



industriales

etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial

## Protección de estructuras de construcción en atmósferas corrosivas.

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

**Autor:** Guillermo García Ruiz  
**Director:** Ramón Francisco Pamies Porras  
**Codirector:** Diego José Alcaráz Lorente  
Cartagena, de Mayo de 2018



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer en primer lugar al Dr. Ramón Pamies Porras, por su paciencia, enseñanzas y apoyo en la dirección de este proyecto. Gracias por aguantar todas mis quejas, que no han sido pocas.

A los miembros del Departamento de Materiales del Centro Tecnológico del Metal, Victoria y Juana, por su ayuda y dedicación durante mi etapa de prácticas, sin ellas no hubiera sido posible la realización de este proyecto.

A mis padres y hermano, por su apoyo incondicional y comprensión durante todos estos años de estudios.

A María, por animarme en cada momento y sacar lo mejor de mí.

# ÍNDICE

## Capítulo 1: Introducción General

1.1.- CORROSIÓN METÁLICA. UN PROBLEMA ECONÓMICO Y DE SEGURIDAD.....	7
1.2.- ACIDIFICACIÓN ATMOSFÉRICA. LLUVIA ACÍDA. ....	8
1.3.- CORROSIÓN POR LLUVIA ÁCIDA EN MATERIALES METÁLICOS.....	9
1.4.- TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE EMISIONES DE SO <sub>2</sub> . ....	11
1.5.- PROTECCIÓN DE METALES POR RECUBRIMIENTOS PROTECTORES.....	12
1.5.1 RECUBRIMIENTOS METÁLICOS. ....	13
1.5.2 RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS.....	14
1.6.- CÁMARAS DE ACONDICIONAMIENTO CLIMÁTICO. ....	15

## Capítulo 2: Objetivos

2.1.- OBJETIVOS DE PROYECTO. ....	17
-----------------------------------	----

## Capítulo 3: Equipos y Probetas de ensayo.

3.1.- EQUIPOS UTILIZADOS.....	19
3.1.1.- CÁMARA KESTERNICH. ....	19
3.1.2.- EQUIPOS PARA DETERMINACIÓN DE ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.....	21
3.1.3.- EQUIPOS PARA ENSAYO GRAVIMÉTRICO.....	21
3.2 PROBETAS DE ENSAYO. ....	22
3.2.1 ACERO S 275 JR.....	23
3.2.2 ACERO S 275 JR GRANALLADO Y PINTADO CON EPOXY.....	23
3.2.3 ACERO GALVANIZADO.....	24
3.2.4.- ACERO GALVANIZADO Y PINTADO.....	24
3.3.- DISEÑO DE PROBETAS.....	25
3.4.- CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS.....	26
3.4.1.- DIMENSIONES. ....	26

3.4.2.- CODIFICACIÓN.....	27
---------------------------	----

#### Capítulo 4: Diseño de un ensayo para el seguimiento de la corrosión acelerada en atmósferas húmedas que contienen dióxido de azufre

4.1.- ENSAYO EN CÁMARA KESTERNICH.....	30
4.1.1.- FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA. ....	30
4.1.2.- PROCEDIMIENTO Y CONDICIONES DE ENSAYO.....	32
4.1.3.- ACONDICIONAMIENTO DE LAS PROBETAS. ....	33
4.1.4.- ENSAYO DE EVALUACIÓN DE DEFECTOS DEL RECUBRIMIENTO METÁLICO. ....	34
4.1.5.- ENSAYO DE EVALUACIÓN DE DEFECTOS DEL RECUBRIMIENTO ORGÁNICO. ....	35
4.2.- DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.....	37
4.2.1.- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO ORGÁNICO. ....	37
4.2.2.- ENSAYOS REALIZADOS. ....	37
4.3.- GRAVIMETRÍA DE LAS PROBETAS.....	38
4.3.1.- FUNDAMENTO DE LA TÉCNICA. ....	38
4.3.2. ENSAYOS REALIZADOS.....	38

#### Capítulo 5: Resultados: Seguimiento de la corrosión acelerada

5.1- CONTROL Y EVOLUCIÓN DE LAS PROBETAS.....	40
5.2.- CICLO 0. INSPECCIÓN VISUAL INICIAL. ....	40
5.2.1.- INSPECCIÓN VISUAL. ....	40
5.2.2.- ESPESOR INICIAL DE RECUBRIMIENTO.....	41
5.2.3.- MASA INICIAL DE LAS PROBETAS. ....	42
5.3.- CICLO I. ....	42
5.3.1.- INSPECCIÓN VISUAL. ....	42
5.3.2.- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO. ....	45
5.4.- CICLO III. ....	45
5.4.1.- INSPECCIÓN VISUAL. ....	45
5.4.2.- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO. ....	48
5.5.- CICLO V.....	49

5.5.1.- INSPECCIÓN VISUAL..	49
5.5.2.- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.	53
5.6.- CICLO VIII.....	53
5.6.1.- INSPECCIÓN VISUAL.	53
5.6.2.- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.	57
5.7.- CICLO X. INSPECCIÓN VISUAL FINAL.	58
5.8.- CLASIFICACIÓN FINAL DE PROBETAS CON PROTECCIÓN SOMETIDAS A ENSAYO DE CORROSIÓN.....	62
5.8.1.- PROBETA CON RECUBRIMIENTO GALVÁNICO.	62
5.8.2.- PROBETAS CON RECUBRIMIENTO ORGÁNICO.....	63
5.9.- ESPESOR FINAL DE RECUBRIMIENTO.	64
5.10.- MASA FINAL DE LAS PROBETAS.	66

## Capítulo 6: Conclusiones

6.1.- CONCLUSIONES OBTENIDAS.	69
6.2.- PROPUESTAS DE MEJORA EN EL DISEÑO DEL ENSAYO KESTERNICH.....	70

## Capítulo 7: Referencias

7.1.- NORMAS UTILIZADAS.....	72
7.2.- BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA.....	73



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1.- CORROSIÓN METÁLICA. UN PROBLEMA ECONÓMICO Y DE SEGURIDAD.

La corrosión es la causa general de la destrucción de la mayor parte de los materiales naturales y fabricados por el hombre. Si bien esta interacción destructiva entre el medio ambiente y los materiales, especialmente los metales, ha existido siempre, no se ha tomado en consideración hasta los tiempos modernos debido al avance de la tecnología y en concreto la electroquímica [1].

El desarrollo de la industria y el uso de combustibles, en especial el petróleo, han cambiado la composición de la atmósfera de los centros industriales y grandes conglomerados urbanos, tornándola más corrosiva. La corrosión es aparentemente inevitable desde el punto de vista termodinámico, no se puede detener pero sí controlar.

La corrosión de los metales constituye una de las pérdidas económicas más grande de la civilización moderna. La peor consecuencia de la corrosión es la destrucción del metal al que afecta. Este fenómeno puede provocar desde fracturas en los tubos de escape y silenciadores de los automotores, estructuras metálicas de naves industriales, roturas de los tanques de almacenamiento, derrumbes de puentes, hasta rotura de un oleoducto, llegando a producir grandes pérdidas tanto económicas como ambientales. Son por tanto muchos los efectos debidos a los ataques del fenómeno de corrosión.

Aun así, lo peor de todo es que si no se previenen y se combaten estos fenómenos nocivos, la seguridad de las personas se verá permanentemente afectada.

Desde el punto de vista económico, el sector industrial resulta ser el más afectado por la corrosión. Existen dos clases de pérdidas económicas [2].

- **Pérdidas directas:** Son las que afectan de manera inmediata cuando se produce el ataque. No sólo se deben a la rotura y sustitución de un equipo, sino también a la necesidad de utilización de materiales metálicos más resistentes, así como

el empleo de medidas de protección, como recubrimientos orgánicos y metálicos.

- **Pérdidas indirectas:** Todas las derivadas de los fallos debidos a los ataques de corrosión. Las principales son las paradas de producción provocadas por los fallos producidos y las responsabilidades civiles y penales a causa de posibles accidentes, como la fuga de un líquido de un depósito.

En general, el costo de la corrosión de los metales se estima en torno al 6% del PIB mundial (un 3% de costo directo y otro 3% de costos indirectos), según datos del estudio "Corrosion Costs and Preventive Strategies in The United States". En el caso de España, datos de The Economist referidos a 2007, el costo supera los 48.000 millones de euros. Si nos centramos sólo en el acero, los costos suponen en España a día de hoy el 2,2% del PIB, según los datos que maneja ATEG, la Asociación Técnica Española de Galvanización. Esto en euros supone más de 25.000 millones de euros.

Por tanto, la corrosión está ligada en la industria a problemas tanto de seguridad como económicos.

## **1.2.- ACIDIFICACIÓN ATMOSFÉRICA. LLUVIA ACÍDA.**

Los principales agentes causantes de la acidificación atmosférica son el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), su gran mayoría de origen antropogénico. Estos contaminantes pueden reaccionar con el oxígeno atmosférico y disolverse en el agua de lluvia formando los ácidos sulfúrico y nítrico. El viento puede provocar que estos corrosivos elementos recorran miles de kilómetros antes de precipitar.

El concepto de lluvia ácida obtuvo alcance mundial en 1972 mediante un estudio del gobierno de Suecia que reconocía su incidencia a nivel mundial [3]. Este estudio se presentó en la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, en el cuál se reflejaba que los ecosistemas del país nórdico sufrían este fenómeno, producido por las instalaciones industriales.

En el territorio nacional [4], este fenómeno afecta en nuestro país principalmente a Galicia, País Vasco, Murcia y algunas zonas de Cataluña. Impulsado en gran medida por las centrales térmicas más contaminantes, como la de Compostilla (León), la de Andorra (Teruel), o la de As Pontes en A Coruña.

Se vienen elaborando informes anuales de la calidad del aire en España desde el año 2001, año en que se llevó a cabo la evaluación de la calidad del aire según las nuevas Directivas Comunitarias refundidas en la Directiva 2008/50/CE que fue traspuesta a la legislación en forma de Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad de aire. Las directivas anteriores fueron modificadas por la Directiva (UE) 2015/1480.

Según la evaluación de la calidad del aire en España en 2016, realizado por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, las emisiones de SO<sub>2</sub> no superan los límites establecidos en 2005, las cuales se vienen mejorando desde 2009.

### **1.3.- CORROSIÓN POR LLUVIA ÁCIDA EN MATERIALES METÁLICOS.**

Los fenómenos de corrosión pueden clasificarse de acuerdo a muy variados criterios, entre los que se encuentran [5]:

- La morfología del ataque: corrosión uniforme, intergranular, localizada, etc.
- El medio atacante: corrosión en medio ácido, básico, por sales fundidas, de estructuras enterradas, atmosférica, etc.
- Las acciones físicas que junto con las químicas motivan el deterioro del metal: corrosión bajo tensión, por fatiga, por cavitación, por corrientes vagabundas, etc.
- Los mecanismos de reacción: oxidación directa y corrosión electroquímica.

Desde el punto de vista fisicoquímico, la clasificación que nos interesa es la de los mecanismos de reacción. El primero, nombrado oxidación directa, ocurre por reacción de los átomos del metal con los de la sustancia agresiva. El segundo, conocido

como corrosión electroquímica, se debe a la actuación de micropilas electroquímicas, que se originan cuando zonas del metal que se comportan de distinta forma desde el punto de vista eléctrico.

En la corrosión atmosférica, el mecanismo de actuación de la corrosión es fundamentalmente electroquímico. Esta corrosión también se conoce como corrosión acuosa o corrosión húmeda, pues para que tenga lugar es necesario que los metales se hallen en contacto con medios de conductividad electrolítica, como es el caso del agua, de las disoluciones salinas o ácidas y de la simple humedad de la atmósfera y de los suelos.

Los metales pueden verse expuestos a la atmósfera natural, entendiéndola como la exterior y la interior en situaciones de abrigo, durante largos períodos de tiempo. Esto da lugar al origen de finas capas de humedad que recubren la superficie metálica, las cuales actúan como conductores iónicos o pilas electroquímicas (electrolitos) sobre la superficie del metal [6].

En ambientes oxidantes y sulfurantes pueden generarse como consecuencia de equilibrios del tipo:



a partir de atmósferas contaminadas por  $\text{SO}_2$  o por mezclas  $\text{SO}_2 + \text{O}_2$ .

Una característica de los átomos metálicos es su pérdida o ganancia de electrones, por tanto, la superficie metálica tendrá multitud de zonas anódicas (proceso de oxidación) y catódicas (proceso de reducción). A pesar de que todo proceso de oxidación-reducción supone un movimiento de electrones, tiene sentido hablar siempre de reacción electroquímica. Dando origen a la formación de oxohidróxidos y sulfatos de hierro.

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

continuamente de posición las zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve totalmente.

El dióxido de azufre es de por sí, un activo despolarizante catódico por su susceptibilidad, no sólo a oxidarse, sino a reducirse sobre los metales. A este respecto, dado que la solubilidad del  $\text{SO}_2$  en agua es unas 2600 veces mayor que la del  $\text{O}_2$ , aun siendo muy pequeño el contenido de gas  $\text{SO}_2$  en la atmósfera, su concentración en el electrolito y sus efectos pueden ser del mismo orden que los del oxígeno, que es el despolarizante catódico por excelencia. Como el ácido se regenera en presencia de agua, la corrosión del metal depende del período de humectación del mismo [7].

Todo ello, entre otros factores, se ha dado lugar al desarrollo de una gran variedad de técnicas para el control de emisiones de dióxido de azufre y la prevención de la corrosión que permita cuando menos retardar la aparición de procesos localizados de corrosión atmosférica, entre las que sin duda la más ampliamente usada es la protección mediante aislamiento del acero por empleo de recubrimientos poliméricos como las pinturas y recubrimientos metálicos como el galvanizado.

#### **1.4.- TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE EMISIONES DE $\text{SO}_2$ .**

Para reducir las emisiones de  $\text{SO}_2$  se puede actuar en tres puntos distintos del ciclo: eliminando el azufre del combustible, eliminándolo durante la quema o desulfurando los gases emitidos [8].

- La eliminación de azufre o desulfuración del combustible supone la eliminación del máximo contenido de azufre combustible del carbón antes de su combustión. Este azufre puede encontrarse en forma orgánica o inorgánica, y solamente este último se elimina mediante el lavado del carbón. El carbón se tritura, separándolo posteriormente del azufre por distintos métodos. La instalación de una planta de lavado en las centrales que queman lignitos, es una medida necesaria para reducir las emisiones de  $\text{SO}_2$ .
- La desulfuración durante la combustión se lleva a cabo mediante « lechos fluidizados », en los que se introducen adsorbentes (caliza o dolomía),

consiguiendo la eliminación de una parte del  $\text{SO}_2$ , que queda en una capa de  $\text{CaSO}_4$ . Los inconvenientes que presenta este sistema se deben a que no puede aplicarse a plantas ya instaladas, sino en las nuevas, y no de gran potencia, y que la desulfuración no es tan efectiva como cuando se realiza sobre los gases emitidos.

- En el caso de la de  $\text{SO}_2$  a partir de los gases emitidos, se aplican los procesos de desulfuración de gases (FGD), que son los más eficaces en la reducción de estas emisiones. Así se consiguen disminuciones del 85-95 %, con la ventaja además de poder aplicarse a grandes térmicas que ya están en funcionamiento. Las técnicas FGD son las más extendidas en Centroeuropa y las más apropiadas para aplicar en las grandes centrales de nuestro país.

Como se ha visto anteriormente en el informe de calidad del aire en España la tendencia es positiva, ya que han descendidos los niveles emitidos de dióxido de azufre a la atmósfera, pero no es suficiente ya que según la OMS el nivel diario de emisiones no debe superar los  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{SO}_2$ , por lo que la Unión Europea ha aprobado un plan de reducción de estas emisiones del 88% a partir de 2030 en comparación con los niveles establecidos en 2005 [9].

## **1.5.- PROTECCIÓN DE METALES POR RECUBRIMIENTOS PROTECTORES.**

Con la aplicación de recubrimientos protectores a los aceros se les permite alargar el límite de su vida útil por encima de sus características iniciales, manteniendo sus propiedades mecánicas básicas aislándolos del medio exterior.

La mejor forma para controlar la corrosión de un metal activo es mediante la aplicación de recubrimientos protectores sobre la superficie del mismo, con la finalidad de protección del mismo del medio que le rodea. Estos recubrimientos llegan a actuar como bloqueadores térmicos, aunque su aplicación más importante está relacionada con la capacidad de actuar como barrera anticorrosiva, disminuyendo el

contacto de la superficie con el medio ambiente y mejorando la capacidad de uso del material por el aporte de propiedades en la superficie.

La gran mayoría de estructuras y materiales de acero para la construcción están recubiertos por capas de otros metales o de pinturas anticorrosivas, cuya durabilidad dependerá del ambiente y del mantenimiento sostenible durante su ciclo de vida.

Estas medidas de protección frente a la corrosión pueden generar un ahorro del 15 al 30 % del coste económico producido por los efectos de la corrosión [10].

### **1.5.1.- RECUBRIMIENTOS METÁLICOS.**

El recubrimiento mediante electrodeposición de metales con mayor electronegatividad es la técnica más frecuente para recubrir un acero con un metal, aunque existe otro método conocido como << hot-dipping >>, que es el más utilizado en la producción de aceros galvanizados, recubrimiento de cinc. Esta técnica consiste en sumergir en una bañera el acero a proteger en el metal protector, el cual se encuentra en estado líquido, creando una capa protectora que solidifica al enfriarse [11].

Este sistema de protección contra la corrosión electroquímica está basado en evitar la creación de la pila de corrosión mediante el desplazamiento electroquímico. Aislando la superficie catódica (acero a proteger), acero con menor potencial electronegativo, con un metal de mayor electronegatividad que actué como región anódica de sacrificio contra la interacción con la húmeda (electrolito). Este proceso de protección metálica también recibe el nombre de protección catódica.

