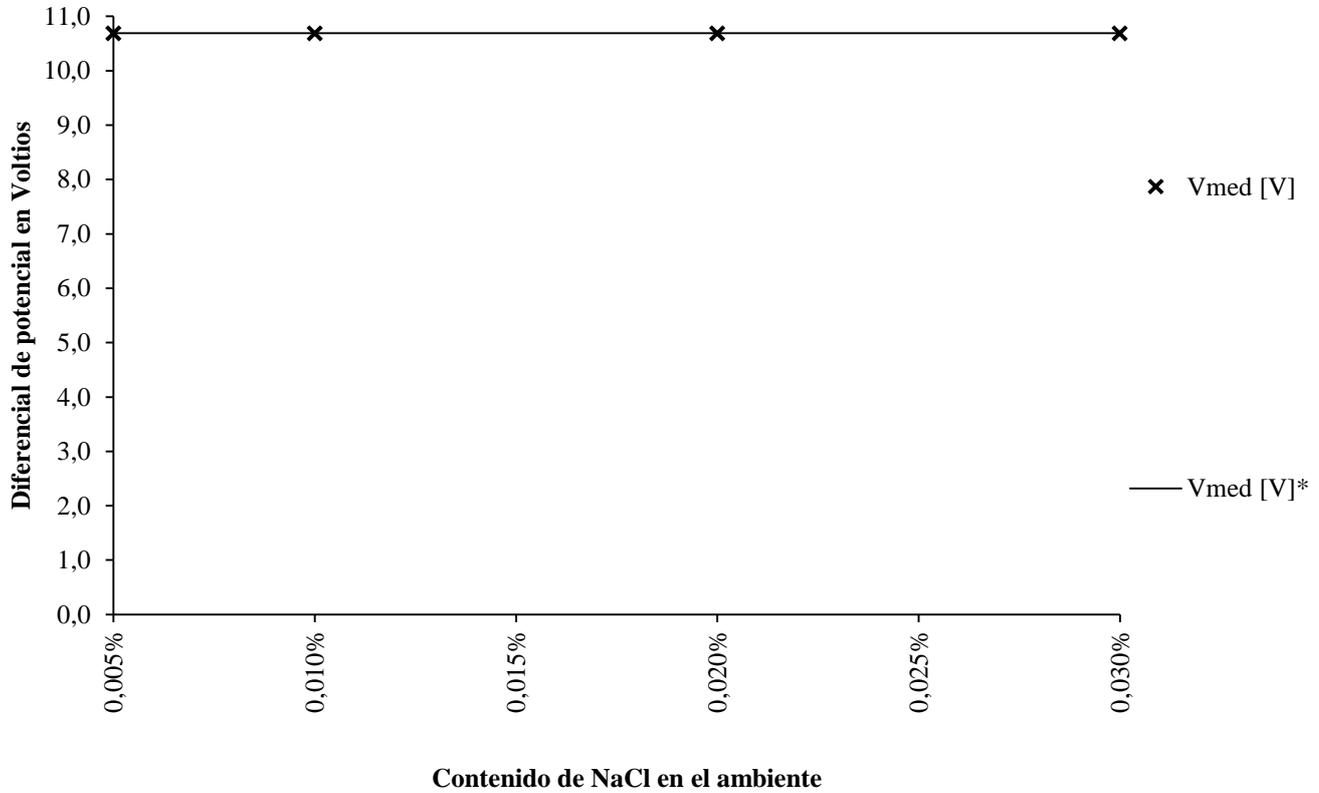


Figura 3.38

El voltaje medio para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $V_{med} = 10,6900$ y $R^2 = 0$, es decir, es constante en **10,69 V**.

VN-T20-C00-SXXX: Resistencia eléctrica

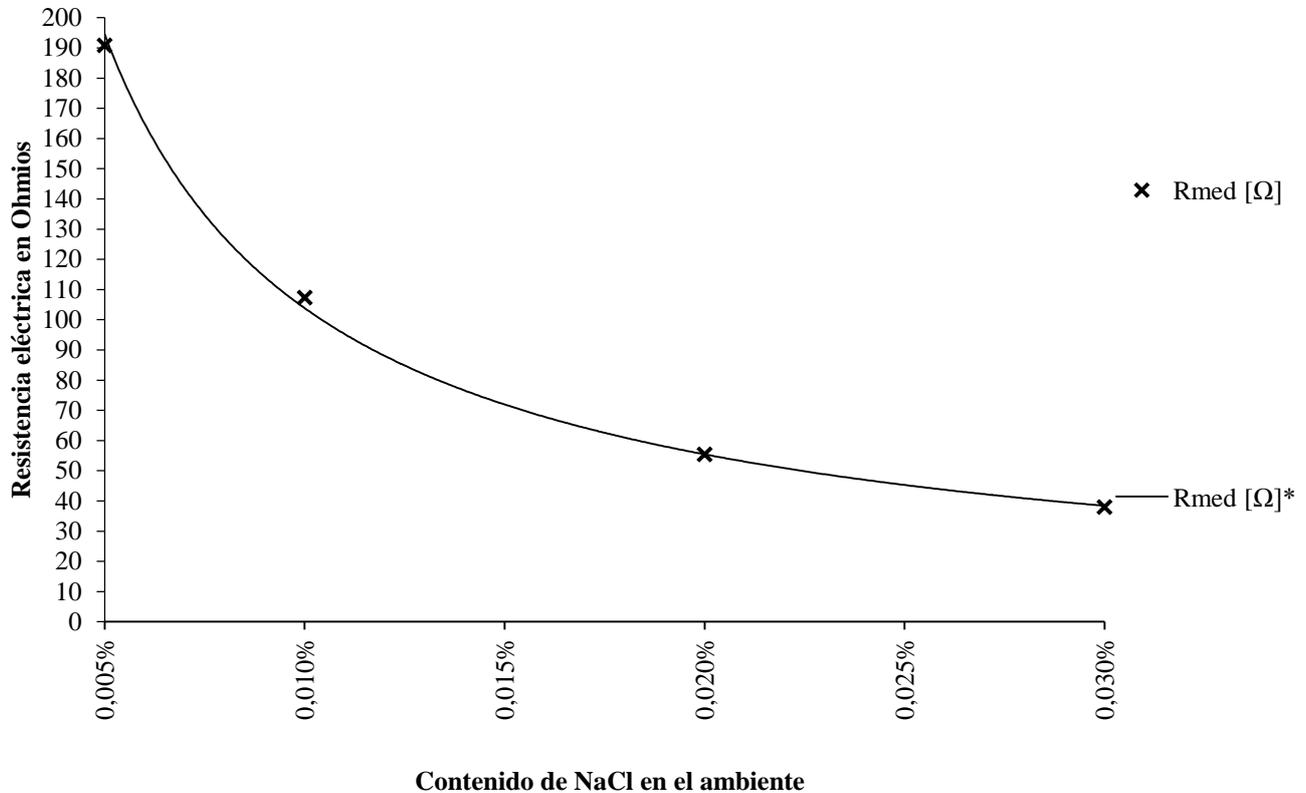


Figura 3.39

La resistencia media para esta serie de ensayos corresponde a la regresión potencial con la ecuación $R_{med} = 0,0248 \cdot S_{\%}^{-0,9054}$ y $R^2 = 0,9990$.

Estos datos siguen presentando los mismos patrones observados en las anteriores series de ensayos sin presencia de hidróxido cálcico. A medida que aumenta el contenido de cloruro sódico también lo hace la conductividad eléctrica y por ello la intensidad media y la potencia media, mientras la resistencia eléctrica baja.

3.2.6.2 Variaciones de masa:

Tabla 3.13: Pesos secos medidos para las probetas de la serie VN-T20-C00-SXXX

NOMBRE	P_{si} [g]	P_{sfc} [g]	P_{sfl} [g]
VN-T20-C00-S005	169,8272	169,8082	169,8024
VN-T20-C00-S010	170,3159	170,2776	170,2681
VN-T20-C00-S020	170,2029	170,1337	170,1270
VN-T20-C00-S030	170,0937	169,9974	169,9855

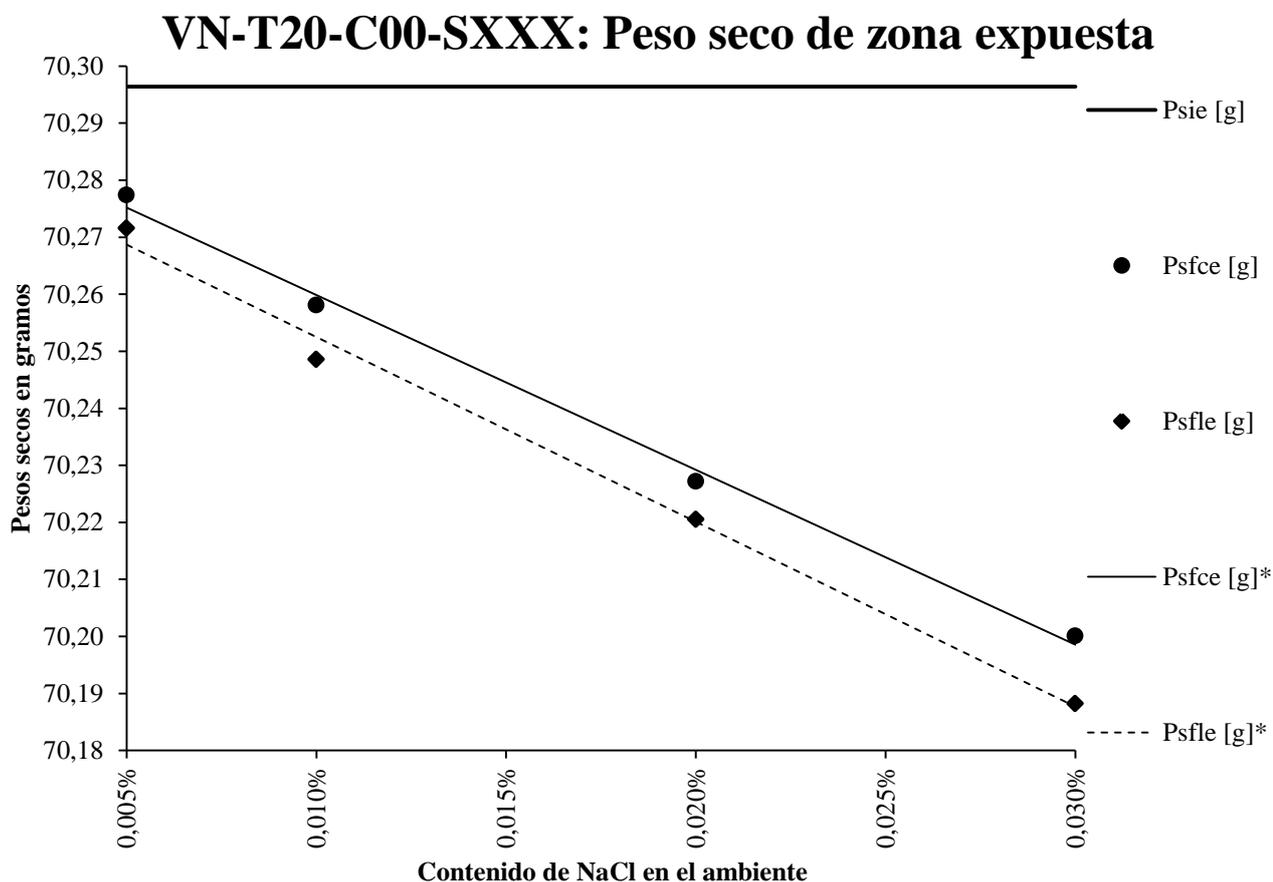


Figura 3.40

El peso seco final corroído expuesto para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFCE} = -306,5763 \cdot S_{\%} + 70,2905$ y $R^2 = 0,9959$.

El peso seco final limpio expuesto para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la ecuación $P_{SFLE} = -323,9661 \cdot S_{\%} + 70,2849$ y $R^2 = 0,9938$.

