

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto / Trabajo Fin de Carrera

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE
CORROSION'S DEGREE: CASE OF STUDY
"JUAN JOSÉ ARENAS" BRIDGE,
SANTANDER, CANTABRIA.**

Para acceder al Título de

INGENIERO INDUSTRIAL

Autor: Carmen Torre Agüera

Sept-2015

ÍNDICE

Capítulo 1. OBJETIVO Y PLANTEAMIENTO	1
1.1. Objetivo	2
1.2. Justificación	5
1.3. Planteamiento	7
Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE	10
2.1. El fenómeno de la corrosión	11
2.2. Efectos de la corrosión	12
2.3. Fundamentos de la corrosión	15
2.4. Tipos de corrosión	19
2.4.1. Corrosión uniforme	20
2.4.2. Corrosión galvánica	22
2.4.3. Corrosión por resquicios	28
2.4.4. Corrosión por picaduras	30
2.4.5. Corrosión selectiva	35
2.4.6. Corrosión intragranular	38
2.4.7. Corrosión por exfoliación	40
2.4.8. Corrosión por erosión	42
2.4.9. Corrosión Bajo tensión	45
2.4.10. Corrosión fatiga	47
2.5. Lógica difusa	49
2.5.1. Historia de la lógica difusa	49
2.5.2. Conjuntos difusos y funciones características	53

2.5.3. Operaciones sobre conjuntos difusos	56
2.5.4. Etapas Método Fuzzi de la Lógica Difusa	58
Capítulo 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	65
3.1. Terminología empleada	66
3.2. Recogida de datos	73
3.2.1. Selección de casquillos	73
3.2.2. Adquisición y selección de fotografías de cada zona	75
3.2.3. Selección y adecuación de imágenes	79
3.3. Cálculo de variables.	81
3.3.1. Procesado digital de imágenes, análisis de Imágenes y visión artificial	81
3.3.2. Conceptos básicos de la imagen digital	82
3.3.2.1. Espacio de color utilizado	90
3.3.3. Segmentación de imágenes	92
3.3.3.1. Segmentación mediante detección de bordes	93
3.3.3.2. Segmentación basada en la conectividad	96
3.3.3.3. Color Threasholder. Histograma	97
3.3.4. Segmentación de imágenes con Matlab	99
3.4. Método Fuzzy aplicado al presente proyecto	108
3.4.1. Conjuntos de entrada	108
3.4.2. Conjuntos de salida	108
3.4.3. Etapas del proceso	109
Capítulo 4. RESULTADOS	122
4.1. Resultado del procesado de imágenes	124

4.1.1. Escenario A	126
4.1.2. Escenario B	130
4.1.3. Escenario C	134
4.1.4. Escenario D	138
4.2. Grado de corrosión de cada escenario	142
4.2.1. Escenario A	142
4.2.2. Escenario B	149
4.2.3. Escenario C	154
4.2.4. Escenario D	159
4.3. Análisis de resultados	164
Capítulo 5. CONCLUSIONES	168
Capítulo 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	173
ANEXO 1. SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES	178
ESCENARIO A	179
ESCENARIO B	194
ESCENARIO C	209
ESCENARIO D	224
ANEXO 2. FIGURAS	239
ANEXO 3. TABLAS	247

Capítulo 1

Objetivo y Planteamiento

Se definirá y justificará el objetivo del presente Proyecto Final de Carrera, y se realizará una breve descripción de su planteamiento.

1.1- Objetivo

El objetivo del presente Proyecto Fin de Carrera consiste en la realización de un Análisis del grado de corrosión por picaduras altamente localizada de los casquillos constituyentes del “Puente Juan José Arenas”, Figura 1, infraestructura civil ubicada en la ciudad de Santander, España. Es un puente transitado, tanto por vehículos rodados como por peatones.



Fig. 1. Puente Juan José Arenas, Santander, España

Este análisis será de tipo comparativo y, para ello, se empleará el fundamento de la Lógica Difusa o Fuzzy. Se han seleccionado cuatro escenarios, remarcados como regiones o áreas, en los casquillos del puente objeto de estudio, Figura 2, remarcados en la Figura 3: zona Oeste - lado

circulación, zona Oeste– lado peatonal, zona Este– lado peatonal y zona Este – lado circulación. Cada una de estas regiones estará afectada por distintas variables que contribuyen al fenómeno corrosivo. Siguiendo el procedimiento descrito en el Capítulo 3, se obtendrá el grado de corrosión de cada uno de estos escenarios, y siempre, marcando de forma predeterminada, las variables a considerar en la Lógica Difusa, ya que la corrosión, al ser un fenómeno afectado por numerosas variables y de diferente magnitud de forma dinámica, su control resulta realmente complejo, por lo que el cálculo probabilístico es una herramienta óptima para realizar análisis comparativos.



Fig 2. Casquillo del puente Juan José Arenas

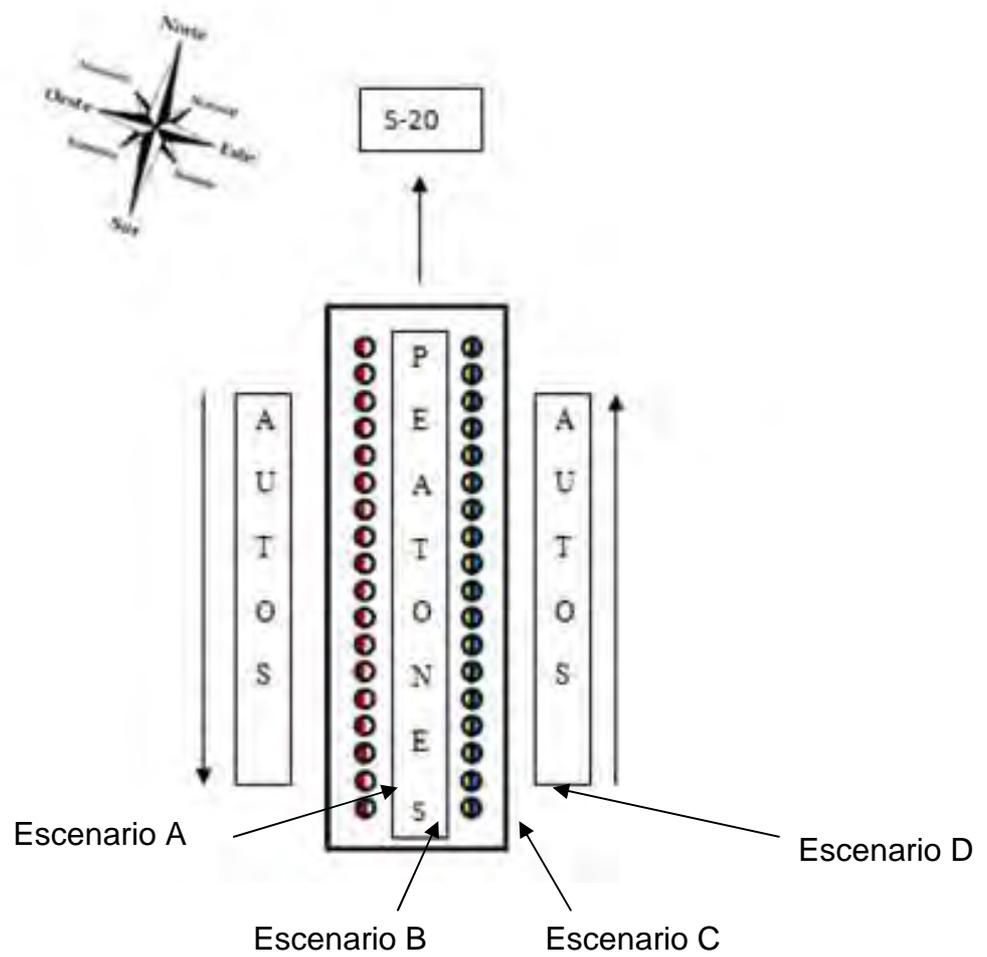


Fig. 3. Escenarios del Puente Juan José Arenas, Santander

1.2- Justificación

Los efectos de la corrosión afectan a nuestras vidas diariamente. Durante un paseo, se puede observar una cantidad significativa de estructuras corroídas, a las que apenas se presta atención. Por ejemplo, un puente de una carretera, puede llegar a romperse en elementos estructurales críticos debido a la corrosión que experimentan las barras de corrugado del acero, o a la fatiga corrosión debido a un intenso tráfico, hecho acontecido en el Puente de plata, Ohio, USA, 1928, [1].

El fenómeno corrosivo afecta a la mayoría de los sistemas metálicos, fundamentalmente a los aceros al ser ésta aleación la más empleada, provocando una pérdida notable de su sección, y disminuyendo su vida útil, se hace necesario una inspección y mantenimiento periódico, con el fin de evitar los fuertes impactos que provocan, tanto sociales, como económicos y medioambientales. A modo de ejemplo, según un estudio de la Universidad de Zulia, en las plantas eléctricas, el 10% del coste de mantenimiento total, preventivo y correctivo, está dedicado a los estragos provocados por la corrosión [2].

En general, los costes totales provocados por la corrosión, directos e indirectos, oscilan alrededor del 4% del PIB de los países industrializados. Muchos de estos gastos podrían evitarse con un mayor y mejor uso de los conocimientos de los fundamentos científicos y su aplicación inmediata de la corrosión, y de las técnicas anticorrosivas que hoy en día están disponibles, remarcando que no todas son válidas para todas las situaciones que potencialmente pudieran aparecer en servicio. Ya en 1971 se presentó el informe Hoar [3] donde se indicaba que los sectores más afectados eran el transporte, la marina y la construcción, puesto que eran los que más

expuestos al fuerte impacto de la intemperie y el agua de mar sobre la corrosión en los metales.

A modo de ejemplo, y para plasmar el impacto medioambiental de este fenómeno, en Diciembre de 1999 frente a las costas de Vizcaya, el buque Eric zozobró debido a la rotura de su casco provocada por la corrosión. Como resultado aproximadamente veinte mil toneladas de petróleo crudo se derramaron en el mar, causando el consiguiente daño al ecosistema marino [4].

Es, pues, el negativo efecto que la corrosión provoca en el mundo, lo que me motivó para llevar a cabo el presente proyecto, pues durante su desarrollo he ahondado más en este fenómeno.

1.3- Planteamiento

El puente de “Juan José Arenas” o Puente de las Llamas, posee 72 casquillos, que actúan como nexo de unión entre los tirantes y la estructura. De estos 72 casquillos, la mitad están ubicados en la parte inferior, uniendo los tirantes con el tablero mientras que, la otra mitad, que junta tirantes y arco, se encuentra en la parte superior, Figura 4.



Fig. 4. Casquillos superiores e inferiores del Puente Juan José Arenas, Santander, España

El presente proyecto centrará su atención sobre los casquillos situados en la zona inferior, debido a la mala accesibilidad que supondría el estudio de los casquillos superiores. Un total de diez casquillos serán estudiados, cinco pertenecientes al lado Oeste (escenarios A y B) y cinco ubicados en el lado Este (escenarios C y D). La selección de todos ellos ha sido realizada al azar.

Cabe destacar que el estudio sólo valorará el fenómeno de corrosión por picaduras, dado en la zona central del casquillo, por lo que no se ha considerado la corrosión por resquicios, que tiene lugar en los extremos de éstos, Figura 5.



(a)

(b)

Fig. 5. Corrosión por resquicios a) en la parte inferior del casquillo, b) en la parte superior del casquillo

La Figura 6, muestra una imagen del deteriorado estado de los casquillos actualmente frente al estado inicial del casquillo.



(a)

(b)

Fig. 6. Imagen del estado actual de los casquillos (a) frente al estado inicial de éstos (b)

El grado de corrosión de cada escenario definido, será la variable obtenida tras aplicar el método Fuzzy, método de lógica difusa seleccionado en este Proyecto Fin de Carrera, frente a la Lógica Convencional o Binaria, debido a la aleatoriedad del fenómeno corrosivo. Como variables de entrada se introducirán el área que ocupan las grietas y picaduras, área de corrosión incipiente y área libre de corrosión en cada región de los casquillos seleccionada.

Estas variables de entrada serán el resultado de un análisis de imágenes digitales, que se segmentarán utilizando la herramienta Matlab, por lo que se estará en condiciones de obtener la información requerida para emplear los pasos de la Lógica Difusa: Fuzzyficación, Motor de Interferencia Fuzzy y Defuzzyficación, Figura 7. Al final, se han obtenido distintas probabilidades de corrosión en los distintas regiones, lo que ha permitido establecer una comparativa de las zonas más dañadas por el efecto corrosivo.

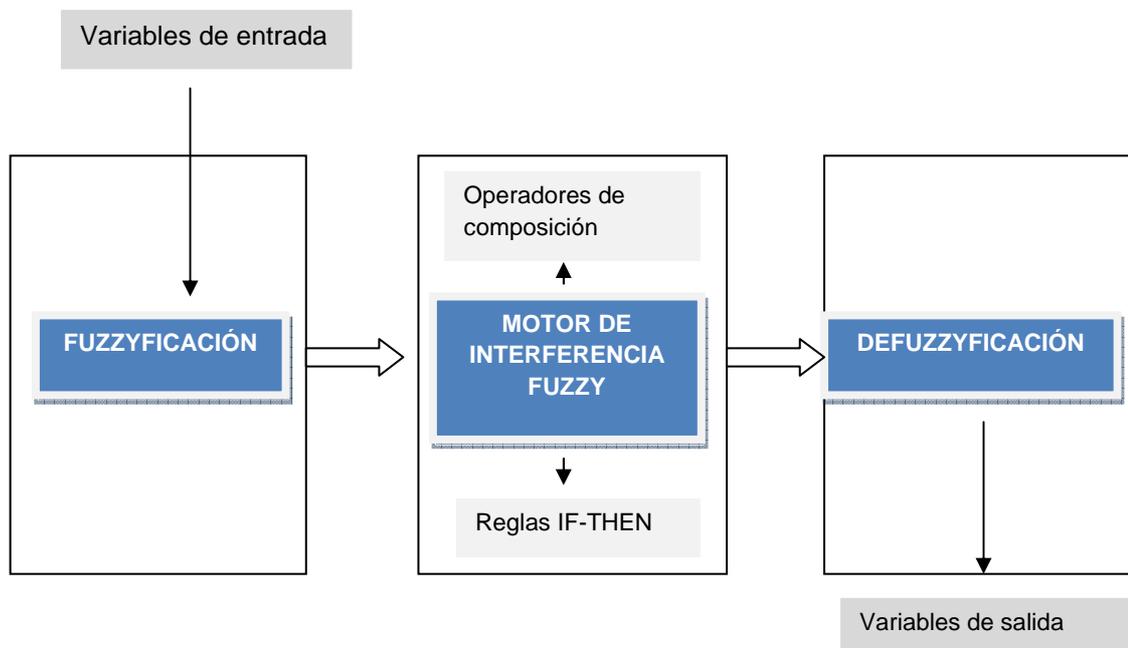


Fig. 7. Etapas del Método Fuzzy: Fuzzyficación, Motor de interferencia Fuzzy y Defuzzyficación

Capítulo 2

Estado del Arte

Para el correcto desarrollo del presente proyecto, se necesitará profundizar en temas relacionados con la corrosión y con la Lógica Difusa, temas detallados en el presente Capítulo.

2.1- El fenómeno de la corrosión

“El verbo “corroer” viene del latín “corrodere” (roer intensivamente, desgastar algo en su conjunto royendo). Se forma con el prefijo con- (globalmente, conjuntamente, completamente) y el verbo rodere (roer).” [5]

La corrosión puede ser definida de varias formas. Algunas definiciones hacen referencia a modos muy específicos de corrosión, mientras que otras, más generales, cubren varias formas de desgaste.

A efectos del presente estudio, se puede definir la corrosión como: Una reacción química o electroquímica entre un sistema metálico y su entorno que produce un deterioro del material y de sus propiedades. [6]

Por tanto, la corrosión que experimenta un material no puede ser estudiada sin tener en cuenta tanto la naturaleza química del sistema metálico como la del ambiente en el que se encuentra. Así, como se verá más adelante en el presente proyecto, y dada la elevada casuística de variables que influyen en el fenómeno de la corrosión, se evaluarán las probabilidades de corrosión de los casquillos del Puente Juan José Arenas, Santander, España, en base a distintos escenarios seleccionados y detallados en el Capítulo 3. A modo de resumen, se primarán las orientaciones de las superficies expuestas de los casquillos y la afectación directa o indirecta por el tráfico rodado.

2.2- Efectos de la corrosión

La corrosión está presente en nuestra vida diaria directa e indirectamente.

Este fenómeno ataca a nuestras herramientas, al refrigerador de nuestro automóvil, a la barandilla de nuestro balcón, etc. Pero también los productores y proveedores de bienes y servicios incurren en costes derivados de la corrosión que se traducen en un incremento del precio de aquello que compramos.

Estos costes pueden dividirse en pérdidas directas e indirectas. En la Tabla 1 se muestran algunos ejemplos de pérdidas económicas directas e indirectas derivadas del fenómeno corrosivo:

Tabla 1.- Pérdidas económicas directas e indirectas derivadas de la corrosión

Pérdidas directas	Pérdidas indirectas
● Costes de mantenimiento	● Interrupciones en la producción
● Costes de reposición (material, transporte y mano de obra)	● Pérdidas de producto
● Costes por averías imprevistas	● Pérdidas de rendimiento
● Costes directos por daños accidentales	● Contaminación de los productos
	● Sobredimensionamiento

A Pesar de que las pérdidas indirectas son más difíciles de cuantificar, *“En términos económicos se estima que aproximadamente el 4% del P.I.B de un país industrializado se gasta, directa e indirectamente, en prevenir y corregir problemas relacionados con la corrosión metálica”*. [7]

Además de las motivaciones económicas, existen dos factores más que hacen necesario el estudio de la corrosión: factores sociales y medioambientales.

El impacto ambiental derivado del fenómeno de la corrosión puede tener distintos grados y características. Su primera manifestación es la fuga de un gas o un líquido.

Las consecuencias de ésta fuga dependerán de las propiedades del fluido. Si éste es combustible, ocasionará fácilmente un incendio o la formación de una nube inflamable, con posterior explosión. Si es tóxico puede formar una nube o simplemente difundirse en el aire. [8]

De forma esquemática, en la Figura 8 se representan las diferentes posibilidades, en caso de fuga o derrame, y los impactos medioambientales ocasionados por la corrosión.

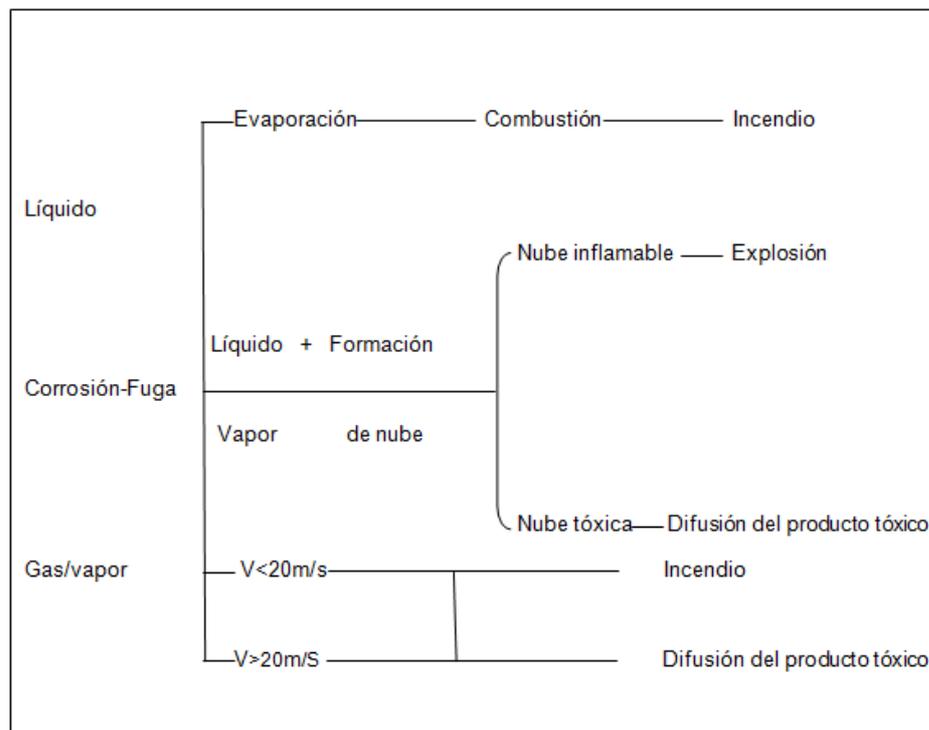


Fig. 8. Posibilidades e impactos medioambientales ocasionados por la corrosión, en caso de fuga o derrame

En la catástrofe acontecida en Bhopal (India) el 3 de Diciembre de 1984, donde 23000 Kg de metil isocianato (MIC) fueron emitidos a la atmósfera, es un claro ejemplo histórico sobre el impacto medioambiental que la corrosión puede llegar a tener. Existen diferentes teorías que se desprenden de las investigaciones realizadas por la misma empresa y por la justicia. Una de ellas dice que el accidente se produjo al no tomarse las debidas precauciones durante las tareas de limpieza y mantenimiento de la planta provocando una corrosión en los equipos que hizo que el agua a presión utilizada, cristales de cloruro sódico, restos metálicos y otras impurezas que la misma arrastraba, entrasen en contacto con el gas almacenado, iniciando una reacción exotérmica que provocó la apertura por sobrepresión de las válvulas de seguridad de los tanques y con ello la liberación a la atmósfera del gas tóxico; con el agravante de que el sistema de refrigeración de los tanques y el catalizador de gases previo a la salida a la atmósfera, se habían desactivado por ahorro de costes. [9]

Pero cuando el factor primordial a considerar es la seguridad, los daños que la corrosión puede ocasionar sobrepasan a cualquier predicción. Se puede encontrar también un ejemplo histórico en la catástrofe de Bhopal, pues se estima que 6.000 a 8.000 personas murieron en la primera semana tras el escape tóxico y al menos otras 12.000 fallecieron posteriormente como consecuencia directa de la catástrofe, que afectó a más de 600.000 personas, 150.000 de las cuales sufrieron graves secuelas.