Como el metal más común utilizado en la industria de construcción es el acero, por su alta resistencia mecánica y su bajo precio van destinados a su protección, es necesario protegerlo para prolongar su vida útil. A su vez, el cinc es el recubrimiento metálico más recomendado por su alta capacidad de sacrificio para proteger el acero base.

La utilización de recubrimientos metálicos se plantea en sustitución de recubrimientos poliméricos, al ser un método más sencillo a la hora de obtener capas más gruesas, con mayor adherencia, baja permeabilidad y resistencia a la corrosión.

### **1.5.2.- RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS.**

Las pinturas como recubrimiento son las más utilizadas desde hace décadas, tanto para la protección de superficies grandes como pequeñas.

Las propiedades de cada polímero determinan las nuevas características, físicas y químicas, de la superficie recubierta. La gran mayoría de las pinturas protectoras están compuestas por una matriz polimérica y un conjunto de pigmentos e inhibidores, que proporcionan a esta una resistencia elevada a la penetración de agua y humedades, así como aumento de la durabilidad del polímero, aumentando su resistencia a la erosión [12].

Los pigmentos son partículas sólidas añadidas al polímero con la función de proporcionar una coloración específica y opacidad a la capa protectora. Los pigmentos metálicos actúan como ánodo, en beneficio del metal al que protege. La adición de inhibidores oxidantes como los cromatos y partículas de cinc, atenúan los efectos de corrosión sobre el metal.

Las resinas de naturaleza epoxi y derivados de celulosa, permiten desarrollar capas resistentes a la corrosión atmosférica además de una función decorativa, modificando el aspecto superficial del material base.

Al utilizar este tipo de recubrimientos protectores se debe tener en consideración que son recubrimientos permeables. El factor a la hora de seleccionar un determinado polímero es la permeabilidad al agua, humedad y medios corrosivos, así como el tiempo al que se verá expuesto y sus condiciones de uso.

## **1.6.- CÁMARAS DE ACONDICIONAMIENTO CLIMÁTICO.**

A la hora de realizar ensayos ambientales, los ensayos de acondicionamiento climático tienen como objetivo reproducir por medio de cámaras climáticas las condiciones atmosféricas necesarias para someter a un producto o partes de un producto dentro de un laboratorio.

Los ensayos climáticos están referidos al cambio de las condiciones atmosféricas naturales como temperatura, humedad, niveles de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. En los equipos de acondicionamiento climático se pueden regular estos parámetros, para así cumplir las condiciones requeridas en los ensayos de envejecimiento sobre recubrimientos y medir sus capacidades atribuidas. Se trata de acelerar el proceso de oxidación sobre las muestras mediante este tipo de equipos en el que el envejecimiento se da por la constante exposición del material a tratar a diferentes condiciones ambientales [13].

Existe una gran variedad de cámaras para la realización de este tipo de ensayos de envejecimiento de muestras para comprobar su resistencia a la corrosión. Las más conocidas son las cámaras de niebla salina (ambientes marinos), cámaras de envejecimiento solar por radiación ultravioleta, cámaras climobáricas que generan condiciones de altitud para navegación aérea y espacial.

La cámara de corrosión utilizada para crear condiciones de corrosión ácida es la cámara Kesternich, la cual será la que se utilizará en este trabajo y que se comentará en detalle más adelante.



## **2.1.- OBJETIVOS DE PROYECTO.**

El objetivo de este trabajo se centrará en conocer la influencia y el comportamiento de las capacidades protectoras de recubrimientos anticorrosivos, en entornos industriales con concentración atmosférica de dióxido de azufre, sobre aceros estructurales de construcción.

El estudio se lleva a cabo a través de probetas metálicas de acero base S 275 JR recubiertas con protección catódica de cinc y recubrimiento orgánico como la pintura epoxi e imprimaciones de cinc.

Las probetas seleccionadas a estudio serán sometidas a un proceso de acondicionamiento acelerado en atmósfera húmeda que contiene dióxido de azufre por un total de diez ciclos de exposición en cámara climática Kesternich. La aplicación más característica de este tipo de equipos es el rápido reconocimiento de defectos y el estudio de la resistencia de los revestimientos o capas de protección de superficies sometidas al ataque de la citada atmósfera corrosiva. El ambiente sulfúrico acelerado será generado en la cámara controlando parámetros de humedad relativa, temperatura y niveles de  $SO_2$ .

Las probetas sometidas a ensayo de corrosión atmosférica se tratan para determinar la resistencia de recubrimiento mediante técnicas gravimétricas y mediciones del espesor de recubrimiento protector, así como el seguimiento de la evolución de la corrosión acelerada sobre las superficies de las probetas en los ciclos de exposición establecidos.

En las inspecciones periódicas se evalúa de forma visual el proceso de corrosión sobre las superficies de las probetas con el fin de establecer una clasificación sobre los defectos en las probetas, como grado de corrosión en el recubrimiento y metal base, descamaciones o desprendimiento de pintura, número de picaduras, así como distintos desperfectos que se puedan dar sobre la superficie expuesta en cada una de las probetas.



# Capítulo 3

EQUIPO Y PROBETAS DE ENSAYO

### 3.1.- EQUIPOS UTILIZADOS.

#### 3.1.1.- CÁMARA KESTERNICH.

La cámara de corrosión Kesternich, serie VCK 300 de DYCOMETAL, simula una atmosfera artificial de humedad saturada y temperatura constante combinado con gas de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) para provocar un efecto de lluvia ácida según la norma DIN 50018 y realizar ensayos corrosivos de atmósfera sulfúrica.

Los rangos máximos de temperatura en modelo estándar son desde ambiente pudiendo llegar a los  $+60^\circ\text{C}$ , rango de humedad de hasta el 100 HR %. Trabaja a una tensión de 230 V con 50 Hz de frecuencia y 1 KW de potencia a intensidad de 4,4 A. Tiene un peso de 80 Kg y una capacidad de 300 litros.

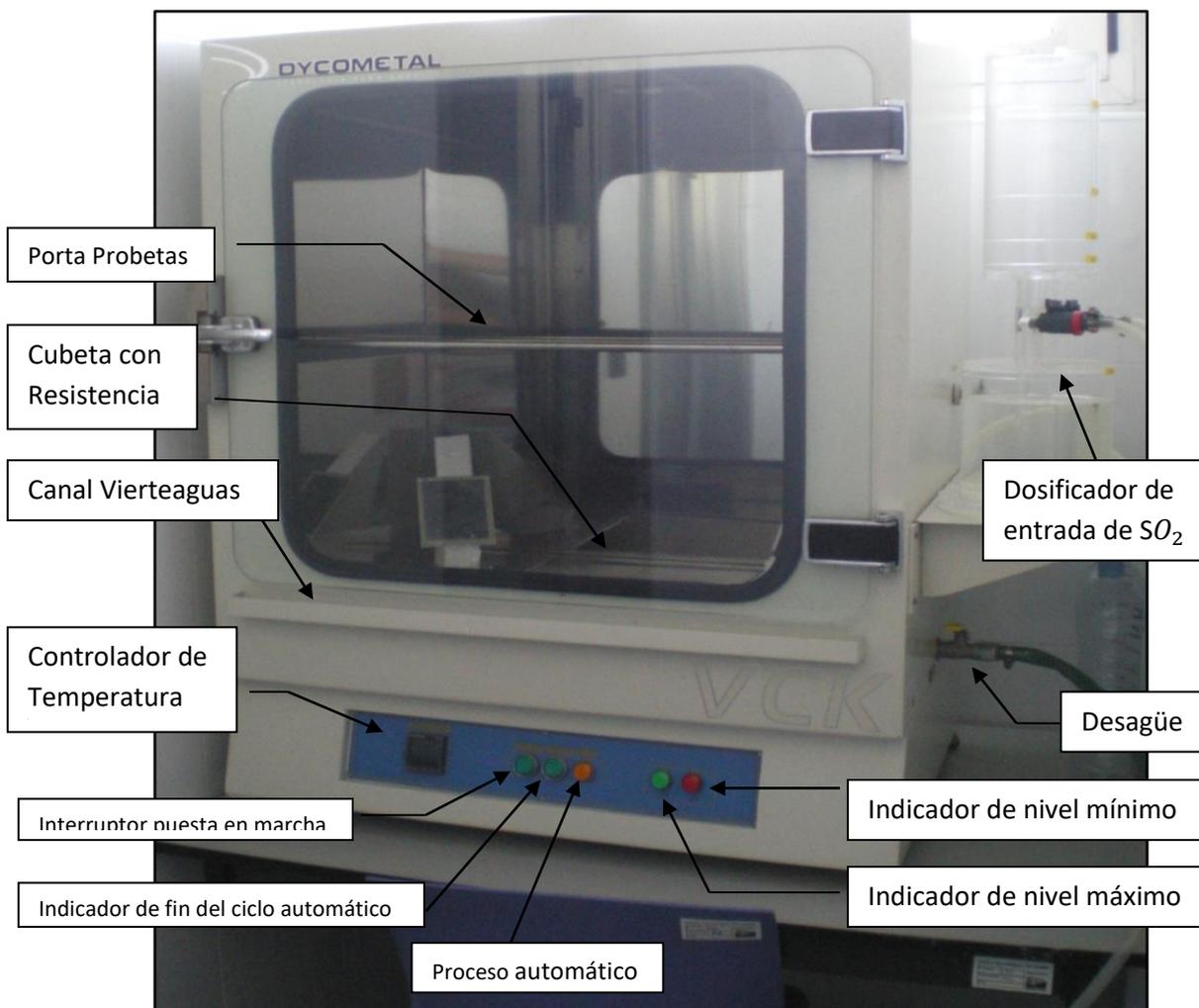


Figura 1. Cámara Kesternich. Laboratorio Centro Tecnológico del Metal. Murcia.

Tanto el interior como el exterior de la cámara están fabricados en polipropileno inerte a la corrosión. En la puerta se ubica una ventana para visualizar el interior de la cámara. Debido a la agresividad de los ensayos con disoluciones gaseosas, este tipo de cámaras están fabricadas interiormente en acero inoxidable AISI 316 L. Los soportes de PVC en los laterales para colgar las barras porta-muestras. Posee un aislamiento de lana de roca.

En la base de la cámara existe una cubeta de 4 litros de agua en la cual va alojada una resistencia de inmersión que nos permite alcanzar la temperatura deseada. El techo con inclinación para evitar el goteo sobre las muestras y válvula de compensación de presión.

En el exterior de la cámara se encuentra el dosificador de gas  $\text{SO}_2$ , fabricado en metacrilato transparente. El depósito inferior se rellena de parafina y el superior con dióxido de azufre procedente de la botella de gas con manómetro, este depósito está graduado métricamente desde 2 a 0,2 litros.

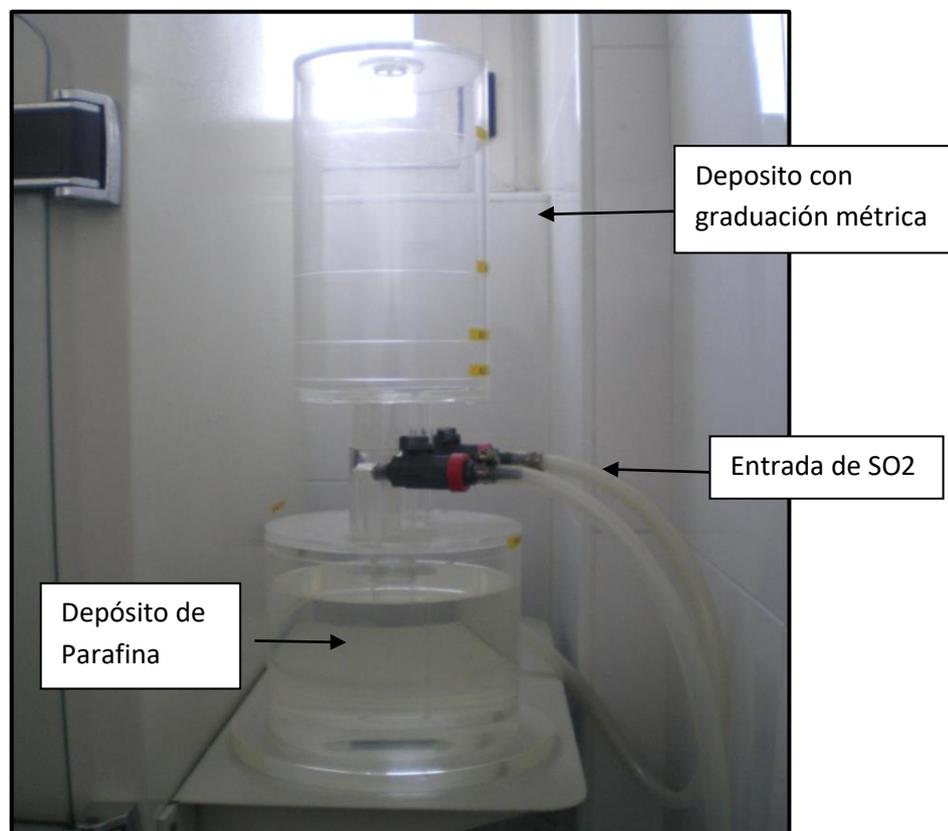


Figura 2. Dosificador de dióxido de azufre.

### 3.1.2.- EQUIPOS PARA DETERMINACIÓN DE ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.

- EQUIPO 1: Medición de Recubrimientos Orgánicos.
  - **Medidor de espesores de recubrimientos.**
    - MODELO: MEGA-CHECK FN
    - N° SERIE: 1835M002
    - N° CERTIFICADO CALIBRACIÓN ENAC: 08/101720 Parte 1/2
  - **Lámina patrón para calibración.**
    - N° SERIE: 120603B
    - ESPESOR NOMINAL: 0,3060 mm.
    - N° CERTIFICADO CALIBRACIÓN ENAC: 08/101720 Parte 2/2
    -
- EQUIPO 2: Determinación de Recubrimiento Metálico.
  - **Balanza de precisión.**
    - MARCA: KERN
    - MODELO: ACJ 320-4M
    - N° SERIE: WB12AC0145
    - N° CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN: 025-0614BE
  - **Pie de Rey digital.**
    - MODELO: INSIZE (0-200 MM) Series 1137
    - N° SERIE: 2101110496
    - N° CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN: 288/11

### 3.1.3.- EQUIPOS PARA ENSAYO GRAVIMÉTRICO.

- EQUIPO: Determinación de Masa.
  - **Balanza de precisión.**
    - MARCA: KERN
    - MODELO: ACJ 320-4M

- Nº SERIE: WB12AC0145
- Nº CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN: 025-0614BE

### 3.2.- PROBETAS DE ENSAYO.

El material seleccionado ha sido suministrado por la empresa Hierros Ibáñez, S.A., polígono industrial de Alcantarilla, Murcia. Esta empresa se dedica a la fabricación y protección, mediante recubrimientos metálicos y orgánicos, de perfiles metálicos destinados a la construcción con diferentes tipos de sección, como ángulos rectos, forma de T, forma de U, y una gran variedad de secciones transversales con el objetivo de suministrar material estructural para la construcción.

Para el estudio, se han requerido de cuatro perfiles de acero base S 275 JR de construcción de sección en forma de ángulo de lados iguales, un perfil tendrá protección orgánica, mediante pintura epoxi anticorrosiva. Dos perfiles de acero tendrá protección metálica con recubrimiento de zinc, y el cuarto perfil no será protegido por ningún tipo de recubrimiento.

Las dimensiones comerciales de los perfiles de acero S 275 JR, son las siguientes:

- Longitud comercial: 6 m, con tolerancia de largo de 0 a 100 mm.
- Espesor de sección:  $e = 4$  mm.
- Longitud de sección:  $b = 35$  mm.
- Radio de unión:  $r_{unión} = 5$  mm.

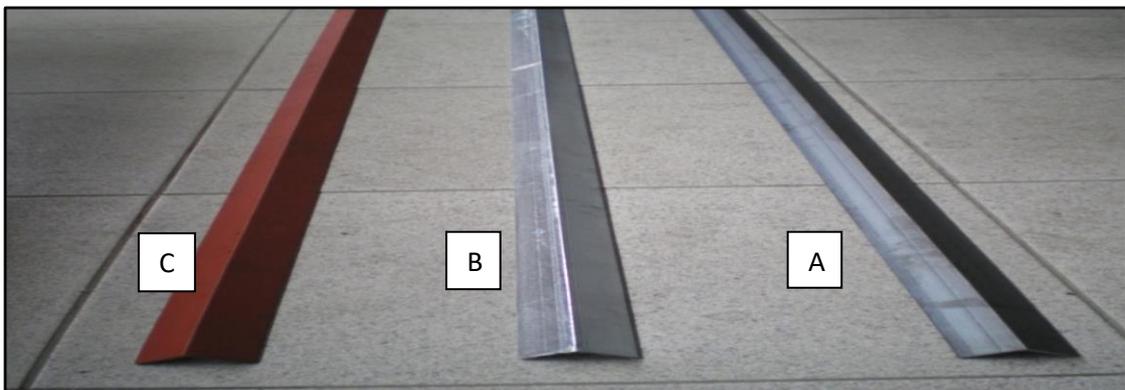
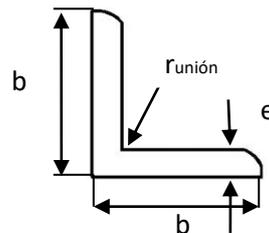


Figura 3. Ángulos de acero S 275 JR (A), recubrimiento metálico (B) y orgánico (C).