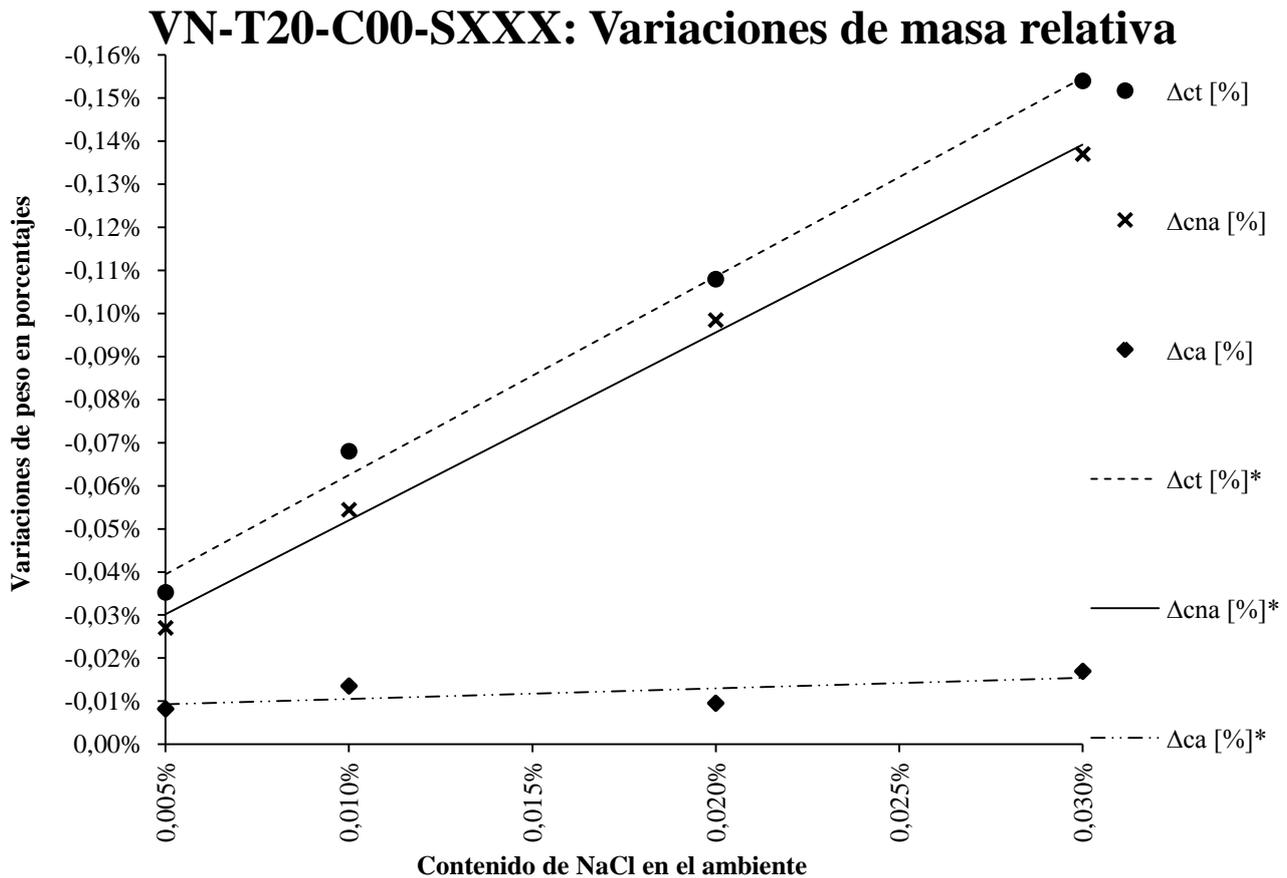


Figura 3.41

La variación por óxidos total para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la siguiente ecuación $\Delta_{CT} = -4,608573 \cdot S_{\%} - 0,000164$ con $R^2 = 0,993830$.

La variación por óxidos no adheridos para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la siguiente ecuación $\Delta_{CNA} = -4,361194 \cdot S_{\%} - 0,000084$ con $R^2 = 0,995858$.

La variación por óxidos adheridos para esta serie de ensayos corresponde a la recta de regresión con la siguiente ecuación $\Delta_{CA} = -0,247379 \cdot S_{\%} - 0,000080$ con $R^2 = 0,482999$.

Se puede deducir que las pérdidas de masa para esta serie de ensayos son representativas del hecho de que todas ellas son directamente proporcionales al contenido de cloruro sódico.

No obstante, el coeficiente de correlación de la variación de masa por óxidos no adheridos es casi uno, mientras que el de la variación por óxidos adheridos es bastante más reducido.

De modo que se puede deducir que, también para esta serie, el indicador de la agresividad del ambiente es la variación de masa por óxidos no adheridos.

3.2.6.3 Fotografías de los ambientes resultantes:

VN-T20-C00-S005 VN-T20-C00-S010 VN-T20-C00-S020 VN-T20-C00-S030

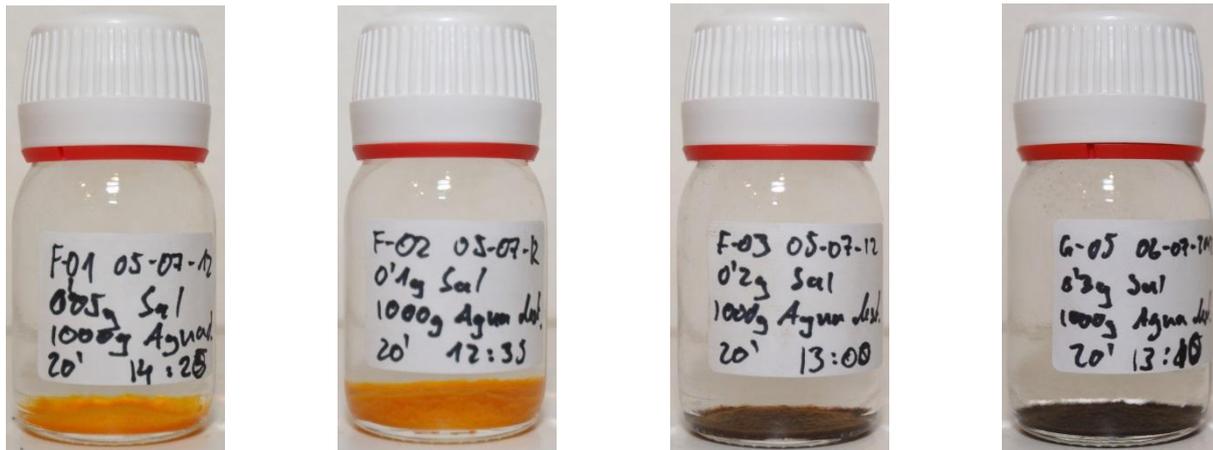


Figura 3.42: Ambientes resultantes de ensayos de la serie VN-T20-C00-SXXX

Las fotografías corroboran notoriamente las conclusiones anteriores para los dos primeros ensayos de esta serie.

Sin embargo, para las otras dos no resulta tan evidente ya que se vuelve a producir el cambio de los óxidos resultantes, lo cual hace difícil comparar sus cantidades.

Debe tenerse en cuenta que, en esta serie de ensayos, el cambio del tipo de óxido se produce a una concentración de cloruro sódico muy inferior a la que hace rendir el circuito en su límite máximo.

3.2.7 VN-T3D-C00-SXXX:

3.2.7.1 Características electroquímicas de los ensayos:

VN-T3D-C00-SXXX: Intensidad de Corriente

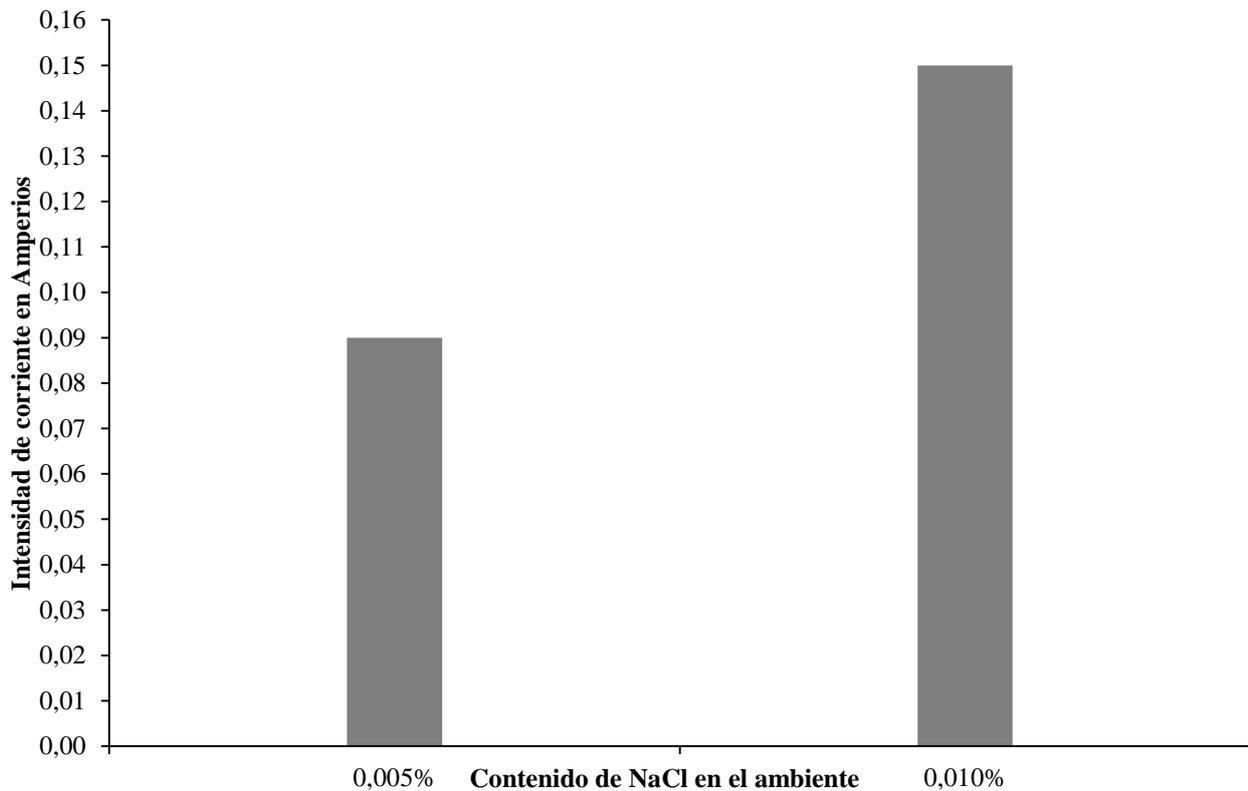


Figura 3.43

La intensidad media para esta serie de ensayos corresponde a la ecuación $I_{med} = 1200,0000 \cdot S_{\%} + 0,0300$, en esta serie de ensayos no se ha calculado el coeficiente de correlación porque no se trata de una recta de regresión, dado solo disponemos de dos valores experimentales.

VN-T3D-C00-SXXX: Potencia eléctrica

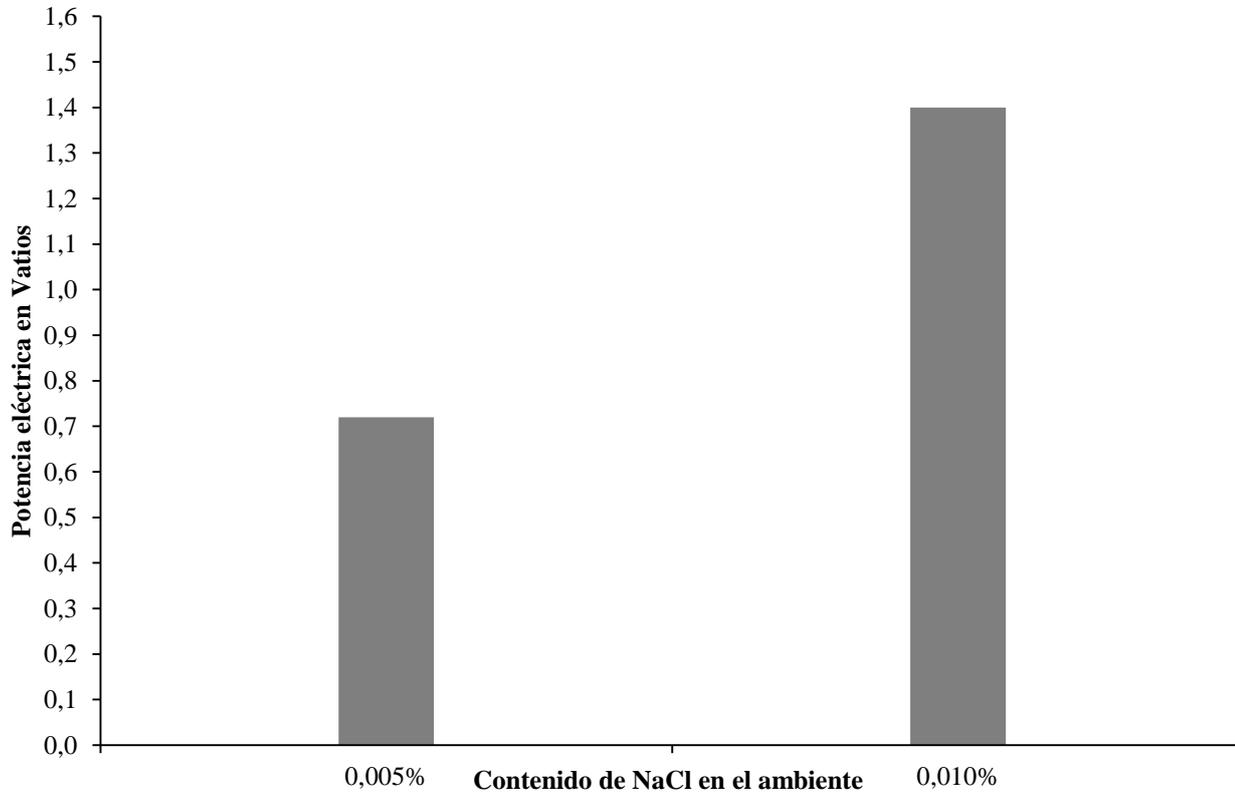


Figura 3.44

La potencia media para esta serie de ensayos corresponde a la ecuación $P_{med} = 13600,0000 \cdot S_{\%} + 0,0400$, tampoco se ha calculado el coeficiente de correlación por el mismo motivo.