2.3- Fundamentos de la corrosión.

Cuando un metal está en contacto con un ambiente particular durante su vida en servicio, éste puede comportarse de tres formas distintas, atendiendo a su naturaleza electroquímica [6]:

- Comportamiento inmune: El metal está termodinámicamente estable en este entorno, por lo que no se produce corrosión de forma espontánea. A los metales que adoptan este comportamiento se les denominan metales nobles.
- Comportamiento activo: Se produce una corrosión activa en la que el metal se disuelve en la solución formando productos de corrosión a veces solubles y no protectores. Este tipo de comportamiento se caracteriza por una pérdida de peso y dimensiones del metal.
- Comportamiento pasivo: Hay una reacción electroquímica y el metal se corroe, pero se forma en él una fina capa insoluble, protectora, delgada y adherente que disminuye la velocidad de corrosión hasta niveles muy bajos. La resistencia a la corrosión en este caso depende de la integridad de esta capa protectora, que puede dañarse o romperse pasando el metal a adoptar un comportamiento activo.

En la Figura 9 se muestran estos tipos de comportamientos.

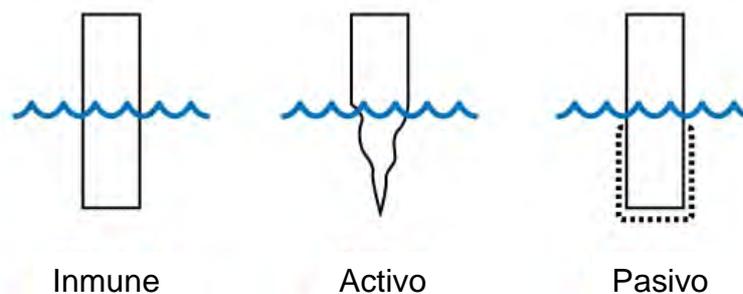


Figura 9. Tipos de comportamiento de un metal en un entorno



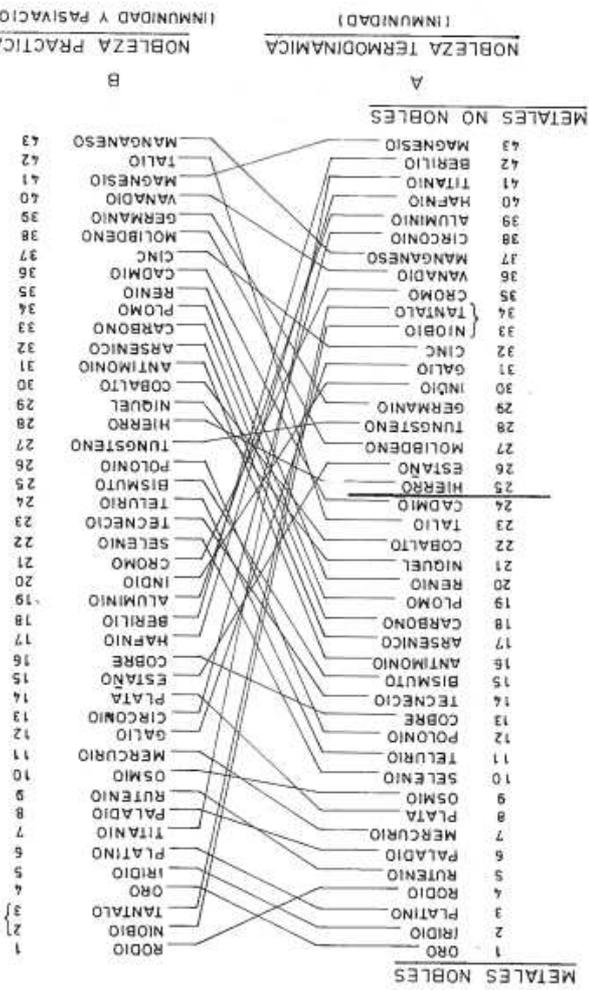
El grado de corrosión: Caso particular "Juan José Arenas", Santander

Ingeniería Industrial

Metales más utilizados son inestables para la corrosión. Estos materiales se obtienen a partir de minerales y al ser sometidos a un proceso de refinación se exponen a la atmósfera. Desde este momento se inicia el proceso natural a través del cual un metal se oxida y vuelve a su estado original (o a productos de oxidación).

Algunos metales que muestran un comportamiento de corrosión, como el hierro y otros metales, adquiere otro tipo de comportamiento de corrosión al ser sometidos a su nobleza termodinámica y práctica.

Comportamiento de los metales [10]



La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo y forma más común de ataque a los metales. Su funcionamiento se basa en el de una celda electroquímica. Hay cuatro requisitos que deben darse para que ésta exista, Figura 10:

- Ánodo
- Cátodo
- Circuito electrónico
- Circuito iónico

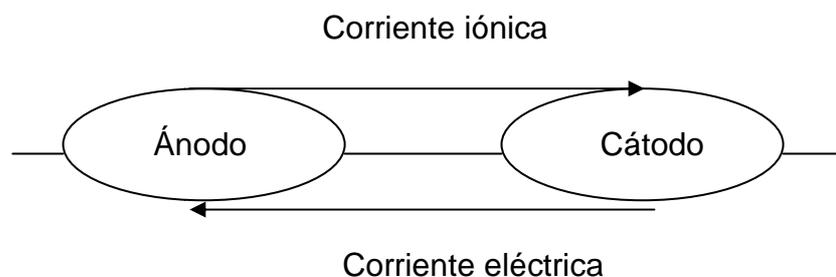


Fig. 10. Requisitos para la existencia de una celda electroquímica

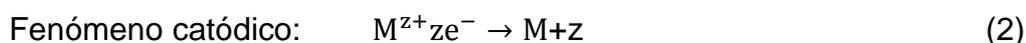
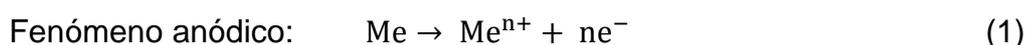
En este proceso electroquímico, un metal reacciona con su medio ambiente formando óxido o algún otro compuesto, atendiendo a la composición galvánica y pH de éste. La celda que causa este proceso está compuesta esencialmente por tres componentes: un ánodo, un cátodo y un electrolito (o solución conductora de electricidad).

El ánodo es la zona donde el metal es corroído, siendo el electrolito el medio corrosivo encargado de transportar las especies iónicas. El cátodo, que puede ser parte de la misma superficie metálica o de otra superficie metálica de un sistema metálico diferente que esté en contacto, forma el otro semielemento en la celda y no es consumido por el proceso de corrosión. En el ánodo el metal corroído pasa a través del electrolito como iones cargados positivamente, liberando electrones que participan en la reacción catódica. Es por ello que la corriente de corrosión entre el ánodo y el cátodo consiste

en electrones fluyendo dentro del metal y de iones fluyendo dentro del electrolito.

Así, la definición más aceptada entiende por corrosión electroquímica el paso de electrones e iones de una fase a otra limítrofe constituyendo un fenómeno electródico, es decir, transformaciones materiales con la cooperación fundamental, activa o pasiva, de un campo eléctrico macroscópico, entendiéndose por macroscópico aquel campo eléctrico que tiene dimensiones superiores a las atómicas en dos direcciones del espacio.

En los procesos de corrosión electroquímica de los metales se tiene simultáneamente un paso de electrones libres entre los espacios anódicos y catódicos vecinos, separados entre sí, según el esquema siguiente:



Este flujo de iones y electrones implica una corriente electrónica a través de la superficie límite de las fases. En el proceso anódico, el dador de electrones, Me, los cede a un potencial galvánico más negativo, y dichos electrones son captados en el proceso catódico por un aceptor de electrones, M^{Z+} , con potencial más positivo.

2.4- Tipos de corrosión

La corrosión ocurre en muchas y muy variadas formas, pero su clasificación generalmente se basa en uno de los tres siguientes criterios,

Fig. 11:

- Naturaleza de la sustancia corrosiva: La corrosión puede ser clasificada como seca, a altas temperaturas y en ausencia de electrolito o húmeda, electroquímica o bajas temperaturas. En el primer caso las reacciones se desarrollan con gases a elevadas temperaturas, mientras que el segundo caso requiere un líquido o humedad como agente corrosivo.
- Mecanismo de corrosión: Este comprende las reacciones electroquímicas, químicas o microbiológicas.
- Morfología del ataque: La corrosión puede ser uniforme, el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien localizada, en cuyo caso solamente pequeñas áreas quedan afectadas.



Figura 11. Clasificación de la corrosión

En el presente proyecto se describirán brevemente cada uno de los tipos de corrosión basándonos en el aspecto que adquiere la superficie corroída.

2.4.1- Corrosión uniforme

Es el tipo de corrosión más comúnmente encontrado, caracterizándose por un adelgazamiento progresivo y uniforme del componente metálico. El ataque se extiende de forma homogénea sobre la superficie metálica, es decir, la pérdida de espesor será muy similar en cada punto de la superficie del material, y su penetración media es igual en toda la superficie. [6]

Múltiples ánodos y cátodos pueden actuar al mismo tiempo sobre la superficie del metal. La ubicación de las zonas anódicas y catódicas se mueve continuamente sobre la superficie, dando como resultado dicha corrosión uniforme.

También puede estimarse la velocidad de corrosión uniforme a partir de las condiciones previas en servicio similar e incluir unas cinéticas que se ajustan a ciertos márgenes de gravedad, lo que permitirá seleccionar correctamente el material.

Cualquier metal puede verse afectado por corrosión uniforme, salvo los metales nobles. Los sistemas metálicos pasivables experimentan este tipo de corrosión, con una cinética muy baja, desarrollando la capa protectora; posteriormente ésta puede destruirse.

La Figura 12 muestra una puerta afectada por corrosión uniforme.



Fig. 12. Corrosión uniforme en puerta

La forma más usual de prevenir o reducir la corrosión uniforme es mediante la selección de materiales apropiados, el uso de recubrimientos superficiales o inhibidores de la corrosión o dotando al material de una protección anódica o catódica, esto es, cambiando su potencial electroquímico.

Estos métodos de prevención pueden ser utilizados individualmente o en combinación.

Esta forma de corrosión no es muy preocupante, desde un punto de vista técnico, pues la vida de los componentes se pueden estimar con gran precisión basándose en pruebas de inmersión relativamente simples. Estas pruebas dan lugar a una pérdida de peso y una reducción de espesor, que se pueden expresar como una función del tiempo y, de esta forma, dimensionar correctamente los elementos estructurales.

2.4.2- Corrosión galvánica

Cada metal tiene un cierto número de electrones libres siendo el metal eléctricamente neutro, Figura 13.

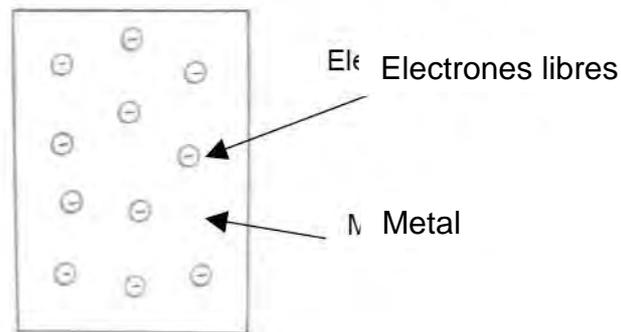


Fig. 13. Metal en estado de equilibrio

Cuando dos o más metales entran en contacto, se produce un desequilibrio de electrones libres al producirse un flujo de los electrones libres de cada especie, Figura 14.

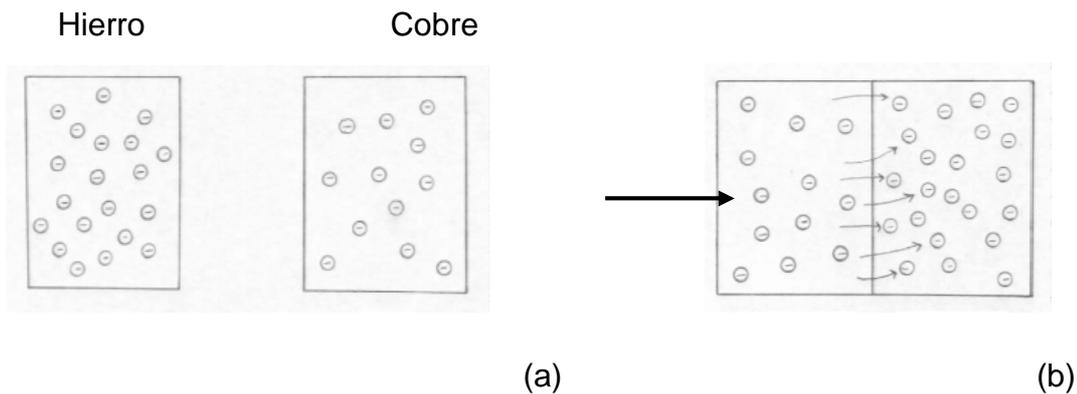


Fig. 14. Chapas de Fe y Cu aisladas (a) y tras entrar en contacto (b)

Debido a ésta migración de electrones, uno de los metales quedará con menos electrones de los que tenía inicialmente, en su estado neutro, mientras que el otro adquiere más electrones. Así, tendremos un metal

cargado positivamente y otro metal con carga negativa. Este fenómeno se conoce como par galvánico.

Si, bajo estas condiciones, ambos metales entran en contacto con un electrolito, se generará el fenómeno de corrosión galvánica:

En el caso del ejemplo de las imágenes, hierro y cobre, tras el acoplo los electrones se moverán desde el hierro hacia el cobre a través del hilo conductor. El hierro quedará con menos electrones de los que tenía inicialmente adquiriendo así, una carga positiva. El cobre, que habrá ganado electrones, tendrá carga negativa, y estas cargas estarán en equilibrio entre sí, Figura 15.

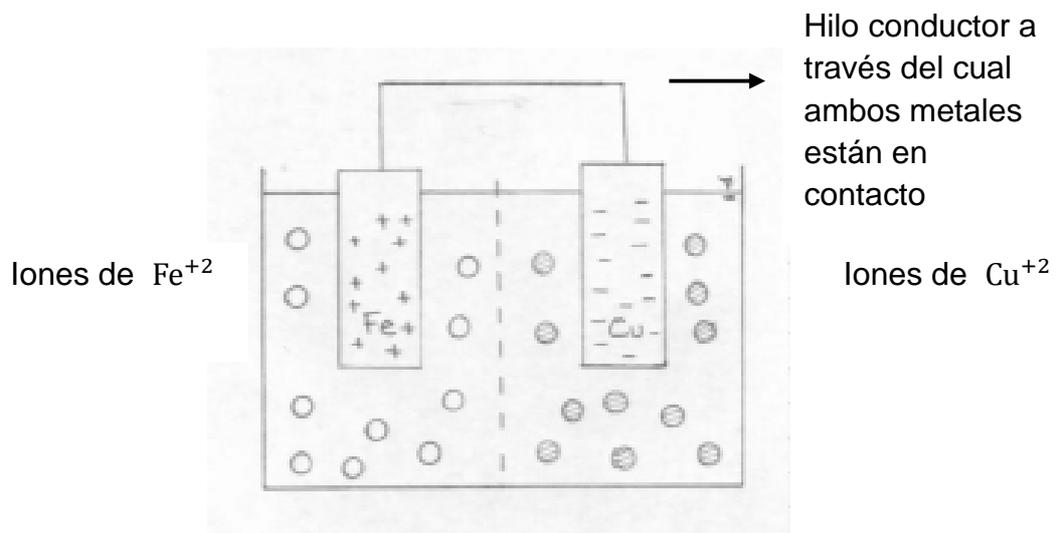


Fig. 15. Hierro y cobre en contacto con electrolito

Los iones de cobre que están disueltos en el líquido están en contacto con los electrones libres que están en exceso sobre la superficie de cobre.

Cuando un ion de Cobre se acerca a dos electrones libres, se da la reacción:



El cobre metálico que se genera a partir de ésta ecuación quedará depositado en la superficie del cobre original. Así, el número de electrones

libres de la superficie se reduce, continuando la reacción hasta que los electrones del cobre se agotan.

Los iones cobre en solución se depositan en la superficie del cobre metálico hasta que no quedan electrones libres. Sin embargo, el cobre buscará obtener nuevamente su carga negativa de equilibrio. Para ello buscará obtener más electrones del hierro mediante el siguiente proceso, o reacción anódica:



Esto produce dos electrones libres capaces de viajar hacia el cobre y un ion de hierro. Este ion sale del hierro metálico y se disuelve en el líquido que lo rodea. El hierro metálico comienza a experimentar una pérdida notable de su peso. En la Figura 16 se representa ésta pérdida.

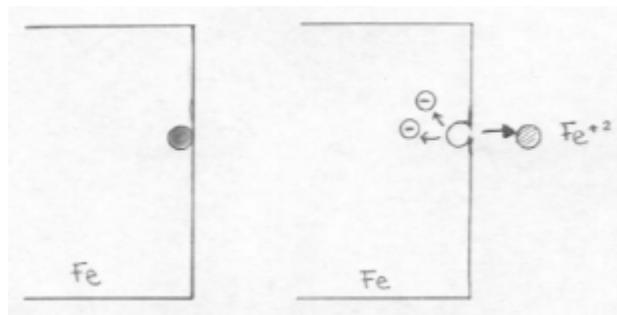


Fig. 16. Reacción anódica del hierro en una celda galvánica

Así, el cobre consume electrones mientras que el hierro los genera a cambio de su desintegración. Este proceso, corrosión galvánica, continúa hasta se elimina el contacto eléctrico entre los metales, o bien se elimina el líquido en contacto con los metales.

El hecho de que un metal actúe como ánodo o como cátodo, depende de su actividad electroquímica, la cual está tabulada en las series galvánicas y electroquímicas. Los metales más nobles, más inactivos son aquellos que poseen mayor potencial eléctrico, E_0 , y, por tanto, suelen actuar como cátodo. Por el contrario, los activos son los de menor potencial, ánodos.

Cuanta mayor diferencia de potencial eléctrico, en valor absoluto, haya entre los dos metales, más rápidamente se corroerá el ánodo.

Las Figuras 17 y 18 forman una serie electroquímica de metales.