### 3.2.1.- ACERO S 275 JR.

El acero S 275 JR, laminado en caliente y con perfil en forma de ángulo y lados iguales, va a ser el metal base elegido para el ensayo de acondicionamiento climático en cámara Kesternich con el fin de obtener probetas de ensayo y comprobar la capacidad de protección tanto del recubrimiento orgánico (epoxi) como del recubrimiento metálico (galvanizado) a la acción corrosiva de la atmósfera ácida.

El acero S 275 JR, es un acero no aleado y laminado en caliente que está clasificado según la norma UNE EN 10025 como acero para la construcción ordinaria, de ahí su terminación JR. Se trata de una aleación de hierro con un porcentaje de carbono menor del 0,20%, que aportan dureza y resistencia. Este tipo de acero estructural por excelencia y más demandado en la actual por sus altas prestaciones en realización de estructuras metálicas tales como naves, edificios, depósitos, etc.

Las características comunes a este acero estructural son las siguientes:

- El valor mínimo garantizado del límite elástico es de 275 MPa (N/mm<sup>2</sup>)
- Flexión por choque de 27 J
- Módulo de Elasticidad:  $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
- Módulo de Elasticidad Transversal:  $G = 81.000 \text{ N/mm}^2$
- Coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,3$
- Coeficiente de dilatación térmica:  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$
- Densidad:  $\rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$

### 3.2.2.- ACERO S 275 JR GRANALLADO Y PINTADO CON EPOXI.

El proceso de protección orgánica comienza granallando el perfil de acero, eliminando la capa de calamina superficial y así dejar el acero completamente limpio para su posterior recubrimiento con pintura epoxi poliamida. Esta pintura a base pigmentos especiales y aditivos posee una excelente adherencia sobre el acero debidamente tratado, está especialmente diseñada para su desempeño en ambientes industriales agresivos y se pinta a través de una cámara de pintado por pulverizado.

La limpieza por granallado de la superficie metálica antes de pintarla se realiza a través del chorro de granallas de plomo como una verdadera operación de bombardeo, en que una cantidad innumerable de partículas abrasivas son lanzadas con alta velocidad contra la superficie del metal a tratar, con el objetivo de disminuir los defectos superficiales de la pieza. Inmediatamente antes de chocar contra la superficie, las partículas están dotadas de energía cinética, que es directamente proporcional a la masa de la partícula de plomo y al cuadrado de la velocidad.

### **3.2.3.- ACERO GALVANIZADO.**

La protección galvánica que la empresa realiza sobre el perfil de acero S 275 JR la lleva a cabo por el método de inmersión en bañera caliente de cinc.

El proceso consiste básicamente en recubrir de cinc fundido la superficie del acero para protegerlo de la corrosión, formando en su totalidad una superficie con mayor electronegatividad que el metal a proteger, como se ha descrito anteriormente este proceso es conocido también como protección catódica.

### **3.2.4.- ACERO GALVANIZADO Y PINTADO.**

Para el ensayo con recubrimiento mixto, se propone recubrir orgánicamente la superficie galvanizada de uno de los perfiles de acero, con la finalidad de embellecer el acabado superficial de este perfil destinado al interior de una nave.

El proceso de pintado se lleva a cabo mediante pulverización por aerosoles de pinturas anticorrosivas especiales para mantenimiento y acabados de superficies galvanizadas que necesiten ser reparadas o retocadas.

En primer lugar, el perfil de acero es revestido con una capa de imprimación de alto contenido de polvo cinc puro a base de resinas epoxi que contienen pigmentos inhibidores que impiden la corrosión del metal, produciendo una película opaca de color gris oscuro de alto poder anticorrosivo, con tiempo de secado de 20 minutos.

Para finalizar el proceso de embellecimiento superficial, se dan dos capas de pintura acrílica azul pulverizando la superficie. Este esmalte brillante está destinado tanto a interior como a exterior con un tiempo de secado de unos quince minutos.

Estos aerosoles son producidos por la empresa Ambro-Sol Spray, S.L. Han sido embotellados a una presión de 5 bares a 20°C de temperatura. En caso de la imprimación de cinc la densidad a temperatura ambiente es de 0,98 - 1,02 g/ml [14].

### 3.3.- DISEÑO DE PROBETAS.

Los perfiles metálicos han sido cortados para obtener unas probetas con un tamaño estándar adecuado para su experimentación. Las dimensiones las probetas destinadas a ensayo son de 35x35x150mm, con un espesor de 4 mm.

Se ha realizado un agujero en las muestras, con taladro de columna y broca de 4 mm de diámetro, con el fin de colgar las probetas en las barras del interior de la cámara climática.

El corte de las piezas se ha llevado a cabo mediante una sierra de cinta semiautomática.

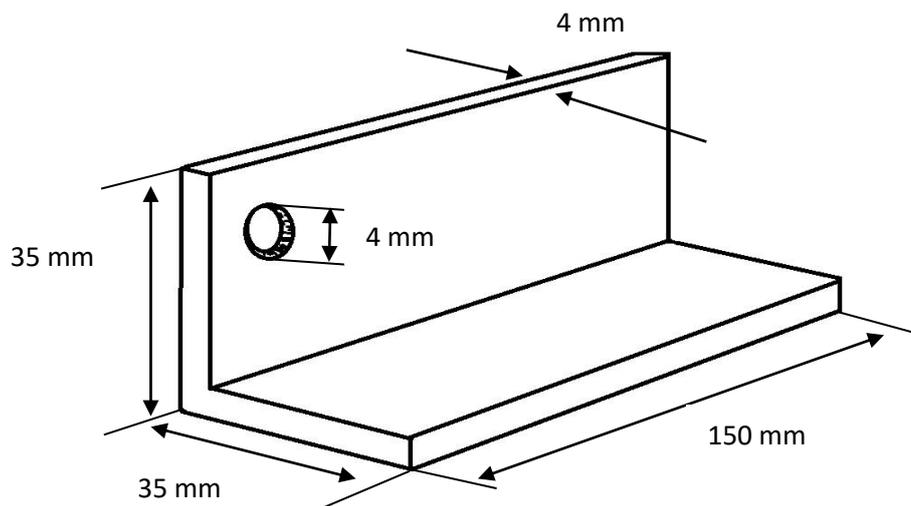


Figura 4. Diseño de las probetas.

### 3.4.- CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS.

El grupo está formado por cuatro probetas mecanizadas de los tres perfiles de acero S 275 JR adquiridos. Dos de las probetas pertenecen al perfil galvanizado, de las cuales una ha sido embellecida con pintura acrílica azul. Una tercera probeta pertenece al perfil granallado y pintado con pintura epoxy roja, y la última es propio acero S 275 JR sin recubrimiento.

#### 3.4.1.- DIMENSIONES.

Las medidas geométricas correspondientes a cada una de las probetas mecanizadas se han tomado con pie de rey digital.

El valor del área se encuentra normalizado para perfiles en forma de ángulo con lados iguales según la UNE EN 10056-1:99. “ Dimensiones y características geométricas de los angulares laminados en caliente de lados iguales”, en la cual aparece una tabla de dimensiones geométricas para perfiles estructurales de acero S 275 JR.

Por tanto el valor de área asociado a la sección de las probetas con unas dimensiones de longitud de anchura de 35 mm para ambos lados y 4 mm espesor, es de  $2,67 \text{ cm}^2$  .

Se puede aproximar por consiguiente el valor del área de ambas caras para cada una de las probetas mediante este valor de área normalizado, obteniendo los siguientes resultados:

Probeta	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Área ( $\text{cm}^2$ )
<b>SR-20C</b>	35,30	153,34	3,56	108,25
<b>RG-20C</b>	35,29	151,68	3,87	107,05
<b>RM-20C</b>	35,20	151,48	3,54	106,64
<b>RO-20C</b>	35,29	148,19	3,86	104,59

Tabla 1. Dimensiones geométricas de las probetas.

### 3.4.2.- CODIFICACIÓN.

Se han codificado cada una de las probetas en función de su recubrimiento. Se mostrarán imágenes de cada una de las probetas antes de ser preparadas para la puesta en marcha del ensayo de acondicionamiento húmedo.

- Codificación de las probetas:
  - Probeta 1. Probeta de acero S 275 JR.  
Código: **SR-20C**.



Figura 5A. Cara A, probeta SR-20C

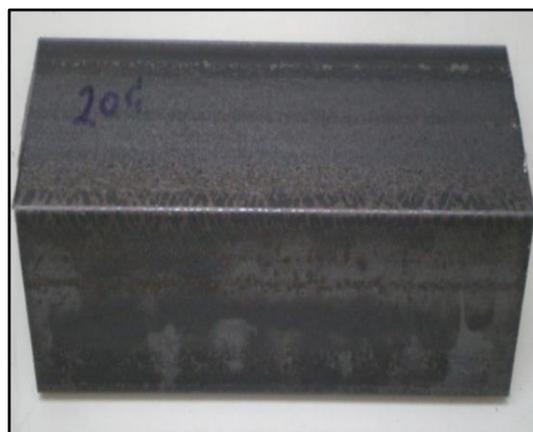


Figura 5B. Cara B, probeta SR-20C

- Probeta 2. Probeta con protección metálica.  
Código: **RG-20C**



Figura 6A. Cara A, probeta RG-20C

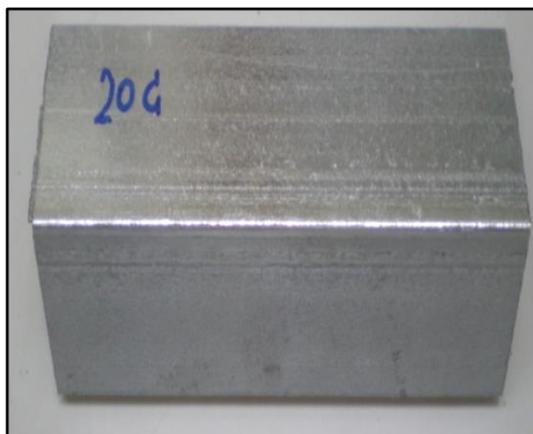


Figura 6B. Cara B, probeta RG-20C

- Probeta 3. Probeta con recubrimiento mixto.

Código: **RM-20C**



Figura 7A. Cara A, probeta RM-20C



Figura 7B. Cara B, probeta RM-20C

- Probeta 4. Probeta con protección orgánica.

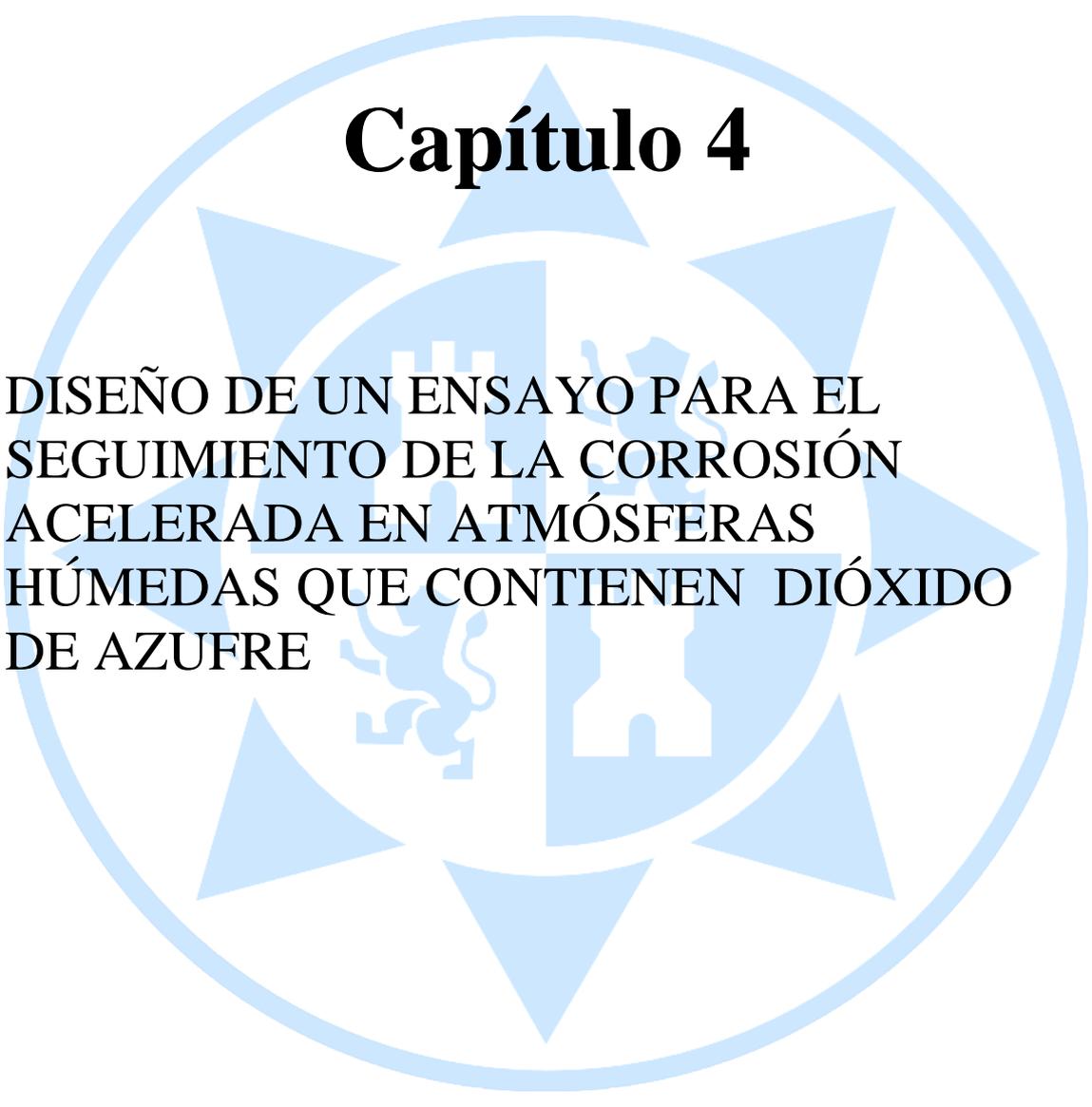
Código: **RO-20C**



Figura 8A. Cara A, probeta RO-20C



Figura 8B. Cara B, probeta RO-20C



# Capítulo 4

DISEÑO DE UN ENSAYO PARA EL  
SEGUIMIENTO DE LA CORROSIÓN  
ACELERADA EN ATMÓSFERAS  
HÚMEDAS QUE CONTIENEN DIÓXIDO  
DE AZUFRE

#### **4.1.- ENSAYO EN CÁMARA KESTERNICH.**

Las probetas seleccionadas a estudio serán sometidas a un proceso de acondicionamiento acelerado en atmósfera húmeda que contiene dióxido de azufre por un total de diez ciclos de exposición en cámara climática Kesternich, según norma UNE-EN ISO 6988:1996. El ambiente sulfúrico acelerado será generado en la cámara controlando parámetros de humedad relativa, temperatura y niveles de SO<sub>2</sub> .

Las probetas sometidas a ensayo de corrosión atmosférica se tratan para determinar la resistencia de recubrimiento mediante técnicas gravimétricas y mediciones del espesor de recubrimiento orgánico protector, así como el seguimiento de la evolución de la corrosión acelerada sobre las superficies de las probetas en los ciclos de exposición establecidos.

En las inspecciones periódicas se evalúa de forma visual el proceso de evolución de la corrosión, destacando mediante fotografías los defectos más significativos, sobre las superficies de las probetas con el fin de establecer en último ciclo una clasificación sobre los defectos en las probetas según normativas establecidas de caracterización de recubrimientos metálicos y orgánicos.

##### **4.1.1.- FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA.**

El Método de ensayo está basado en las normas UNE-EN ISO 6988:1996, “Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad.” y UNE-EN ISO 3231:1998 “Pinturas y barnices. Determinación de la resistencia a atmósferas húmedas que contienen dióxido de azufre”.

El ensayo Kesternich es un indicador del índice de contaminación en atmósferas industriales y urbanas. El ensayo comprende un ciclo de 24 horas divididas en dos etapas:

- La primera etapa dura 8 horas en las que la cámara permanece cerrada y las piezas en su interior. Las probetas son expuestas a rangos de temperatura  $40^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  y con una humedad relativa del 100%. Al introducir el  $\text{SO}_2$  en la cámara junto con las condiciones de ensayo establecidas, el ambiente húmedo se torna corrosivo y precipita como ácido sulfúrico humectando las probetas.
- Terminada la primera fase, la puerta de la cámara se abre automáticamente, se detiene la calefacción y las muestras están expuestas a temperatura ambiente del aire ambiente en la sala aislada donde está la cámara climática. Esta segunda etapa de exposición en el ciclo de envejecimiento dura 16 horas con una temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y a una humedad relativa del  $50 \pm 20\%$ .

Las probetas serán sometidas a un total de diez ciclos en cámara climática, con un total de 240 horas de ensayo de corrosión de atmósfera húmeda.

Los ciclos establecidos para la inspección visual y toma de mediciones de espesor de recubrimiento de las probetas serán en los siguientes:

- Ciclo 0: Inicial. Inspección de las probetas antes de exposición.
- Ciclo I: Inspección de las probetas a las 24 horas de exposición.
- Ciclo III: Inspección de las probetas a las 72 horas de exposición.
- Ciclo V: Inspección de las probetas a las 120 horas de exposición.
- Ciclo VIII: Inspección de las probetas a las 192 horas de exposición.
- Ciclo X: Final. Inspección de las probetas a las 240 horas de exposición.

Al finalizar el periodo de ensayo especificado, se retiran las probetas de la cabina y se dejan en reposo hasta que se solidifiquen los productos de corrosión líquidos, en el caso de los recubrimientos orgánicos hasta un período de 24 horas.

En cada uno de los ciclos se citan los defectos superficiales más característicos de cada una de las probetas acompañadas de imágenes que muestran las zonas de recubrimiento afectadas.