VN-T3D-C00-SXXX: Diferencial de potencial

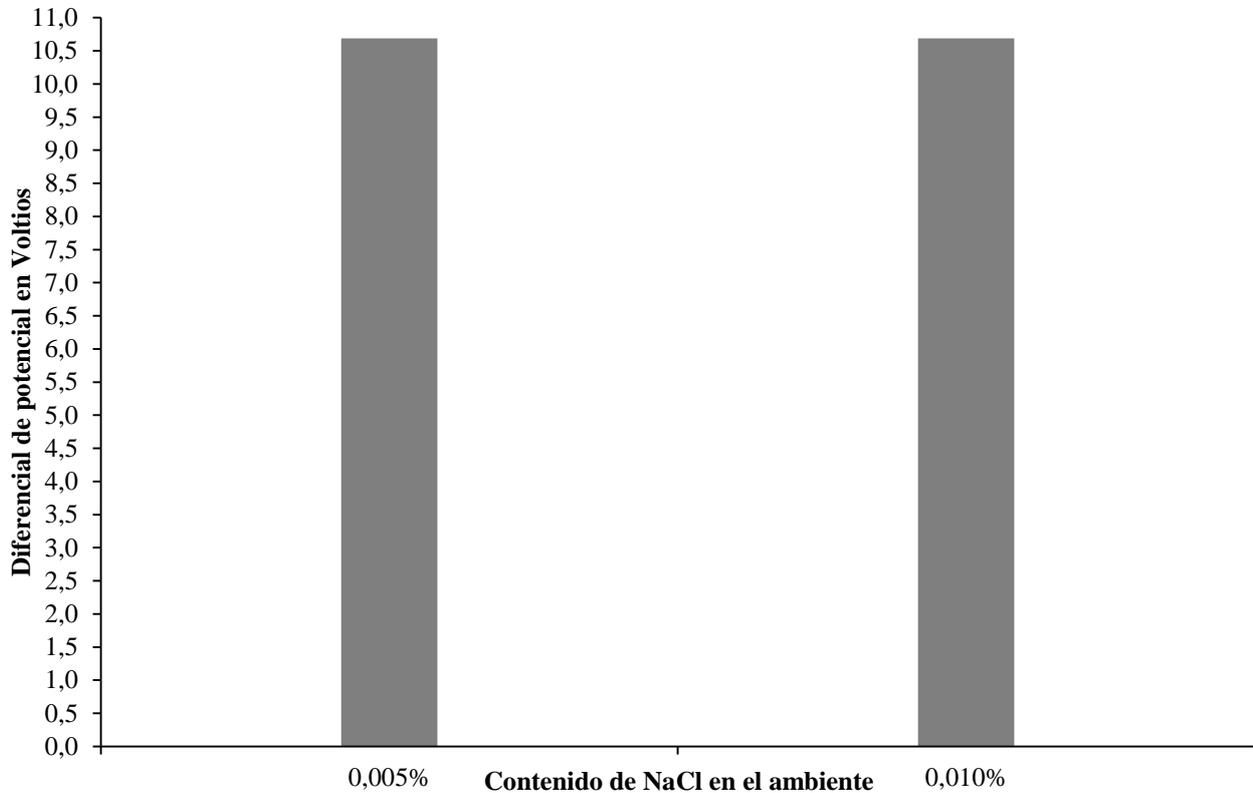


Figura 3.45

El voltaje medio para esta serie de ensayos corresponde a la ecuación $V_{med} = 10,6900$, tampoco se ha calculado el coeficiente de correlación por el mismo motivo.

VN-T3D-C00-SXXX: Resistencia eléctrica

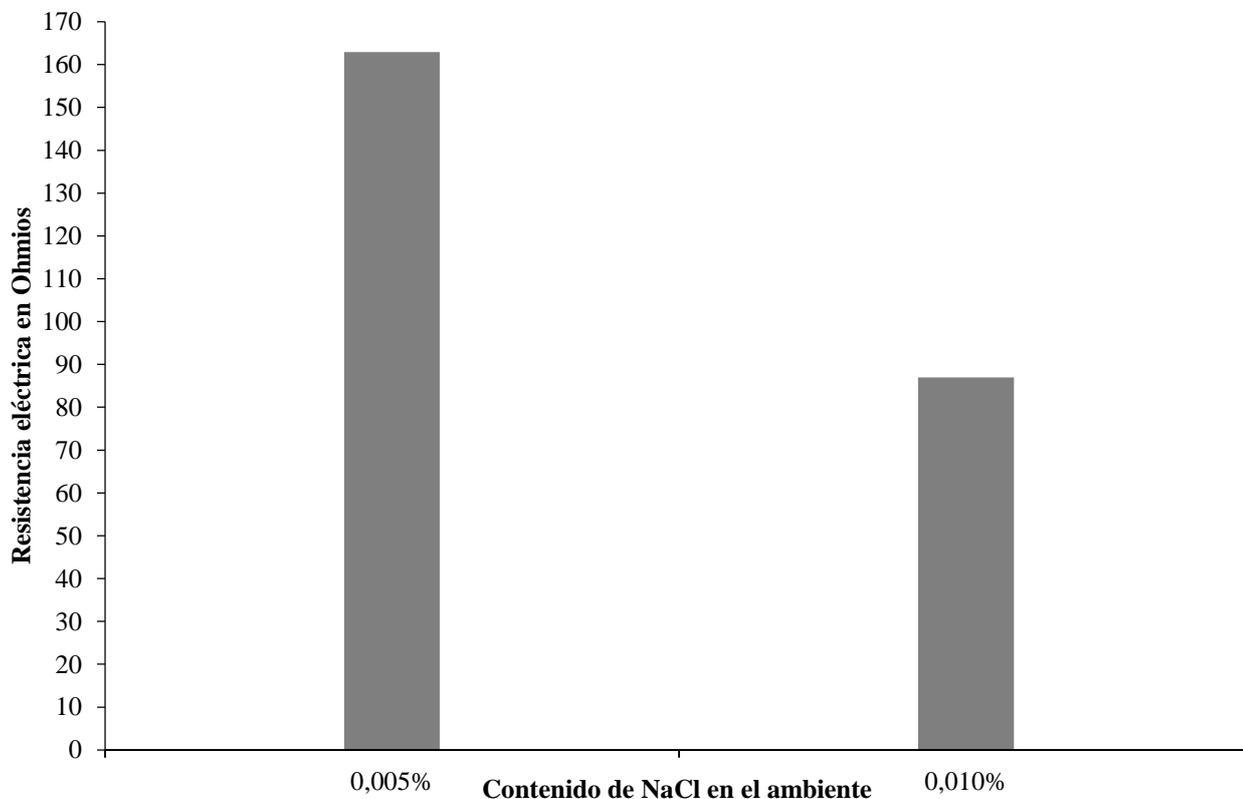


Figura 3.46

La resistencia media para esta serie de ensayos corresponde a la ecuación $R_{med} = 0,0206 \cdot S_{\%}^{-0,9063}$, tampoco se ha calculado el coeficiente de correlación por el mismo motivo.

Aunque la cantidad de datos en esta serie de ensayos es demasiado pequeña para ser analizada aisladamente, si se pueden confirmar las observaciones de las series anteriores. Se cumple la proporcionalidad entre la concentración de cloruro sódico, la conductividad y por ello la intensidad media y la potencia media.

3.2.7.2 Variaciones de masa:

Tabla 3.14: Pesos secos medidos para las probetas de la serie VN-T3D-C00-SXXX

NOMBRE	P_{si} [g]	P_{sfc} [g]	P_{sfl} [g]
VN-T3D-C00-S005	169,7399	165,0108	164,9593
VN-T3D-C00-S010	170,0809	161,8770	161,7125

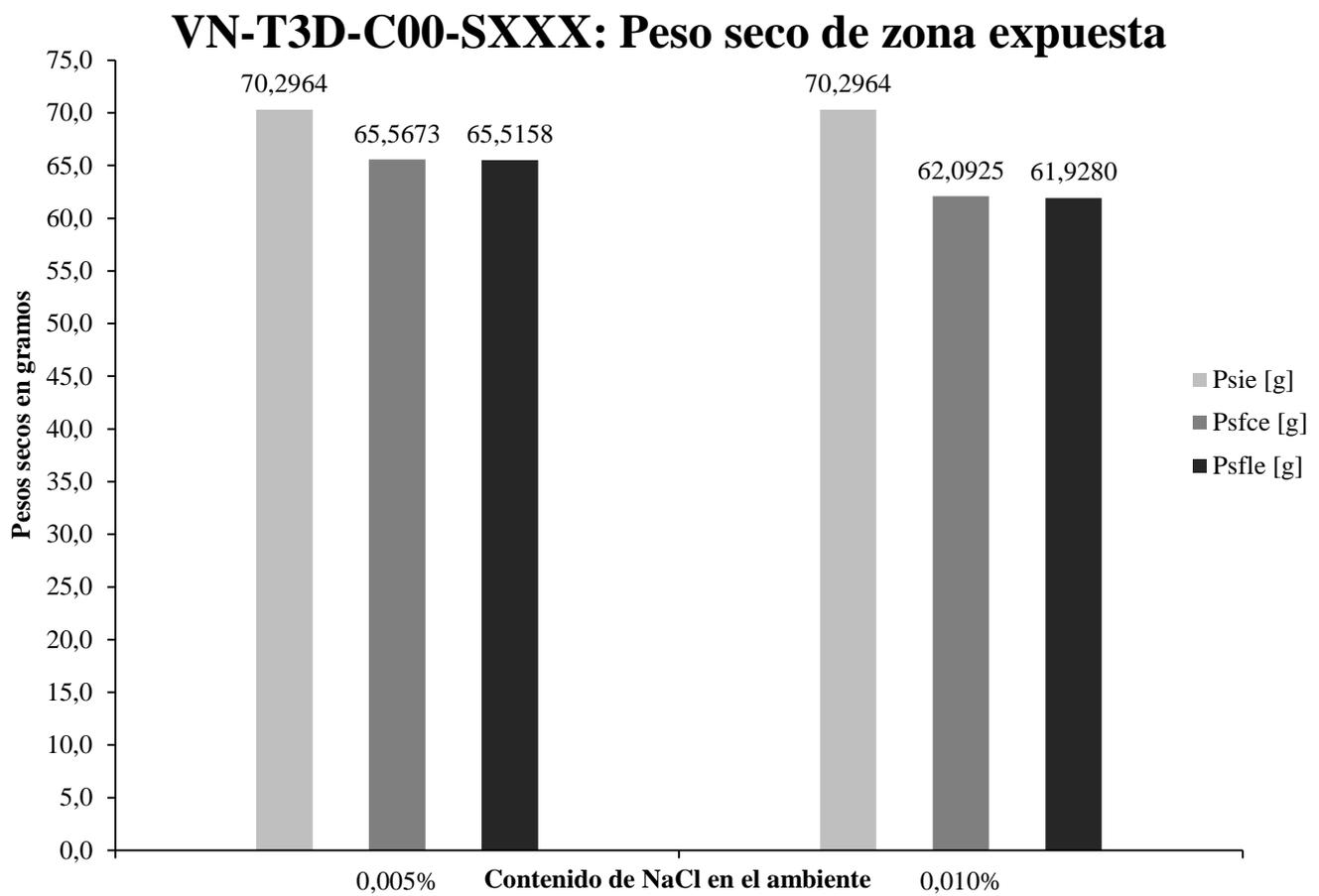


Figura 3.47

El peso seco final corroído expuesto para esta serie de ensayos corresponde a la ecuación $P_{SFCE} = -69496,0000 \cdot S_{\%} + 69,0421$, tampoco se ha calculado el coeficiente de correlación por el mismo motivo dado en el apartado sobre las características electroquímicas.