Par redox	E°
$F_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2HF(aq)$	3.06
$F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$	2.87
$O_3 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons O_2 + H_2O$	2.07
$S_2O_8^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	2.01
$Co^{3+} + e \rightleftharpoons Co^{2+}$	1.82
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.77
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons MnO_2 + 2H_2O$	1.70
$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons PbSO_4 + 2H_2O$	1.69
$Au^+ + e \rightleftharpoons Au$	1.68
$HClO_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HClO + H_2O$	1.64
$HClO + H^+ + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Cl_2 + H_2O$	1.63
$Ce^{4+} + e \rightleftharpoons Ce^{3+}$	1.61
$Bi_2O_4 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons 2BiO^+ + 2H_2O$	1.59
$BrO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Br_2 + 3H_2O$	1.52
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	1.51
$PbO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2H_2O$	1.46
$Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	1.36
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1.33
$MnO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23
$O_2 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.23
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2 + 3H_2O$	1.20
$ClO_4^- + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons ClO_3^- + H_2O$	1.19
$Br_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.09
$Br_2(liq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.07
$Br_3^- + 2e \rightleftharpoons 3Br^-$	1.05
$VO_2^+ + 2H^+ + e \rightleftharpoons VO^{2+} + H_2O$	1.00
$AuCl_4^- + 3e \rightleftharpoons Au + 4Cl^-$	1.00
$NO_3^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons NO + 2H_2O$	0.96
$NO_3^- + 3H^+ + 2e \rightleftharpoons HNO_2 + H_2O$	0.94
$2Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg_2^{2+}$	0.92
$AuBr_4^- + 3e \rightleftharpoons Au + 4Br^-$	0.87
$Cu^{2+} + I^- + e \rightleftharpoons CuI$	0.86
$Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg$	0.85
$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag$	0.80
$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2Hg$	0.79
$Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	0.77
$PtCl_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt + 4Cl^-$	0.73
$Q + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2Q$	0.70
$O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$	0.68
$PtBr_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt + 4Br^-$	0.58
$MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$	0.56
$H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HAsO_2 + 2H_2O$	0.56
$I_3^- + 2e \rightleftharpoons 3I^-$	0.54
$I_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	0.54
$Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu$	0.52
$4H_2SO_3 + 4H^+ + 6e \rightleftharpoons S_4O_6^{2-} + 6H_2O$	0.51

Fig. 17. Serie electroquímica, parte 1

Par redox	E°
$2\text{H}_2\text{SO}_3 + 2\text{H}^+ + 4e \rightleftharpoons \text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}$	0.40
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	0.36
$\text{VO}^{2+} + 2\text{H}^+ + e \rightleftharpoons \text{V}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$	0.36
$\text{Cu}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.34
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$	0.28
$\text{IO}_3^- + 3\text{H}_2\text{O} + 6e \rightleftharpoons \text{I}^- + 6\text{OH}^-$	0.26
$\text{AgCl} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Cl}^-$	0.22
$\text{HgBr}_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons \text{Hg} + 4\text{Br}^-$	0.21
$\text{Cu}^{2+} + e \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	0.15
$\text{Sn}^{4+} + 2e \rightleftharpoons \text{Sn}^{2+}$	0.15
$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S}$	0.14
$\text{CuCl} + e \rightleftharpoons \text{Cu} + \text{Cl}^-$	0.14
$\text{AgBr} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Br}^-$	0.10
$\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	0.08
$\text{CuBr} + e \rightleftharpoons \text{Cu} + \text{Br}^-$	0.03
$2\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{H}_2$	0.00
$\text{HgI}_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons \text{Hg} + 4\text{I}^-$	-0.04
$\text{Pb}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0.13
$\text{CrO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} + 3e \rightleftharpoons \text{Cr}(\text{OH})_3 + 5\text{OH}^-$	-0.13
$\text{Sn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Sn}$	-0.14
$\text{AgI} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{I}^-$	-0.15
$\text{CuI} + e \rightleftharpoons \text{Cu} + \text{I}^-$	-0.19
$\text{Ni}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0.25
$\text{V}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{V}^{2+}$	-0.26
$\text{PbCl}_2 + 2e \rightleftharpoons \text{Pb} + 2\text{Cl}^-$	-0.27
$\text{Co}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Co}$	-0.28
$\text{PbBr}_2 + 2e \rightleftharpoons \text{Pb} + 2\text{Br}^-$	-0.28
$\text{PbSO}_4 + 2e \rightleftharpoons \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$	-0.36
$\text{PbI}_2 + 2e \rightleftharpoons \text{Pb} + 2\text{I}^-$	-0.37
$\text{Cd}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cd}$	-0.40
$\text{Cr}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Cr}^{2+}$	-0.41
$\text{Fe}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.44
$2\text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4(\text{aq})$	-0.49
$\text{Cr}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0.74
$\text{Zn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0.76
$\text{H}_2\text{O} + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{H}_2 + \text{OH}^-$	-0.83
$\text{Cr}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0.91
$\text{Mn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Mn}$	-1.18
$\text{Al}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.66
$\text{Mg}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2.37
$\text{Na}^+ + e \rightleftharpoons \text{Na}$	-2.71
$\text{Ca}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ca}$	-2.87
$\text{Sr}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Sr}$	-2.89
$\text{Ba}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ba}$	-2.90
$\text{K}^+ + e \rightleftharpoons \text{K}$	-2.93
$\text{Li}^+ + e \rightleftharpoons \text{Li}$	-3.05

Fig. 18. Serie electroquímica, parte 2

2.4.3- Corrosión por resquicios

Esta forma de ataque localizado se produce en las aberturas estrechas, hendiduras o espacios entre metal-metal o metal-no metal. Tiene lugar como consecuencia de una celda electroquímica formada por un electrolito dentro del resquicio, donde hay escasez de oxígeno, y el electrolito fuera de la hendidura, donde el oxígeno es más abundante. El material situado en el interior de la hendidura actúa como ánodo, mientras que, el del exterior, correspondería al cátodo. [7]

La corrosión por resquicios afecta tanto a los metales activos como a los pasivos, siendo más severo para las aleaciones pasivas, en particular, los aceros inoxidable. La rotura de la película pasiva dentro de una geometría dada, conduce a una rápida pérdida de metal en esa zona.

La iniciación y propagación de las grietas está influida por numerosos factores metalúrgicos, geométricos y medioambientales, así como reacciones electroquímicas, intrínsecas a cada proceso particular implicado.

La propagación de la grieta de corrosión mantiene un alto grado de acidez dentro de la solución de la grieta por hidrólisis de los iones metálicos disueltos.

En la Figura 19, se ilustra esquemáticamente el proceso de corrosión en resquicios para un acero inoxidable en una solución clorurada, como la que es inherente al medio marino.

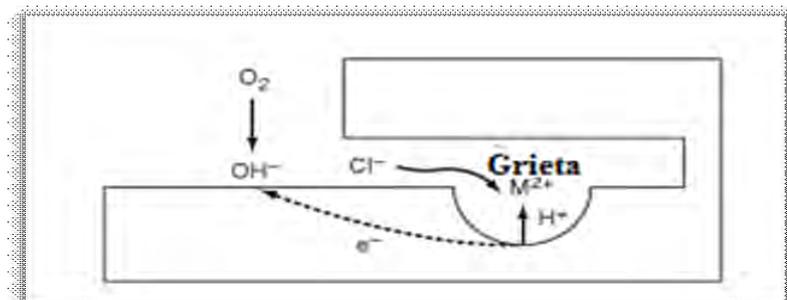
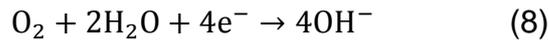


Fig. 19. Proceso de corrosión en resquicios

La reacción de la disolución anódica del metal en el interior de la grieta:



, es equilibrada por la reacción catódica en la superficie adyacente



El incremento de la concentración de iones M^{+} dentro de la cavidad genera una afluencia de iones de cloruro para mantener la neutralidad. El cloruro formado se hidroliza con agua dando lugar a hidróxido y protones:



El ácido producido por la reacción de hidrólisis mantiene el pH en valores inferiores a 2, mientras que el pH de la solución fuera de la grieta se mantiene neutral (pH=7). Entonces, el electrolito presente dentro de una grieta, puede ser considerado como ácido clorhídrico concentrado que contiene cloruros metálicos disueltos en concentraciones cercanas a la saturación. [6]

En la Figura 20, se aprecia el lugar donde tendría lugar la corrosión por resquicios, debajo de la tuerca.



Fig. 20. Corrosión por resquicios

2.4.4 – Corrosión por picaduras

Los sistemas pasivables, capaces de desarrollar una capa protectora, delgada, adherente y continua sobre el sustrato metálico, presentan excelente resistencia a la corrosión ya que dicha capa se produce instantáneamente al reaccionar con el medio. Ahora bien, en determinadas circunstancias, esa capa se puede romper localmente, dando lugar a uno de los ataques más insidiosos que se conocen, corrosión por picadura, que producen unas condiciones químicas locales que aceleran el proceso corrosivo provocando defectos en el material, tanto externos como internos, con una distribución aleatoria en la superficie metálica. [11]

Se denomina picadura a cualquier perforación pequeña que sufren los materiales metálicos. La corrosión por picadura que experimentan los sistemas metálicos pasivos se produce cuando la capa se rompe localmente.

El proceso de corrosión por picadura, fenómeno por el que se encuentran afectados los casquillos objeto de estudio del presente proyecto, constituye el caso límite en cuanto a ataque de corrosión localizado, ya que el ataque se centra en un área muy reducida respecto a la superficie total expuesta y profundiza hacia el interior del metal, formando pequeños túneles, con mayor rapidez que en el caso de procesos de corrosión uniforme. Por ello, la corrosión por picadura representa una limitación importante en cuanto a la seguridad de muchos metales empleados en la industria y es considerada una de las formas de corrosión más destructiva ya que, en un caso extremo, puede causar la perforación del material durante su uso, siendo causa habitual de fallo en servicio.

En la Figura 21, se muestra una fotografía de uno de los casquillos objeto de estudio del presente estudio, donde se aprecia el ataque de corrosión por picaduras al que está sometido.



Fig. 21. Corrosión por picaduras en un casquillo del Puente Juan José Arenas, Santander, España

Aunque esta forma de ataque se encuentra favorecida por la presencia de heterogeneidades macroscópicas o microscópicas, en la superficie del metal, o contenido de determinados iones en el electrolito con el que mantiene contacto, el fenómeno suele producirse en materiales de elevada resistencia a la corrosión por su carácter pasivable sin que, aparentemente, presenten heterogeneidades ni en la superficie ni variaciones físicas en el medio, pues suele iniciarse como consecuencia de la rotura local de la película pasiva. [12]

Además, estos fenómenos de ataque localizado, en superficies aparentemente homogéneas tienen lugar en presencia de determinados aniones agresivos contenidos en el electrolito que son los que provocan esta rotura de la capa pasiva, entre los que se encuentran los iones Cl^- , F^- , I^- , Br^-

y ClO_3^- . El más importante de todos ellos, por su abundancia en la naturaleza, es el ión cloruro, presente en aguas naturales y numerosos fluidos industriales.

No todos los metales en estado pasivo poseen la misma susceptibilidad a este tipo de corrosión en los distintos medios. Por ejemplo el molibdeno, el titanio y el cromo puro, no sufren este tipo de corrosión, mientras el aluminio o algunos aceros inoxidables expuestos al agua del mar, desarrollan picaduras profundas en pocos meses, que se originan, por lo general, en ranuras en otras zonas donde el electrolito queda estanco.

Esta tendencia es mayor en los aceros inoxidables ferríticos y martensíticos que en los austeníticos, disminuyendo la tendencia en los últimos, a medida que se aumenta su contenido en níquel en su composición química.

También se favorece la formación de picadura, cuando los aceros inoxidables se cubren con películas orgánicas o inorgánicas o, con organismos marinos, que impiden el acceso del oxígeno hacia la superficie metálica.

En cuanto al mecanismo del proceso, se inicia cuando, por alguna causa, se produce la rotura local de la capa pasiva. Ambientes con iones agresivos, así como discontinuidades y defectos de la aleación pueden provocar el inicio de la picadura. En general, el estado de la superficie (preparación y tratamiento, rugosidad, etc.), la presencia de impurezas e inclusiones y la microestructura y composición del acero, tales como precipitados, fases secundarias, etc., son aspectos importantes a tener en cuenta en los procesos de corrosión localizada. Así, la probabilidad que se inicie la formación de picaduras en estos materiales aumenta con la rugosidad superficial del acero o con la presencia de inclusiones. Por ejemplo, otro de los posibles lugares de inicio de picaduras en el acero se

relaciona con la formación de ferrita delta, fase de conocidos efectos negativos en la resistencia a la picadura.

Esta rotura local de la capa pasiva origina la formación de una pila activa-pasiva constituida por una pequeña área anódica, asociada a la zona desnuda, con menor valor de potencial de reducción, y una gran área catódica, correspondiente a la región con capa pasiva estable. Puesto que las intensidades de corriente anódica y catódica son iguales, la diferencia de áreas hace que la densidad de corriente anódica sea superior a la catódica, lo que justifica las altas velocidades de disolución en el interior de la picadura.

Una vez iniciada la picadura, las condiciones electroquímicas que existen dentro de ella difieren de las de la superficie, favoreciendo el progreso autocatalítico del ataque hacia el interior del material. Los cationes metálicos, procedentes de la reacción anódica, se incorporan al electrolito en el interior de la picadura y se hidrolizan a través de sucesivas reacciones provocando una reducción local de pH en la cavidad que impide la regeneración de la capa pasiva en esa región.

Siendo bien conocido que la resistencia a la corrosión de los aceros puede incrementarse drásticamente por efecto de los elementos aleantes adicionados, puede decirse que una de las variables que más influyen en la resistencia al ataque por picadura de estos materiales es su composición química. Así, desde que Lorenz y Medawar señalaran por primera vez el efecto sinérgico del cromo y molibdeno, potenciado por el nitrógeno según investigaciones posteriores de Herbsle, resulta indudable el efecto beneficioso de estos tres elementos en la resistencia a la corrosión localizada por picadura de los aceros inoxidable, siendo atribuido tanto a la formación de capas protectoras poco susceptibles a la rotura por parte de aniones agresivos como a la adsorción de productos solubles formados a partir de ellos (por ejemplo, MoO_4^{2-} en el caso del molibdeno)

La citada sinergia entre los aleantes Cr, Mo y N ha dado lugar al planteamiento de diversas ecuaciones empíricas que predicen el comportamiento del material en función de su contenido en dichos elementos. Una de las más empleadas permite ordenar los aceros inoxidables austeníticos de acuerdo con su resistencia a la corrosión por picadura expresada como el número PREN (siglas del inglés *Pitting Resistance Equivalent Number*) mediante la ecuación:

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3 \cdot \%Mo + 30 \cdot \%N \quad (10)$$

Aparte de la composición del acero, la temperatura del medio es también una variable relevante en el proceso de corrosión localizada. Así, por ejemplo, estudios realizados en agua de mar demuestran que el aumento de la temperatura origina un descenso en el potencial de picadura del acero inoxidable y un aumento de la velocidad de corrosión y de la susceptibilidad a la picadura [126,127], aunque la disminución de la solubilidad de oxígeno disuelto a determinada temperatura podría reducir el proceso.

Por ello, paralelamente al PREN, la temperatura es un factor extensamente empleado como criterio fundamental a la hora de valorar la resistencia a la corrosión por picadura de los aceros inoxidables. Así, basándose en la determinación de la temperatura mínima que origina ataque por picadura en el material, Brigham y Tozer introdujeron el concepto de temperatura crítica de picadura (TCP), que también permite comparar el comportamiento de diversos aceros en cuanto a su resistencia a la corrosión localizada, aunque, a diferencia del PREN, se obtiene como resultado de una medida experimental. No obstante, ni el PREN ni la TCP permiten realizar predicciones sobre la velocidad del proceso de corrosión por picadura que tiene lugar en el acero, sino que sólo resultan útiles para comparar el comportamiento de distintos materiales en un medio agresivo determinado.

2.4.5- Corrosión selectiva

En la corrosión selectiva, el ataque ocurre sobre uno o más componentes, fases o elementos de una aleación. A menudo la superficie atacada se vuelve porosa, pudiendo también mantener el mismo aspecto, salvo un ligero empañado y su forma original, por lo que no aparenta la pérdida de resistencia y de ductilidad producida. [6]

El caso más frecuente de esta forma de corrosión se produce en el ataque que experimenta el cinc en los latones. Esto se conoce como descincado o descincificación, y consiste en la eliminación selectiva del cinc que está aleado con cobre. Como consecuencia se observa una zona de color rojizo, porosa y pequeños residuos de cobre en la superficie.

La descincificación es cuantificada de acuerdo a la norma ISO 6509. Por un lado, la presencia de níquel disminuye levemente la descincificación en los latones $\alpha + \beta$ y, por otro lado, los contenidos de estaño hasta 0.30% también reducen el espesor de la capa afectada. Contenidos superiores de estaño tienen un efecto inverso. El hierro segrega, en proporciones aproximadamente iguales, en las fases α y β . La adición de arsénico forma el compuesto intermetálico FeAs, el que es termodinámicamente estable, ennoblece la fase β , con lo cual disminuye la capa descincificada. Contenidos de Fe sobre 0.2% producen una ostensible disminución del efecto antes mencionado, aumentando el espesor de la capa descincificada. [15]

En la Figura 22 se muestra el diagrama de equilibrio Cu-Zn (latones).

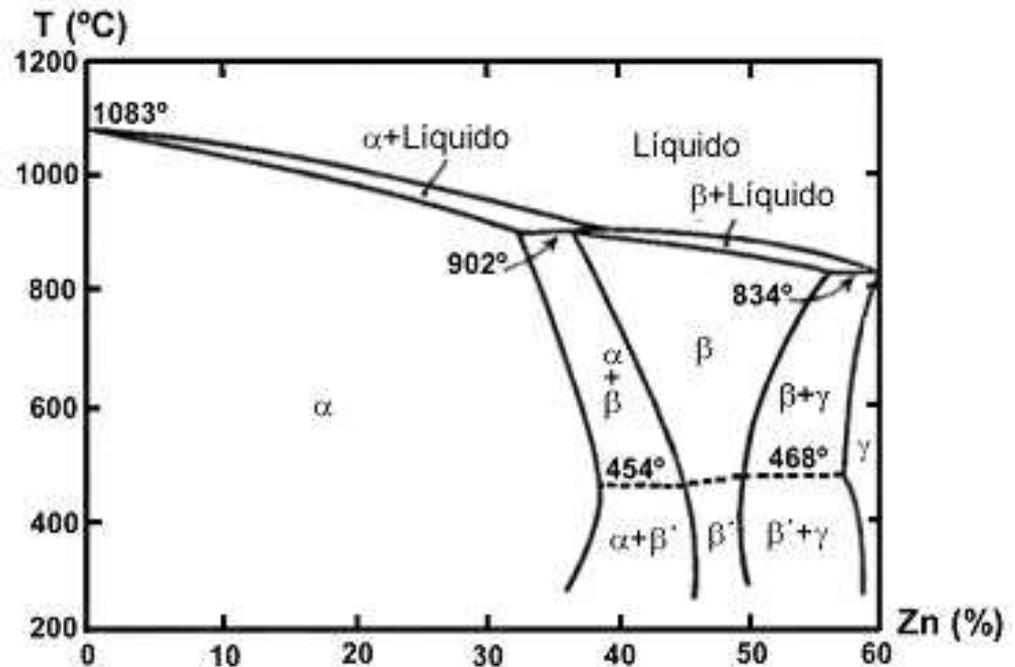


Fig. 22. Diagrama de equilibrio Cu-Zn, latones

Existen dos teorías acerca del mecanismo específico que tiene lugar durante el proceso de descincificación:

- El cobre se redeposita sobre la superficie de la aleación cuando ésta se corroe, dando un aspecto de placa porosa. Cinc y cobre se disuelven al mismo tiempo. Luego, se deposita nuevamente el cobre por desplazamiento, mientras que los productos de corrosión del cinc pasan a la solución como sal soluble o bien, se precipitan si son insolubles. Así, en la zona corroída el latón inicial se reemplaza por una masa porosa de cobre.
- Existe una difusión de cinc hacia la superficie, donde se corroe preferentemente dejando la aleación rica en cobre.

La descincificación se produce especialmente en soluciones que poseen una conductividad eléctrica elevada, y se desarrolla:

- En zonas locales de la superficie del metal, llamado tipo tapón, más común en medios alcalinos, neutros o ácidos suaves donde la

corrosión se podría expandir con profundidad (descalcificación por picadura).

- Uniformemente sobre la superficie, llamada de tipo capa, que ocurre en medios ácidos. En este caso se forma una película de cobre de espesor relativamente constante

Las condiciones que favorecen este fenómeno son temperaturas elevadas y velocidades de flujo bajas o estancadas. El fenómeno se acelera cuanto más rico en agua es el oxígeno.

Procesos similares también ocurren en otras aleaciones:

- El níquel y el estaño se corroen de forma preferencial en aleaciones de cobre.
- El níquel en los aceros.
- La plata en la aleación con oro (75%Ag-25%Au).
- La fase ferrita en los aceros dúplex.

En la Figura 23 se muestra una imagen microscópica de corrosión selectiva.

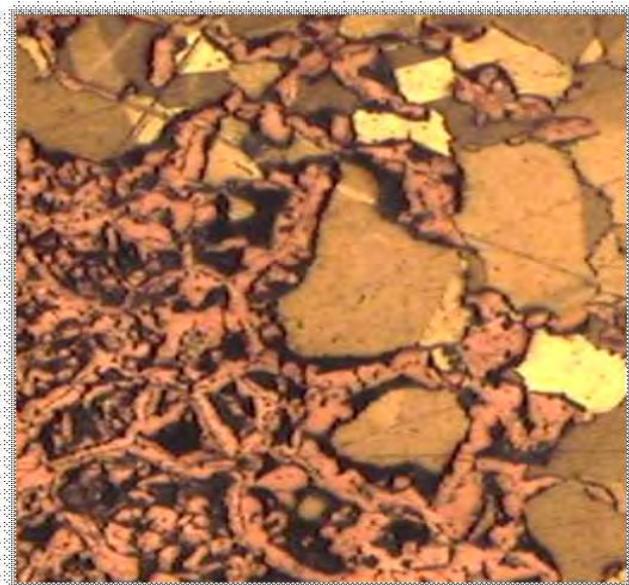


Fig. 23. Corrosión selectiva

2.4.6- Corrosión intergranular

La corrosión intergranular provoca un deterioro por corrosión localizada y/o adyacente a los límites de grano de una aleación. Bajo condiciones normales, si un metal se corroe uniformemente los límites de grano serán ligeramente más reactivos que la matriz. Pero bajo otras condiciones, las regiones del límite de grano pueden ser muy reactivas, resultando una corrosión intergranular que origina pérdida de resistencia de la aleación e incluso la desintegración en los bordes de grano.