#### 4.1.2.- PROCEDIMIENTO Y CONDICIONES DE ENSAYO.

Para su puesta en marcha, según la norma UNE-EN ISO 6988, sigue el siguiente procedimiento:

- Se llena la cubeta con dos litros de agua destilada, con una conductividad de  $500 \mu\text{S/m}$  o inferior, y se colocan las piezas a ensayar suspendidas de las varillas porta-piezas.
- A continuación se cierra el aparato y se ejecuta el cuadro del control, introduciendo  $0,2 \text{ dm}^3$  de dióxido de azufre en la cámara, a través de la tubería de alimentación de gas.
- Regular el termostato a la temperatura deseada, en interior de la cámara debe aumentar hasta alcanzar los  $40 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- El dosificador de  $\text{SO}_2$  deberá estar lleno de aceite de parafina (hasta la marca existente en el depósito inferior).
- Por último pulsar el botón de puesta en marcha para que se inicie el proceso de calentamiento.
- En ningún caso deberá abrirse la puerta de la cámara una vez iniciado el ensayo, puesto que se perturbará el grado de humedad y concentración de  $\text{SO}_2$  falseándose los resultados, sin contar que la concentración de  $\text{SO}_2$  es altamente tóxica.
- Al finalizar el tiempo de ensayo (8 h de marcha) se desconectará la calefacción y se abrirá automáticamente la puerta, que permanecerá así durante 16 horas.
- Para iniciar un nuevo ciclo se vaciará el agua de la cubeta y se repetirán todas las operaciones anteriores desde el principio.

Hay que tener en cuenta, que la cámara Kesternich evapora hacia el exterior una cantidad más o menos apreciable de dióxido de azufre, por este motivo el lugar de emplazamiento está lo más aislado posible del laboratorio con ventilación continua por equipos de extracción de aire. El acceso a la sala se realiza por motivos de seguridad con el uso de un equipo de aislamiento corporal y con un equipo con respiración autónoma.

#### 4.1.3.- ACONDICIONAMIENTO DE LAS PROBETAS.

Antes de colocar las probetas en el interior de la cámara se ha necesitado revestir los cantos vivos de las probetas, producidos por el corte radial para la disminución de sus dimensiones, con silicona para evitar el contacto entre el ambiente corrosivo y el acero base. Por último, los bordes han sido cubiertos con papel adhesivo con el fin de evitar que la silicona se desprendiera del borde metálico.

En cuanto a la sujeción de las probetas a las barras de la cámara, a través de los taladros realizados en las probetas, se ha utilizado hilo de nylon.

El posicionamiento de las muestras sometidas a exposición en el interior de la cámara de ensayo debe cumplir unas condiciones específicas, estas están definidas en la norma UNE-EN ISO 6988. Según el método de exposición, las muestras estarán sujetas a las siguientes restricciones:

- La distancia entre las muestras no debe ser inferior a 20 mm.
- La distancia entre las muestras y la pared o el techo de la cámara de ensayo no debe ser inferior a 100 mm.
- La distancia entre los bordes inferiores de las muestras y la superficie de agua en el fondo de la cámara no debe ser inferior a 200 mm.

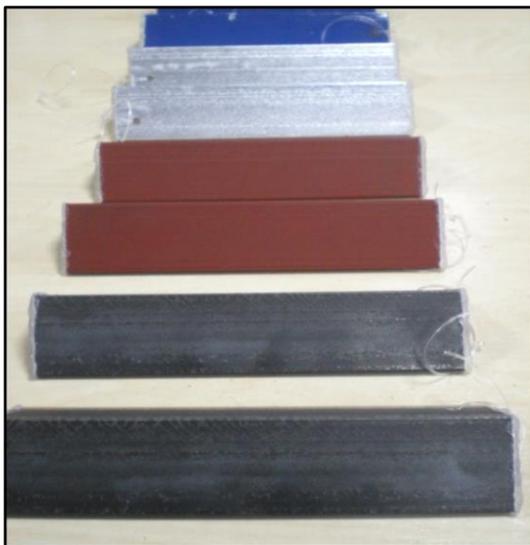


Figura 9. Preparación de muestras



Figura 10. Posición de muestras en cámara

#### 4.1.4.- ENSAYO DE EVALUACIÓN DE DEFECTOS DEL RECUBRIMIENTO METÁLICO.

La clasificación del comportamiento de los recubrimientos metálicos frente a la corrosión se realiza según la norma, UNE-EN ISO 10289: 2001 “Métodos de ensayo de corrosión de recubrimientos metálicos sobre sustratos metálicos. Clasificación de probetas y piezas de protección sometidas a ensayos de corrosión”.

Para la clasificación del comportamiento se deben realizar dos evaluaciones:

- Clasificación de la protección ( $R_p$ ), donde se asigna un número que representa la capacidad del recubrimiento para proteger al sustrato metálico mediante la siguiente la fórmula:

$R_p = 3 \cdot (2 - \log A)$ , donde A es el porcentaje del área total que presenta corrosión del metal base.

- Clasificación de la apariencia ( $R_A$ ), se asigna una secuencia de letras y números que reflejan el aspecto general, que incluyen todos los defectos causados por el ensayo de corrosión.

La clasificación de los defectos viene recogida en las siguientes tablas:

**Tabla 2:** Clasificación de la protección ( $R_p$ ) y según la apariencia ( $R_A$ )

Superficie defectuosa A (%)	Clasificación $R_p$ o $R_A$
Sin defectos	10
$0 < A \leq 0,1$	9
$0,1 < A \leq 0,25$	8
$0,25 < A \leq 0,5$	7
$0,5 < A \leq 1,0$	6
$1,0 < A \leq 2,5$	5
$2,5 < A \leq 5,0$	4
$5,0 < A \leq 10$	3
$10 < A \leq 25$	2
$25 < A \leq 50$	1
$50 < A$	0

Para la clasificación del comportamiento se combinan la clasificación de la protección ( $R_p$ ) seguida por una barra oblicua (/) y por la clasificación de la apariencia ( $R_A$ ), es decir,  $R_p/R_A$ .

**Tabla 3:** Clasificación de los tipos de deterioro del recubrimiento.

A	Mancha y/o decoloración debida al deterioro del recubrimiento
B	Deslumbre con poca o nula corrosión visible del recubrimiento
C	Productos de corrosión de un recubrimiento anódico
D	Productos de corrosión de un recubrimiento catódico
E	Picaduras de la superficie (picaduras que no llegan hasta el metal base)
F	Desconchado, descamación, desprendimiento
G	Ampollas
H	Fisuras
I	CuarTEAMIENTO
J	Pata de gallo o defectos en forma de estrella

La clasificación de la apariencia según la tabla 3 viene antecedida de una evaluación subjetiva del grado de deterioro de la superficie afectada mediante las siguientes designaciones.

- Cantidad mínima : **vs**
- Ligero = **s**
- Moderado = **m**
- Cantidad excesiva = **x**

#### **4.1.5.- ENSAYO DE EVALUACIÓN DE DEFECTOS DEL RECUBRIMIENTO ORGÁNICO.**

En el caso de los recubrimientos orgánicos a través de la norma UNE-EN ISO 4628:2003 "Pinturas y barnices. Evaluación de la degradación de los recubrimientos. Designación de la intensidad, cantidad y tamaño de los tipos más comunes de defectos".

El estudio visual de la superficie deteriora del recubrimiento se centra en la posible formación de ampollas, de acuerdo con la ISO 4628-2, y evolución del grado de oxidación., de acuerdo con la ISO 4628-3.

La valoración del grado de “ampollamiento” describe las ampollas del recubrimiento en términos de cantidad (densidad) y tamaño asociadas a fotografías que proporciona la norma ISO 4628-2, como también la dimensión aproximada del área respecto del total, expresada como porcentaje.

Para la valoración del grado de corrosión (Ri), se describe el grado de formación de óxido (que rompe y atraviesa la película) sobre una superficie pintada tomando como referencia patrones fotográficos dados en la norma ISO 4628-3.

Por tanto el grado de oxidación se expresa como el Ri correspondiente a cada una de las probetas con respecto al porcentaje de área oxidada según la siguiente tabla.

**Tabla 4.** Grado de oxidación (Ri) según porcentaje de área oxidada.

Grado de oxidación	Área oxidada (%)
Ri 0	0
Ri 1	0,05
Ri 2	0,5
Ri 3	1
Ri 4	8
Ri 5	40-50

Esta norma UNE EN ISO 4628:2003, también evalúa el grado de agrietamiento en el apartado 4 y el grado de descamación del recubrimiento orgánico en el apartado 5.

## **4.2.-DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.**

### **4.2.1.- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO ORGÁNICO.**

El método de ensayo para la determinación de espesores de recubrimiento orgánico se realiza según el método de inducción magnética, UNE-EN ISO 2808:2007 “Pinturas y barnices. Determinación del espesor de película”.

Mediante el uso del medidor de espesor MEGA-CHECK FN, Se toman mediciones de espesor de capa seca tanto en la probeta con protección epoxi como la probeta galvanizada con imprimación de cinc y pintura acrílica, ya que el medidor de espesores utilizado para el ensayo permite medir espesores de recubrimiento orgánico sobre substrato galvanizado, modelo FN.

### **4.2.2.- ENSAYOS REALIZADOS.**

Para el caso de las probetas con recubrimiento orgánico se han tomado hasta 6 mediciones en diferentes zonas del espesor de capa seca en ambas caras de la probeta, de las que obtendremos un valor medio aproximado.

La toma de medidas de espesor de recubrimiento se ha realizado antes comienzo del ensayo de acondicionamiento atmosférico (ciclo 0), durante las inspecciones periódicas programadas para la inspección visual y una vez finalizado el ensayo.

En cuanto al espesor de recubrimiento metálico, se tomarán medidas de masa de la probeta antes del inicio de ensayo en cámara Kesternich y al final de éste. También se toman las medidas de las dimensiones de la probeta mediante un pie de rey digital.

Los resultados de los valores del espesor del recubrimiento se recogen en tablas para estudiar la evolución de las pérdidas de masa producidas por la corrosión sulfúrica durante el proceso de envejecimiento en la cámara climática.

## **4.3.- GRAVIMETRÍA DE LAS PROBETAS.**

### **4.3.1.- FUNDAMENTO DE LA TÉCNICA.**

El método de ensayo utilizado en la determinación de la masa es el ME 12 LMAT, en la que se mide de forma periódica la masa de cada una de las probetas seleccionadas para ensayo, con el fin de cuantificar la pérdida de masa que sufren debido al proceso de envejecimiento corrosivo en la cámara de acondicionamiento climático.

### **4.3.2. ENSAYOS REALIZADOS.**

Se determina, mediante balanza analítica, la masa en gramos de cada una de las probetas destinadas a ensayo.

Se han realizados dos mediciones de masa, la primera medición antes de introducir las probetas en la cámara climática, ciclo 0, y una segunda medición al finalizar el ensayo de corrosión atmosférica acelerada, ciclo X.



# Capítulo 5

RESULTADOS: SEGUIMIENTO DE LA  
CORROSIÓN ACELERADA

## **5.1- CONTROL Y EVOLUCIÓN DE LAS PROBETAS.**

En este capítulo se evaluará el estado de las probetas sometidas a acondicionamiento en cámara ácida en cada uno de los ciclos seleccionados a inspección.

Al finalizar el ciclo destinado a inspección, las probetas son tratadas para su toma de datos en la que se evalúa el aspecto visual, destacando los aspectos más relevantes de la evolución de la corrosión sobre la superficie del recubrimiento. También se toman medidas de espesor de recubrimiento orgánico en cada uno de los ciclos.

En cuanto a la pérdida de masa de las probetas, se han tomados datos de la masa de cada una de ellas antes del envejecimiento y una vez finalizado el ensayo de exposición atmosférica en cámara Kesternich.

## **5.2.- CICLO 0. INSPECCIÓN VISUAL INICIAL.**

Evaluación de las probetas antes de ser sometidas al acondicionamiento atmosférico controlado. Se tomarán medidas de espesor inicial de recubrimiento sobre el acero base así como la masa de las probetas.

### **5.2.1.- INSPECCIÓN VISUAL.**

En general, las superficies de las probetas se encuentran en buenas condiciones, los recubrimientos son uniformes en ambas caras de las probetas.

El defecto más significativo de todas las probetas es el taladro realizado para la sujeción de las mismas en la cámara. Este agujero deja al descubierto el metal base.

Otro defecto, apreciable en el recubrimiento con pintura acrílica, es el desprendimiento de pequeñas escamas de pintura azul dejando a exposición la pintura de imprimación de cinc, se pueden apreciar estos defectos en los bordes de la probeta, como muestra la siguiente figura 11.

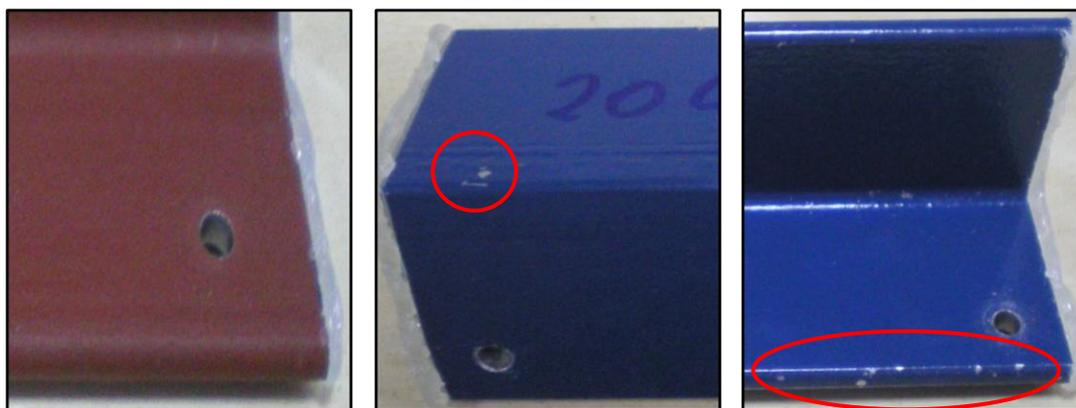


Figura 11. Defectos sobre los recubrimientos. Taladros y desprendimiento de pintura.

### 5.2.2.- ESPESOR INICIAL DE RECUBRIMIENTO.

Las distintas mediciones del espesor inicial de recubrimiento orgánico sobre cada una de las caras de las probetas están recogidas en la tabla 5. En ella se determina el valor medio del espesor así como la desviación estándar de las mediciones.

	Muestra 3: RM-20C		Muestra 4: RO-20C	
	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
ESPESOR ( $\mu\text{m}$ )	165	161	24,1	30,9
	181	148	32,7	25,8
	157	159	27,5	32,2
	163	168	31,8	23,6
	175	170	25,6	31,7
	151	158	29,3	28,4
	<b>Valor medio</b>	<b>165,33</b>	<b>160,66</b>	<b>28,51</b>
Máximo	181	170	32,7	32,2
Mínimo	151	148	24,1	23,6
<b>Desviación estándar</b>	<b>11,13</b>	<b>7,89</b>	<b>3,41</b>	<b>3,48</b>

Tabla 5. Espesor inicial de recubrimiento orgánico.

### 5.2.3.- MASA INICIAL DE LAS PROBETAS.

Mediante la balanza analítica se han obtenido los valores de masa para cada una de las probetas seleccionadas para el ensayo.

Probeta	Código	Masa Inicial (g)
1	SR-20C	<b>274,552</b>
2	RG-20C	<b>298,038</b>
3	RM-20C	<b>285,508</b>
4	RO-20C	<b>269,693</b>

Tabla 6. Masa inicial de las probetas.

### 5.3.- CICLO I.

A continuación se muestran las imágenes de las probetas tras las primeras 24 horas de exposición en cámara Kesternich.

#### 5.3.1.- INSPECCIÓN VISUAL.

- **Probeta 1: SR-20C.**

En ambas caras se observa que la corrosión roja ha afectado a la totalidad de la superficie del acero S 275 JR, produciendo descamaciones del acero corroído. Esta corrosión roja es producida por los óxidos de hierro y sulfatos ferrosos resultantes de la exposición a dióxido de azufre en la cámara.

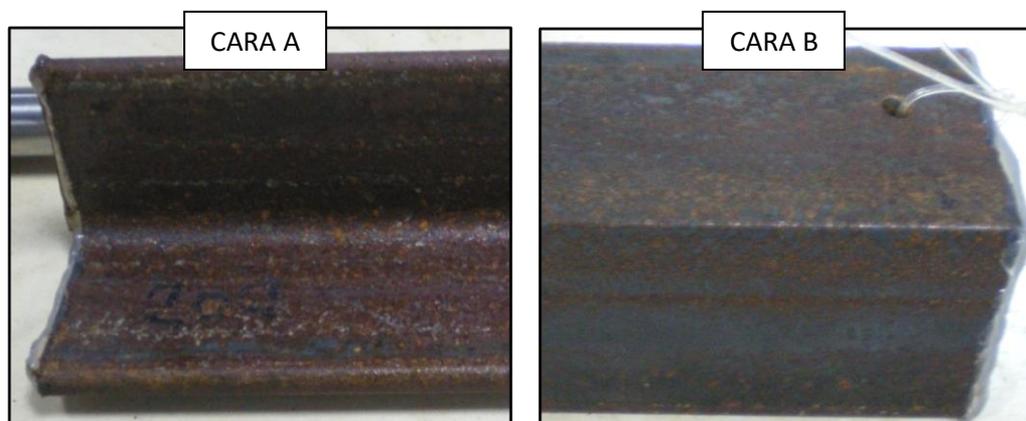


Figura 12. Imágenes probeta SR-20C. Ciclo I.