El peso seco final limpio expuesto para esta serie de ensayos corresponde a la ecuación $P_{SFLE} = -71756,0000 \cdot S_{\%} + 69,1036$, tampoco se ha calculado el coeficiente de correlación por el mismo motivo.

VN-T3D-C00-SXXX: Variaciones de masa relativa

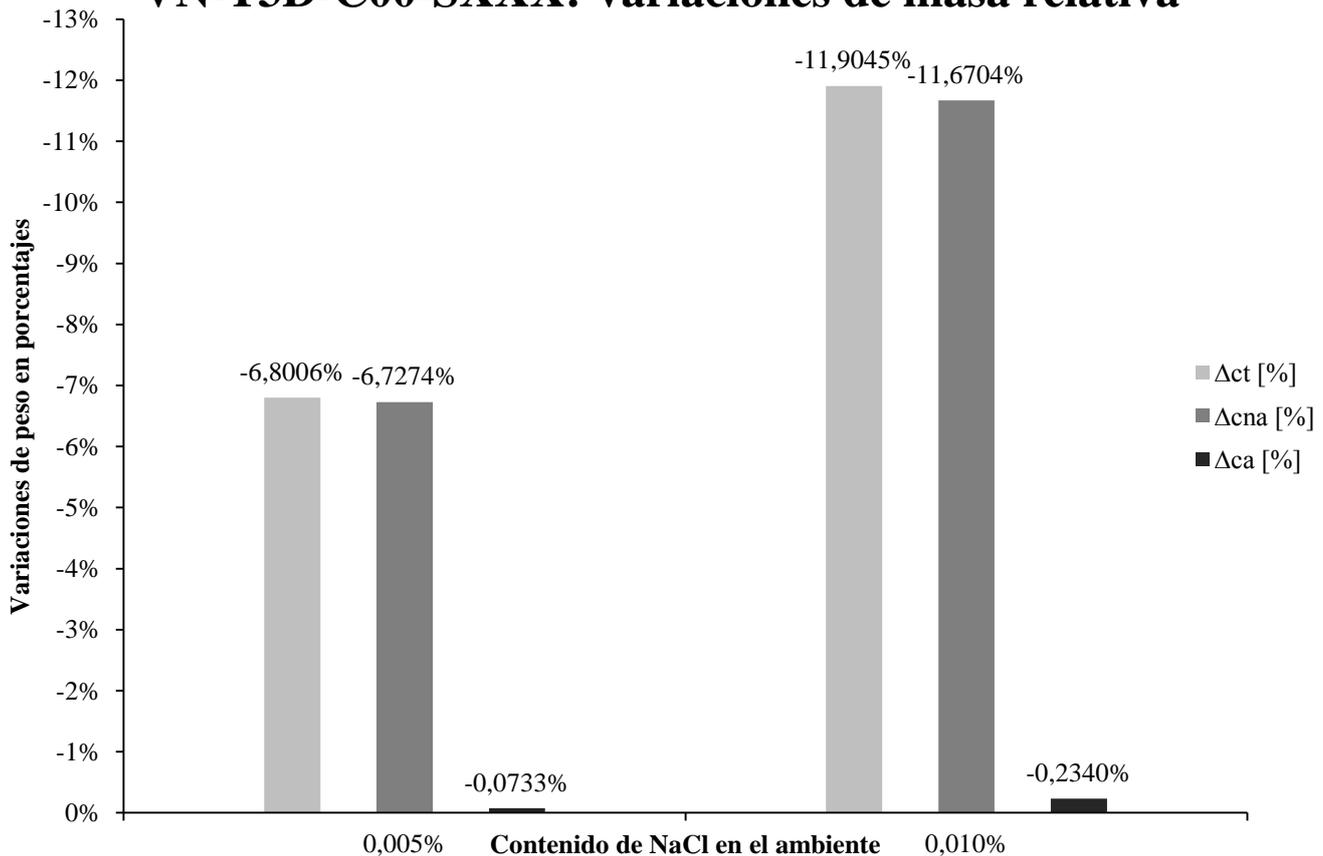


Figura 3.48

La variación por óxidos total para esta serie de ensayos corresponde a la ecuación $\Delta_{CT} = -1020,763510 \cdot S_{\%} - 0,016968$, tampoco se ha calculado el coeficiente de correlación por el mismo motivo.

La variación por óxidos no adheridos para esta serie de ensayos corresponde a la ecuación $\Delta_{CNA} = -988,613926 \cdot S_{\%} - 0,017843$, tampoco se ha calculado el coeficiente de correlación por el mismo motivo.

La variación por óxidos adheridos para esta serie de ensayos corresponde a la ecuación $\Delta_{CA} = -32,149584 \cdot S_{\%} + 0,000875$, tampoco se ha calculado el coeficiente de correlación por el mismo motivo.

De la misma manera que ocurría con las características electroquímicas de esta serie, escasa cantidad de datos de los que se dispone no se prestan a sacar conclusiones de forma aislada sobre esta serie. Sin embargo, comparando con las demás series, en esta hallamos la confirmación de tres supuestos clave.

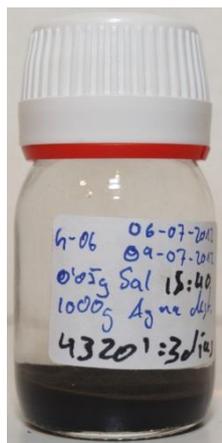
En primer lugar, dado que en esta serie ha aumentado el orden de las variaciones relativas de masa por óxidos no adheridos de entre 0% y 0,2% para las otras series hasta entre 6,7% y 11,7% en esta, se tiene una confirmación de que el tiempo es un factor muy influyente en la corrosión.

Por otra parte, observando que la variación de masa por óxidos adheridos no se incrementa notoriamente con respecto a las demás series de ensayos, se puede confirmar la suposición de atribuirla al tiempo y las condiciones de secado y por tanto poco representativas de las condiciones de ensayo.

Por último hay que destacar que en esta serie de ensayos la diferencia de corrosión producida para diferentes concentraciones de cloruro sódico es tan grande que se puede desestimar totalmente la posibilidad de que se trate de un error de medición, confirmando así las tendencias observadas anteriormente.

3.2.7.3 Fotografías de los ambientes resultantes:

VN-T3D-C00-S005



VN-T3D-C00-S010

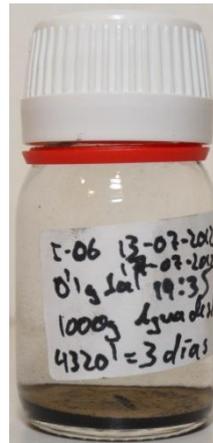


Figura 3.49: Ambientes resultantes de ensayos de la serie VN-T3D-C00-SXXX

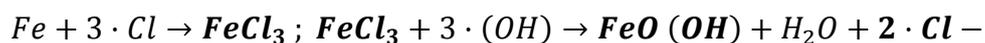
Las fotografías de los ambientes de estas series de ensayo permiten concluir que para prácticamente cualquier concentración de cloruro sódico se puede

provocar la transformación de los óxidos anaranjados a los óxidos negros, observado en las anteriores series, siempre que dispongan de tiempo suficiente.

3.3 Resumen de resultados de ensayos de corrosión forzada:

La primera observación que se puede hacer es que, analizando las series de ensayo (VN-T10-C05-SXXX y VN-T10-C10-SXXX), el papel protector del hidróxido cálcico en la corrosión es relativo. Cuando existen iones Cl^- se produce corrosión incluso si se adiciona hidróxido cálcico. Sin embargo, en las disoluciones que no contienen Cl^- , a pesar de que circula corriente no se aprecia corrosión en presencia de iones HO^- .

Los aniones HO^- podrían reaccionar con el cloruro de hierro formado en presencia de cloruro sódico, produciendo oxi-hidróxido de hierro (III) y liberando los aniones de cloruro. El cloruro actúa como catalizador del proceso, pues facilita la formación de un compuesto intermedio estable $[\text{FeCl}_n]^{3-n}$ y, finalmente, no se consume en la reacción (catalizador), pues se libera al medio de reacción. Un posible mecanismo de reacción del proceso de corrosión del acero en la celda sería el siguiente:



Por otra parte, en cuanto a la agresividad del ambiente químico, desde el punto de vista cualitativo, el método permite diferenciar distintos ambientes de exposición. Dentro de cada serie de ensayos, el método desarrollado sí que permite un análisis cuantitativo de la degradación de la barra de acero. El método desarrollado es solo sensible a la masa desprendida durante el proceso de corrosión forzada, mientras que en el secado posterior de las probetas no se observaron diferencias representativas.

El factor tiempo demostró ser una variable importante para la corrosión forzada al aplicar la metodología descrita. Incluso, la naturaleza de los óxidos formados fue diferente dentro del mismo ambiente de ensayo. Dado que las condiciones de ensayo son forzadas y por tanto no representan las condiciones reales del acero en un hormigón, es necesario llevar a cabo otros ensayos de corrosión no forzada como se describe en el Capítulo IV.



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN





ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA





CAPÍTULO IV:

RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS ENSAYOS A LARGO PLAZO





CAPÍTULO IV: RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS ENSAYOS A LARGO PLAZO

4.1 Características de los ensayos:

Tabla 4.01: Características y probetas empleadas de ensayos a largo plazo

Ensayo	Probeta	NaCl	Ca(OH) ₂
1 [C0-S000]	C0-S000-1	0,000%	0,000%
	C0-S000-2		
2 [C0-S005]	C0-S005-1	0,005%	0,000%
	C0-S005-2		
3 [C0-S070]	C0-S070-1	0,070%	0,000%
	C0-S070-2		
4 [C0-S100]	C0-S100-1	0,100%	0,000%
	C0-S100-2		
5 [C1-S000]	C1-S000-1	0,000%	0,100%
	C1-S000-2		
6 [C1-S005]	C1-S005-1	0,005%	0,100%
	C1-S005-2		
7 [C1-S070]	C1-S070-1	0,070%	0,100%
	C1-S070-2		
8 [C1-S100]	C1-S100-1	0,100%	0,100%
	C1-S100-2		
9 [GRIFO]	GRIFO-1	Agua de grifo	
	GRIFO-2		
10 [MARCALA]	MARCALA-1	Agua de mar de Calabardina	
	MARCALA-2		
11 [MARMENOR]	MARMENOR-1	Agua de mar del Mar Menor	
	MARMENOR-2		

Como puede apreciarse en la Tabla 4.01, se ha reducido el número de ensayos a largo plazo con respecto a los ensayos de corrosión forzada. Las concentraciones seleccionadas son, por un lado un blanco con un ambiente exclusivamente formado por agua destilada y otro con hidróxido cálcico (0,1%) pero sin cloruro sódico. Estos dos blancos servirán de referencia para estudiar los efectos de los demás ambientes.

Como se aprecia en la tabla, se ha optado por establecer 3 parejas correspondientes a los blancos, es decir, siempre uno sin hidróxido cálcico y el otro con la misma concentración que el blanco. Se han seleccionado estas concentraciones de cloruro sódico por ser las más representativas de las series de ensayo de corrosión forzada estudiadas en el capítulo anterior. La elección de ambientes naturales, tales como agua de red, agua marina procedente de Calabardina (Águilas) y del Mar Menor (La Manga), se considera de interés al proporcionar ambientes reales de exposición de las armaduras.



4.2 Variación de masa:

Tabla 4.02: Pesos secos individuales de probetas en ensayos a largo plazo

Probeta	P_{lpsi} [mg]	P_{lpsfc} [mg]	P_{lpsfl} [mg]
CO-S000-1	2409,210	2406,401	2400,008
CO-S000-2	3351,468	3347,453	3340,603
CO-S005-1	2809,392	2806,095	2799,345
CO-S005-2	3083,304	3078,157	3071,692
CO-S070-1	2907,262	2888,852	2882,460
CO-S070-2	2989,534	2977,202	2970,424
CO-S100-1	2754,433	2738,722	2732,423
CO-S100-2	3080,571	3064,104	3057,948
C1-S000-1	2493,842	2499,058	2487,071
C1-S000-2	3333,827	3341,847	3326,680
C1-S005-1	2565,461	2573,221	2559,028
C1-S005-2	3227,029	3231,520	3220,914
C1-S070-1	2088,386	2095,049	2083,256
C1-S070-2	3823,608	3828,251	3815,791
C1-S100-1	2383,702	2388,423	2377,886
C1-S100-2	3431,452	3438,267	3425,687
GRIFO-1	2212,428	2198,138	2195,520
GRIFO-2	3824,269	3804,511	3801,447
MARCALA-1	2948,989	2932,301	2929,218
MARCALA-2	2950,462	2938,221	2934,809
MARMENOR-1	2743,556	2728,195	2725,300
MARMENOR-2	3162,329	3146,928	3143,503

Para minimizar el error relativo, se usó siempre la suma de ambos pesos de cada pareja de probetas ensayadas en el mismo ambiente, que se exponen a continuación.