Las principales causas que provocan este fenómeno son las siguientes:

- Pequeños microefectos bimetálicos en sistemas metálicos, pues el borde de grano tiene una composición distinta que el grano y más reactiva, debido a su elevada actividad energética por el hecho de estar repleta de dislocaciones.
- Aleaciones que forman capa pasiva, como son los aceros inoxidables, y que consiste en la formación de carburos de cromo en los bordes de grano, provocando un empobrecimiento en cromo en la zona vecina, no quedando suficiente cromo para formar la capa pasiva de óxido de cromo. Este fenómeno es característico de los aceros inoxidables, sin embargo, se puede presentar en otras aleaciones que forman capas pasivas, como aleaciones base aluminio o níquel.

En aceros inoxidables, es necesario una cantidad mínima de aproximadamente el 12% de cromo para crear la capa protectora de óxido de cromo (Cr_2O_3), que es la que aporta la resistencia a la corrosión a los aceros inoxidables. El mecanismo que se presenta para la corrosión intergranular es la formación de carburos de cromo normalmente el (Cr_{23}C_6), debido a que la afinidad del cromo por el carbono es termodinámicamente muy alta. Cuando se eleva la temperatura, el carbono tiene buena difusividad a través del acero hacia el borde del grano y en el borde de

grano, se produce la nucleación de los precipitados de $Cr_{23}C_6$ muy ricos en cromo, provocando que quede una zona próxima a los carburos empobrecida en cromo, inferior al 12% de cromo, lo que provoca que estas zonas no se pueda formar la capa protectora. Para que se formen los carburos de cromo en los bordes de grano, se tiene que producir la difusión del carbono hasta los límites de grano, o, normalmente este proceso está asociado a un aumento y mantenimiento de la temperatura de entre 450 a 850 °C, al cual se le denomina sensibilización a la corrosión intergranular, y normalmente es producto de un tratamiento térmico incorrecto o una soldadura. El acero queda sensibilizado frente a la corrosión intergranular. [13]

Al crearse los carburos de cromo y las zonas empobrecidas en este último elemento, se crean pequeñas celdas galvánicas debido a la diferencia de potencial entre los bordes y el resto del grano del metal, lo cual provoca una corrosión galvánica localizada en los bordes del grano, Figura 24.

Existen 3 formas de controlar la corrosión intergranular:

- Utilizando un tratamiento de calentamiento a alta temperatura, 500 a 800°C, seguido de un enfriamiento con agua, de esta forma los carburos de cromo pueden ser redisueltos y volver a la solución sólida.
- Añadiendo un elemento que pueda combinarse con el carbono del acero para que no pueda formarse el carburo de cromo. El niobio y el titanio son los elementos químicos que provocan este efecto dando lugar a los aceros 347 y 321 respectivamente: se dice entonces que están en una condición estabilizada.
- Disminuyendo el contenido en carbono alrededor del 0,03% en peso o menos para que no puedan precipitar cantidades significativas de carburo de cromo. El acero inoxidable tipo 304L, por ejemplo, tiene su carbono a ese nivel tan bajo.

Para prevenir este fenómeno, se pueden utilizar tipos con bajo contenido en carbono, a un nivel al que los carburos de cromo no pueden formarse durante el enfriamiento de la soldadura. Los tipos habituales son 1.4307 (304L) o 1.4404 (316L).

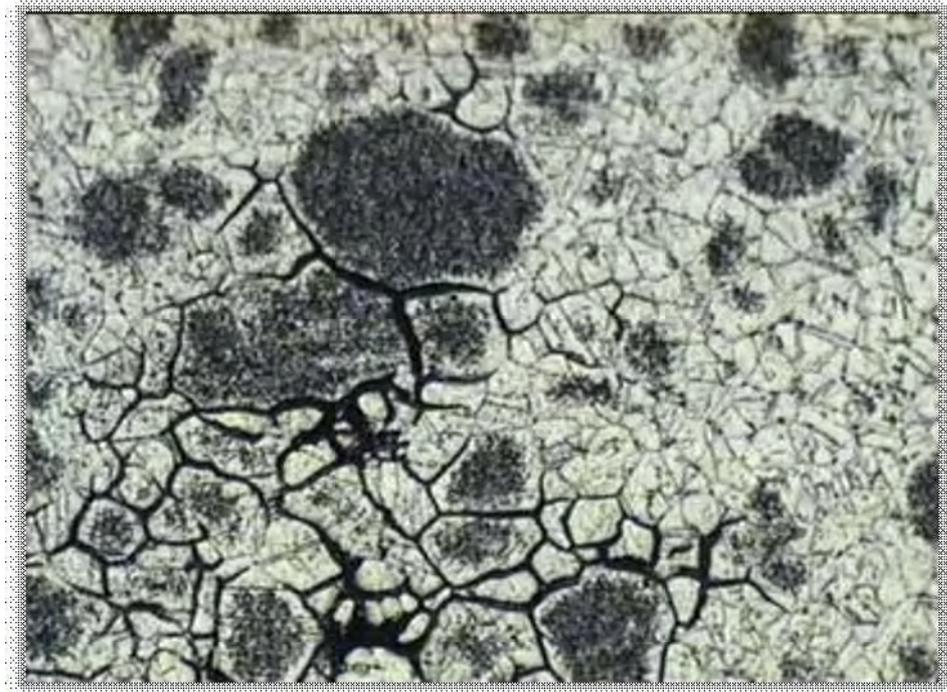


Fig. 24. Corrosión intergranular microscópica

2.4.7- Corrosión por exfoliación

La corrosión por exfoliación, también llamada corrosión laminar, es una forma de ataque específica que se da en materiales con una estructura altamente direccional de granos muy alargados y estrechos. Discurre a través de las fronteras de grano y de forma paralela a la superficie del metal. Esta dirección de disolución preferente coincide con la de laminación o de extrusión del producto. La profundidad de la zona afectada por el ataque es menor, comparada con su extensión en el resto de las direcciones. Los productos de corrosión formados durante el ataque, se acumulan en el

interior de las fronteras de grano y aumentan de tamaño, ejerciendo una presión sobre los granos más superficiales que acaba levantándolos, a semejanza de las páginas de un libro, como se aprecia en la Figura 25. Cuando la exfoliación es muy severa, provoca la pérdida de los granos más superficiales. Este fenómeno se denomina de laminación. [6]

En atmósferas poco agresivas, la exfoliación puede tardar años en manifestarse. Esto sucede en materiales extruidos, debido a la presencia de una banda próxima a la superficie, con una estructura recristalizada con menor susceptibilidad a la exfoliación. La exfoliación es muy común en las aleaciones Al-Cu-Mg tratadas térmicamente, aunque también se ha observado en Al-Mg, Al-Zn-Mg y Al-Mg-Si.



Fig. 25. Corrosión por exfoliación

2.4.8- Corrosión por erosión

Corrosión por erosión es el fenómeno producido cuando el movimiento de un agente corrosivo sobre la superficie de un metal acelera o aumenta la velocidad de deterioro o ataque, debido al desgaste mecánico. Puede ser uno de los tipos de corrosión más dañinos, aunque varía considerablemente en función de la ubicación del componente metálico y condiciones físico-químicas del ambiente.

En general, el papel de la erosión se atribuye a la eliminación de películas superficiales protectoras. Ejemplo de ello es la película protectora formada por el óxido generado por el aire. Un metal oxidado ralentiza su deterioro porque la superficie dificulta que el interior continúe oxidándose. Si, por ejemplo, la arena o el polvo, impulsados por el viento, eliminasen esa capa exterior de óxido, el metal continuaría deteriorándose por el hecho de haber perdido su protección.

La apariencia de este tipo de corrosión tiene, en general, el aspecto de pequeños hoyos lisos, olas, agujeros redondeados. El ataque puede también exhibir un patrón direccional relacionado con la trayectoria tomada por el agente corrosivo que transporta el medio o por movimientos sobre la superficie del metal, permitiendo determinar la dirección del flujo. Las zonas afectadas suelen estar libres de productos de corrosión, aunque pueden encontrarse en casos en los que el fenómeno corrosivo-erosivo se produzca intermitentemente, y el caudal del agente erosivo sea relativamente bajo.

La mayoría de los metales son susceptibles a sufrir ésta corrosión bajo condiciones específicas. Los sistemas metálicos que requieren una capa protectora relativamente gruesa para la resistencia a la corrosión son, con frecuencia, objeto de este fenómeno. Esto es debido a la mala adherencia de su recubrimiento, en contraposición a las películas delgadas formadas por los metales pasivos clásicos, tales como los aceros inoxidables y el titanio y sus aleaciones. Estos dos metales son relativamente inmunes a la corrosión por erosión en la mayoría de entornos posibles. Metales suaves y

con poca resistencia al desgaste mecánico, como algunas aleaciones base Cu y base Pb, son también notablemente susceptibles. Incluso los metales nobles o preciosos, plata, oro y platino, están sujetos a este desgaste.

Todos los medios corrosivos, incluyendo gases, soluciones acuosas, sistemas orgánicos y metales líquidos, pueden ser agentes erosivos. La corrosión por erosión es, pues, un modo de fallo bastante complejo, influenciado por las características metálicas y los factores ambientales. [6] Aunque algunos de estos factores están relacionados entre sí, se pueden discutir por separado en la medida de la posible:

Película superficial:

La naturaleza y propiedades de las películas protectoras que se forman en muchos metales y aleaciones son muy importantes, desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión por erosión. La capacidad de éstas, para proteger el metal, depende de la velocidad o facilidad con la que se forman cuando están expuestas al medio, su resistencia al daño mecánico o desgaste, y su tasa de recuperación cuando se dañan o destruyen.

Así, una película densa, adherente y continua proporcionará una mejor protección que una película fácilmente eliminable por medios mecánicos. Una película quebradiza que se agrieta bajo tensiones, incluso de baja magnitud, no será protectora.

Además, la naturaleza de la película protectora que se forma en un metal dado, depende del entorno específico al que está expuesta. Esto, a su vez, determina su resistencia a la erosión por ese entorno.

Velocidad:

La velocidad del medio juega un papel muy importante, porque la corrosión por erosión implica el movimiento relativo entre un metal y el ambiente donde se desarrolla su actividad. La velocidad, a menudo, influye mucho en el mecanismo de la reacción a la corrosión.

El efecto de la velocidad puede ser nulo, o aumentar lentamente el fenómeno hasta alcanzar una velocidad crítica, tras la cual el ataque aumenta a un ritmo rápido. La Figura 26 muestra el efecto crítico de la velocidad:

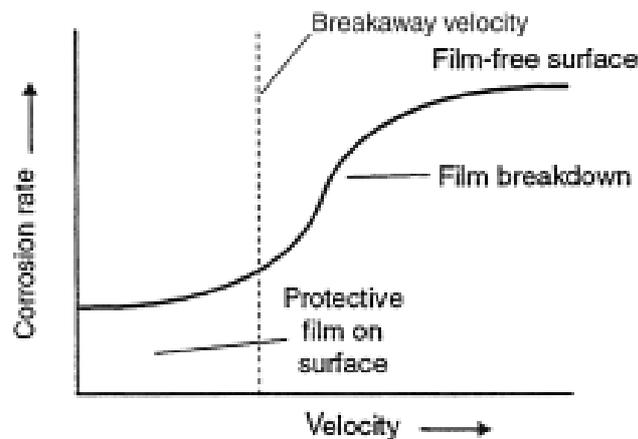


Fig. 26. Esquema del efecto de la velocidad en la corrosión por erosión[6]

Corrosión galvánica

El efecto de la corrosión galvánica sobre la corrosión por erosión puede ser nulo en condiciones estáticas, pero aumenta en gran medida cuando el movimiento está presente.

Naturaleza del metal o aleación:

La composición química de la mayoría de las aleaciones determina en cierta medida su resistencia a la corrosión por erosión, es decir, su capacidad para formar y mantener una película protectora. Los metales más nobles poseen una buena resistencia inherente a la corrosión. A igualdad de factores, un material con mejor resistencia tendrá menores probabilidades

de ser afectado por la erosión. La adición de un tercer elemento a una aleación a menudo aumenta la resistencia.

Efectos de los tratamientos térmicos

El endurecimiento producido por los tratamientos térmicos conlleva cambios en la microestructura y, generalmente, en la heterogeneidad. A menudo esto disminuye la resistencia a la corrosión porque las áreas catódicas y anódicas locales se forman más fácilmente, lo que hace al material más susceptible a la corrosión erosión.

2.4.9- Corrosión Bajo Tensión

La Corrosión Bajo Tensión (CBT) es un fenómeno por el cual un sólido, expuesto a la acción de ciertos agentes corrosivos, se agrieta, pudiendo llegar a la rotura, a valores de tensión muy inferiores a los de diseño. Se presenta como resultado de la acción simultánea del medio corrosivo, de las tensiones mecánicas y de un sistema metálico susceptible en ese medio, condiciones necesarias pero no suficientes. Si se elimina alguno de estos dos componentes, medio corrosivo o tensiones mecánicas, la fisuración por corrosión bajo tensión se detiene. [19]

Otra característica importante de este fenómeno es que las grietas no se propagan a velocidades cercanas a la del sonido, sino que varían en cada caso, y lo hacen a velocidades que van desde valores tan bajos como 10⁻¹¹ m/s, hasta valores que superan 10⁻² m/s.

Prácticamente todos los metales y aleaciones, sometidos a tensiones de tracción, y simultáneamente expuestos a la acción de ciertos medios corrosivos podían presentar roturas prematuras.

En la actualidad se considera que la CBT en metales está dividida en tres grandes categorías:

- En la primera categoría se encuentran las aleaciones que contienen en su interior un camino preexistente para la CBT. Tal es el caso de las aleaciones térmicamente envejecidas, aluminio-cobre, o los aceros inoxidables sensitizados.
- La segunda categoría está formada por las aleaciones que sufren fragilización por hidrógeno, tales como los aceros de alta resistencia mecánica, o los metales que forman hidruros, tales como el circonio o el titanio.
- La tercera categoría está formada por las aleaciones homogéneas, tales como los aceros inoxidables austeníticos, los latones, las aleaciones de metales nobles, las aleaciones de níquel, etc

La CBT acostumbra a afectar las aleaciones compuestas a partir de diferentes elementos de carácter noble, aunque a la práctica solo afecta de forma mayoritaria las aleaciones cobre-zinc (latones) .

La norma establece que con el aumento del grado de deformación la tendencia a sufrir de CBT aumenta, pero esto solo vale para las deformaciones de grado pequeño o medio. En casos de deformación elevada o extrema, esta corrosión tiene menos impacto. Un ejemplo serían los tubos extruidos en grado extremo, que soportan el estar sometidos a un medio amoniacal sin acusar corrosión. Las tensiones internas están tan repartidas y son tan omnipresentes, que ningún elemento se muestra más vulnerable al ataque que otro.

La grieta muestra, tanto en la microestructura como externamente, una morfología característica. La grieta sigue un perfil irregular y parcialmente ramificado. A partir de la imagen microestructural se puede observar un latón α con una fisura provocada por CBT, donde los granos situados alrededor de la fisura no muestran ningún tipo de deformación . La fisura misma transcurre entre los granos, aunque puede atravesar ocasionalmente

algún grano. Si la estructura estuviera compuesta de fases ($\alpha + \beta$) las fisuras atravesarían transversalmente los cristales fase β . Normalmente es difícil distinguir la diferencia entre este tipo de corrosión y una intercrystalina solamente con la imagen de la microestructura.

Pero la CBT no está limitada a los metales y sus aleaciones. Se sabe que los plásticos sufren CBT, pero su estudio es relativamente incipiente. También sufre CBT el vidrio, y el tema ha sido motivo de estudios sistemáticos. El caso de la CBT del vidrio es de particular interés. Se inició en los años 60, y en menos de dos décadas se desarrolló un mecanismo que recibió aceptación general. En cambio, en el caso de los metales, tras 150 años de estudio aún no se tiene un mecanismo de CBT que tenga aceptación general. Una probable explicación está relacionada con la estructura de los metales. Estos presentan una estructura cristalográfica simple de cationes metálicos apilados en forma compacta y rodeados por una nube de electrones libres. Esta nube impide el uso de técnicas ópticas que fueron tan útiles en el estudio de la CBT de los vidrios.

2.4.10 -Corrosión Fatiga

La corrosión por Fatiga aparece en materiales metálicos que trabajan en un ambiente agresivo, cíclico y con estados tensionales, provocando que los valores de la resistencia a fatiga sean mucho menores de lo esperado. De este modo no se puede hacer específicamente una resistencia a fatiga, pues, desaparece el valor límite, atendiendo al trabajo de las curvas de Wholer.

Este fenómeno está muy asociado a la corrosión por picaduras, pues los metales, propensos a sufrir este tipo de corrosión y trabajando bajo las características descritas, sufrirán este ataque.

El metal no puede regenerar bien su capa pasiva y será mas propenso a corroerse. En este caso, las fisuras generadas no se ramificarán y permitirán al electrolito adentrarse más en la pieza, potenciando y favoreciendo la oxidación.

Con el fin de evitar este fenómeno, se debe elegir un material no propenso al ataque por picadura y resistente a este tipo de corrosión, como las aleaciones de base Berilio. De no ser posible, habrá que reducir las tensiones de trabajo y aplicar recubrimientos superficiales adecuados o bien añadir inhibidores en el electrolito.

2.5- Lógica Difusa

La lógica difusa aplica expresiones que no son totalmente ciertas ni totalmente falsas, es decir, es una lógica que se aplica a conceptos que pueden tomar un valor indeterminado de veracidad dentro de un conjunto de valores, cuyos extremos serían la verdad absoluta o la falsedad absoluta. Expresa la falta de definición del objeto al que se aplica. Es una técnica de la inteligencia computacional, que ayuda o permite trabajar con información que es imprecisa, y no está bien definida. Pertenece a la lógica multivaluada pero la lógica borrosa se distingue de ésta en que nos permite introducir valores intermedios entre la afirmación completa o la negación absoluta. [14]

Conviene recalcar que lo que es difuso, borroso, impreciso o vago no es la lógica en sí, sino el objeto que estudia: expresa la falta de definición del concepto al que se aplica. La Lógica Difusa permite tratar información imprecisa, tal como *estatura media* o *temperatura baja*, en términos de conjuntos difusos que se combinan en reglas para definir acciones: *Si la temperatura es baja entonces calentar*. De este modo, los sistemas de control basados en lógica difusa combinan variables de entrada, definidas en términos de conjuntos difusos, por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida.

Se suele emplear en situaciones, escenarios, estudios, en donde confluyen multitud de variables y, en ocasiones, éstas son de definición compleja en cuanto a su medida o dotación de valor numérico absoluto.

2.5.1- Historia de la lógica difusa

La lógica difusa fue investigada por primera vez a mediados de los años sesenta por el ingeniero Lotfy A. Zadeh en la Universidad de Berkeley (California), Figura 27. En un principio éste la denominó principio de incompatibilidad: "Conforme la complejidad de un sistema aumenta, nuestra

capacidad para ser precisos y construir instrucciones sobre su comportamiento disminuye hasta el umbral más allá del cual, la precisión y el significado son características excluyentes”. Así fue como introdujo el concepto de conjunto difuso (en inglés Fuzzy Set).



Fig. 27. Lotfi A. Zadeh, primer investigador de Lógica Difusa

La idea de que los elementos sobre los que se basa el pensamiento humano no son números sino etiquetas lingüísticas se refleja en este nuevo concepto [21]. Esta idea es la que permite que se pueda representar el conocimiento, que es principalmente lingüístico de tipo cualitativo y no tanto cuantitativo, en un lenguaje matemático mediante los conjuntos difusos y funciones características asociadas a ello. Ello no quiere decir que exclusivamente se trabaje con números, permitiéndonos trabajar con datos numéricos y con términos lingüísticos que, siendo más imprecisos, a menudo son más fáciles de entender para el razonamiento humano. Aunque la lógica borrosa es hoy en día más conocida gracias a Lotfi Zadeh, la idea que se esconde detrás de este término tiene sus orígenes hace unos 2500 años, puesto que los filósofos griegos ya trabajaban con la idea de que existían distintos grados de veracidad y de falsedad.

Aunque se considera que Zadeh fue quien primero habló de la lógica borrosa, su tesis se basa también en estudios y obras de otros pensadores de otras disciplinas que tenían una visión alejada de la lógica tradicional y muy similar a la de Zadeh. Entre las obras y personas que le influenciaron, podemos destacar: la paradoja del conjunto de Russell, el principio de incertidumbre de Heisenberg y a Jack Lukasiewicz creador de la lógica multivaluada. [14]

En un principio, la comunidad científica no vió con buenos ojos la Lógica Difusa; sin embargo algunos de estos investigadores que, en un principio habían mostrado su resistencia ante este concepto, terminaron siendo seguidores de Zadeh e, incluso, mientras él seguía asentando los conocimientos de la lógica borrosa, estos científicos se dedicaron a explorar nuevas teorías referidas a este tipo de lógica. Entre estos nuevos seguidores de la lógica borrosa podemos destacar a Bellman, Lakoff, Goguen, Smit. Otro paso importante para el desarrollo de la lógica difusa fue que, a principios de la década de los setenta, se crearon varios grupos de investigación en diferentes universidades japonesas hicieron grandes contribuciones sobre las aplicaciones que podía tener este tipo de lógica. De esta forma se consiguió crear el primer controlador difuso para una máquina de vapor, o crear un controlador de inyección de química en depuradoras de agua. En décadas posteriores, esta teoría cada vez fue teniendo más éxito y se le iban encontrando nuevas aplicaciones.