- **Probeta 2: RG-20C**

En ambas caras de la probeta se aprecia corrosión blanca, este color es fruto de la aparición de óxidos de cinc ( $ZnO$ ) en la superficie galvanizada, con el resultado de una capa de óxido grisácea que ocasiona la pérdida del brillo metálico característico de este proceso de protección.

Se observa corrosión roja en el metal base descubierto en el orificio, provocando un leve escurrido sobre la superficie de la cara A de la probeta.

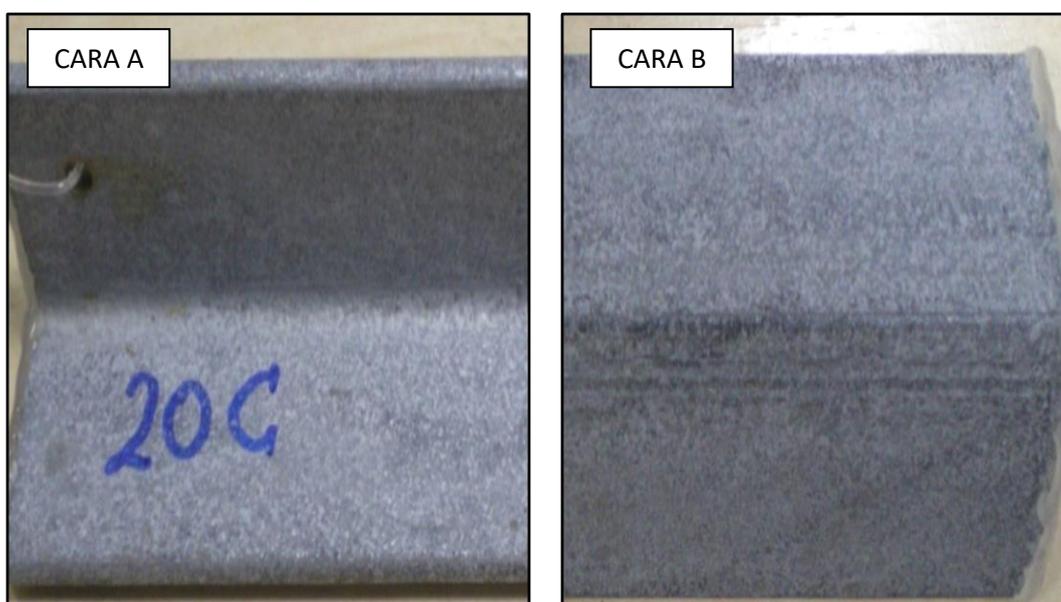


Figura 13. Imágenes probeta SG-20C. Ciclo I.

- **Probeta 3: RM-20C**

En la superficie de la probeta comienzan a aparecer pequeñas ampollas entre la imprimación y la pintura acrílica, estas ampollas se encuentran cerca de las zonas donde se han producido defectos superficiales.

Además, por las dos caras de la probeta aparecen varias picaduras de corrosión blanca como se puede apreciar en la figura 14.

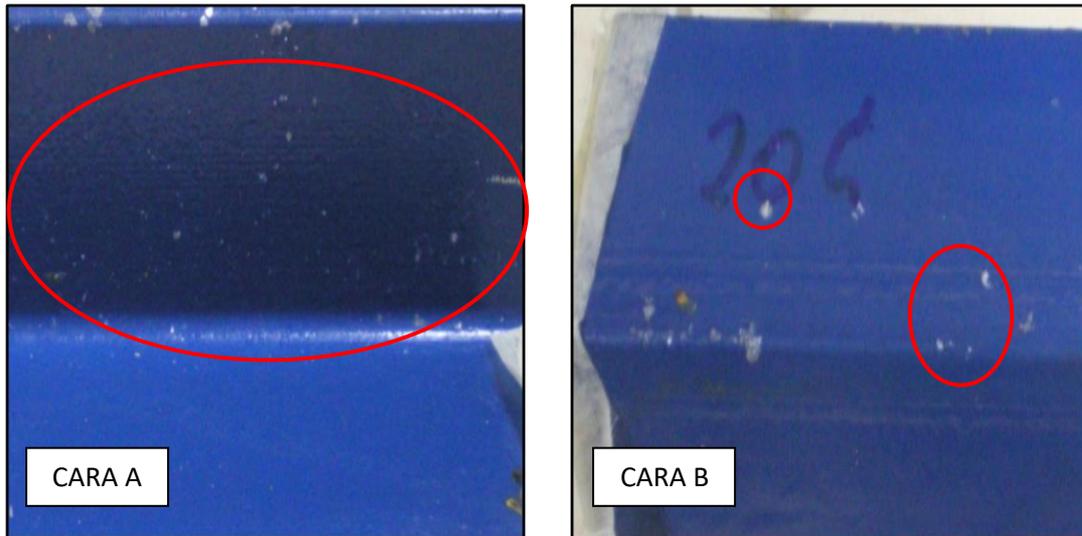


Figura 14. Picaduras blancas en probeta SM-20C. Ciclo I.

- **Probeta 4: RO-20C**

En la cara A de la probeta aparece corrosión granular uniforme en una zona de la superficie, zona marcada en la figura 15. En esta zona se aprecia un crecimiento de ampollas en la superficie afectada por la corrosión.

Tanto en la cara A como en la B se detecta corrosión roja en forma de picaduras amarillas sobre la superficie, como se puede ver la figura 15, cara B.

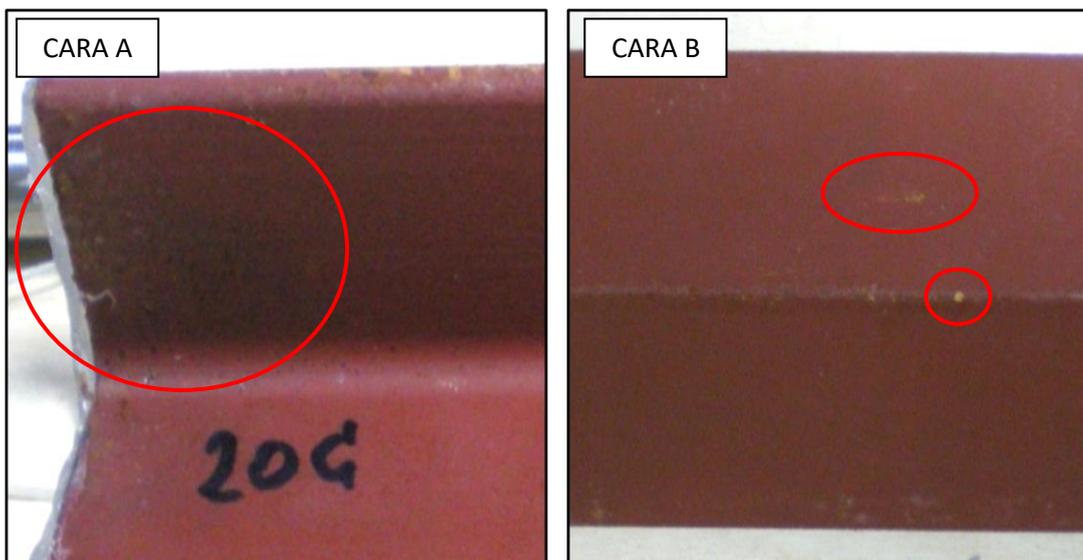


Figura 15. Imágenes probeta RO-20C. Ciclo I.

### 5.3.2.- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.

En la tabla 7, se muestran los valores obtenidos de las mediciones de espesor de capa seca para cada uno de los recubrimientos orgánicos tras el primer ciclo de exposición en cámara climática.

GRUPO 2	Muestra 3: RM-20C		Muestra 4: RO-20C	
	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
ESPESOR ( $\mu\text{m}$ )	171	159	32,4	31,9
	153	167	25,2	27,6
	168	152	28,9	32,6
	166	154	30,8	24,8
	183	162	29,7	31,2
	156	171	26,5	28,3
	<b>Valor medio</b>	<b>166,16</b>	<b>160,83</b>	<b>28,91</b>
Máximo	183	171	32,4	32,6
Mínimo	153	152	25,2	24,8
<b>Desviación estándar</b>	<b>10,83</b>	<b>7,36</b>	<b>2,68</b>	<b>3,01</b>
<b>Pérdida de espesor</b>	<b>-0,83</b>	<b>-0,17</b>	<b>-0,40</b>	<b>-0,64</b>

Tabla 7. Medidas de espesor de recubrimiento. Ciclo I.

### 5.4.- CICLO III.

A continuación se muestran las imágenes de las probetas tras 72 horas de exposición en cámara Kesternich.

#### 5.4.1.- INSPECCIÓN VISUAL.

- **Probeta 1: SR-20C**

Avance de la corrosión roja sobre la superficie, encontrándose totalmente corroída.

Tanto en la cara A como la B, la superficie comienza a descamarse desprendido finas láminas de óxido metálico dejando al acero base al descubierto, como se señala en la figura 16, cara A.

Hay gotas ácidas que se han depositado sobre la cara A de la probeta, éstas se han secado durante la segunda etapa del ciclo de exposición en la cámara

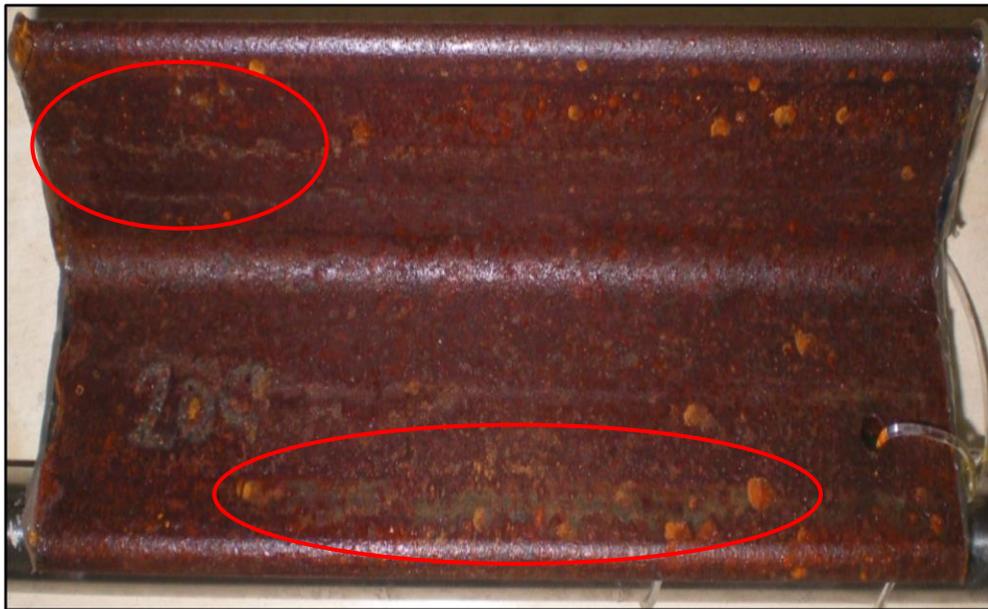


Figura 16. Descamación, cara A. Probeta SR-20C. Ciclo III.

- **Probeta 2: RG-20C**

Se observa un avance de la corrosión blanca sobre la mayor parte del recubrimiento en ambas caras de la probeta, en concreto la zona del extremo de la probeta que se muestra en la figura 17, cara B se aprecia mayor acumulación de corrosión blanca. Sigue existiendo leve corrosión roja en el orificio de la probeta.

Aparición de gran cantidad de gránulos de pequeño tamaño sobre el recubrimiento en la zona del pliegue interno, marcadas en la figura 17, cara A.

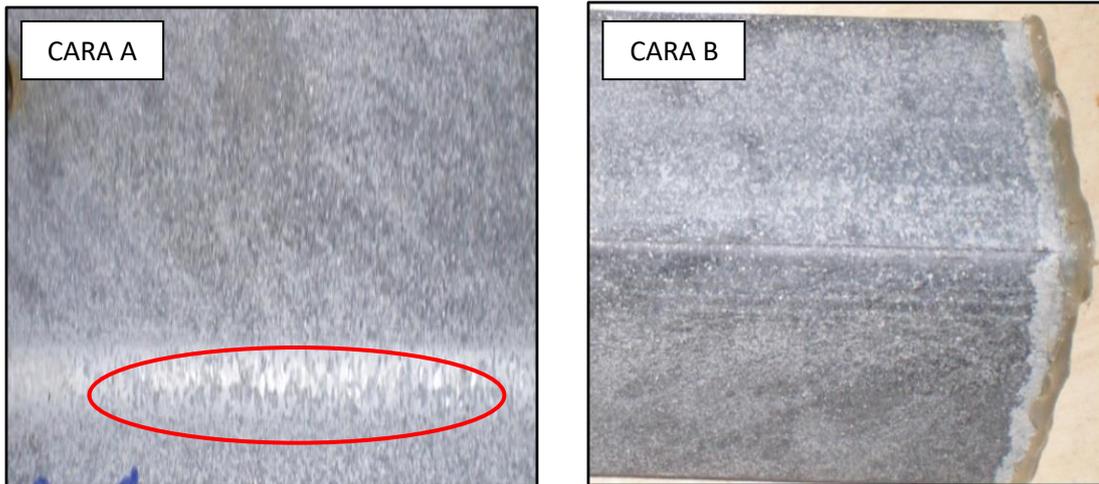


Figura 17. Gránulos, cara A. Cara B. Probeta RO-20C. Ciclo III.

- **Probeta 3: RM-20C**

Crecimiento moderado de ampollas sobre la superficie de la cara A, en algunas de ellas la pintura acrílica se ha desprendido dando lugar a la aparición de corrosión blanca sobre estas zonas afectadas por el ampollamiento en la pintura.

En la cara B se observa el avance de la corrosión blanca a través de las picaduras anteriormente marcadas, así como nuevas aparición de diversas picaduras blancas por el recubrimiento orgánico.



Figura 18. Productos de corrosión y ampollamiento. Probeta RO-20C. Ciclo III.

- **Probeta 4: RO-20C**

Tras tres ciclos de exposición la corrosión roja avanza sobre la cara A, apreciándose diferentes tonalidades de la corrosión en esta zona desde amarilla hasta un color rojo intenso. Aparecen picaduras de corrosión sobre el pliegue, así como pérdida de intensidad del color rojo de la pintura epoxi.

En la cara B, la zona más afectada está cerca del orificio donde hay ampollamiento en el contorno del mismo, además de un aumento de la corrosión roja alrededor de esta zona.



Figura 19. Zonas corroídas probeta RO-20C. Ciclo III.

#### **5.4.2.- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.**

En la tabla 8, se muestran los valores obtenidos de las mediciones de espesor de capa seca para cada uno de los recubrimientos orgánicos tras el tercer ciclo de exposición en cámara climática.

GRUPO 2	Muestra 3: RM-20C		Muestra 4: RO-20C	
	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
ESPESOR ( $\mu\text{m}$ )	156	144	26,5	27,2
	174	156	31,7	31,5
	168	175	31,8	33,9
	172	164	35,2	28,7
	180	149	27,1	26,8
	153	179	28,2	29,4
	<b>Valor medio</b>	<b>167,16</b>	<b>161,16</b>	<b>30,08</b>
Máximo	180	179	35,2	33,9
Mínimo	153	144	26,5	26,8
<b>Desviación estándar</b>	<b>10,59</b>	<b>14,05</b>	<b>3,38</b>	<b>2,71</b>
<b>Pérdida de espesor</b>	<b>-1,83</b>	<b>-0,5</b>	<b>-1,57</b>	<b>-0,82</b>

Tabla 8. Medidas de espesor de recubrimiento. Ciclo III.

## 5.5.- CICLO V.

A continuación se muestran las imágenes de las probetas tras 120 horas de exposición en cámara Kesternich.

### 5.5.1.- INSPECCIÓN VISUAL.

- **Probeta 1: SR-20C**

La cara A de la probeta se encuentra totalmente corroída, existiendo zonas donde se ha desprendido acero superficial. La corrosión roja se vuelve a aparecer en las zonas donde este acero se ha desprendido como se puede ver en la zona marcada de la figura 20, cara A.

En cuanto a la cara B de la probeta, al igual que la cara interna, se encuentra corroída toda la superficie. En esta cara se aprecia además como siguen acumulándose gotas de ácido que se han secado sobre la superficie como se muestra en la figura 20, cara B.

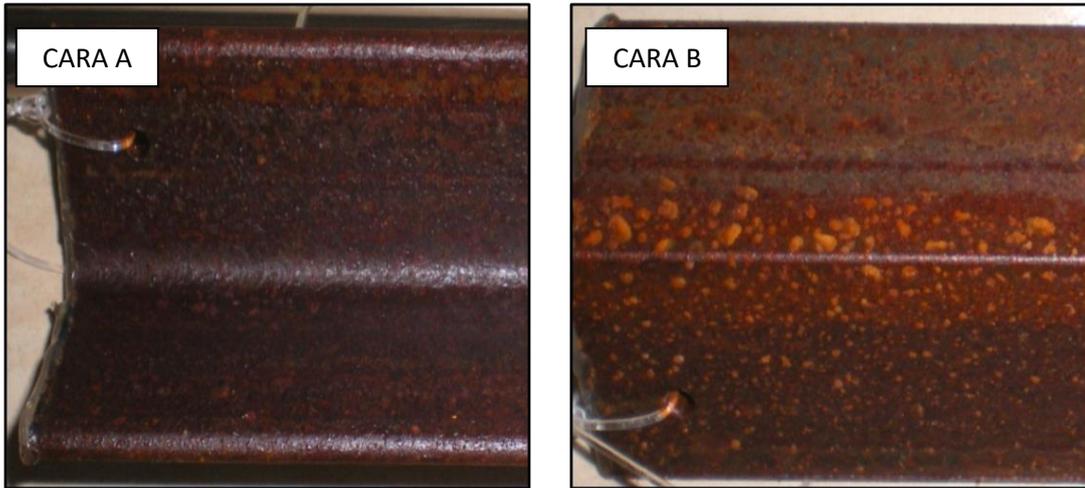


Figura 20. Corrosión en ambas caras de la probeta SR-20C. Ciclo V.