Tabla 4.03: Pesos secos de parejas de probetas en ensayos a largo plazo

Ensayo	P_{ipsi} [mg]	P_{ipsfc} [mg]	P_{ipsfl} [mg]
1 [CO-S000]	5760,678	5753,854	5740,611
2 [CO-S005]	5892,696	5884,252	5871,037
3 [CO-S070]	5896,796	5866,054	5852,884
4 [CO-S100]	5835,004	5802,826	5790,371
5 [C1-S000]	5827,669	5840,905	5813,751
6 [C1-S005]	5792,490	5804,741	5779,942
7 [C1-S070]	5911,994	5923,300	5899,047
8 [C1-S100]	5815,154	5826,690	5803,573
9 [GRIFO]	6036,697	6002,649	5996,967
10 [MARCALA]	5899,451	5870,522	5864,027
11 [MARMENOR]	5905,885	5875,123	5868,803

Aunque de esta forma los datos ofrecen una mayor fiabilidad, observando la Tabla 4.03, resulta evidente que la diferencia entre los pesos secos iniciales para cada ensayo sigue siendo notoria.

Para una mejor visualización se exponen, a continuación, gráficamente los pesos secos iniciales, finales corroídos y finales limpios.

Pesos secos de ensayos a largo plazo

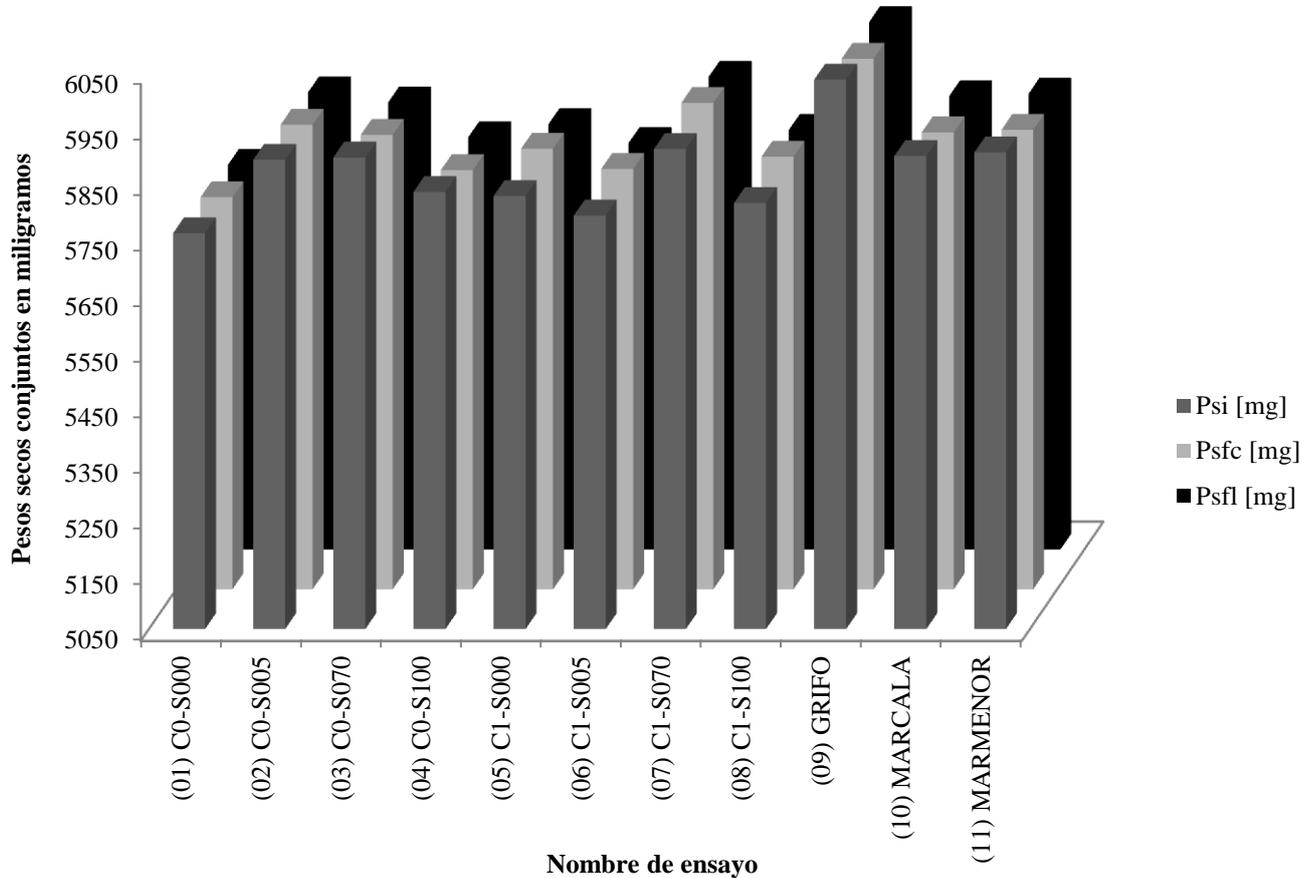


Figura 4.1

Puede apreciarse con facilidad en la Figura 4.1, los pesos secos iniciales de las parejas de probetas (primera fila de columnas), que para una óptima comparabilidad de los resultados deberían ser idénticos, distan mucho de serlo.

Por ello se aplica, a cada probeta individualmente, el coeficiente de corrección por superficie de exposición (C_{CSE}), cuyo cálculo queda desarrollado en el Capítulo II, sobre materiales y métodos.



Tabla 4.04: Alturas, superficies expuestas y coeficientes de corrección por superficie de exposición de las probetas para ensayos a largo plazo

Probeta	h [mm]	S_E [mm²]	C_{CSSE} [adimensional]
CO-S000-1	2,7418	329,5571	1,0685
CO-S000-2	3,8141	369,9828	0,9517
CO-S005-1	3,1972	346,7261	1,0156
CO-S005-2	3,5089	358,4778	0,9823
CO-S070-1	3,3086	350,9250	1,0034
CO-S070-2	3,4022	354,4548	0,9934
CO-S100-1	3,1347	344,3682	1,0225
CO-S100-2	3,5058	358,3605	0,9826
C1-S000-1	2,8381	333,1881	1,0568
C1-S000-2	3,7940	369,2260	0,9537
C1-S005-1	2,9196	336,2607	1,0472
C1-S005-2	3,6725	364,6440	0,9657
C1-S070-1	2,3767	315,7928	1,1150
C1-S070-2	4,3514	390,2391	0,9023
C1-S100-1	2,7127	328,4627	1,0720
C1-S100-2	3,9051	373,4144	0,9430
GRIFO-1	2,5178	321,1145	1,0966
GRIFO-2	4,3522	390,2674	0,9023
MARCALA-1	3,3561	352,7153	0,9983
MARCALA-2	3,3577	352,7784	0,9981
MARMENOR-1	3,1223	343,9016	1,0239
MARMENOR-2	3,5989	361,8682	0,9731
PROMEDIO		352,1239	

También hay que atender que, tal como ya se explicó en el Capítulo II, se usará el promedio de los pesos secos iniciales de todas las probetas para ensayos a largo



plazo como base para calcular sus respectivas variaciones de masa relativas. De modo que las variaciones de masa individuales para cada probeta con las siguientes.

Tabla 4.05: Variaciones de masa registradas en ensayos a largo plazo con ambientes químicos elaborados exclusivamente con cloruro sódico

Probeta	P_{lpcna} [mg]	P_{lpc} [mg]	P_{lpct} [mg]	Δ_{lpcna} [%]	Δ_{lpc} [%]	Δ_{lpct} [%]
CO-S000-1	-3,001	-6,831	-9,832	-0,102%	-0,233%	-0,335%
CO-S000-2	-3,821	-6,519	-10,341	-0,130%	-0,222%	-0,352%
CO-S005-1	-3,348	-6,855	-10,203	-0,114%	-0,234%	-0,348%
CO-S005-2	-5,056	-6,350	-11,406	-0,172%	-0,216%	-0,389%
CO-S070-1	-18,473	-6,414	-24,887	-0,629%	-0,219%	-0,848%
CO-S070-2	-12,251	-6,733	-18,984	-0,417%	-0,229%	-0,647%
CO-S100-1	-16,065	-6,441	-22,506	-0,547%	-0,219%	-0,767%
CO-S100-2	-16,180	-6,049	-22,229	-0,551%	-0,206%	-0,757%

Como puede apreciarse en la tabla anterior, las pérdidas de masas de probetas diferentes en el mismo ambiente son bastante parecidas, tanto en valor real como relativo. Además se observa que hay un aumento significativo de pérdida de masa por óxidos no adheridos conforme aumenta el contenido de cloruro sódico en el ambiente.

No obstante, la pérdida de masa por óxidos adheridos se mantiene prácticamente constante, aunque realmente disminuye ligeramente conforme aumenta la concentración de cloruro sódico. Destaca que en los ensayos a bajas concentraciones de cloruro sódico la variación por óxidos no adheridos representa solo la mitad del valor de la pérdida por óxidos adheridos, mientras que para las concentraciones más altas este ratio se invierte.

Respecto a la pérdida de masa total, obtenida tras secar y eliminar los restos de corrosión, se observa un claro aumento de la cantidad de óxido desprendido de la probeta. A partir de una concentración de cloruro igual o superior a 0,07% no se observan variaciones significativas.



Tabla 4.06: Variaciones de masa registradas en ensayos a largo plazo con ambientes químicos elaborados con hidróxido cálcico y cloruro sódico

Probeta	P_{lpcna} [mg]	P_{lpca} [mg]	P_{lpct} [mg]	Δ_{lpcna} [%]	Δ_{lpca} [%]	Δ_{lpct} [%]
C1-S000-1	5,512	-12,668	-7,156	0,188%	-0,432%	-0,244%
C1-S000-2	7,649	-14,464	-6,816	0,261%	-0,493%	-0,232%
C1-S005-1	8,126	-14,863	-6,736	0,277%	-0,506%	-0,230%
C1-S005-2	4,337	-10,242	-5,905	0,148%	-0,349%	-0,201%
C1-S070-1	7,430	-13,150	-5,720	0,253%	-0,448%	-0,195%
C1-S070-2	4,190	-11,243	-7,054	0,143%	-0,383%	-0,240%
C1-S100-1	5,061	-11,296	-6,235	0,172%	-0,385%	-0,212%
C1-S100-2	6,426	-11,863	-5,436	0,219%	-0,404%	-0,185%

La primera observación es que, al contrario que en casi todos los ensayos, tanto a largo plazo, como de corrosión forzada, las variaciones por óxido no adheridos que se han registrado para estos ensayos son positivas, es decir, se ha producido un aumento de masa y no una pérdida. Este aumento de masa es casi constante, aunque decae ligeramente a mayor concentración de cloruro sódico. La diferencia observada entre probetas en ambientes salinos con y sin hidróxido cálcico, pudo apreciarse a simple vista en el examen visual de las probetas mostrado en la Figura 4.3.

Es también notorio que la pérdida de masa total mostrada en la Tabla 4.06, indica que la cal ejerce un papel protector en las probetas. Al comparar con los resultados anteriores de la Tabla 4.05, la pérdida de masa de las probetas es en este último caso hasta cuatro veces mayor que en la serie analizada.

Tabla 4.07: Variaciones de masa registradas en ensayos a largo plazo con ambientes químicos naturales



Probeta	P_{Ipcna} [mg]	P_{Izca} [mg]	P_{Ipcet} [mg]	$\Delta Ipcna$ [%]	$\Delta Izca$ [%]	$\Delta Ipcet$ [%]
GRIFO-1	-15,670	-2,871	-18,541	-0,534%	-0,098%	-0,632%
GRIFO-2	-17,827	-2,765	-20,591	-0,607%	-0,094%	-0,702%
MARCALA-1	-16,660	-3,078	-19,738	-0,568%	-0,105%	-0,672%
MARCALA-2	-12,218	-3,406	-15,624	-0,416%	-0,116%	-0,532%
MARMENOR-1	-15,728	-2,964	-18,692	-0,536%	-0,101%	-0,637%
MARMENOR-2	-14,986	-3,333	-18,319	-0,511%	-0,114%	-0,624%

En estas probetas no hay una variable definida, de modo que no es posible comentar el comportamiento corrosivo frente a una variable concreta. No obstante, cabe destacar que, tal como se esperaba, en los dos ambientes marinos se ha registrado una gran pérdida de masa en las probetas. Sin embargo, resulta llamativo el hecho de que el agua de red sea igual de corrosiva para el acero corrugado.