En la década de los ochenta, la investigación se orientó hacia las redes neuronales y su similitud con los sistemas Fuzzy. Estos sistemas utilizan métodos de aprendizaje basados en redes neuronales para identificar y optimizar sus parámetros. La década de los noventa, aparte de la investigación de las redes neuronales y los Sistemas Fuzzy, surgen los algoritmos genéticos. Si combinamos estas tres técnicas computacionales, se puede conseguir una herramienta de trabajo muy potente de los sistemas de control. [15]

Según lo expuesto hasta ahora, se puede ver que la lógica borrosa ha provocado innumerables investigaciones y aplicaciones, la mayoría orientadas a sistemas de control pero, actualmente, se está yendo más allá y se empieza a investigar en áreas como el reconocimiento de patrones visuales o la identificación de segmentos de ADN. Por último, mencionar que muchos de los investigadores que actualmente investigan en los temas de la lógica borrosa, comentan que el futuro de Internet, en cuanto a controlar la red, gestionarla o recuperar información, está en aplicar las tecnologías borrosas en estas áreas.

La Lógica Difusa está teniendo bastante éxito en su utilización sobre los sistemas de control, aplicación que ya podría considerarse como rutinaria. Sin embargo, los investigadores buscan nuevos campos de aplicación de esta técnica. Se investiga en áreas como el reconocimiento de patrones visuales o la identificación de segmentos de ADN. Además, según algunos de los más prestigiosos investigadores en Internet, parece que el futuro para abordar la enorme cantidad de datos, recuperar la información, controlar y gestionar la red, pasa por el uso de tecnologías difusas. [14]

En la Figura 28 se muestra un cronograma que, a modo resumen, presenta los acontecimientos más importantes de la Lógica Difusa.

2500 a. C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Surje, en los círculos de los filósofos griegos, la idea esencial de la Lógica Difusa
[1960-1970]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La Lógica Difusa es investigada por primera vez por el ingeniero Lofty A. Zadeh
[1970-1980]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se crea el primer controlador difuso para una máquina de vapor ▪ Se crea el primer controlador de inyección de química en depuradoras de agua
[1980-1990]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La investigación de la Lógica Difusa se orienta hacia las redes neuronales
[1990-2000]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Surjen los algoritmos genéticos
Actualidad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reconocimiento de patrones visuales ▪ Identificación de segmentos de ADN
Futuro	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Control de la red ▪ Gestión de la red ▪ Recuperación de información

Fig. 28. Cronograma Lógica Difusa

2.5.2- Conjuntos difusos y funciones características

Un ejemplo comúnmente utilizado para ilustrar la idea de conjunto difuso, es el conjunto de *hombres altos*:

Según la teoría de la lógica clásica, el conjunto hombres altos estaría formado por aquellos individuos con una estatura mayor a un valor dado, que por ejemplo podemos establecer en 1.8 metros. Siguiendo ésta lógica un hombre que mide 1.81 metros pertenecería al conjunto hombres altos, sin embargo un hombre que mide 1,79 quedaría fuera del conjunto. Pero no parece muy lógico decir que un hombre es alto y otro no lo es cuando su altura difiere en tan sólo dos centímetros.

El enfoque de la lógica difusa considera que el conjunto hombres altos es un conjunto que no tiene una frontera clara para pertenecer o no pertenecer a él: mediante una función que define la transición de alto a no alto se asigna

a cada valor de altura un grado de pertenencia al conjunto, entre 0 y 1. De este modo, un hombre que mide 1,79 puede pertenecer al conjunto difuso *hombres altos* con un grado 0.8 de pertenencia, uno que mide 1.81 con un grado 0.85 y uno que mide 1.5 m con un grado de 0.1.

Visto desde esta perspectiva se puede considerar que la lógica clásica es un caso límite de la Lógica Difusa en el que se asigna un grado de pertenencia 0 a lo que tienen una altura menor.

La Figura 29 es una representación gráfica de la visión de la Lógica Difusa frente a la visión de la lógica clásica.



Fig. 29. Visión de la Lógica Difusa (a) Visión de la lógica clásica (b)

Así, la teoría de conjuntos difusos contempla la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto: cada elemento presenta un grado de pertenencia a un conjunto difuso que puede tomar cualquier valor comprendido entre 0 y 1. Este grado de pertenencia se define mediante la *función característica* $\mu_A(x)$, asociada al conjunto difuso: para cada valor que pueda tomar un elemento o variable de entrada x la función característica, proporciona el grado de pertenencia de este valor de x al conjunto difuso A .

Formalmente, un conjunto clásico A, en un universo de discurso U, se puede definir de varias formas:

- Enumerando los elementos que pertenecen al conjunto:

$$U=\{1,3,10,27\}$$

- Especificando las propiedades que deben cumplir los elementos que pertenecen a ese conjunto.

- En términos de la función de pertenencia $\mu_A(x)$:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (11)$$

En este caso conocer la función de pertenencia implica conocer A.

Un conjunto difuso en el universo de discurso U se caracteriza por una función de pertenencia μ que toma valores en el intervalo [0-1], y puede representarse como un conjunto de pares ordenados de un elemento x y su valor de pertenencia al conjunto:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in U.\} \quad (12)$$

La función característica proporciona una medida del grado de similitud de un elemento de U con el conjunto difuso. La forma utilizada de la función depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema. La única condición que debe cumplir una función característica es que adquiera valores entre 0 y 1, con continuidad. Las funciones características más comúnmente utilizadas por su simplicidad matemática y su manejabilidad son: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal, campana, Figura 30.

Conceptualmente existen dos aproximaciones para determinar la función característica asociada a un conjunto: la primera aproximación está basada en el conocimiento humano de los expertos, y la segunda es utilizar una colección de datos para diseñar la función.

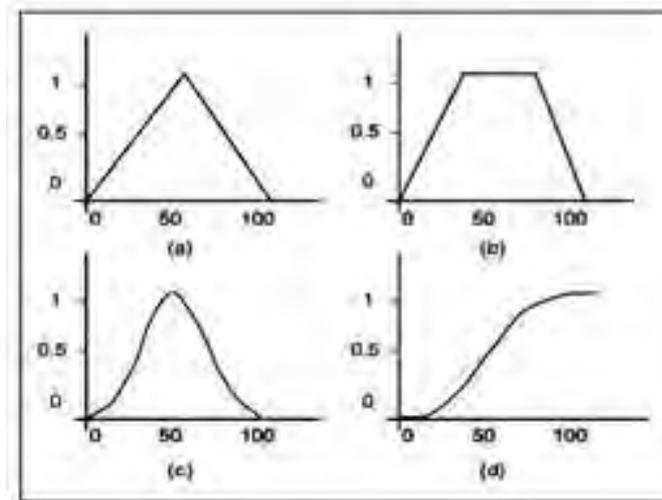


Fig. 30. Algunas de las funciones características más habituales del método Fuzzy: Triangular (a); Trapezoidal (b); Gaussiana (c) y sigmoideal (d)

El usuario será quien elija el número de funciones características asociadas a una misma variable: a mayor número de funciones características mayor resolución y mayor complejidad computacional.

Por último señalar que estas funciones pueden estar solapadas o no; el hecho de estarlo pone de manifiesto un aspecto clave de la lógica difusa: una variable puede pertenecer con diferentes grados a varios conjuntos difusos a la vez.

2.5.3- Operaciones sobre conjuntos difusos

Existen seis tipos de operaciones:

1- Inclusión o subconjunto:

$$A \text{ es subconjunto de } B \leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \forall x \quad (13)$$

2- Unión:

La unión de los conjuntos difusos A y B es el conjunto difuso C. Su función de pertenencia está dada por:

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) \quad (14)$$

3- Intersección:

La intersección de los conjuntos difusos A y B es el conjunto difuso C. Su función de pertenencia está dada por:

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) \quad (15)$$

4- Negación o complemento:

El complemento del conjunto difuso A, se define como:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (16)$$

5- Producto cartesiano:

Si A y B son conjuntos difusos en X e Y, el producto cartesiano de los conjuntos A y B en el espacio XxY tiene la función de pertenencia:

$$\mu_{AxB}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (17)$$

6- Co-producto cartesiano:

A+B en el espacio X x Y tiene la función de pertenencia:

$$\mu_{A+B}(x, y) = \max(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (18)$$

2.5.4- Etapas Método Fuzzy de la Lógica Difusa

El método Fuzzy consta de tres etapas que deben desarrollarse estrictamente en el orden que se establece a continuación. La Figura 31 muestra el modelo conceptual del método donde se indican las entradas y salidas de los procesos involucrados.

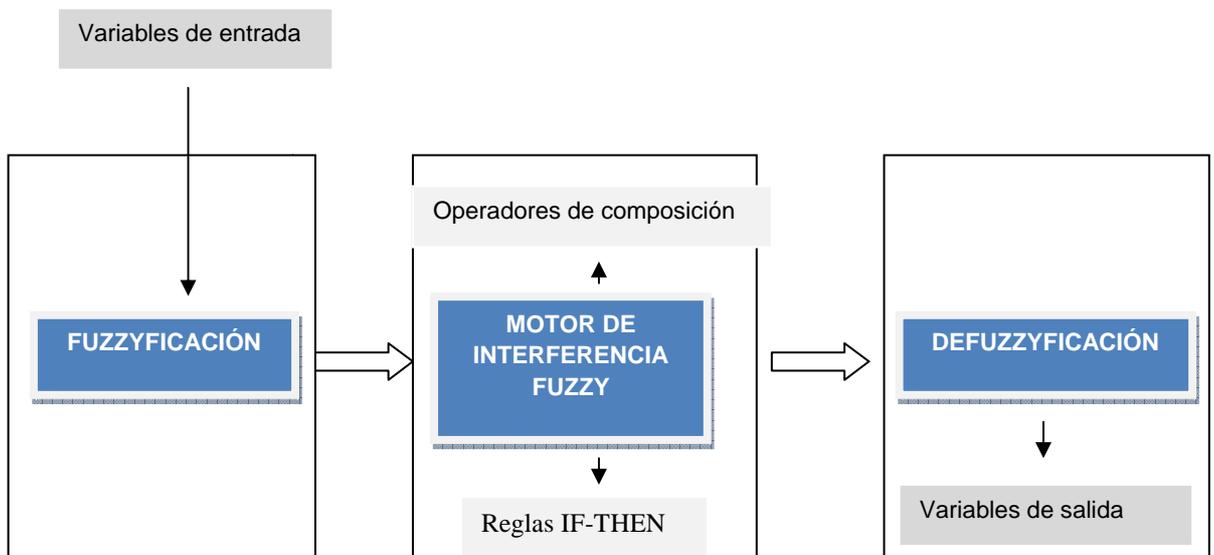


Fig. 31. Etapas del Método Fuzzy: Fuzzyficación (a); motor de interferencia (b); Defuzzyficación (c)

Se definirán previamente algunos conceptos a los que se hará referencia y que es necesario entender.

- Etiqueta: Nombre descriptivo utilizado para identificar una función de pertenencia. Por ejemplo bajo, mediano, alto muy alto.
- Entradas abruptas: Diferentes valores discretos de la variable del sistema, por ejemplo 1.8; 1.7.

- Rango/dominio: Intervalo sobre el cual una función de pertenencia es definida.
- Universo de discurso: Rango de todos los valores posibles de la variable del sistema.
- Función de pertenencia: Define un conjunto Fuzzy mapeando entradas abruptas de su dominio hasta su grado de pertenencia.
- Grado de pertenencia: Grado al que una entrada abrupta es compatible con una función de pertenencia. Puede tomar valores dentro de un valor predeterminado entre 0 y 1

A continuación se describen cada uno de los pasos del Método Fuzzy.

1- Fuzzyficación

Constituye la primera etapa de operación en el sistema difuso. Se trata de la conversión de los datos de entrada al conjunto difuso.

Las variables de entrada serán escogidas en base a un análisis de la situación objeto de estudio para una posterior recopilación de datos. No todos los datos serán necesarios para el análisis de la situación por lo que, los datos seleccionados, se clasifican en distintos tipos para la fase de recopilación de datos. Algunos podrán introducirse directamente en el sistema difuso, mientras que otros podrán no estar en formato compatible, por ejemplo diagramas, para la integración directa en el sistema. En tal caso se requerirá un proceso intermedio para traducir los datos.[16]

Esta primera etapa calcula el grado de pertenencia que podría tener una entrada abrupta a una o varias funciones de pertenencia de una variable, teniendo como resultado una entrada Fuzzy. En la Figura 32 se representa el procedimiento.

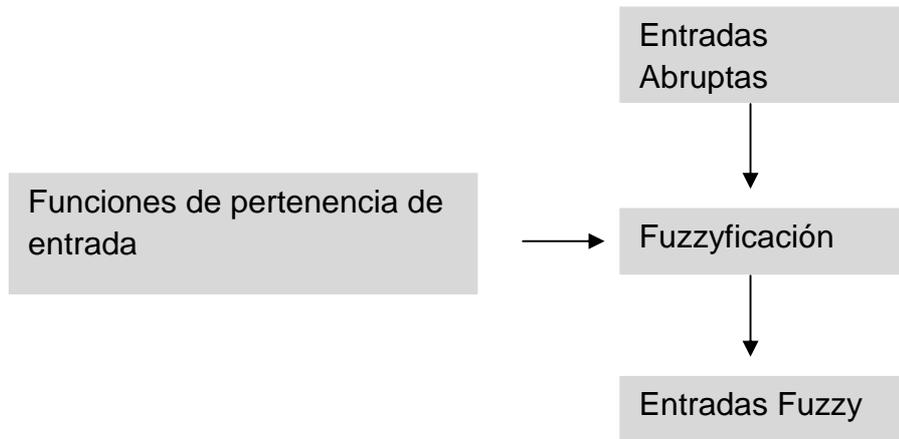


Fig. 32. Etapa Fuzzyficación, Método Fuzzy

Para transformar las entradas abruptas en entradas Fuzzy, primero deberán determinarse las funciones de pertenencia de la variable, mediante la asignación de etiquetas a cada variable dentro del Universo de Discurso.

Así, para la variable de entrada altura del individuo se podrían escoger las siguientes etiquetas: Bajo, Mediano, Alto. A continuación se definen las funciones de pertenencia para éstas etiquetas. El eje Y de la Figura 33 se refiere al grado de pertenencia para la cual los valores de entrada abrupta pertenecen a cada función de pertenencia.

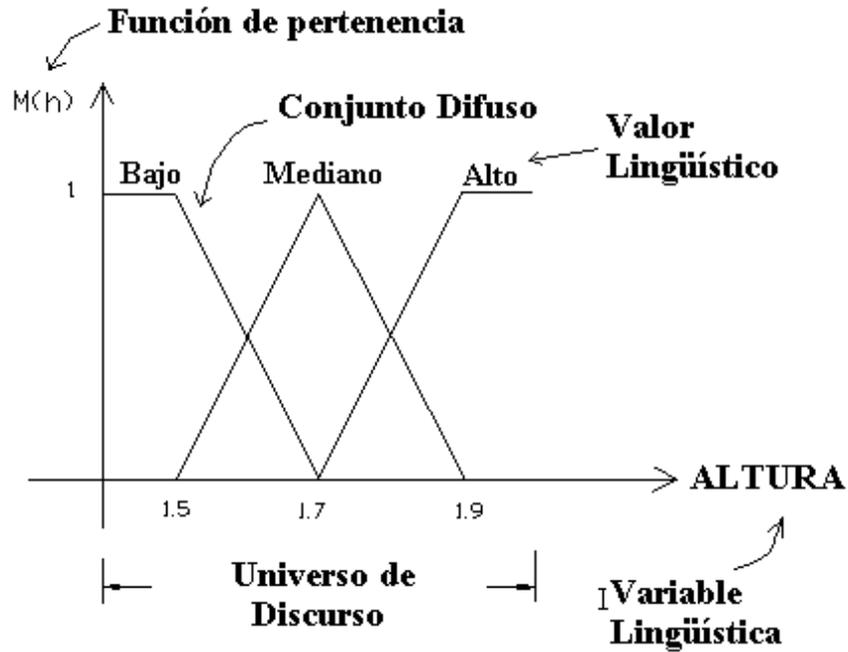


Fig. 33. Funciones de pertenencia, Método Fuzzy

2- Motor de interferencia Fuzzy

En la segunda etapa del procesamiento de la Lógica Fuzzy, llamada Interferencia Fuzzy, el controlador Fuzzy utiliza reglas lingüísticas sobre los resultados que fueron generados en la primera etapa, denominados entradas Fuzzy. El procedimiento queda reflejado en la Figura 34.

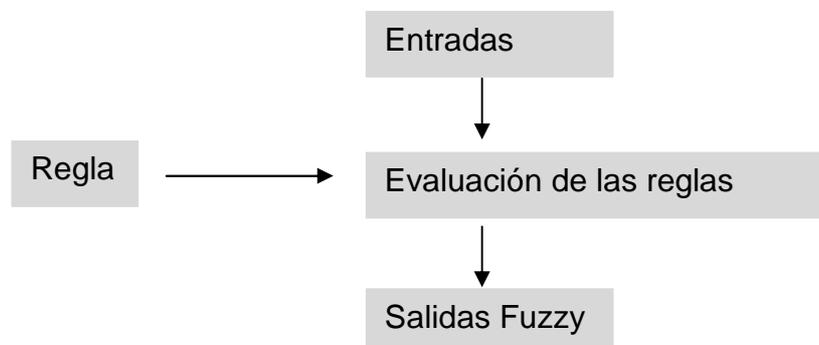


Fig. 34. Procedimiento de la etapa Motor de Interferencia, Método Fuzzy

Las reglas Fuzzy son sentencias del tipo Si \rightarrow Entonces (If \rightarrow Then) que describen la acción a tomar en respuesta a varias entradas Fuzzy. Las reglas están confinadas a un predefinido conjunto de términos lingüísticos cuya sintaxis es la siguiente:

IF antecedente 1 AND IF antecedente 2 ... THEN *consecuente 1* AND *consecuente 2*

, siendo AND uno de los operadores de la lógica Fuzzy. El antecedente tiene el siguiente formato:

Variable de entrada = Etiqueta (La altura (variable) es baja (etiqueta))
(19)

El consecuente sigue la siguiente forma:

Variable de salida = Etiqueta (20)

Las reglas siguen el sentido común del comportamiento del sistema y son escritas en términos de las etiquetas de las funciones de pertenencia.

Los antecedentes de las reglas poseen un grado de pertenencia que fueron calculados en la etapa de Fuzzyficación. Debido a que los antecedentes fueron conectados con el operador AND, la regla de fuerza asume como resultado el valor más pequeño de los antecedentes.

Una vez evaluado cada una de las cuatro reglas, el próximo paso es determinar la salida Fuzzy, comparando las fuerzas de todas las reglas que especifican el mismo consecuente, es decir, misma acción de salida.

3- Defuzzyficación

En la Defuzzyficación, el objetivo final es encontrar las salidas abruptas. Para ello cada salida Fuzzy, salidas que se obtuvieron en la etapa de Fuzzyficación, modificará a su respectiva función de pertenencia de salida. [16]

Los métodos más comunes en la Defuzzyficación son:

- *Método de la Media Ponderada:*

Se trata de un sencillo cálculo del promedio entre los valores de salida que se obtendrían para cada uno de los conjuntos Fuzzy multiplicados por el peso de la correspondiente regla o grado de pertenencia al subconjunto.

- *Método de Centro de Masa:*

En éste se determina el centro de gravedad del conjunto de salida, que resulta de la unión de las contribuciones de todas las reglas válidas. El valor de salida es la abscisa del punto del centro de gravedad.

- *Singleton:*

Método derivado del Centro de masa, donde se obtiene las abscisas de los puntos del centro de gravedad para cada regla válida. El valor de salida se obtiene por la media ponderada con relación a los grados de pertenencia de estos valores.

Debido a la cantidad y aleatoriedad de los diversos factores implicados en el fenómeno corrosivo y debido a que el objetivo del presente Proyecto Final de Carrera es realizar un análisis comparativo, se ha escogido el Método Fuzzy de Lógica Difusa frente a otros Métodos de la Lógica Clásica.

Previo al desarrollo de dicho Método se realizará un análisis digital de Imágenes, tras el cual, se obtendrán las variables abruptas que serán introducidas en el Método Fuzzy.

Todo esto, queda recogido en el siguiente Capítulo.

Capítulo 3

Metodología de Trabajo

En este capítulo se refleja la Metodología de Trabajo creada y empleada en el desarrollo del Presente Proyecto Final de Carrera.

El objetivo del presente proyecto consiste en realizar una evaluación comparativa del grado de corrosión de los diez casquillos objeto de estudio, ubicados en la zona inferior del Puente de Juan José Arenas, para conocer cuáles de las variables asociadas a cada escenario, establecido y predeterminado para tal fin, contribuyen a un mayor nivel de corrosión.