- **Probeta 2: RG-20C**

En ambas cara de la probeta con recubrimiento galvánico el color metálico característico prácticamente ha desaparecido, dejando en su totalidad un aspecto grisáceo por la corrosión blanca del cinc.

En la cara A, destacar el crecimiento de pequeñas ampollas en el recubrimiento en la zona del pliegue y zonas cercanas.

En la cara B, la corrosión blanca más significativa avanza desde el extremo hacia el interior de la superficie.

Además el aspecto del recubrimiento galvánico empieza a asemejarse a la piel de serpiente, dando lugar a una superficie escamada, pero sin desprendimiento de recubrimiento.

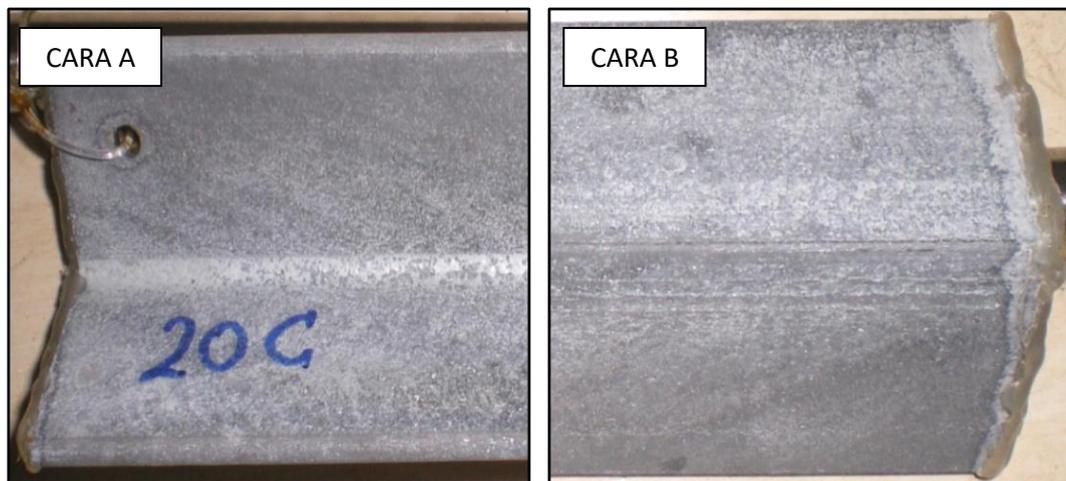


Figura 21. Caras probeta RGO-20C. Ciclo V.

- **Probeta 3: RM-20C**

Avance de la corrosión blanca a través de las ampollas que se han salido sobre el recubrimiento de pintura acrílica, estas han aumentado de tamaño y la superficie interna (cara A) se ve realmente deteriorada por la corrosión blanca.

En el pliegue interno aparece una picadura de corrosión roja además de la corrosión roja que aparece en el orificio, marcada en la figura cara A.

En los bordes de la probeta se ha desprendido pintura acrílica, dejando la imprimación de cinc al descubierto.

En la cara B de la probeta se ve un aumento de las ampollas en el recubrimiento. Empiezan a aparecer más picaduras blancas sobre la superficie pero a un ritmo más moderado que la superficie interna.

Existen pequeños desprendimiento en ambas superficie del recubrimiento, pero se muestra más deteriora la cara interna de la probeta.



Figura 22. Corrosión blanca y roja (marcada), cara A probeta RO-20C. Ciclo V.

- **Probeta 4: RO-20C**

La corrosión roja sigue avanzando sobre la superficie de la cara A, creando zonas donde la pintura epoxy se ve totalmente corroída, al igual que la zona del orificio donde se puede ver como la corrosión se ha alojado en todo el perímetro del mismo. Se aprecian picaduras de diferentes tonalidades por toda la superficie, blancas, amarillas y naranjas. En el pliegue interno sigue el avance de pequeñas manchas negras que aparecen por toda esta zona.

En la cara B de la probeta, sigue el avance de la corrosión cerca del orificio y empieza a corroerse el pliegue exterior, sobre todo en las zonas de los extremos.

En general, sigue el avance de la pérdida de intensidad del color rojo mate del recubrimiento epoxy, la superficie libre de corrosión ha sufrido decoloración de la pintura. Como se puede observar en la siguiente figura 23, la cara A de la probeta es la que se encuentra en peor estado comparada con la cara externa.



Figura 23. Corrosión ácida sobre probeta RO-20C, CARA a. Ciclo V.

## 5.5.2.- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.

En la tabla 9, se muestran los valores obtenidos de las mediciones de espesor de capa seca para cada uno de los recubrimientos orgánicos tras el quinto ciclo de exposición en cámara climática.

GRUPO 2	Muestra 3: RM-20C		Muestra 4: RO-20C	
	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
ESPESOR ( $\mu\text{m}$ )	163	157	34,3	28,7
	175	172	27,9	32,6
	162	168	32,9	33,5
	159	163	28,3	26,9
	156	148	33,4	31,8
	179	166	31,6	30,3
	<b>Valor medio</b>	<b>165,67</b>	<b>162,33</b>	<b>31,43</b>
Máximo	179	172	34,3	33,5
Mínimo	156	148	27,9	26,9
<b>Desviación estándar</b>	<b>9,20</b>	<b>8,64</b>	<b>2,71</b>	<b>2,49</b>
<b>Pérdida de espesor</b>	<b>-0,34</b>	<b>-1,67</b>	<b>-2,92</b>	<b>-1,87</b>

Tabla 9. Medidas de espesor de recubrimiento. Ciclo V.

## 5.6.- CICLO VIII.

A continuación se muestran las imágenes de las probetas tras 192 horas de exposición en cámara Kesternich.

### 5.6.1.- INSPECCIÓN VISUAL.

- **Probeta 1: SR-20C**

En ambas caras de la probeta la corrosión acapara la totalidad de la superficie, como se ha comentado en inspecciones de ciclos anteriores el desprendimiento de óxidos metálicos es generalizado.

La cara A sigue siendo la más afectada, dentro de la gravedad en la que se encuentran ambas, con mayor acumulación de productos ácidos en su superficie.

En la figura 24, cara B, se han marcado zonas donde existe desprendimiento superficial de los óxidos acumulados.

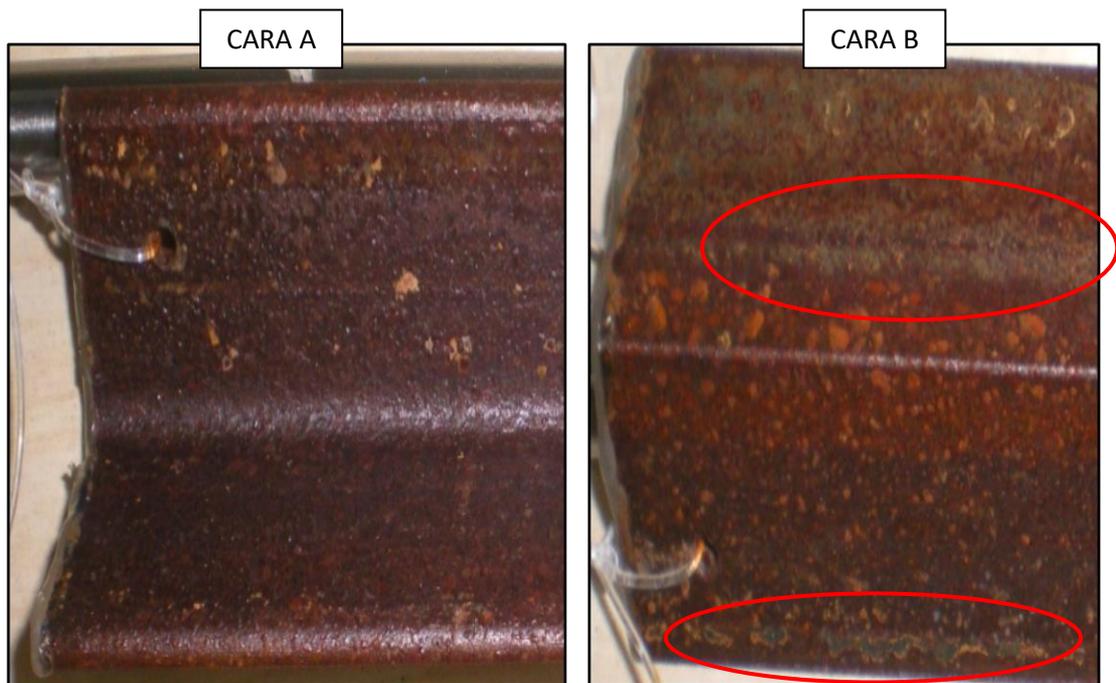


Figura 24. Oxidación y descamación probeta SR-20C. Ciclo VIII.

- **Probeta 2: RG-20C**

Se muestra una disminución uniforme de la capa de óxido grisáceo que recubre la superficie galvanizada. El aspecto del recubrimiento en ambos lados de la probeta se muestra filamentososo como se puede apreciar en la figura 25.

Crecimiento generalizado del número de gránulos existentes en el radio de unión de la probeta.

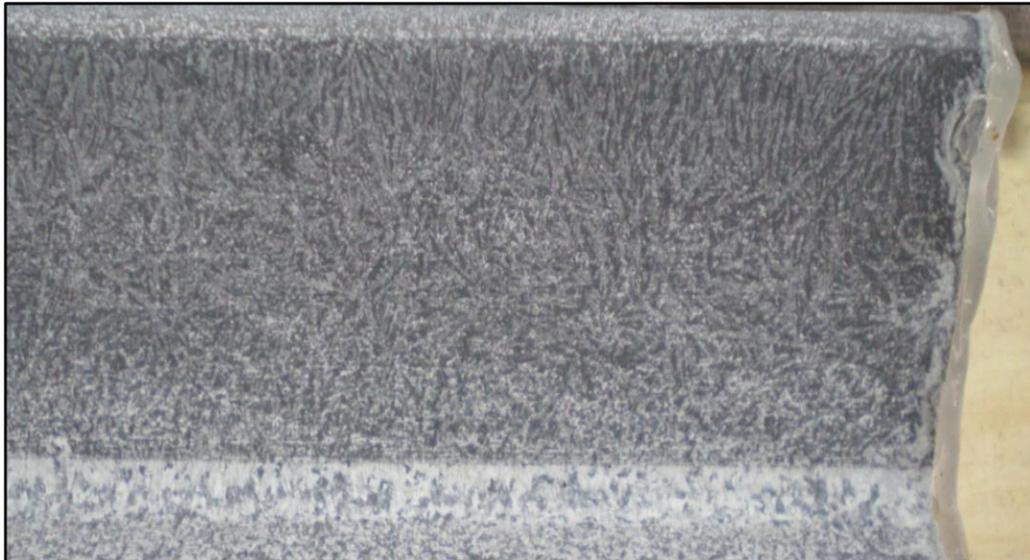


Figura 25. Aspecto superficial la probeta RG-20C, cara A. Ciclo VIII.

- **Probeta 3: RM-20C**

Avance del número de ampollas del recubrimiento acrílico en ambas caras de la probeta. Las superficies tienen un aspecto granulado de forma generalizada.

Crecimiento de corrosión sobre las caras en forma de manchas blancas irregulares y de distintos tamaños, como se muestra en la figura 26.

Se observa pérdida de color en la pintura azul en forma de escurridos en la cara B de la probeta.



Figura 26. Ampollas y corrosión blanca probeta RM-20C. Ciclo VIII.

- **Probeta 4: RO-20C**

Aumento en la superficie de la corrosión granulada en la cara interna de la probeta. También en esta cara aumenta el crecimiento de óxidos metálicos en el pliegue del acero.

El óxido se abre paso a través de la esquina en la cara externa, cara B, a lo largo de toda la superficie de extremo a extremo.

En cuanto a la zona del orificio, donde se ve un aumento de la corrosión roja, se producen escurridos de que atraviesan la cara interna de la probeta, provocando pérdida de color a su paso, así como picaduras sobre el recubrimiento orgánico.



Figura 27. Cara A probeta RO-20C. Ciclo VIII.



Figura 28. Cara B probeta RO-20C. Ciclo VIII.

### 5.6.2.- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.

En la tabla 10, se muestran los valores obtenidos de las mediciones de espesor de capa seca para cada uno de los recubrimientos orgánicos tras el octavo ciclo de exposición en cámara climática.

GRUPO 2	Muestra 3: RM-20C		Muestra 4: RO-20C	
	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
ESPESOR ( $\mu\text{m}$ )	157	171	32,1	28,6
	163	165	29,5	32,4
	173	158	30,5	32,9
	166	154	33,4	31,6
	178	167	27,6	31,3
	152	149	31,2	27,9
	<b>Valor medio</b>	<b>164,83</b>	<b>160,67</b>	<b>30,71</b>
Máximo	178	171	33,4	32,9
Mínimo	152	149	27,6	27,9
<b>Desviación estándar</b>	<b>9,71</b>	<b>8,41</b>	<b>2,03</b>	<b>2,15</b>
<b>Pérdida de espesor</b>	<b>0,50</b>	<b>0,01</b>	<b>-2,14</b>	<b>-2,02</b>

Tabla 10. Medidas de espesor de recubrimiento. Ciclo VIII.

## 5.7.- CICLO X. INSPECCIÓN VISUAL FINAL.

Una vez finalizado este último ciclo de exposición, las piezas han sido sometidas a ensayo de envejecimiento atmosférico corrosivo durante un período de 240 horas en cámara climática, las probetas son liberadas del soporte y llevadas a inspección en una sala con buena iluminación.

- **Probeta 1: SR-10C**

Corrosión roja generalizada y uniforme, formándose otra vez una capa de productos de corrosión acumulados en las superficies de la probeta.

Esta capa de óxidos acumulados en ambas caras de la probeta comienza de nuevo a desprenderse en algunas zonas.

La silicona del extremo se ha corroído dejando productos corrosivos sobre el acero base, provocando escurridos en ambos lados de la superficie.

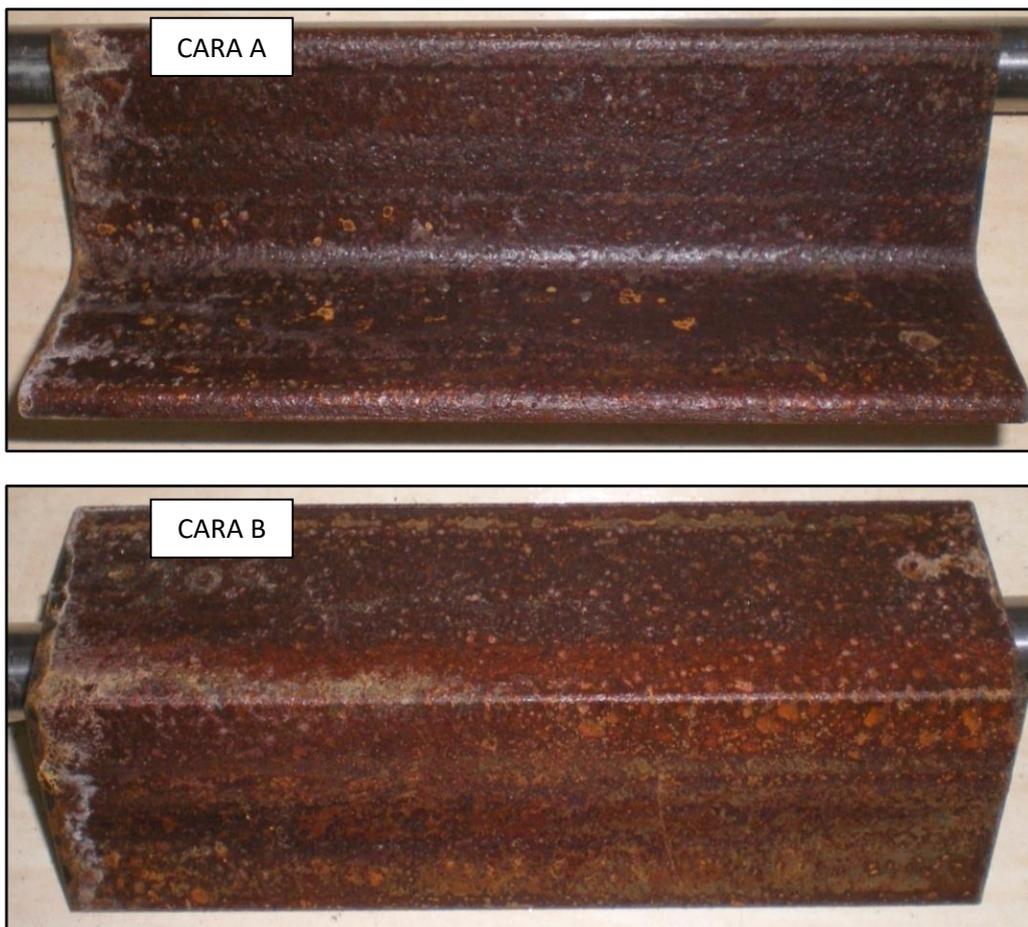


Figura 29. Caras probeta SR-20C. Ciclo X.

- **Probeta 2: RG-20C**

El aspecto superficial, después del último ciclo de exposición, luce mayoritariamente blanco perdiendo a su vez de forma generalizada y uniforme el brillo metálico que adquiere la probeta al ser recubierta por cinc.

En ambas caras la acumulación de productos ácidos sobre la superficie es abundante, existiendo una mayor densidad de capa de óxidos depositados por la zona que rodea el radio de unión, donde a su vez se han generado gran cantidad de gránulos que adquieren a esta zona un aspecto de rugosidad superficial significativa.