Sin embargo, las pérdidas de masa durante el secado (P_{Izca}) son sorprendentemente pequeñas, representado en la mayoría de los casos entre el 20% y el 25% de las pérdidas por óxidos no adheridos (P_{Ipcna}). La pérdida de masa total en ambientes marinos o de agua de red es similar a la observada para concentraciones de cloruro sódico del orden del 0,07%.

Examinando las pérdidas de masa para todos los ensayos a largo plazo [Tabla 4.05, Tabla 4.06, Tabla 4.07], se observa que el ambiente más agresivo, en cuanto a su capacidad de corroer el acero es el agua de red, tomando como indicador la variación de masa por óxidos no adheridos. Tomando como referencia la variación de masa total, lo más agresivo es usar cloruro sódico al 0,1%.

No obstante, deben tratarse los resultados, tal como se explica en el Capítulo II, de forma conjunta para las probetas de un solo ensayo. De modo que a continuación se representarán gráficamente las variaciones de masa relativas, conjuntas para cada ensayo.

Variaciones de masa relativas de ensayos a largo plazo conjuntas

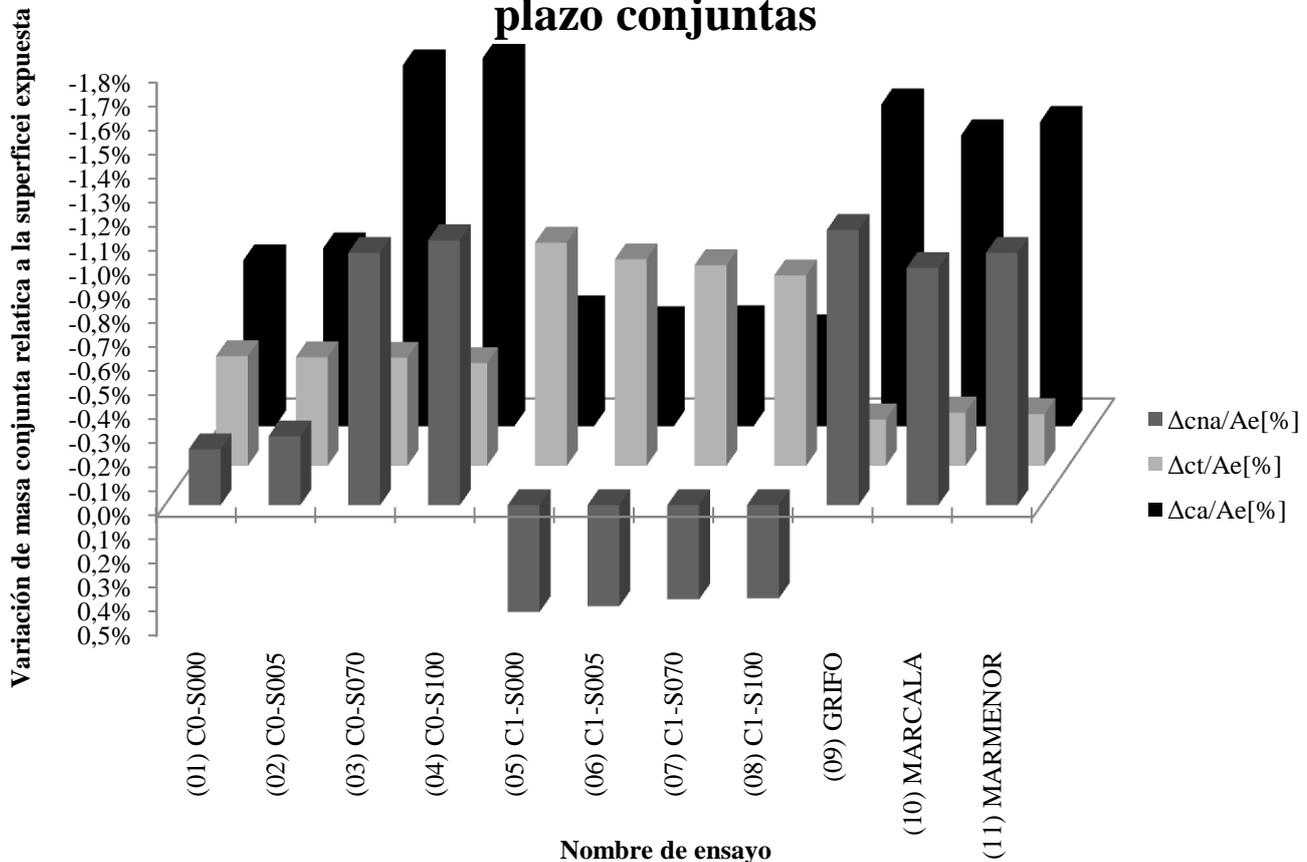


Figura 4.2

En el gráfico se hace evidente lo observado anteriormente en las tablas. Se aprecian con facilidad las tendencias en la variación de masa que han generado los diferentes ambientes.

Por un lado, los ambientes que contienen exclusivamente cloruro sódico en su composición, generan una pérdida de masa por óxidos no adheridos cada vez mayor conforme aumenta la concentración de cloruro sódico. Al contrario que la pérdida de masa, que sufren las probetas en estos ensayos por óxidos adheridos, que se mantiene prácticamente constante.

Viendo el gráfico, se comprueba que la pérdida de masa por óxidos adheridos, atribuida al secado, es, para concentraciones bajas de cloruro sódico, bastante mayor que la producida por óxidos no adheridos. Esto se debe a que el calor que se aplica durante el secado actúa como catalizador de la oxidación, tal como hace en



cualquier reacción química. Por ello, en ambientes formados por las mismas sustancias químicas en diferentes concentraciones, esta pérdida se mantiene constante.

Por otro lado, los ambientes con una concentración constante de hidróxido cálcico y variable de cloruro sódico generan un aumento de masa por óxidos no adheridos y una pérdida más elevada por óxidos adheridos en las probetas que se exponen a ellos.

El aumento de masa por óxidos no adheridos se produce por la reacción química entre el hidróxido cálcico y el hierro, contenido en el acero, formando goethita [oxi-hidróxido de hierro (III)] y/o limonita [oxi-hidróxido de hierro (III) n-hidratado]. Aunque el pH influye de forma decisiva en la protección frente a la corrosión del acero, la deposición superficial de óxidos de hierro aglutinados por una capa superficial de cal, podrían constituir una barrera física eficaz que entorpece el proceso corrosivo. Esta capa de cal, firmemente adherida a la superficie metálica, no es fácilmente eliminada al limpiar la probeta con papel. Posteriormente, durante el secado el recubrimiento de cal se carbonata con el CO_2 atmosférico, lo que produce un aumento de masa de la probeta.

La considerable pérdida de masa por óxidos adheridos es, por tanto, resultado de que durante la limpieza con cepillo se elimina esta capa protectora y no se debe a la eliminación de óxidos de hierro formados durante el secado. Se tiene por tanto una prueba del papel protector que empeña el hidróxido cálcico frente al proceso de la corrosión.

4.3 Documentación fotográfica de los ensayos a largo plazo:

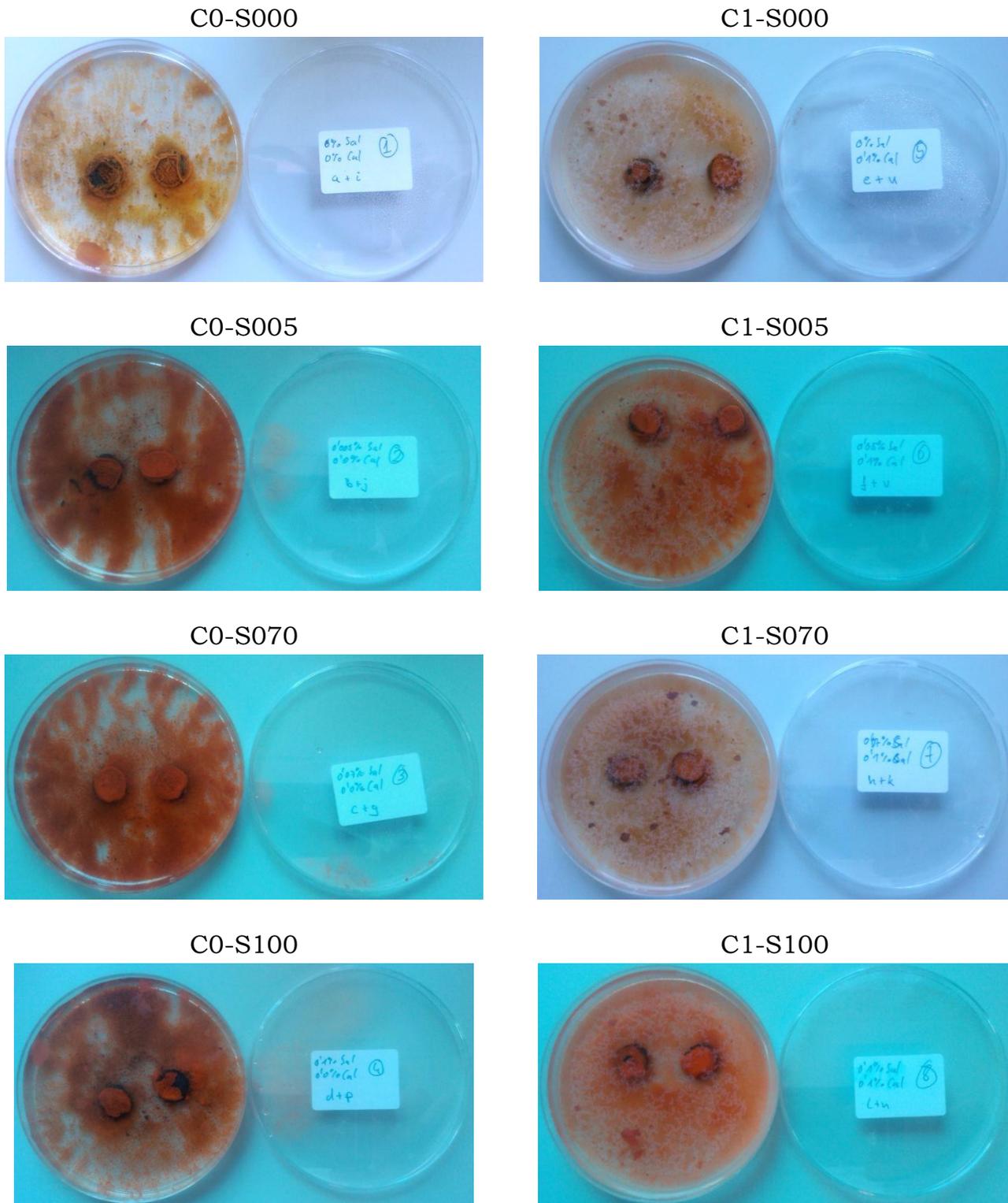
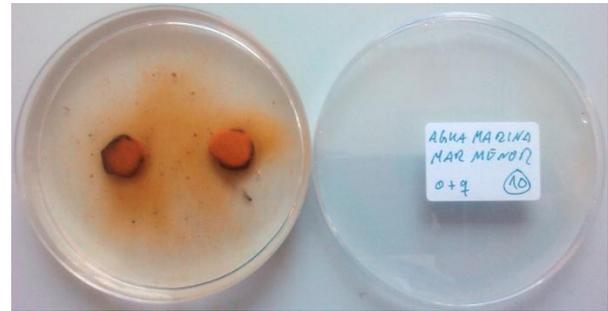


Figura 4.3: Probetas y ambientes resultantes de ensayos a largo plazo con ambientes elaborados

MARCALA



MARMENOR



GRIFO



Figura 4.4: Probetas y ambientes resultantes de ensayos a largo plazo con ambientes naturales

Por un lado, en las fotografías destaca que en ambos blancos [C0-S000 y C1-S000] se aprecian cantidades de óxidos muy pequeñas, aunque en el blanco con hidróxido cálcico se puede distinguir que ha sedimentado cierta cantidad de un residuo en forma de polvo blanco. Se trata de carbonato cálcico [CaCO_3] un compuesto que se forma por la carbonatación de hidróxido cálcico. A simple vista se puede apreciar que la cal tiene un papel protector en la oxidación, pues en las probetas sumergidas en medio alcalino se desprende menos óxido (Figura 4.3).

Por otro lado, dadas las pequeñas cantidades de óxidos formados en todos los ensayos y su distribución no uniforme en los recipientes, en algunos casos, resulta difícil comparar las placas de manera visual. Tampoco resulta esclarecedor comparar su color ya que en los ensayos con hidróxido cálcico, la presencia de carbonato cálcico distorsiona la intensidad y el tono.