Para lograrlo, se ha realizado el trabajo en tres pasos fundamentales:

- Recogida de Datos: Esta primera fase implicará la definición de los distintos escenarios, la selección de casquillos, selección de secciones, toma de fotografías y selección y adecuación de imágenes.
- Cálculo de variables: Se obtendrán las tres variables abruptas: área ocupado por grietas y picaduras, área de corrosión incipiente y área libre de corrosión, mediante un procesado digital de imágenes.
- Aplicación del Método Fuzzy: Siguiendo el procedimiento de este método, se obtendrá finalmente el grado de corrosión de cada uno de los escenarios preestablecidos.

3.1- Terminología empleada:

Previo a la descripción del procedimiento de trabajo, necesitamos hacer una breve descripción de la terminología empleada. Utilizaremos la nomenclatura utilizada por Prieto en su Proyecto Final de Carrera [17] pues, tras, una minuciosa observación de los casquillos se observa que los aspectos de la corrosión siguen la misma forma ya identificada.

De este modo se manejarán en el estudio siete términos: Nueva picadura, picadura avanzada, colapso por picadura y grietas de corrosión, área libre de corrosión y área ocupada por grietas y picaduras, área de corrosión incipiente, estos tres últimos términos las abruptas que se introducirán en la Aplicación del Método Fuzzy.

En la Figura 35 se integran los cuatro tipos de picadura en una sección del casquillo:

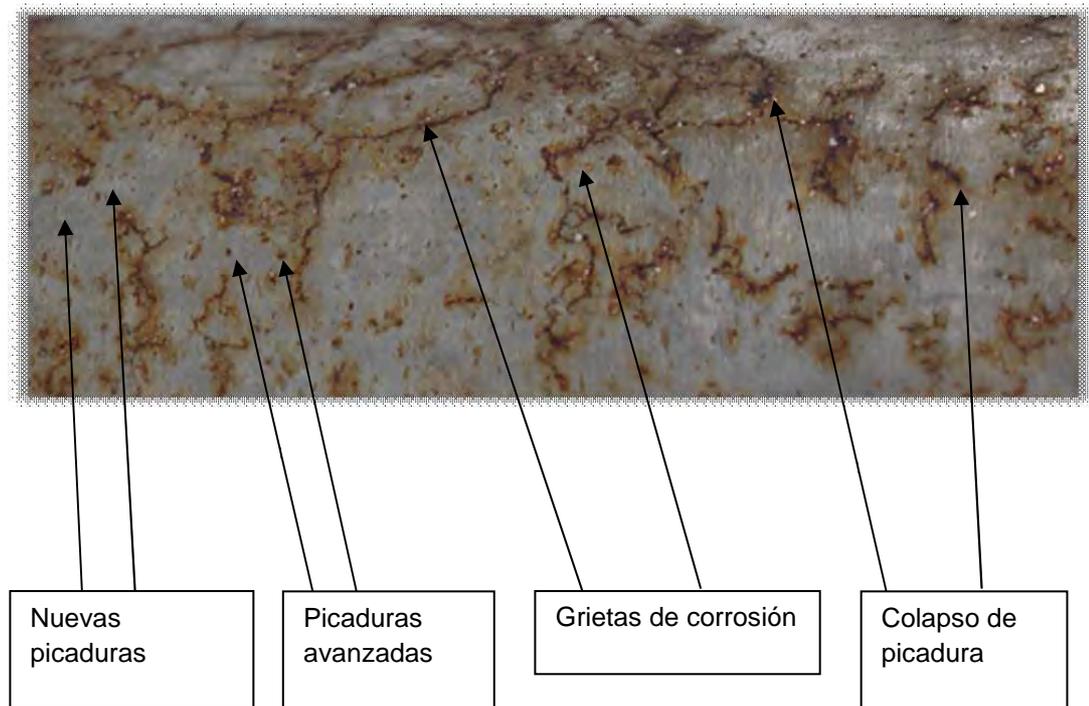


Fig. 35. Tipos de picaduras en los casquillos del Puente Juan José Arenas

- Nueva picadura

Las nuevas picaduras son las más pequeñas, casi imperceptibles a primera vista y fácilmente confundibles con el óxido residual de la superficie. El diámetro medio de estas nuevas picaduras, según los cálculos obtenidos, es de 0,03 cm, Figura 36. [17]



Fig. 36. Nuevas picaduras en un casquillo del Puente Juan José Arenas

- Picadura avanzada

Son el aspecto que adquieren las nuevas picaduras con el paso del tiempo, Figura 37. El diámetro medio obtenido es de 0,069cm. [17]



Fig. 37. Picaduras avanzadas en un casquillo del Puente Juan José Arenas

- Colapso por picadura y grietas de corrosión:

Los colapsos de picadura representan el mayor volumen de corrosión en la superficie, Figura 36. Su diámetro medio es de 0.111 cm. [17]

Se pueden generar por varios motivos. Las formas más frecuentes observadas para que se genere un colapso son:

- 1.) Por acumulación de picaduras adyacentes: Las nuevas picaduras y picaduras avanzadas pueden ir evolucionando muy próximas entre sí pudiendo juntarse y unirse superficies corroídas, desarrollando zonas de gran diámetro, Figura 38.

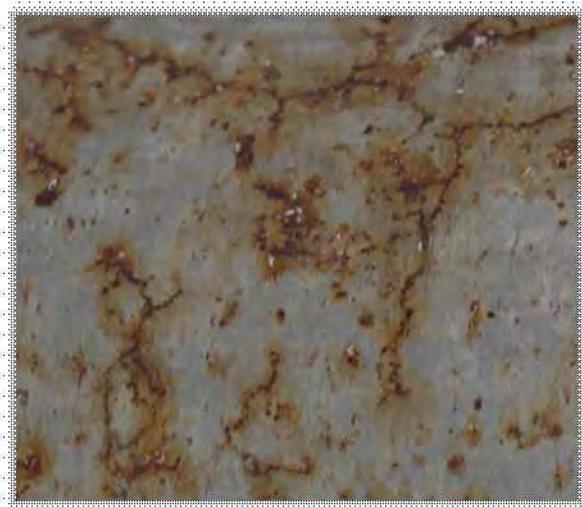


Fig. 38. Grietas de corrosión en un casquillo del Puente Juan José Arenas

- 2) Por generación de grietas con productos de corrosión: Se genera al haber picaduras adyacentes que no se llegan a tocar en su crecimiento, pero aparece un hilo o grieta de óxido que une ambas picaduras. Esta grieta crece en longitud y espesor, llegando a crear el colapso, Figura 39.



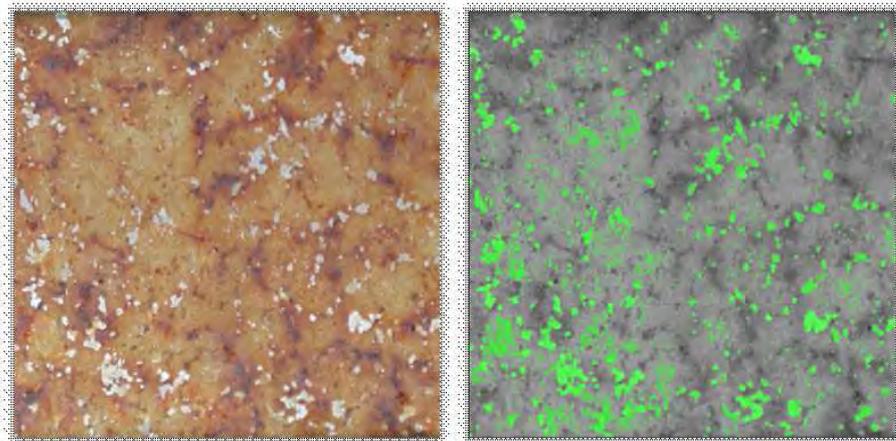
Fig. 39. Colapso por picaduras en un casquillo del Puente Juan José Arenas

Las tres variables medidas y, que posteriormente se incluirán en el proceso de Fuzzyficación, son: área libre de corrosión, área ocupada por grietas y picaduras y área de corrosión incipiente, que se detallan a continuación. Se escogen estas variables por su facilidad y precisión en la medición así como por ser las variables más representativas del grado de corrosión (una explicación más extensa de los motivos que han llevado a la selección de estas variables se verá en el apartado 3.3.4.

- Área libre de corrosión:

Este término hace referencia a la superficie que no contiene ni: nuevas picaduras, picaduras avanzadas o grietas de corrosión. Tampoco deberá incluir aquellos óxidos e hidróxidos de hierro derivados del proceso de corrosión. Es decir, este término comprenderá aquella superficie de casquillo donde la capa pasiva siga intacta.

En la Figura 40, se muestra una imagen de una sección de casquillo y, sombreado en verde, su correspondiente “Área libre de corrosión”.



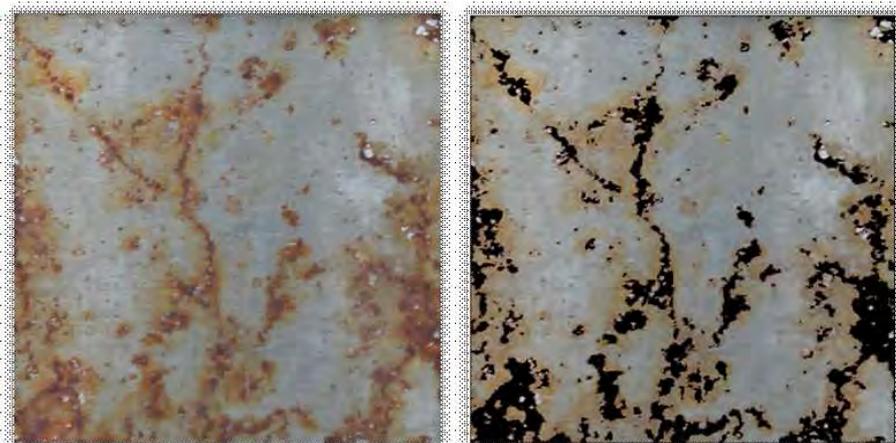
a)

b)

Fig. 40. Fotografía de una sección de casquillo (a) y su área libre de corrosión (b)

- Área ocupada por grietas y picaduras:

Incluye aquella superficie ocupada únicamente por grietas y picaduras. No se incluirán los productos derivados del proceso de corrosión. Esta superficie correspondería a aquella sombreada en negra en Figura 41:



a)

b)

Fig. 41. “Fotografía de una sección de casquillo (a) y su correspondiente área ocupada por grietas y picaduras (b)

- Área de corrosión incipiente:

En función de su carácter protector, los residuos derivados del fenómeno corrosivo protegen, frenan o ralentizan el proceso. Si no protegen, propician, caso de los óxidos e hidróxidos del hierro, ya que se desprenden con facilidad dejando el substrato de nuevo expuesto al ambiente agresivo, pues son altamente higroscópicos.

En este área se incluirán éstos residuos, fácilmente identificables y diferenciables de las grietas o picaduras, debido a su diferencia de tonalidad y a la profundidad que alcanzan grietas y picaduras.

En la Figura 42 se muestra una fotografía de una sección de casquillo, así como su correspondiente área de corrosión incipiente.

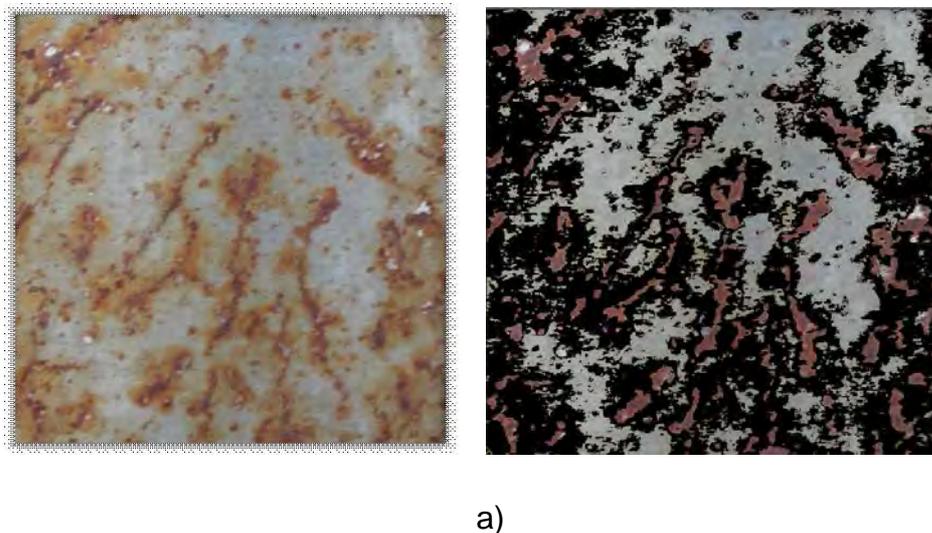


Fig. 42. Fotografía de una sección de casquillo (a) y su correspondiente área de corrosión incipiente (b)

3.2- Recogida de datos

El flujograma de la Figura 43 describe el procedimiento seguido para este apartado, cuyos pasos se describirán a continuación:



Fig. 43. Procedimiento seguido para la Recogida de Datos

3.2.1- Selección de casquillos

El puente de “Juan José Arenas”, ubicado en las coordenadas 43°28'20"N 3°48'30"W [18], contiene 72 casquillos, de los cuales 36 se sitúan en la parte inferior y 36 en la superior. Debido a las dificultades que supondría el estudio de los casquillos de la parte superior, se ha centrado el estudio sobre los 36 casquillos inferiores.

En la Figura 454 se muestra un dibujo de la vista en planta del puente donde quedan representados los 36 casquillos inferiores. Como se observa, se han subdividido los casquillos en cuatro escenarios ó zonas, denominados: A, B, C y D.

- 1.) Escenario A: Se corresponde con la zona coloreada de rojo. Es la mitad de los casquillos de la parte Oeste relativa al dibujo y que no se corresponde con la zona Oeste geográfica. Esta zona está expuesta al efecto del tráfico rodado, así como a los vientos Noroeste, Suroeste y Sur.

- 2.) Escenario B: Se corresponde con la zona coloreada de blanco. Es la mitad de los casquillos de la parte Oeste, Figura 42. Esta zona está directamente expuesta al tráfico peatonal, así como a los vientos Norte, Noreste, Este y Sureste.
- 3.) Escenario C: Se corresponde con la zona coloreada de amarillo. Es la mitad de los casquillos de la parte Este, Figura 42. Esta zona está expuesta a la influencia humana, así como a los vientos Noroeste, Suroeste y Sur.
- 4.) Escenario D: Se corresponde con la zona coloreada de azul. Es la mitad de los casquillos de la parte Este, Figura 44. Esta zona está expuesta a la circulación de automóviles, así como a los vientos Norte, Noreste, Este y Sureste.

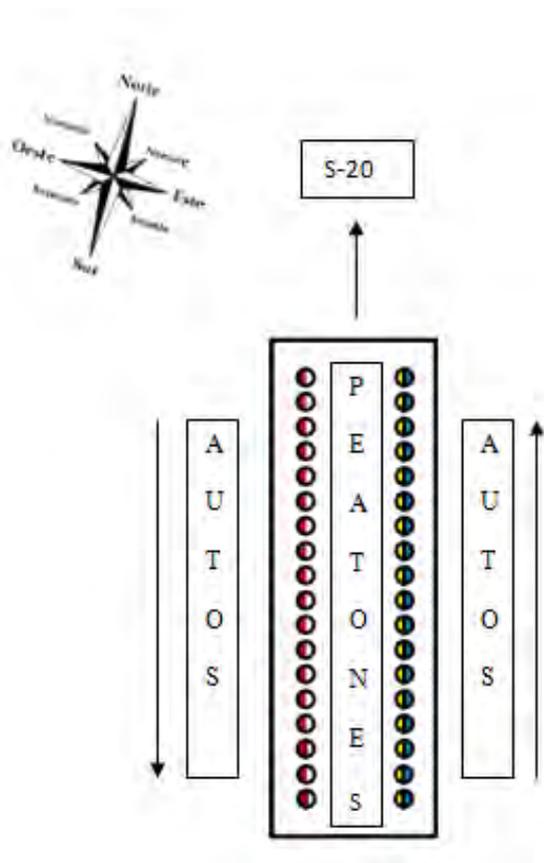


Fig. 44. Escenarios predeterminados del Puente Juan José Arenas para el presente estudio

El estudio sólo se realizará sobre 10 casquillos: 5 de los escenarios A y B y 5 de los escenarios C y D. Los resultados se extrapolarán al resto de casquillos de cada área. Estos se han escogido aleatoriamente y son numerados del 1 al 10, de tal modo que, los casquillos objeto de estudio, serán los indicados en la Figura 45:

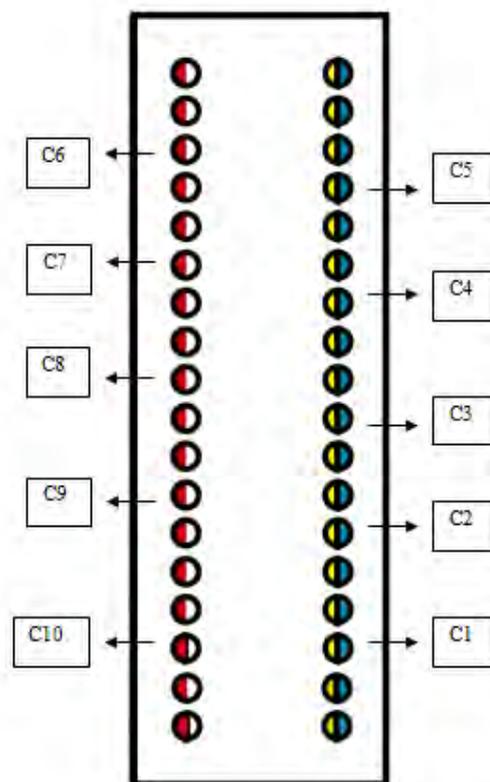


Fig. 45. Selección de casquillos objeto de estudio

3.2.2- Adquisición y selección de fotografías de cada zona

El objetivo de la adquisición de fotografías es realizar un barrido de cada una de las zonas para la posterior medida de las áreas libres de corrosión y ocupadas por grietas y picaduras. Puesto que un barrido total de la superficie no se contempla en el objetivo de este proyecto, se realizará el análisis sobre una superficie total de 4 cm² de cada casquillo de cada zona.

Se han tomado 54 fotografías de cada zona de cada uno de los casquillos seleccionados, esto es, 27 fotografías del casquillo 1 en el escenario C y 27 fotografías del casquillo 1 en el escenario D. De éstas 54 fotografías sólo nos quedaremos con un tercio, 18 en total, 9 por cada zona, seleccionando aquellas que sean más nítidas y representativas. A su vez se dividirá cada casquillo de cada zona en 3 secciones: 1, 2 y 3, que, como muestra la Figura 46, se encontrarán separadas a una distancia de 45 grados:

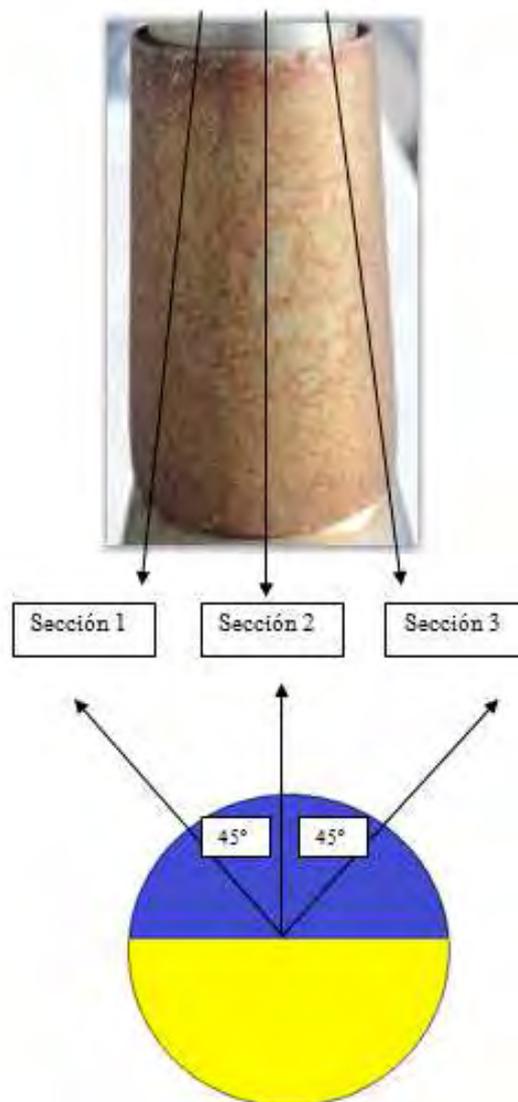


Fig. 46. Secciones objeto de estudio de los casquillos del Puente Juan José Arenas

Se tomarán 6 fotografías de cada sección, de las que se descartarán las 4 con peor resolución, 3 fotografías en cada una de las superficies, 1 y 2, que se muestran en la Figura 47:

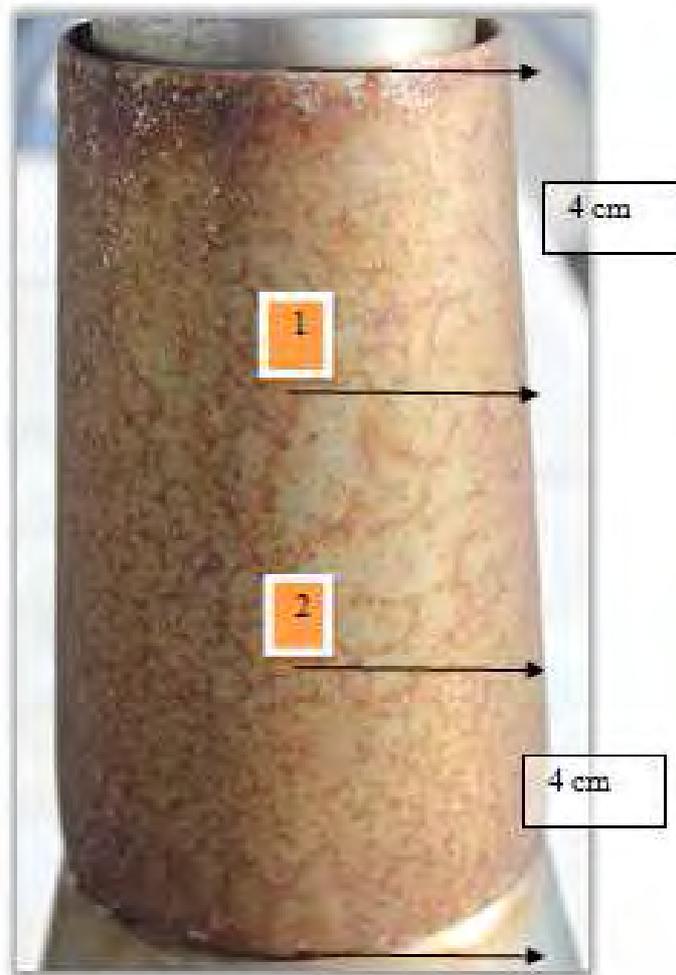


Fig. 47. Superficies objeto de estudio de los casquillos del Puente Juan José Arenas

La adquisición de fotografías es, quizás, el proceso más importante de este proyecto, pues, de no hacerse bien, los resultados serán erróneos, y por ello se ha realizado con sumo cuidado, pudiendo asegurar gran fiabilidad a las conclusiones obtenidas.