Destacar las zonas donde se ha desprendido la capa de óxidos blancos la superficie del recubrimiento metálico posee un aspecto filamentososo de manera generalizada por toda la superficie.

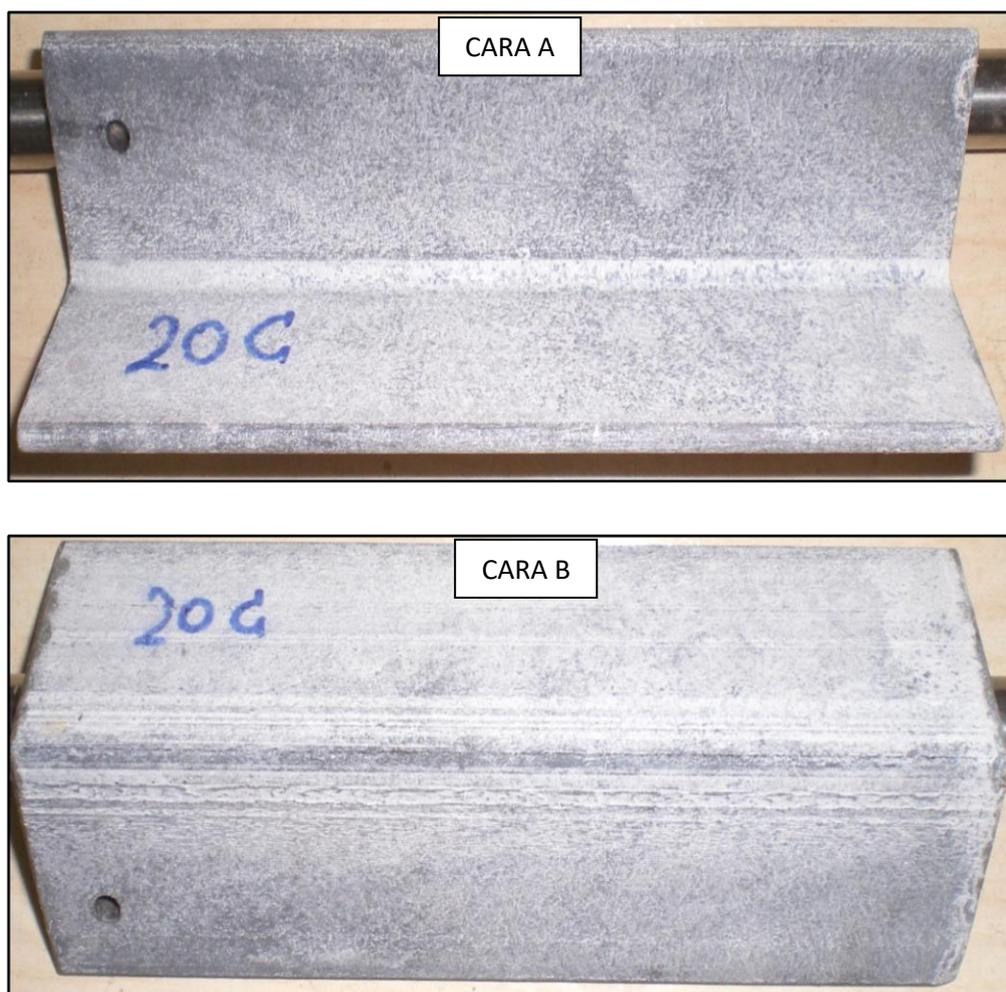


Figura 30. Caras probeta RG-20C. Ciclo X.

- **Probeta 3: RM-20C**

Crecimiento abundante de corrosión blanca en ambas caras sobre la pintura acrílica, así como las zonas donde ha habido descamación de la pintura ya sean en los defectos iniciales o los producidos durante el proceso de acondicionamiento en la cámara. Además estas zonas descamadas donde se muestra la imprimación de cinc han perdido el brillo metálico característico.

En las zonas donde existen imperfecciones, como el orificio o las zonas donde se ha desprendido la pintura acrílica, ha aumentado el número de ampollas. En general, existen gran cantidad de ampollas por toda la superficie de la probeta, en especial la cara B en las que se encuentran las de mayor tamaño.

Aparición de grietas pequeñas por toda la pintura acrílica, provocando un aspecto escamado como piel de serpiente. También se observa el aumento de la pérdida de tonalidad azul ambas superficies.

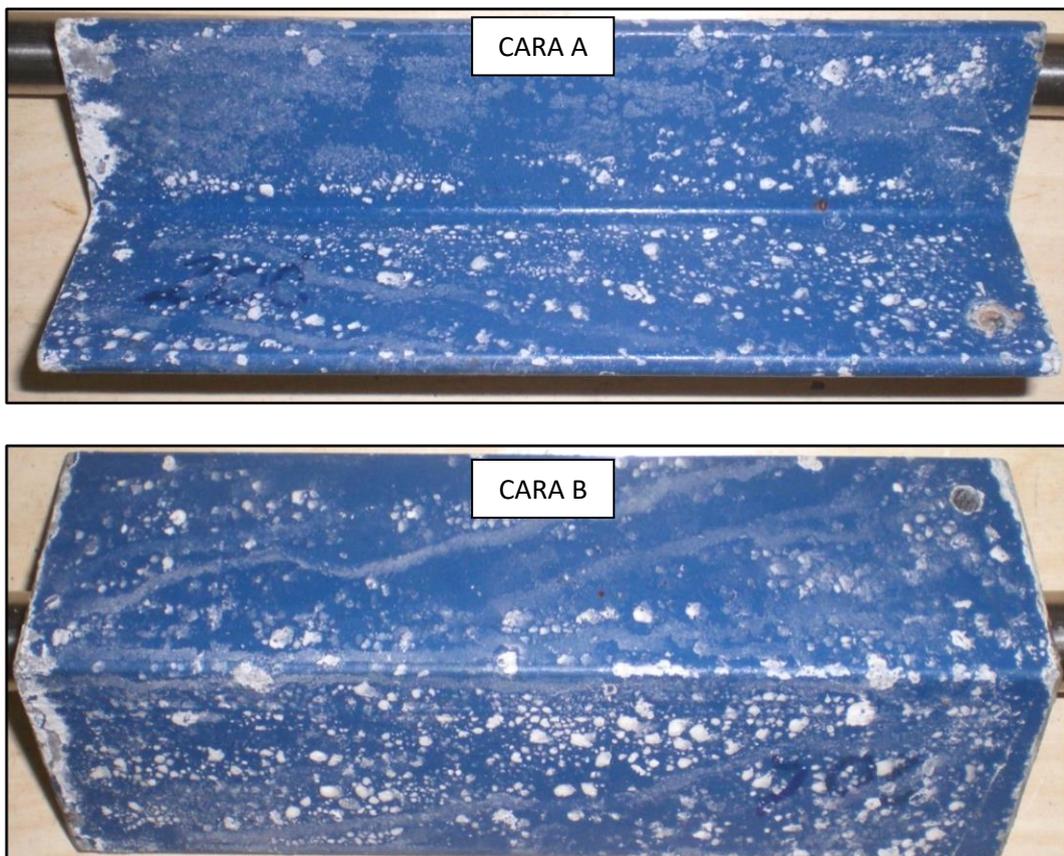


Figura 31. Caras probeta RM-20C. Ciclo X.

- **Probeta 4: RO-20C**

Avance generalizado de la corrosión roja sobre el recubrimiento en ambas caras de la probeta. En la cara interna la corrosión como hemos visto nace de los extremos y desde el orificio provocando escurrido que se expanden sobre la mayor parte de la superficie, deteriorando la calidad visual de la pintura.

En la cara B las zonas más afectadas por la corrosión es la zona que rodeo el orificio y también por toda la extensión del vértice.

La zona del radio de unión en la cara A, más próxima al extremo del orificio se muestra descamada, se ha desprendido pintura y se han acumulado productos de corrosión esta región.

Aumento del número de ampollas en las regiones donde hay mayor acumulación de óxidos corrosivos, vértice, pliegue, extremos y alrededor del orificio.

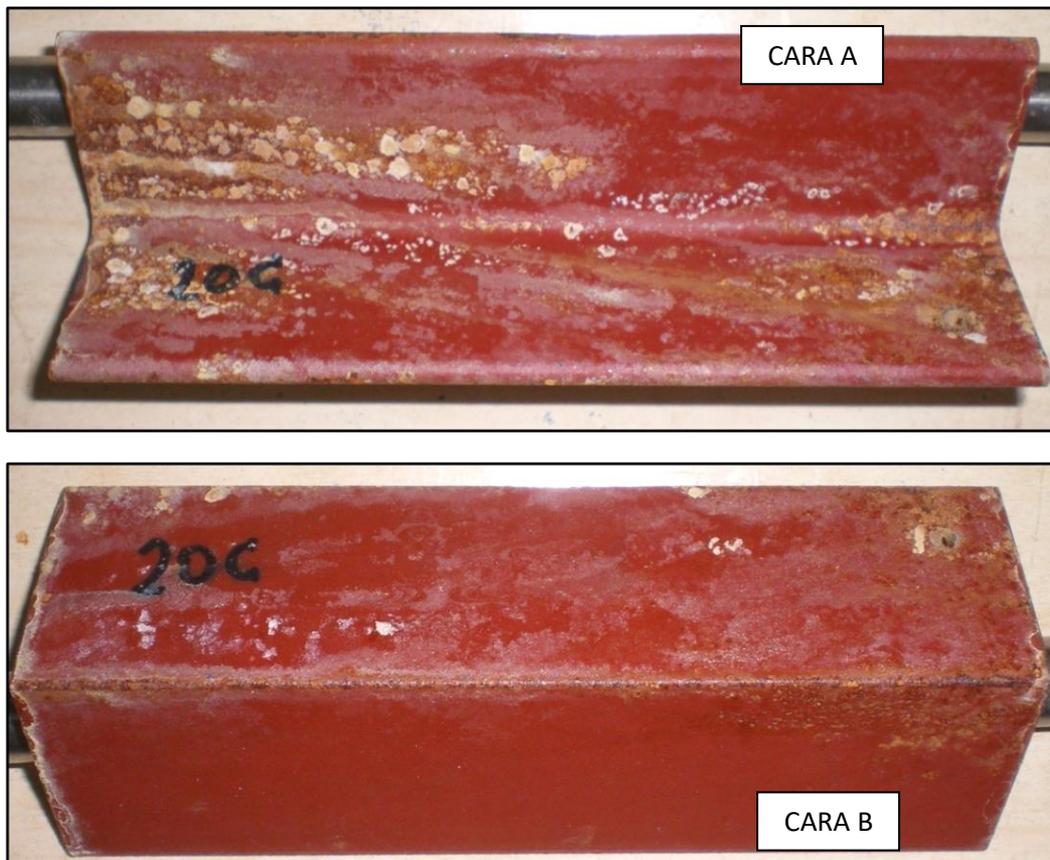


Figura 32. Corrosión probeta RO-20C. Ciclo X.

## **5.8.- CLASIFICACIÓN FINAL DE PROBETAS CON PROTECCIÓN SOMETIDAS A ENSAYO DE CORROSIÓN.**

Mediante la utilización de la normas previamente citadas para la clasificación de los tipos de deterioro de cada uno de los recubrimientos, que junto al seguimiento visual realizado, se caracteriza cada una de las probetas protegidas según los parámetros y designaciones establecidas en cada una de las normas empleadas para la evaluación del comportamiento ante la corrosión del recubrimiento protector sobre el sustrato de acero S 275 JR.

### **5.8.1.- PROBETA CON RECUBRIMIENTO GALVÁNICO.**

- Probeta RG-20C

La exposición a ciclos en atmósfera húmeda con contenido en dióxido de azufre no ha afectado prácticamente al acero base S 275 JR, solo hay corrosión visible en el acero base en la zona del orificio, por lo que no se tomará para la clasificación final.

Clasificación del comportamiento del recubrimiento catódico ( $R_p/R_A$ ):

Probeta donde el metal base no está corroído en ninguna zona ( $R_p=10$ ), la probeta presenta una excesiva presencia de productos de corrosión formados por el recubrimiento catódico ( $R_A$ ) que cubre el 70% de la superficie total: 10/0 x D.

También se aprecia una moderada presencia de ampollas en la cara A (superficie de radio de unión) obtenidas por electrodeposición que no llegan a penetrar sobre el metal base, las ampollas afectan a la superficie en menos del 0,1 % respecto a la tota: 9 m G.

### 5.8.2.- PROBETAS CON RECUBRIMIENTO ORGÁNICO.

Tras los ciclos de corrosión, establecidos los efectos de los defectos en el recubrimiento acrílico y epoxi, y utilizando las designaciones dadas por la norma correspondiente se obtienen la siguiente clasificación:

- Probeta RM-20C
  - Región y Grado de Ampollamiento.
    - Cara A: 3(S3)
    - Cara B: 3(S4)
  - Región y Grado de Oxidación.
    - Cara A: Ri 4
    - Cara B: Ri 4
  - Región y Grado de Agrietamiento.
    - Cara A: 2(S3) a
    - Cara B: 2(S3) a
  - Región y Grado de Descamación.
    - Cara A: 2(S2) a
    - Cara B: 2(S2) a
  
- Probeta RO-20C
  - Región y Grado de Ampollamiento.
    - Pliegue interno cara A: 3(S5)
  - Región y Grado de Oxidación.
    - Cara A: Ri 4
    - Cara B: Ri 3
    - Pliegue interno: Ri 4
    - Vértice externo: Ri 5

Decoloración entorno al 50 % de la superficie total pero sin desprendimientos de pintura ni agrietamiento.

Los efectos de las condiciones ambientales controladas en laboratorio al que se sometieron las probetas llevan a la formación de productos de corrosión de diversa composición química, morfología y propiedades protectoras.

Entre los productos de corrosión hallados, además de los óxidos y oxohidróxidos esperables, se encuentran sulfatos y sulfitos de distinta composición y grado de hidratación, distribuidos en capas discretas. En la etapa inicial se forman los sulfatos y sulfitos, y posteriormente se desarrollan y estabilizan los oxohidróxidos y óxidos en la capa adyacente al metal.

### 5.9.- ESPESOR FINAL DE RECUBRIMIENTO.

Últimas mediciones del espesor de recubrimiento orgánico, tras 240 horas en cámara.

	Probeta 3: RM-20C		Probeta 4: RO-20C	
	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
ESPEJOR ( $\mu\text{m}$ )	168	170	29,3	28,6
	157	161	30,7	28,3
	168	148	29,5	31,9
	173	164	26,9	29,4
	151	153	28,7	29,1
	163	157	32,6	32,2
	<b>Valor medio</b>	<b>163,33</b>	<b>158,83</b>	<b>29,61</b>
Máximo	173	170	32,6	32,2
Mínimo	151	148	26,9	28,6
<b>Desviación estándar</b>	<b>8,12</b>	<b>7,88</b>	<b>1,92</b>	<b>1,69</b>
<b>Pérdida de espesor</b>	<b>2,00</b>	<b>1,83</b>	<b>-1,10</b>	<b>-1,16</b>

Tabla 11. Medidas de espesor de recubrimiento. Ciclo X.

Durante el ensayo de corrosión acelerada se ha realizado un seguimiento de las pérdidas de espesor de las probetas ensayadas con las correspondientes desviaciones estándar.

Tras analizar los datos de las pérdidas de espesor del recubrimiento de las probetas, se concluye que no hay pérdidas significativas de espesor de película seca debido a los ciclos corrosivos a los que son sometidas las probetas.

Como se observa en las tablas de espesores en cada uno de los ciclos de inspección, el método utilizado para la medida del espesor de los recubrimientos tiene unas desviaciones estándar mayores que las supuestas pérdidas detectadas, esto es debido a que el espesor del recubrimiento es muy irregular en las probetas y se han realizado varias medidas asignándole a cada cara el valor de la media de todos los valores obtenidos, por lo que la variación del valor medio del espesor puede ser debida al propio método de medida.

Sin embargo se puede afirmar que si hubiera pérdidas de espesor significativo debido a la corrosión se hubieran detectado al ser éstas mayores que las desviaciones del método.

No obstante, se ha detectado que a partir del ciclo VIII y solo para la probeta con recubrimiento mixto (probeta galvanizada y recubierta con imprimación de cinc y pintura acrílica) una disminución del espesor que sigue esa tendencia en el último ciclo de exposición como se puede ver en la figura 33, donde se recogen los valores de espesor de recubrimiento orgánico en cada cara de las probetas por cada ciclo de ensayo de inspección.

Para confirmar que se trata de una desviación de la medida o de algún fenómeno ocurrido en el recubrimiento sería necesaria realizar un corte transversal de la probeta y observar el interior del recubrimiento y la unión con el metal base.