Sin embargo hay una observación que destaca mucho en comparación con los ensayos a corrosión forzada. En el capítulo anterior forzando la oxidación con corriente eléctrica, se observaba que a partir de cierta cantidad de cloruro sódico, y/o un tiempo de ensayo suficientemente largo, no podía apreciarse más que la formación de magnetita. No obstante, a pesar de la larga duración de los ensayos y de las altas concentración que se han empleado en alguno, en los ensayos a largo

plazo siempre puede observarse también la formación de óxidos anaranjados, evidentemente distintos a la magnetita negra.

4.4 Características electroquímicas de los ambientes:

Ensayos a largo plazo: Conductividad eléctrica

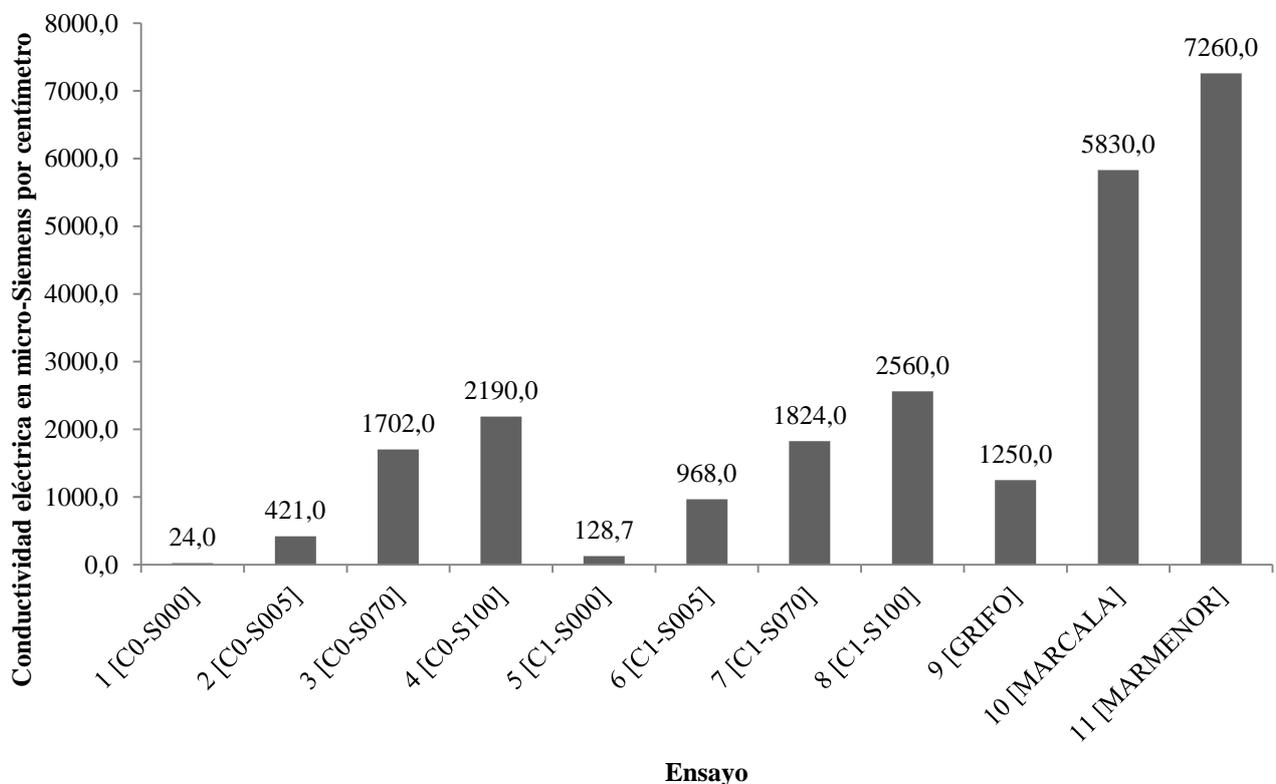


Figura 4.5: Conductividad eléctrica de los ambientes químicos resultantes tras los ensayos a largo plazo.

Todos los ambientes elaborados en laboratorio muestran una razonable y clara relación de proporcionalidad entre la concentración de cloruro sódico y la conductividad eléctrica. También se observa que la presencia de hidróxido cálcico aumenta la conductividad eléctrica, aunque en bastante menor medida que el cloruro sódico. Esto se debe por un lado a que el cloruro sódico es más soluble que el hidróxido cálcico y por otro a que al carbonatarse el hidróxido cálcico disuelto se

transforma en carbonato cálcico en suspensión, dejando de contribuir en la conductividad eléctrica.

No obstante, aunque los ensayos de ambientes elaborados parecen indicar que hay una proporcionalidad entre la conductividad eléctrica y la agresividad del ambiente, el ensayo con agua de red indica que eso no es cierto, pues es fácil distinguir que tiene una conductividad más bien baja, habiendo sido el ambiente más agresivo de todos. Sin embargo, para conductividades del orden de 1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ la capacidad corrosiva de los ambientes salinos alcanza prácticamente un máximo. El agua de grifo, probablemente pone en juego una serie de iones que son eficientes a la hora de oxidar el acero. Además, debemos tener en cuenta que los valores de conductividad son solo orientativos, pues no estamos comparando los mismos iones, con las mismas cargas eléctricas ni las mismas movilidades iónicas.

Ensayos a largo plazo: pH

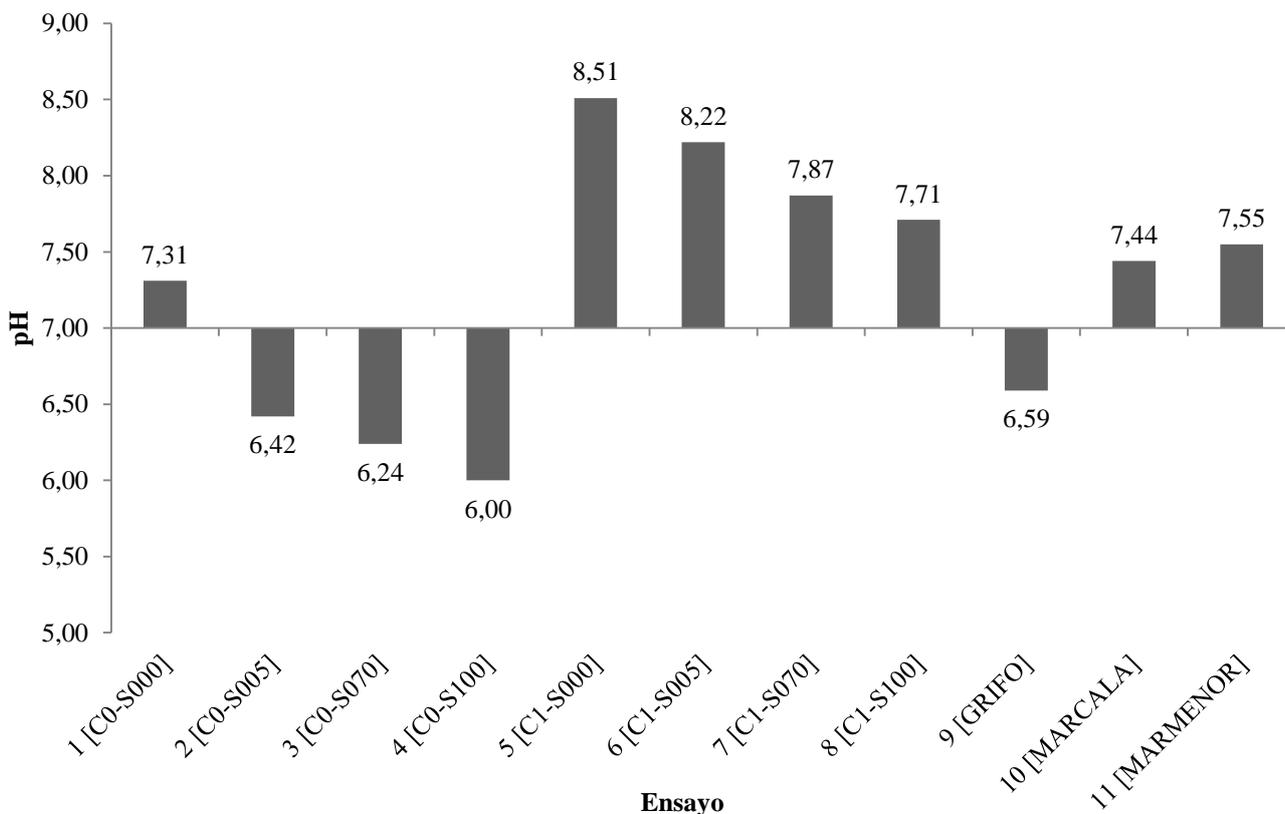


Figura 4.6: pH de los ambientes químicos resultantes tras los ensayos a largo plazo.

Los valores de pH de los ambientes salinos varían de forma irregular porque la sal utilizada es sal de cocina. Se aprecia que la propia sal influye en la disminución del pH y que esta disminución se repite, con la misma pendiente, en las disoluciones de sal con cal al 0,1%. Como se puede ver en la gráfica, el carácter alcalino de la disolución ha disminuido mucho a consecuencia de la carbonatación, por lo cual los valores de pH no son elevados incluso en la serie de cal. En estas probetas, en las que el pH es el más alcalino de todos, se observó también la menor oxidación.

4.5 Resumen de resultados de ensayos a largo plazo:

En los ensayos a largo plazo se observa mucho mejor el papel protector ante la corrosión desempeñado por el hidróxido cálcico. Se puede cuantificar, por la ganancia de masa durante el ensayo y la pérdida tras la limpieza, la capa protectora que forma sobre la superficie de acero.

También se hace evidente la fuerte correlación que hay entre la presencia de cloruro sódico y la corrosión del acero. Se ve claramente que actúa como catalizador de la oxidación, incluso cuando hay un ambiente pasivador con un pH elevado, como el creado por la presencia de hidróxido cálcico

Sin embargo, cabe destacar que esas relaciones quedan alteradas fuertemente cuando hay otros compuestos químicos presentes en el ambiente. Como ejemplo pueden tomarse las muestras de agua marina, cuya concentración de sal ronda en la zona mediterránea el 3,7%. Aun siendo esa concentración muy superior a las concentraciones elaboradas en laboratorio, el agua de mar causa una corrosión ligeramente inferior aunque muy importante.

Para terminar este capítulo hay que destacar que el agua de red, siendo el más usado en la elaboración de hormigón, es la que más corrosión ha provocado en sus probetas. Este hecho es significativo, pues la concentración de sal en agua de red es muy inferior a la del agua de mar.



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN





ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA





CAPÍTULO V:

CONCLUSIONES FINALES



ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA





CAPÍTULO V: CONCLUSIONES FINALES

La corrosión es un proceso complejo que se desarrolla exclusivamente a nivel superficial. Todos los ensayos y resultados obtenidos quedan por tanto sujetos a la extensión de esta superficie.

En los ensayos de corrosión forzada, en presencia de catalizador (cloruro), a mayor intensidad de corriente, mayor fue la pérdida de masa.

Se confirma el papel catalizador del cloruro sódico en la corrosión del acero, tanto para los ensayos de corrosión forzada como a largo plazo.

El aumento de la concentración de cloruro sódico aumenta la corrosión hasta un cierto límite, pues el papel catalizador queda limitado por la superficie metálica expuesta. Asimismo, el proceso corrosivo es dependiente del tiempo para todos los experimentos realizados.

En cuanto a la influencia del hidróxido cálcico en la corrosión, se puede concluir que este desempeña un papel protector. Sin embargo, este efecto se aprecia con mayor claridad en los ensayos a largo plazo, que simulan mejor las condiciones reales de oxidación del acero en el hormigón.

En presencia de cal, las probetas se auto-protegen en cierta forma, por la formación de capas de diferentes óxidos (goethita $[\text{FeO}(\text{OH})]$ o limonita $[\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}]$) alrededor de la superficie del metal. Estas capas protectoras cohesionadas con la cal y el carbonato de calcio formado, no se desprenden con facilidad de la superficie metálica.

La formación de estos óxidos de hierro depende no solo del tipo de ambiente, sino también de la duración del ensayo. En los ensayos de corrosión forzada, exceptuando las disoluciones que contienen cal, a mayor duración del ensayo, se favorece la formación de magnetita.

El agua de red resultó ser bastante corrosiva para el acero corrugado. Este dato debe ser tenido en cuenta en la elaboración de hormigón y productos de cemento armados con acero. Se puede concluir por tanto que, el agua doméstica sin tratar no resulta indicada para tal finalidad.

En los ensayos de corrosión forzada, la cal, en presencia de cloruro, no demuestra ejercer un papel protector del acero pues facilita la transmisión de

corriente eléctrica en la celda. Esta limitación no se observa en los ensayos a largo plazo en los que la corrosión se produce de manera natural.