Con el fin de evitar al máximo la distorsión que tiene lugar por el hecho de fotografiar una superficie curva, las fotografías se realizarán de cada una de las zonas por separado, apoyándonos con una plantilla que contiene una perforación de las dimensiones de las superficies de la imagen anterior (2x2 cm²). La Figura 85 muestra una fotografía hecha con el apoyo de esta plantilla:

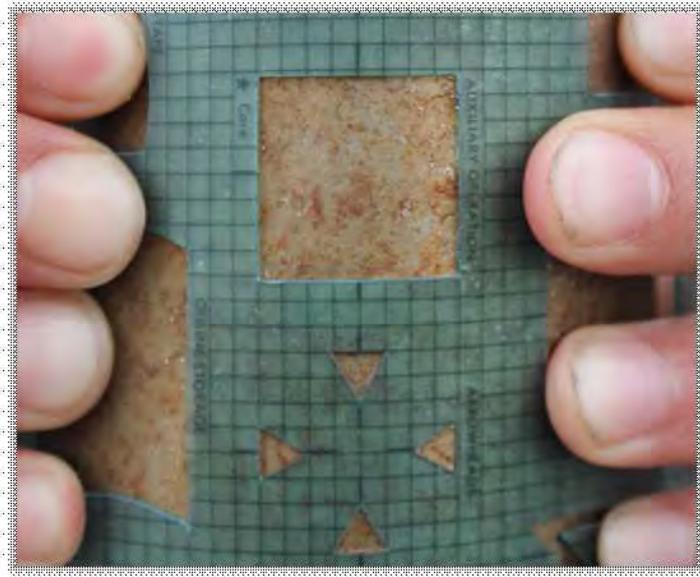


Fig. 48. Adquisición de fotografía de un casquillo mediante el uso de plantilla

Las imágenes se tomarán con el objetivo lo más paralelo posible a la superficie del casquillo y, debido a la cámara y el objetivo utilizados, CANON EDS500, a una distancia de entre 15 y 20 centímetros de la superficie.

Como se explicará más adelante, las imágenes serán procesadas con la herramienta de Procesamiento de Imágenes de Matlab, que diferenciará los píxeles por ello, es importante, que las fotografías se tomen en un día nublado en que cada zona de los casquillos se encuentre bajo la misma iluminación, para que no haya sombras y el Sol no incida directamente sobre la superficie de casquillo.

Por último señalar que en las zonas superior e inferior del casquillo aparecen varios tipos de corrosión, predominando la corrosión por resquicios, Figura 49. Es por esto que evitaremos estas zonas para la toma de fotografías y su posterior análisis, pues el presente proyecto se centra únicamente en la corrosión por picadura. Se dejará pues, un amplio margen de 5 cm en los extremos superior e inferior de los casquillos.

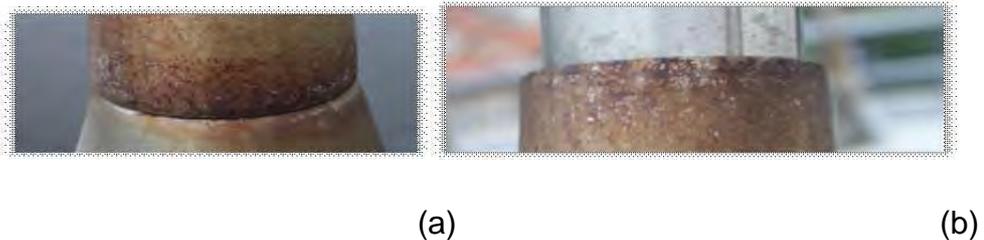


Fig. 49. Zonas inferior (a) y superior (b) de los casquillos afectadas por corrosión por resquicios

3.2.3- Selección y adecuación de imágenes

Una vez realizado el paso anterior, se dispondrá de un total de 360 fotografías. De éstas nos quedaremos con un tercio, pues habremos hecho 3 fotografías de cada superficie, 12 fotografías de cada casquillo seleccionado: 6 para su mitad perteneciente a un escenario y 9 para la otra, 3 por cada superficie. En la Figura 50 se muestra este procedimiento.

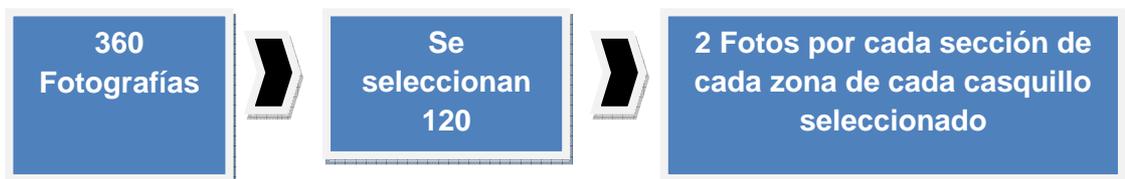


Fig. 50. Procedimiento de la selección y adecuación de imágenes

Es muy importante la organización en este paso, pues una confusión sobre el origen de cada fotografía podría conllevar unos resultados finales erróneos.

Tras una selección e identificación de las 120 fotografías, Escenario-Número de casquillo-Sección-Superficie, se recortarán con el objeto de tener aislados el área de 4 cm². Así, se transformará la fotografía de la Figura 45 en la imagen de la Figura 51.

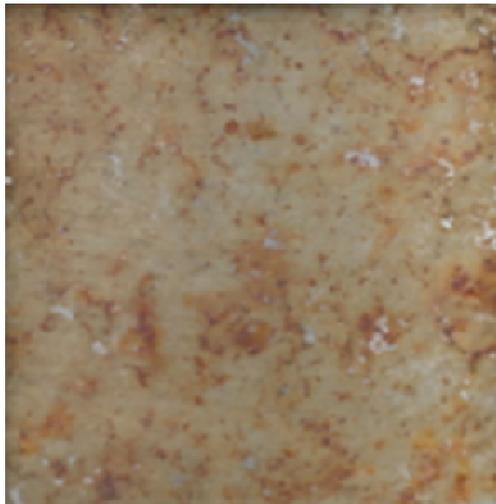


Fig. 51. Fotografía de un casquillo preparada para el procesamiento digital

Con esto ya se estará en disposición de hallar el área libre de corrosión, área ocupado por grietas y picaduras y área de corrosión incipiente, objetivos iniciales marcados para tener las variables de entrada de la primera etapa del Método Fuzzy: Fuzzyficación.

3.3- Cálculo de variables

Como ya se ha comentado, se utilizará en un entorno de Matlab utilizando algoritmos de segmentación capaces de diferenciar cada de las áreas mencionadas, para la posterior extracción de éstas y su introducción en el Método Fuzzy.

3.3.1- Procesado digital de imágenes, análisis de imágenes y visión artificial.

Se entiende por procesado digital de imágenes el almacenamiento, transmisión y representación de información, en forma de imágenes, con la ayuda de un computador. [20]

En este contexto, cabe definir una imagen como una función bidimensional de intensidad de luz, $f(x,y)$, siendo x e y las coordenadas espaciales, y f el valor que toman en cada uno de éstos puntos, que es proporcional a la intensidad de la imagen en ese punto. Una imagen digital se puede representar como una matriz, cuyos elementos se identifican con un punto en la imagen, y cuyo valor coincide con el nivel de intensidad de luz en ese punto. A cada uno de estos elementos del vector se les denomina píxeles.

El objetivo del procesado digital de imágenes es, principalmente, una mejora de la información contenida en una imagen, bien sea para la interpretación humana o para la percepción de una máquina, pues siempre produce otra imagen como resultado de la operación.

La visión artificial es un subcampo de la inteligencia artificial cuyo propósito es programar un computador para que interprete del modo correcto una imagen o sus características, emulando la visión humana.

El análisis de imágenes, método utilizado en este proyecto, se refiere al proceso por el cual se extrae información cuantitativa de la imagen. El

resultado es siempre una tabla de datos, una gráfica o cualquier otra representación de los datos numéricos.

Atendiendo a los tipos de procesos implicados en estas disciplinas, se suele hacer una clasificación de tres niveles:

- *Bajo nivel* (Procesado). Incluye todos aquellos procesos que mejoran la imagen. Todas las entradas y salidas son imágenes.
- *Medio nivel*: Analizan los niveles bajos e incluyen la segmentación, descripción de objetos, clasificación, etc. La entrada es una imagen y la salida son atributos de los objetos, como por ejemplo bordes, contornos, identidades de objetos individuales, etc.
- *Alto nivel*: Los procesos están orientados al proceso de interpretación de los elementos obtenidos en los niveles inferiores, entrando en juego el entendimiento y la toma de decisiones en función del contenido observado.

Así, se denomina procesado digital de imágenes a los procesos cuyas entradas y salidas son imágenes, procesos de bajo nivel, y, además, a aquellos procesos que extraen atributos de imágenes, incluyendo el reconocimiento de objetos individuales, catalogados procesos de nivel medio. [19]

3.3.2- Conceptos básicos de la imagen digital

Con el fin de entender correctamente el funcionamiento y manejo de una herramienta de análisis de imágenes digitales se introducen a continuación algunos conceptos.

a) Imagen Digital

La clasificación de las imágenes se puede realizar atendiendo a distintos criterios. En este apartado se diferencian en dos grandes grupos: Imágenes basadas en mapas de bits e imágenes vectoriales.

- *Imágenes de mapa de bits*, también denominadas *imágenes raster*: son imágenes pixeladas, es decir, están formadas por un conjunto de puntos, píxeles, contenidos en una tabla. Cada uno de estos puntos tiene un valor o más de uno que describe su color.
- *Imágenes vectoriales*: las imágenes vectoriales son representaciones de entidades geométricas, tales como círculos, rectángulos o segmentos. Están representadas por fórmulas matemáticas, un rectángulo está definido por dos puntos; un círculo, por un centro y un radio; una curva, por varios puntos y una ecuación. El procesador "traducirá" estas formas en información que la tarjeta gráfica pueda interpretar.

Dado que una imagen vectorial está compuesta solamente por entidades matemáticas, se pueden aplicar fácilmente transformaciones geométricas a la misma, ampliación, expansión, etc., mientras que una imagen de mapa de bits, compuesta por píxeles, no podrá ser sometida a dichas transformaciones sin sufrir una pérdida de información, llamada distorsión. La apariencia de los píxeles en una imagen después de una transformación geométrica, en particular cuando se la amplía, se denomina pixelación, también conocida como *efecto escalonado*. Además, las imágenes vectoriales, denominadas *clipart* en el caso de un objeto vectorial, permiten definir una imagen con muy poca información, por lo que los archivos son bastante pequeños.[20]

Por otra parte, una imagen vectorial sólo permite la representación de formas simples. Si bien es verdad que la superposición de varios elementos simples puede producir resultados impresionantes, no es posible describir

todas las imágenes con vectores y éste es, particularmente, el caso de las fotografías realistas. En el presente Proyecto Final de Carrera se utilizarán imágenes en mapa de bits.

b) El Color

Para poder percibir el color de un cuerpo es necesaria la luz. El color es una interpretación, individual y subjetiva, de las ondas electromagnéticas que refleja el cuerpo iluminado. El espectro visible es el rango de aquellas longitudes de onda, dentro del espectro electromagnético, que el ojo humano es capaz de detectar. Se corresponde tan sólo a longitudes comprendidas entre 380 y 780 nm, Figura 49. Dentro del espectro visible, se clasifican los seis colores espectrales como franjas de color, incluyendo en sus límites todas las demás tonalidades. [19]

En el proceso de percepción de las distintas longitudes de onda están involucrados los conos y bastones en la retina humana, así como la memoria. Algunos objetos son percibidos con su color almacenado en la memoria. El estudio científico elimina, en gran medida, el factor subjetivo estableciendo, para cada color, un único punto de coordenadas dentro de cada espacio de color. Así el color es cuantitativo, es decir, una combinación de varios números que permiten un análisis objetivo y estandarizado. A continuación se definirán algunos de los espacios de color más ocnocidos y utilizados.



Fig. 52. Espectro visible

- Espacio RGB: *Rojo, Verde y azul.*

Es uno de los espacios más utilizados, basado en mapas de bits y en la capacidad de la retina humana de distinguir entre el rojo, verde y azul. Una imagen en color RGB basa su funcionamiento en la matriz dimensional de una imagen en blanco y negro. Esta matriz está compuesta por los valores de luminancia de cada píxel que compone la imagen. Trabajando con ocho bits se tiene un total de 256 valores posibles para cada píxel, que se traducen en diferentes tonalidades de grises. De este modo se cubre toda la escala de grises, desde el valor 0, correspondiente al negro, hasta el valor máximo 255, que se corresponde al blanco.

En el espacio RGB se parte de la misma idea, a diferencia de que se tiene una matriz tridimensional compuesta por tres planos correspondientes a los tres colores primarios: rojo, verde y azul. Cada plano de color es como una imagen en blanco y negro, donde el valor máximo, 255, es el color puro y los valores comprendidos entre 0 y 254 son distintas tonalidades de este color. La combinación de los tres planos de colores primarios, permite la representación de todos los demás colores. Cada uno de los tres planos de color trabaja a su vez con 8 bits, es decir, que por plano de color se siguen teniendo 256 valores, pero, debido a la tridimensionalidad de una imagen en color, se obtienen un total de 16777216 posibles variables. [19]

La suma de los tres colores primarios puros, los tres planos de color con valor 255, da como resultado el blanco puro, mientras que la ausencia de color, valor 0 en los tres planos, genera el color negro puro, Figura 53.

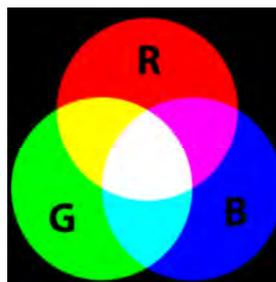


Fig. 53. Espacio RGB

- Espacio CMYK: *Cian, Amarillo y Azul*.

En este espacio, la suma de todos los colores da como resultado el negro y la ausencia de color genera el blanco.

El espacio CMY está compuesto por los colores complementarios a los tres primarios, es decir: cian, magenta y amarillo. Es el espacio de color utilizado en la imprenta. El negro obtenido mediante este espacio contiene impurezas y tiende más a clasificarse como un marrón oscuro, y por ello se añade un cartucho especial de color negro, originando la denominación CMYK.

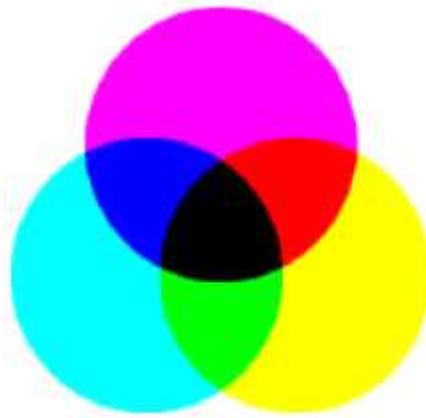


Fig. 54. Espacio de color CMYK

- Modelos HSV; *Hue, Saturation, Lightness*. Modelo circular de color

Pensar sobre términos de matiz y saturación durante la definición de un color es más cercano a la idea humana del color que hacerlo por sus propiedades sustractivas y aditivas. De esta idea nacen los modelos HSV (Hue, Saturation, Value – Matriz, Saturación, Valor) y HSL (Hue, Saturation, Lightness), como una transformación no lineal del espacio RGB. [20]

En el modelo HSV, la matriz se representa en una región circular, cuyo centro es el blanco. La distancia del centro hacia el color en la región circular

define la saturación. Cada color primario está separado del otro 120° , y los colores mixtos están formados entre los espacios resultantes. Una tercera dimensión es añadida para definir el negro, generando así un cono en el espacio, cuya altura viene dada por el brillo o valor. Los constituyentes en coordenadas cilíndricas:

- *Matiz:*

Se representa como un grado de ángulo cuyos valores posibles van de 0 a 360° , aunque para algunas aplicaciones se normalizan del 0 al 100%. Cada valor corresponde a un color; 0 es rojo, 60 es amarillo y 120 es verde.

De forma intuitiva se puede realizar la siguiente transformación para conocer los valores básicos RGB:

Se disponen de 360 grados en dónde se dividen los 3 colores RGB, eso da un total de 120° por color, sabiendo esto podemos recordar que el 0 es rojo RGB(1, 0, 0), 120 es verde RGB(0, 1, 0) y 240 es azul RGB(0, 0, 1). Para colores mixtos se utilizan los grados intermedios, el amarillo, RGB(1, 1, 0) está entre rojo y verde, por lo tanto 60° . Se puede observar como se sigue la secuencia de sumar 60 grados y añadir un 1 o quitar el anterior:

- $0^\circ = \text{RGB}(1, 0, 0)$
- $60^\circ = \text{RGB}(1, 1, 0)$
- $120^\circ = \text{RGB}(0, 1, 0)$
- $180^\circ = \text{RGB}(0, 1, 1)$
- $240^\circ = \text{RGB}(0, 0, 1)$
- $300^\circ = \text{RGB}(1, 0, 1)$
- $360^\circ = 0^\circ$

Esta transformación permite saber los tonos de matices de colores puros que contienen alguna cantidad, o ninguna, de los colores R, G y B. Para el color blanco se puede poner cualquier color y saturación, siempre que se establezca el valor, de luminosidad, máximo. Asimismo, para el color negro,

se puede poner cualquier color y saturación, siempre que se ponga un valor de 0.

- *Saturación*

Se representa como la distancia al eje de brillo negro-blanco. Los valores posibles van del 0 al 100%. A este parámetro también se suele llamar "pureza" por la analogía con la pureza de excitación y la pureza colorimétrica de la colorimetría. Cuanto menor sea la saturación de un color, mayor tonalidad grisácea habrá y más decolorado estará. Por eso es útil definir la *insaturación* como la inversa cualitativa de la saturación.

- *Valor*

Representa la altura en el eje blanco-negro. Los valores posibles van del 0 al 100%. 0 siempre es negro; dependiendo de la saturación, 100 podría ser blanco o un color más o menos saturado.

En la Figura 55 se representa el Cono de colores del espacio HSV.

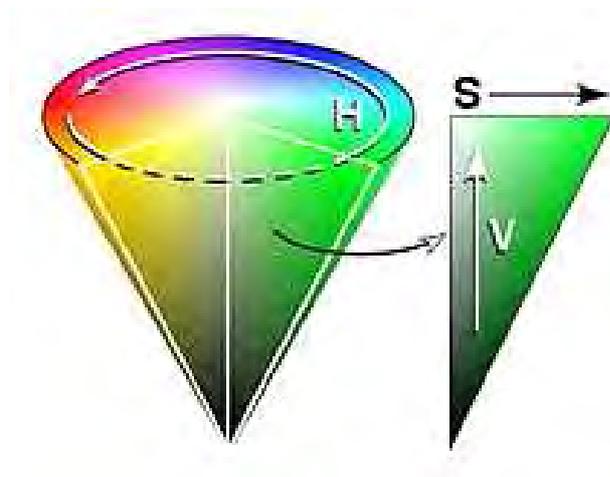


Fig. 55. Cono de colores del espacio HSV

- *Espacio de color L*a*b*

Este espacio está basado en la percepción de color del ojo humano. El espacio de color L*a*b fue diseñado para ser independiente del dispositivo en el que se emplea, ya sea por pantalla o impresora. Crea colores inalterables, persistentes y mas resistentes frente a errores, separando la luminosidad “L”, de los dos canales cromáticos “a” y “b”. [19]

Comparado con el RGB y CMYK, a menudo, es más rápido hacer correcciones eficientes de color en Lab. El hecho de que la luminosidad es completamente ignorada en los canales A y B, hace que sea mucho menos sensible a errores.