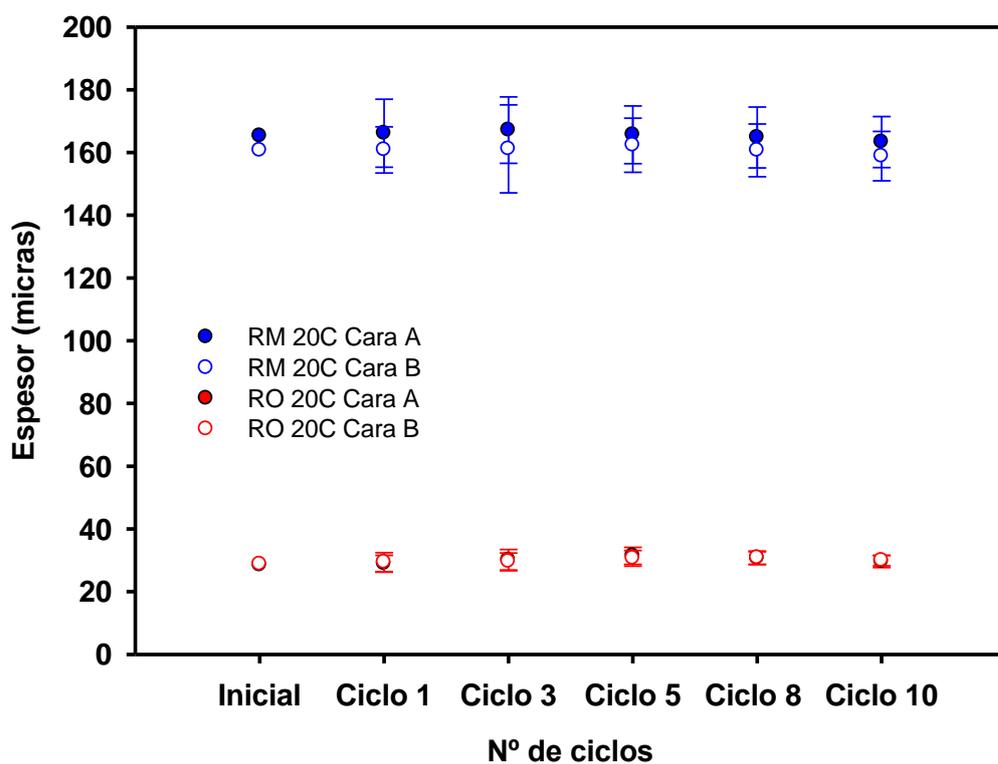


Figura 33. Gráfica espesores de recubrimiento orgánico.

## 5.10.- MASA FINAL DE LAS PROBETAS.

Una vez finalizado el último ciclo de exposición en cámara, se han vuelto a tomar medidas de masa de cada una de las probetas para ver la variación de masa que han sufrido durante este período de acondicionamiento climático, así como el cálculo de espesor de recubrimiento metálico perdido.

Probeta	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Pérdida de masa (%)
SR-20C	<b>273,3323</b>	<b>1,2197</b>	<b>0,44</b>
RG-20C	<b>295,9788</b>	<b>2,0592</b>	<b>0,69</b>
RM-20C	<b>284,5190</b>	<b>0,9890</b>	<b>0,35</b>
RO-20C	<b>269,7222</b>	<b>-0,0292</b>	<b>-0,01</b>

Tabla 9. Resultados de la medida de masa de las probetas tras ensayo corrosivo.

Tras analizar las mediciones de masa llevabas a cabo en el ensayo gravimétrico en el que se compara la masa de inicial y final de las probetas en ensayo de corrosión acelerada, se observa que la pérdida de masa es poco significativa en cada una de probetas estén protegidas catódicamente o mediante protección con pinturas anticorrosivas.

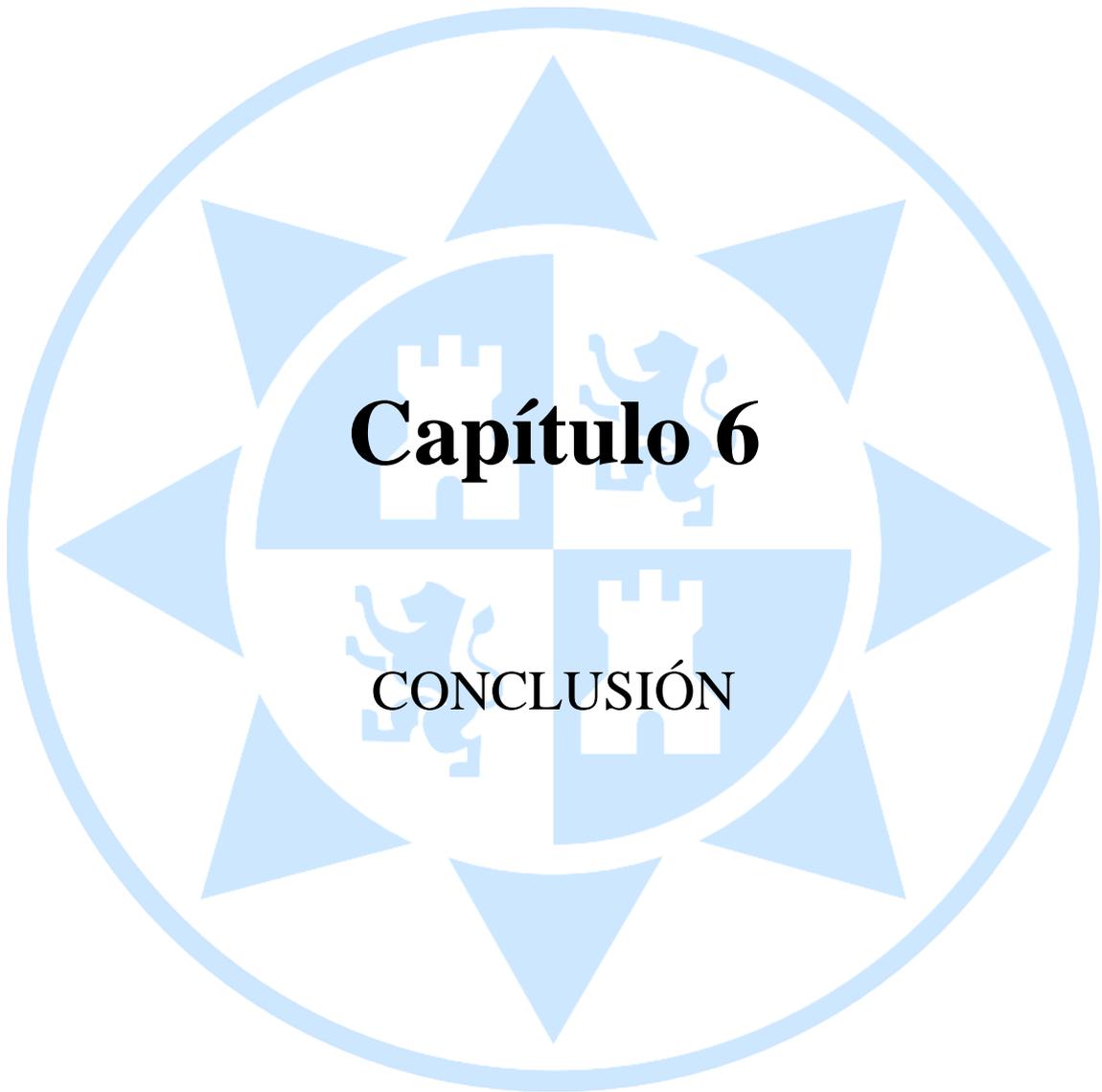
Mencionar que la pérdida de masa en la probeta SG-20C es la que más masa ha perdido, esto se debe al mayor desprendimiento de polvo blanco de óxido de cinc que se ha generado en el proceso electroquímico al actuar como ánodo de sacrificio.

Es de destacar que la probeta de acero S 275 JR que no ha sido recubierta, aunque durante el seguimiento se haya apreciado desprendimiento de capas de acero corroído de la superficie en ambas caras, se han generado una gran cantidad de productos de corrosión que se expanden sobre toda la superficie incrementando el valor de la masa de la probeta.

Los resultados más significativos se podrían obtener tras una limpieza química una vez finalizado el ensayo climático, ya que al eliminar completamente los productos de corrosión generados durante el ensayo es cuando se pone de manifiesto la cantidad de material perdido debido a la corrosión.

Para obtener una mejor interpretación de las pérdidas de peso no basta con determinar la composición química y las proporciones de los productos formados sobre la superficie de los metales, ni los parámetros fisicoquímicos como temperatura, humedad relativa, etc. Para ello es necesario conocer aspectos morfológicos de los productos de corrosión, como el tamaño de partícula, la forma de empaquetamiento, la compacidad, la porosidad, etc. y considerar otros parámetros como la solubilidad y la higroscopicidad, capacidad de absorber la humedad atmosférica, de los diferentes compuestos.

Algunos autores [15] han sugerido para Fe y Zn la formación de complejos de sulfito al adsorberse  $\text{SO}_2$  sobre los óxidos metálicos, a altas concentraciones de  $\text{SO}_2$ . Estos complejos podrían oxidarse por el oxígeno disuelto en el electrolito superficial dando sulfatos o estabilizándose como sulfitos.



# Capítulo 6

CONCLUSIÓN

## 6.1.- CONCLUSIONES OBTENIDAS.

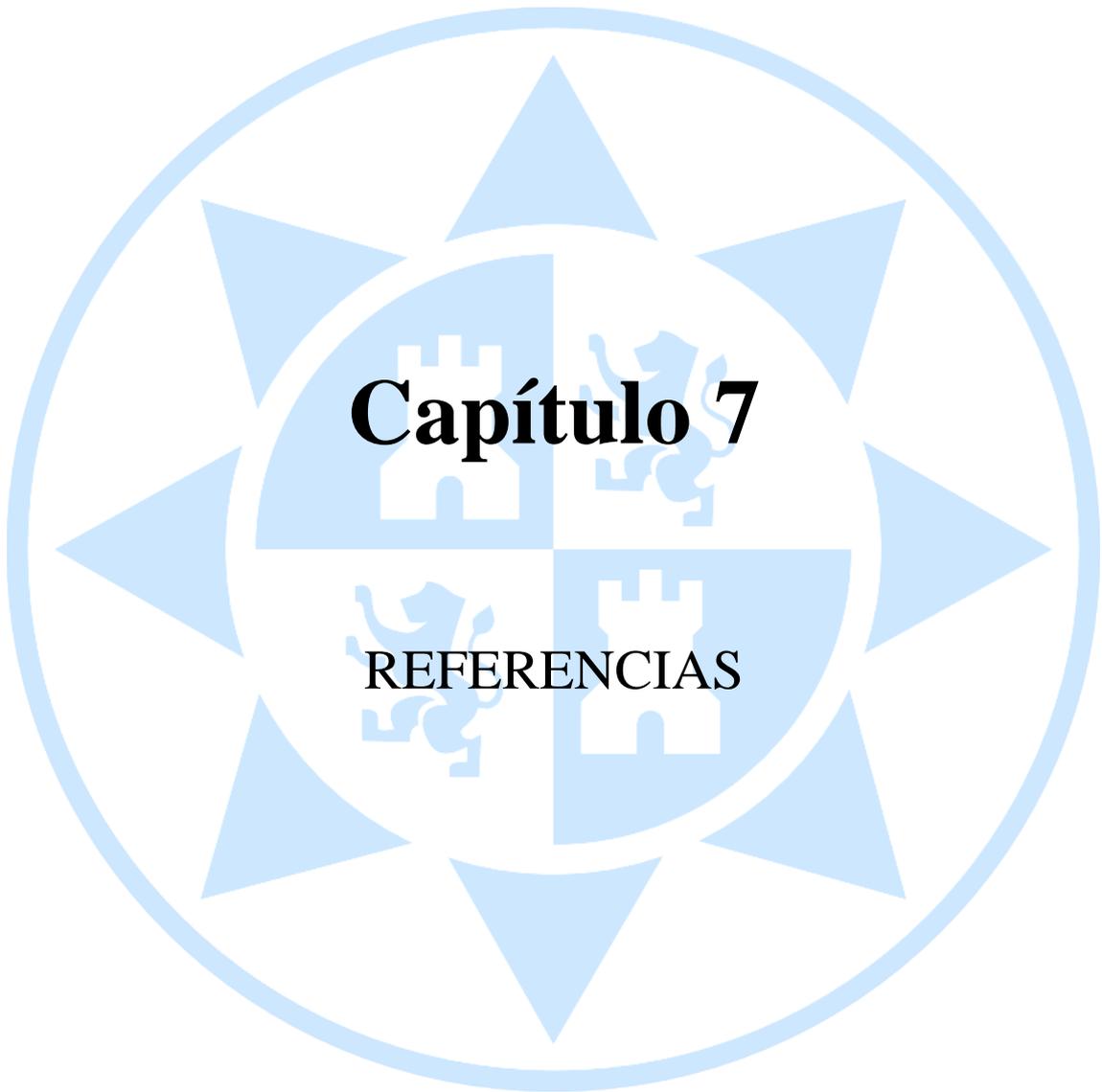
1. Se ha realizado el diseño de un ensayo normalizado con una cámara de acondicionamiento climático tipo Kesternich. Para ello ha sido necesario el empleo de dos normas: la UNE-EN ISO 6988:1996, "Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad." y UNE-EN ISO 3231:1998 "Pinturas y barnices. Determinación de la resistencia a atmósferas húmedas que contienen dióxido de azufre".
2. Empleando la norma UNE EN 10056-1:99. "Dimensiones y características geométricas de los angulares laminados en caliente de lados iguales", se han diseñado las probetas adecuadas para el diseño de los ensayos.
3. Se constata la posibilidad de estudiar diferentes tipos de probetas sin ningún tipo de recubrimiento, galvanizadas, con recubrimiento tipo plástico y también mixto.
4. Del ensayo gravimétrico se extrae, que para obtener una mejor interpretación de las pérdidas de peso en diez ciclos de exposición en cámara climática Kesternich, no basta con determinar la composición química y las proporciones de los productos formados sobre la superficie de los metales, ni los parámetros fisicoquímicos como temperatura, humedad relativa. Para ello es necesario conocer aspectos morfológicos de los productos de corrosión, como el tamaño de partícula, la compacidad, la porosidad y considerar otros parámetros como la solubilidad y la higroscopicidad de los diferentes compuestos.
5. De los ensayos de medidas de espesores orgánicos podemos deducir que las pérdidas de espesor de recubrimiento de las probetas son poco significativas, la medida del espesor de los recubrimientos tiene unas desviaciones estándar

mayores que las supuestas pérdidas detectadas, asociadas a los ciclos corrosivos a los que son sometidas las probetas.

6. El recubrimiento que presenta mejor resistencia a la corrosión por dióxido de azufre es la protección catódica por cinc, con esta protección el acero base se encuentra totalmente protegido frente a la corrosión electroquímica.
7. El embellecimiento con pintura acrílica sobre imprimación cinc resulta ineficiente como medio decorativo, por lo que la imprimación de cinc sería suficiente como método de mantenimiento del recubrimiento metálico.

## **6.2.- PROPUESTAS DE MEJORA EN EL DISEÑO DEL ENSAYO KESTERNICH.**

1. Aumentar el número de ciclos de exposición de probetas en cámara climática a 20 ó 30 ciclos.
2. Incrementar el número de probetas con el mismo recubrimiento sometidas a ensayo para establecer una linealidad de los defectos de corrosión para cada tipo de protección del sustrato.
- 3.- Realizar variaciones de temperatura en cámara climática, aumentando la temperatura al rango de los 50°C.
4. Realizar ensayo de corte metalográfico para observar una posible degradación del espesor de recubrimiento metálico, así como ver zonas de unión de metales.
5. Llevar a cabo una serie de defectos normalizados sobre los recubrimientos orgánicos y evaluar el avance de la corrosión sobre ellos y sobre la superficie que los rodea.
6. Si el número de ciclos de exposición es elevado, realizar un ensayo de seguimiento gravimétrico sobre probetas con protección catódica, con el fin de observar una posible pérdida de masa del recubrimiento metálico.



# Capítulo 7

REFERENCIAS

## 7.1.- NORMAS UTILIZADAS.

- UNE-EN ISO 6988:1996, "Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad."
- UNE-EN ISO 3231:1998 "Pinturas y barnices. Determinación de la resistencia a atmósferas húmedas que contienen dióxido de azufre".
- UNE EN 10056-1:99. "Dimensiones y características geométricas de los angulares laminados en caliente de lados iguales".
- UNE-EN ISO 10289: 2001 "Métodos de ensayo de corrosión de recubrimientos metálicos sobre sustratos metálicos. Clasificación de probetas y piezas de piezas de protección sometidas a ensayos de corrosión".
- UNE-EN ISO 4628:2003 "Pinturas y barnices. Evaluación de la degradación de los recubrimientos. Designación de la intensidad, cantidad y tamaño de los tipos más comunes de defectos".

## 7.2.- BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA.

- [1] Fernández, Jose A. González. "Control de la corrosión. Estudio y medida por técnicas electroquímicas". Madrid, 1989.
- [2] Informe Hoar. Gran Bretaña ,1971.
- [3] Espada, L. y Sánchez, A. "Influencia de la lluvia ácida en la corrosión de los metales". Vigo, 1995.
- [4] Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente. [En línea]: <http://www.mapama.gob.es>
- [5] Gómez de León, F.C. y Alcaraz, D.J. "Manual básico de corrosión para ingenieros". Murcia, 2004.
- [6] Feliu, S. y Andrade. M.C. "Corrosión y protección metálica". Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Vol.1, Madrid 1991.
- [7] Feliu, S. y Morcillo, M. "Corrosión y protección de los metales en la atmósfera". Barcelona 1982.
- [8] Guzmán, Ricardo. Hernández, Jacinto. Hernández, Blanca. "Alternativas de control de emisiones industriales de dióxido de azufre". (En línea).
- [9] El periódico de la energía. [En línea]: <https://www.elperiodicodelaenergia.com>
- [10] Philip, A. y Schweitzer, P.E. (2006). "Paint and coatings: Application and corrosion resistance". York, CRC Press – Taylor & Francis Groups.
- [11] Uhlig, H. H. y Revie R. W., "Corrosion and corrosion control: An Introduction to corrosion science and engineering". New York (USA), 1985.
- [12] Pérez, C., Collazo, A., Izquierdo, M., Merino, P., Nóvoa, X. R., "Characterisation of the barrier properties of different paint systems". Prog. Org. Coat., 37 (1999).
- [13] Orozco, Daniel. "Diseño y construcción de una cámara de envejecimiento acelerado por temperaturas para polímeros". México D.F. , 2007.

[14] AMBRO-SOL SPRAY, S.L. (En línea). <https://www.ambro-sol.es>

[15] T.Ishikawa y K.Ionye. "Journal of Chemical Society". Japan, 1991.