Con los ensayos de corrosión forzada se puede demostrar la influencia de agentes catalizadores de la corrosión como el cloruro. Otra ventaja del diseño experimental, es que puede servir como modelo didáctico para entender la variedad de óxidos de hierro que pueden formarse dependiendo del tipo de ambiente y tiempo de ensayo.

Un porcentaje residual de la corrosión se produjo durante el secado de las probetas, tanto en los ensayos de corrosión forzada como en los ensayos a largo plazo. Este efecto fue más notorio en ambientes poco agresivos, probablemente porque el metal dispone aún de superficie activa para oxidarse con el O₂ ambiental y la temperatura de secado (60°C). De hecho, en algunos casos la corrosión por secado fue más importante que la experimentada durante el propio ensayo.



ANEXO I:

GLOSARIO QUÍMICO Y FÍSICO



ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA





ANEXO I: GLOSARIO QUÍMICO Y FÍSICO

Agua destilada:

- **Fórmula molecular:** H_2O
- **Fórmula semidesarrollada:** H-O-H
- **Nombres alternativos:** Monóxido de hidrógeno
- **Datos adicionales:**

Es una sustancia cuyas moléculas están formadas por dos átomos de sodio y uno oxígeno.

Su pH neutro es 7 y no es ni ácido ni alcalino en estado puro.

Es el disolvente idóneo para la creación de los ambientes químicos empleados en los ensayos, porque no tiene tendencia a reaccionar fácilmente con otros compuestos químicos.

Cloruro sódico:

- **Fórmula molecular:** NaCl
- **Nombres alternativos:** Sal común
- **Datos adicionales:**

Es un compuesto iónico, que forma estructuras cristalinas cúbica cuando no está disuelto en agua.

Al disolverse en agua se descompone en cationes de sodio de carga uno positiva y aniones de cloro de carga uno negativa, sin influir directamente en el pH.

Puede reaccionar para obtener cualquiera de los dos iones mencionados.

Hidróxido cálcico:

- **Fórmula molecular:** CaO_2H_2
- **Fórmula semidesarrollada:** $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- **Nombres alternativos:** Cal apagada; dihidróxido de calcio
- **Datos adicionales:** Es una sustancia cuyas moléculas están formadas por un átomo de calcio, dos de oxígeno y dos de hidrógeno, forma estructuras cristalinas hexagonales. En su composición los átomos de oxígeno e hidrógeno forman dos aniones HO^- , que se enlazan al átomo de calcio. Al disolverse en agua se descompone en cationes de sodio de carga dos positiva y el doble número de aniones HO^- de carga uno negativa, aumentando considerablemente el pH.

Óxido de hierro (II):

- **Fórmula semidesarrollada:** FeO
- **Nombres alternativos:** Wustita; Óxido de hierro
- **Datos adicionales:** No compone moléculas sino sistemas cristalinos isométricos, formados por la misma cantidad de átomos de hierro de valencia dos positiva y átomos de oxígeno.

Es inestable termodinámicamente debajo de 575°C , descomponiéndose espontáneamente en hierro metálico y óxido de hierro (II,III):





Óxido de hierro (III):

- **Fórmula semidesarrollada:** Fe_2O_3
- **Nombres alternativos:** Hematita; Trióxido de dihierro
- **Datos adicionales:** No compone moléculas sino sistemas cristalinos trigonales, formados por una cantidad de átomos de hierro de valencia tres positiva y una cantidad un 50% mayor de átomos de oxígeno.

Es estable y el compuesto formado habitualmente por la exposición de hierro puro a la atmósfera.

Óxido de hierro (II,III):

- **Fórmula semidesarrollada:** Fe_3O_4
- **Nombres alternativos:** Magnetita
- **Datos adicionales:** No compone moléculas sino sistemas cristalinos complejos, formados por átomos de hierro de valencia dos, el doble de átomos de hierro de valencia tres y el cuádruple de átomos de oxígeno. El sistema cristalinos se forma con tres figuras básicas:

Un tetraedro cuyas esquinas componen átomos de oxígeno y que encierra un átomo de hierro de valencia tres, un octaedro cuyas esquinas componen átomos de oxígeno y que encierra un átomo de hierro de valencia dos o bien encierra un átomo de hierro de valencia tres.

Aunque los compuestos que contienen hierro de valencia dos no suelen ser estables, la compleja estructura geométrica dota a la hematita de estabilidad y un fuerte magnetismo.

Oxi-hidróxido de hierro (III):

- **Fórmula semidesarrollada:** FeO(OH)
- **Nombres alternativos:** Goethita; Limonita (n-hidratado)
- **Datos adicionales:** No compone moléculas sino sistemas cristalinos ortorrómbicos, formados por una cantidad de átomos de hierro de valencia tres positiva, la misma cantidad de átomos de hidrógeno y la doble cantidad de átomos de oxígeno. La mitad de los átomos de oxígeno se asocia a los átomos de hidrógeno para formas aniones HO^- .

Cloruro de hierro (II):

- **Fórmula semidesarrollada:** FeCl_2
- **Nombres alternativos:** Rokühnita; Dicloruro de hierro
- **Datos adicionales:** No compone moléculas sino sistemas cristalinos monoclinicos, formados átomos de hierro de valencia dos positiva y la doble cantidad de átomos de cloro, coordinados geoméricamente en octaedros, con los átomos de hierro en su centro.

Cloruro de hierro (III):

- **Fórmula semidesarrollada:** FeCl_3
- **Nombres alternativos:** Molisita; Percloruro de hierro
- **Datos adicionales:** No compone moléculas sino sistemas cristalinos hexagonales formados átomos de hierro de valencia dos positiva y la triple cantidad de átomos de cloro, coordinados geoméricamente en octaedros.



Reacciones redox:

Las reacciones redox, o bien, reducción-oxidación, son aquellas en las que se transfieren electrones entre los reactivos, cambiando sus respectivos estados de oxidación. En estas reacciones interviene, por un lado, el agente oxidante, que tiende a captar electrones reduciendo su estado de oxidación. Por otro lado interviene el agente reductor, que tiende a ceder electrones aumentando su estado de oxidación, es decir, es oxidado.

No necesariamente tienen que captar y ceder electrones respectivamente, también es posible que compartan sus electrones con un átomo que tenga la tendencia contraria a la propia.

La corriente eléctrica continuo, un flujo constante de electrones inducido por un elemento ajeno, cataliza considerablemente las reacciones redox, ya que fuerza continuamente a los átomos a ceder y ganar electrones, alterando su estado de oxidación. A su vez, la presencia conjunta de elementos químicos con un alto potencial reductor y oxidante facilita el flujo de electrones por su tendencia respectiva a la captura o pérdida de electrones.

Electrolito:

Un electrolito es cualquier sustancia que contiene electrones libres, tratándose habitualmente de disoluciones iónicas, como el cloruro sódico disuelto en agua. Sumergiendo un cátodo y un ánodo en un electrolito sin que estos estén en contacto, se crea una celda de electrolito.

En estas celdas, el electrolito conduce la electricidad, puede hacerlo por transmisión de electrones, como los conductores sólidos, o bien, a través de reacciones químicas en ambos electrodos. Se produce una reacción química que consume electrones procedentes del cátodo (reducción) y otra que libera electrones (oxidación), que son capturados por el ánodo.

Como consecuencia se producen nubes de carga positiva alrededor del cátodo y de carga positiva alrededor del ánodo, causando un movimiento de los iones del electrolito hacia la nube de carga opuesta, neutralizando así las cargas y permitiendo que los electrones sigan fluyendo.

Los electrolitos, dependiendo de su composición y la de los electrodos, pueden reaccionar también con cátodo y/o ánodo para mantener el flujo de electrones. Si se da este caso, las reacciones que se producen con uno o ambos electrodos con reacciones redox.

Disolución iónica:

La disolución iónica es la que se produce al disolver un compuesto iónico en un disolvente acuoso, siendo buenos conductores eléctricos. Esta característica se debe a que sus aniones (carga eléctrica negativa) y cationes (carga eléctrica positiva), que en estado sólido suelen formar una red cristalina, en el disolvente se disgregan, quedando rodeados de moléculas de agua, orientadas según sus cargas. De esta manera, los iones son capaces de moverse libremente de los de carga opuesta, respectivamente y acudir al electrodo de carga opuesta.

Las cargas de los iones son fruto del enlace iónico que se forma entre los átomos de los compuestos iónicos. Este enlace consiste en que los átomos electropositivos ceden, de forma permanente, un electrón de su última capa a los átomos electronegativos, conformando iones de cargas de igual valor pero signo opuesto.

Ley de Ohm:

La intensidad de corriente que circula por un circuito es proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica. De este modo, midiendo el diferencial de potencial de un circuito, antes y después de una resistencia desconocida, y la intensidad de corriente que lo atraviesa, se puede deducir matemáticamente la resistencia eléctrica.

$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow R = \frac{V}{I}$$



Potencia eléctrica:

Es la cantidad de energía transmitida a través de un circuito eléctrico por unidad de tiempo transcurrida. Cuando la corriente atraviesa una resistencia eléctrica, la potencia eléctrica es directamente proporcional al producto de la resistencia y el cuadrado de la intensidad de corriente. De este modo, se puede deducir la resistencia eléctrica, midiendo la potencia y la intensidad de corriente.

$$P = R \cdot I^2 \quad \Rightarrow \quad R = \frac{P}{I^2}$$

Resistencia eléctrica:

Es la oposición que presenta un material para ser atravesado por un flujo de electrones. Se puede deducir la resistencia eléctrica de un circuito midiendo cualquier pareja de los siguientes valores: Intensidad de corriente, Potencia eléctrica y diferencial de potencial eléctrico. Las correspondientes formulas son las siguientes:

$$R = \frac{V}{I} \quad ; \quad R = \frac{P}{I^2} \quad ; \quad R = \frac{V^2}{P}$$

Además, es la inversa de la conductancia eléctrica, definida como la propiedad de transportar, mover o desplazar uno o más electrones en su cuerpo.



ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA



**PROYECTO
FIN DE CARRERA**

**ALUMNO: JULIAN MORITZ RUBEN HOFFMANN
DIRECTOR: MARCOS LANZÓN TORRES**



ANEXO II:

BIBLIOGRAFÍA



ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA





ANEXO II: BIBLIOGRAFÍA

- o *Código Técnico de la Edificación (CTE); REAL DECRETO 314/2006, de 17-MAR, del Ministerio de Fomento; B.O.E.: 28-MAR-06*

- o *Instrucción de Hormigón Estructural "EHE"; REAL DECRETO 2661/1998, de 11-DIC, del Ministerio de Fomento; B.O.E.: 13-ENE-99*

- o *Química General Moderna - Una Introducción a la Química física y a la Química descriptiva superior (Inorgánica, Orgánica y Bioquímica); José A. Babor & José Ibarz Aznárez; Editorial Marín, S.A.; ISBN 84-7102-997-9*

- o *Química inorgánica experimental - Una guía de trabajo de laboratorio (Título original: The chemistry of metallic elements); David Steele; Traducción al Castellano por J.M. Esteban Bermúdez; Editorial Alhambra, S.A.; ISBN 00-8011-854-2 (Versión original en inglés)*

- o *Equilibrios Iónicos en Disolución. Análisis Volumétrico; F. Pino Pérez & M. Valcárcel Cases; Publicaciones de la Universidad de Sevilla y Urmo, S.A.; ISBN 84-7405-114-2*

- o *Electrochemical methods - Fundamentals and Applications; Allen J. Bard & Larry R. Faulkner; John Wiley & Sons, INC.; ISBN 04-7104-372-0*

- o *Química inorgánica avanzada (Título original: Advanced inorganic chemistry); F. Albert Cotton & Geoffrey Wilkinson; Traducción al Castellano por Dr. Ruben Levitus & Dr. Rodolfo H. Busch; Editorial Limusa-Wiley, S.A.; ISBN 96-8181-795-8*

- o *Fundamentos de física II - Electricidad y magnetismo (Título original: Electricity and magnetism); Francis W. Sears; Traducido al castellano por Albino Yusta Almarza; Aguilar, S.A.; ISBN 84-0320-995-9*
- o *Introducción a los Circuitos eléctricos (Título original: Introduction to electric circuits); H. Alex Romanowitz; Traducido al Castellano por Joel Ruiz de Aquino; Compañía editorial continental, S.A.; ISBN 96-8260-109-6*
- o *Fundamentos de teoría de circuitos; Antonio Gómez Expósito, José L. Martínez Ramos, José A. Rosendo Macías, Esther Romero Ramos & Jesús M. Riquelme Santos; Thomson Editores Spain Parainfo, S.A.; ISBN 84-9732-417-5*
- o *Wikipedia - La enciclopedia libre; Fundación Wikimedia, INC.; <http://es.wikipedia.org>*



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE CARTAGENA

DIPLOMATURA
DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

ESCUELA DE
ARQUITECTURA E
INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