Aunque el número de valores numéricos posibles por cada píxel es menor en Lab que en RGB o CMYK, es posible referenciar una cantidad superior de colores en total desde el sistema Lab -no solo colores que no pueden ser descritos con RGB o CMYK sino también colores que no aparecen en absoluto en el mundo real. En algunos casos este acceso a colores imaginarios es de utilidad cuando se generan manipulaciones de imagen de gran cantidad de pasos.

Los tres parámetros en el modelo representan la luminosidad de color (L*, L*=0 rendimientos negro y L*=100 indica blanca), su posición entre rojo y verde (a*, valores negativos indican verde mientras valores positivos indican rojo) y su posición entre amarillo y azul (b*, valores negativos indican azul y valores positivos indican amarillo).

El modelo de color Lab ha sido creado para servir como un dispositivo independiente modelo para ser utilizado como referencia. Por eso es crucial darse cuenta de que la representaciones visuales de la plena gama de colores en este modelo nunca son exactas, ya que están ahí sólo para ayudar en el concepto, pero son intrínsecamente inexactas.

El modelo de color Lab es tridimensional y sólo puede ser representado adecuadamente en un espacio tridimensional.

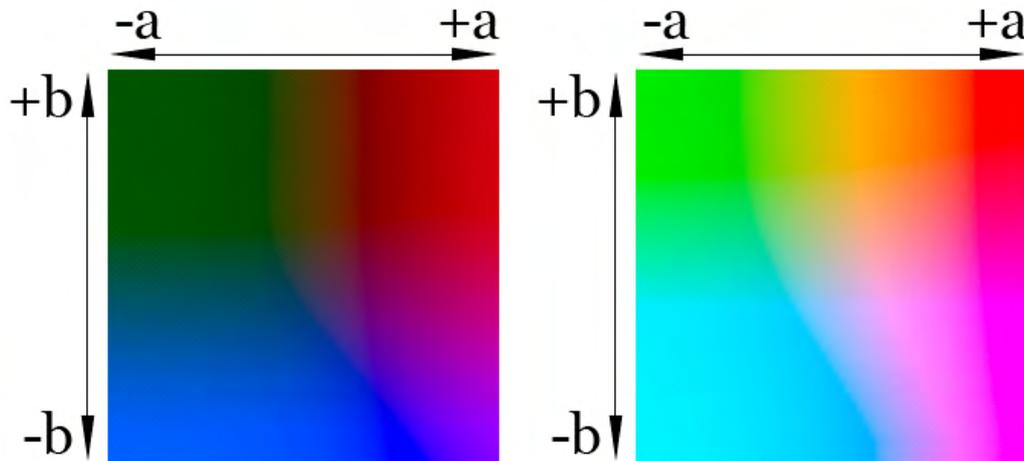


Fig. 56. Escala de color Lab luminisidad al 25% (a) y luminisidad al 75% (b)

3.3.2.1- Espacio de color utilizado en el Proyecto Final de Carrera

Como ya se ha comentado, todas las fotografías han sido tomadas el mismo día, un día nublado en el que no había sombras ni rayos incidiendo directamente sobre los casquillos. De este modo se ha pretendido que la iluminación y saturación de las imágenes fuese exactamente la misma.

Cabe resaltar que aún bajo éstas condiciones se han dado ciertas diferencias entre la saturación e iluminación de distintas imágenes. En la Figura 57 se observa la diferencia de saturación e intensidad de dos fotografías correspondientes a los Escenarios A y C.

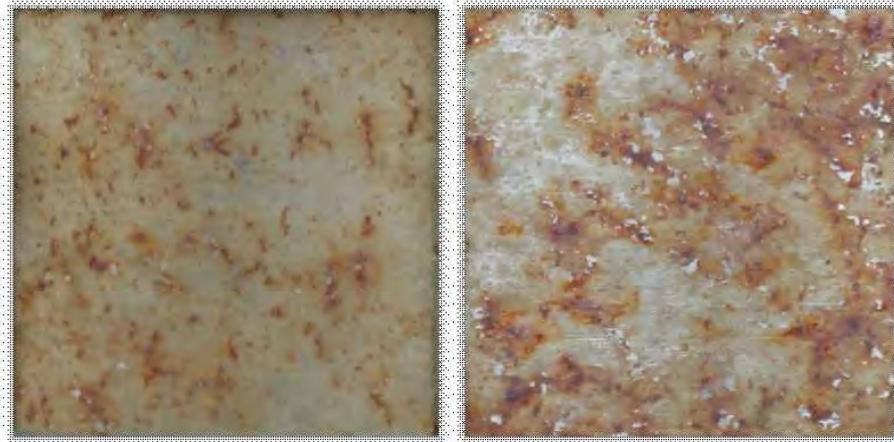


Fig. 57. Fotografías de casquillos con distinta saturación

Debido a que el objetivo de este proyecto es realizar una comparativa entre distintas zonas de estudio, es necesario tratar de igualar las condiciones para estar en disposición de comparar. El problema principal que se ha detectado es la diferencia de saturación e iluminación de las distintas imágenes, por lo que se ha utilizado un espacio de color que permitiese las comparaciones objetivas en estos casos.

La saturación, colorido o pureza es la intensidad de un matiz específico. Se basa en la pureza del color. Un color muy saturado tiene un color vivo e intenso mientras que, un color menos saturado, parece más descolorido y gris. Sin saturación, un color se convierte en un tono de gris.

La saturación de un color está determinada por una combinación de su intensidad luminosa y la distribución de sus diferentes longitudes de onda en el espectro de colores. El color más puro se consigue usando una sola longitud de onda, a una intensidad muy alta, como con un láser. Si la intensidad luminosa disminuye, la saturación también. Para desaturar un color en un sistema sustractivo, puede agregársele blanco, negro, gris, o su color complementario.

En el espacio RGB, un color tiene una saturación máxima si tiene una luminosidad de 100% en el canal rojo y 0% en los otros canales. Este color no estaría saturado en absoluto, si todos los canales fueran iguales. Así, la

saturación, será la diferencia entre los valores de los canales. En términos exclusivamente colorimétricos, esta definición en el espacio colorimétrico RGB plantea varios problemas. El espacio colorimétrico RGB no es absoluto, el valor de saturación es arbitrario y depende de la elección de los colores primarios y del punto blanco. Por ejemplo, el espacio de color RGB no tiene necesariamente un jacobiano único en términos colorimétricos.

La saturación es una de las coordenadas en los sistemas colorimétricos HSL y HSV.

Este es el motivo por el que se analizarán las imágenes manejadas utilizando el espacio de color HSV.

3.3.3- Segmentación de imágenes

El análisis de imágenes comprende todos los métodos y técnicas que se utilizan para extraer información de una imagen.

El primer paso lo constituye la segmentación de imágenes. Esta se ocupa de descomponer una imagen en sus partes constituyentes, basándose en ciertas características que permiten distinguirlas. En detalle, la segmentación de la imagen es el proceso de asignación de una etiqueta a cada píxel de la imagen de tal modo, que los píxeles que compartan la misma etiqueta, también tendrán ciertas características visuales similares.

La mayor parte de las imágenes están constituidas por regiones o zonas que tienen características homogéneas (nivel de gris, textura, etc). Estas regiones generalmente corresponden a objetos de la imagen. La segmentación es el proceso mediante el cual se divide la imagen, en varias zonas o regiones homogéneas y disjuntas a partir de su contorno, conectividad, o en términos de un conjunto de características de los píxeles de la imagen que permitan discriminar unas regiones de otras. Cabe distinguir entre segmentación completa y segmentación parcial.

En la segmentación completa, las regiones disjuntas corresponden directamente a objetos de la imagen. En la segmentación parcial, las regiones no se corresponden directamente con objetos de la imagen. La segmentación llevada a cabo en este Proyecto Final de Carrera será de tipo parcial.

Los algoritmos de segmentación de imágenes monocromáticas se basan en alguna de las tres propiedades siguientes:

- Discontinuidad en los tonos de gris de los píxeles de un entorno. Esto permite detectar puntos aislados, líneas y bordes.
- Similitud en los tonos de gris de los píxeles de un entorno, que permite construir regiones por división y fusión, por crecimiento o por umbralización.
- Conectividad de los píxeles. Se dice que una región está conectada si para cada par de píxeles de la región existe un camino formado por píxeles de esa región que los conecta.

En la segmentación se pueden aplicar multitud de procesos y técnicas distintas, atendiendo al tipo de imagen y el resultado deseado. Algunos de ellos se definen a continuación.

3.3.3.1- Segmentación mediante detección de bordes

Un punto aislado de una imagen tiene un tono de gris que difiere significativamente de los tonos de gris de sus píxeles vecinos, es decir, de los ocho píxeles de su entorno 3x3. Una máscara para detectar un punto aislado es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Aplicando esta máscara al píxel (i, j) obtenemos:

$$g(i, j) = -f(i-1, j+1) - f(i-1, j) - f(i+1, j+1) - f(i-1, j) + 8f(i, j) - f(i+1, j) - f(i-1, j-1) - f(i, j-1) - f(i+1, j-1) \quad (22)$$

Diremos que el píxel (i, j) es un punto aislado si :

$$|g(i, j)| > T \quad (23)$$

,donde T es el valor umbral fijado por el decisor. Dicho valor depende de la aplicación que estemos realizando.

Sin embargo, esta máscara puede detectar, como puntos aislados, píxeles que forman parte de un borde. Por ello, es más conveniente utilizar el filtro no lineal siguiente:

$$R(i, j) = \min |f(r, s) - f(i, j)| \quad (24)$$

Diremos que el píxel (i, j) es un punto aislado si :

$$|R(i, j)| > T \quad (25)$$

Un *borde* o *arista* es la frontera entre dos regiones cuyos tonos de gris difieren significativamente o tienen propiedades diferentes, como ocurre en el caso de texturas. Si se quieren detectar los bordes, se debe poner énfasis en los cambios bruscos de los niveles de gris de píxeles vecinos y suprimir aquellas áreas con valores de gris constantes. Los operadores derivada serán útiles para realizar dichas tareas. [19]

Las técnicas de segmentación, basadas en los bordes, son adecuadas cuando las regiones son suficientemente homogéneas de tal modo, que la transición entre regiones, se pueda realizar en base a los tonos de gris. En

caso contrario, es más adecuado utilizar las técnicas de segmentación basadas en regiones.

Un *borde local* (*eje o arista local*), es un píxel cuyo nivel de gris difiere significativamente del nivel de gris de algunos píxeles de su entorno, es decir, hay diferencia de contraste local. Esto se debe principalmente a dos motivos:

- El píxel forma parte del borde entre dos regiones diferentes de la imagen , pues cada región tiene cierta homogeneidad en sus niveles de gris, con respecto a algún criterio de homogeneidad.
- El píxel forma parte de un arco muy fino sobre un fondo de diferente nivel de gris.

Para detectar los bordes se comienzan detectando los bordes locales. Los bordes locales se detectan midiendo la tasa de cambio de los tonos de gris de su entorno. Se utiliza, para ello, el operador gradiente, como operador de primer orden, o el operador Laplaciano (como operador de segundo orden).

Estos operadores son pocos sensibles a los cambios graduales en los niveles de gris, que corresponden a funciones tipo rampa. En estos casos es más adecuado aplicar operadores basados en las derivadas de segundo orden, como, por ejemplo, el operador Laplaciano, definido a partir de la laplaciana de una función:

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2} \quad (26)$$

3.3.3.2- Segmentación basada en la conectividad

Esta técnica de segmentación está basada en la conectividad espacial que pueden presentar los píxeles en una imagen. Dos píxeles son vecinos si tienen en común, al menos, una frontera o una esquina, según el tipo de vecindad. Son vecinos directos aquellos que comparten sus fronteras y vecinos indirectos los que

comparten esquina. Un conjunto de píxeles cumplirá el criterio de vecindad si se da entre ellos un criterio de similitud establecido. Recorriendo la imagen píxel por píxel, de izquierda a derecha y de arriba abajo, se etiqueta cada conjunto de píxeles vecinos con un identificador distinto. [21]

Este tipo de conectividad puede darse de distintas maneras: conectividad cuatro, conectividad ocho o conectividad seis. Un píxel x_0 con coordenadas (x,y) tiene dos vecinos horizontales (x_1, x_2) y dos verticales (x_3, x_4) y sus coordenadas están dadas por:

$$(x + 1, y), (x - 1, y), (x, y + 1), (x, y - 1) \quad (27)$$

Este conjunto de píxeles se conoce como conectividad cuatro siendo el píxel central, x_0 , en (x,y) . Del mismo modo se puede definir el conjunto de diagonales como:

$$(x + 1, y + 1), (x - 1, y + 1), (x - 1, y - 1), (x + 1, y - 1) \quad (28)$$

El conjunto formado por los píxeles que forman la conectividad cuatro y las cuatro diagonales se les conoce como la conectividad ocho respecto al píxel central p en (x,y) . Cualquier variación de estos conjuntos de píxeles que se tienen en cuenta para formar la vecindad es admisible como criterio de segmentación.

3.3.3.3- Color Threesholder. Histograma

El Threesholder, método en el que se apoyará este proyecto, es una representación gráfica de la cantidad de píxeles que hay de cada tonalidad de color de la imagen. En una imagen en tonos de gris se obtendrá un diagrama de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de aparición de cada tonalidad de gris, Figura 58. En una imagen de ocho bits se obtendrán 256 distintos valores, donde la primera posición representa al negro y la última al blanco.

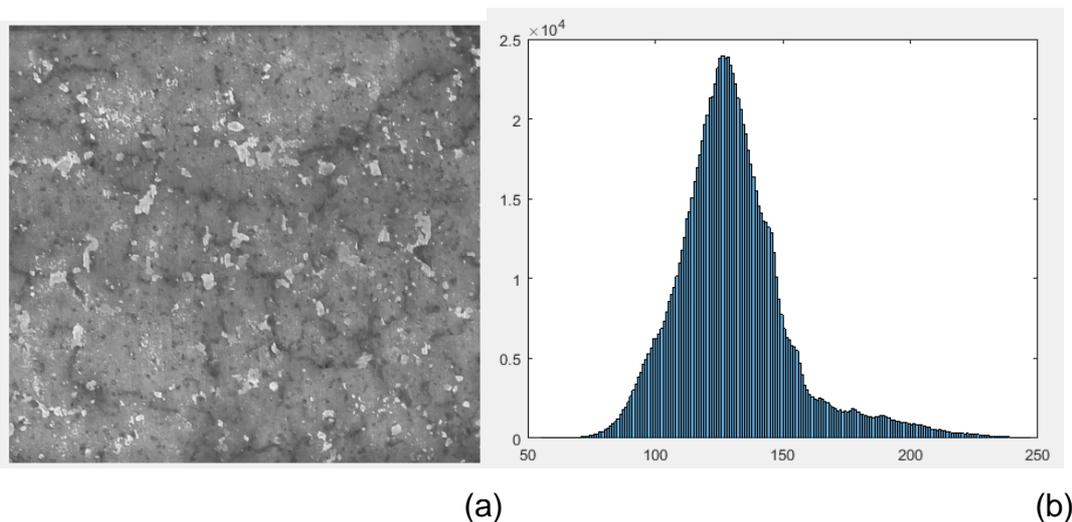


Fig. 58. Histograma (b) aplicado a una fotografía (a) tomada de un casquillo objeto de estudio

El histograma de color es una representación tridimensional de todas las tonalidades de color que aparecen en la imagen. Está compuesto por cubos que dan información acerca de la frecuencia de aparición de cada tonalidad, o bien por varios histogramas por separado. En la Figura 59 se muestra un ejemplo de los histogramas de una fotografía a color de una sección de un casquillo para el espacio RGB.

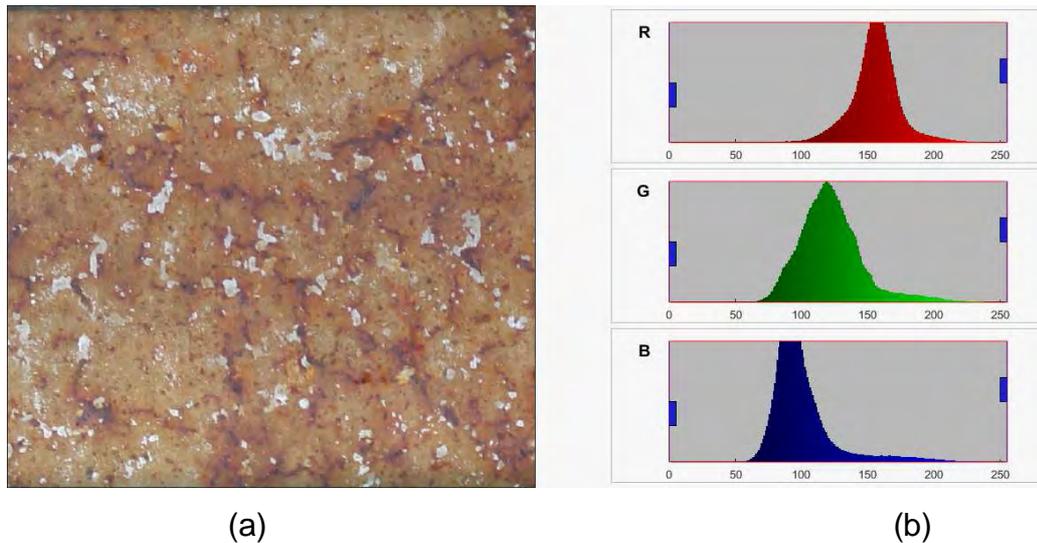


Fig. 59. Espacio de color RGB aplicado (b) a una fotografía (a) de un casquillo

Dado un histograma perteneciente a una imagen, cuyo color de fondo es claramente distinto a la tonalidad del objeto, se podrá identificar el fondo y objeto en dos regiones dominantes. Para distinguir fondo y objeto, con este método se seleccionará una frontera que divida ambas regiones mediante un umbral. Todo valor superior o inferior a cierto umbral pertenecerá o bien al objeto, o bien al fondo. Sea $g(x,y)$ la imagen monocromática y $f(x,y)$ el histograma, podremos separar el fondo de los objetos aplicando un umbral de decisión T .

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{si } f(x,y) > T \\ 0 \rightarrow \text{si } f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (29)$$

No hay convención estándar sobre qué umbral separa mejor las diferentes tonalidades, pues en cada imagen el conjunto de tonalidades será muy distinto. Es por ello que se ha de realizar un estudio independiente del histograma en cada nueva imagen para fijar el umbral óptimo. Para

diferenciar varios objetos en una misma imagen, basta con fijar varios umbrales entre los distintos lóbulos que puede presentar el histograma. [21]

3.3.4- Segmentación de imágenes con Matlab

MATLAB es un paquete de software para el desarrollo de algoritmos, el análisis de datos, la visualización y el cálculo numérico que goza en la actualidad de un alto nivel de implantación en escuelas y centros universitarios, así como en departamentos de investigación y desarrollo de muchas compañías industriales. En entornos universitarios, MATLAB se ha convertido en una herramienta básica tanto para los profesionales e investigadores de centros docentes como para sus alumnos. [20]

El software cuenta con un amplio abanico de herramientas especializadas denominadas toolboxes, que extienden la funcionalidad del programa principal.

Estas herramientas cubren en la actualidad, prácticamente, todas las áreas principales del mundo de la ingeniería y la simulación. La toolbox para el procesado digital de imágenes está compuesta por un conjunto de funciones que amplían las capacidades de MATLAB para el desarrollo de aplicaciones y algoritmos en el campo del procesado y análisis digital de imágenes.

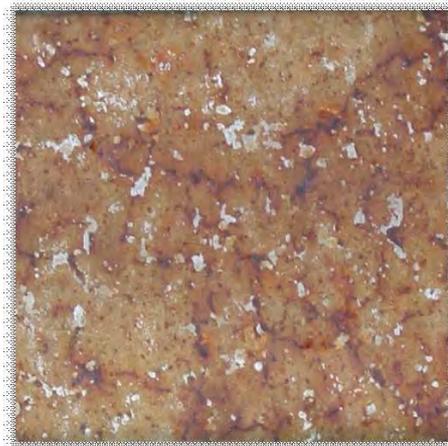
La metodología seguida para el procesado de cada una de las imágenes para cada una de las áreas variables a través de Matlab sigue los siguientes pasos detallados en la Figura 60 y que han permitido tener los valores de las variables para la utilización de la Lógica Difusa.



Fig. 60. Metodología seguida en el procesado digital de imágenes

Segmentación de los distintos áreas

Con objeto de separar cada una de las áreas en que se dividirá la imagen, área ocupado por grietas y picaduras, área de corrosión incipiente y área libre de corrosión, se utilizará la aplicación *Color thresholder* de la toolbox de procesado de imágenes. Una vez abierta la aplicación y seleccionada la imagen correspondiente, se nos pide seleccionar el espacio de color en que se dividirá la fotografía, Figura 61.



(a)

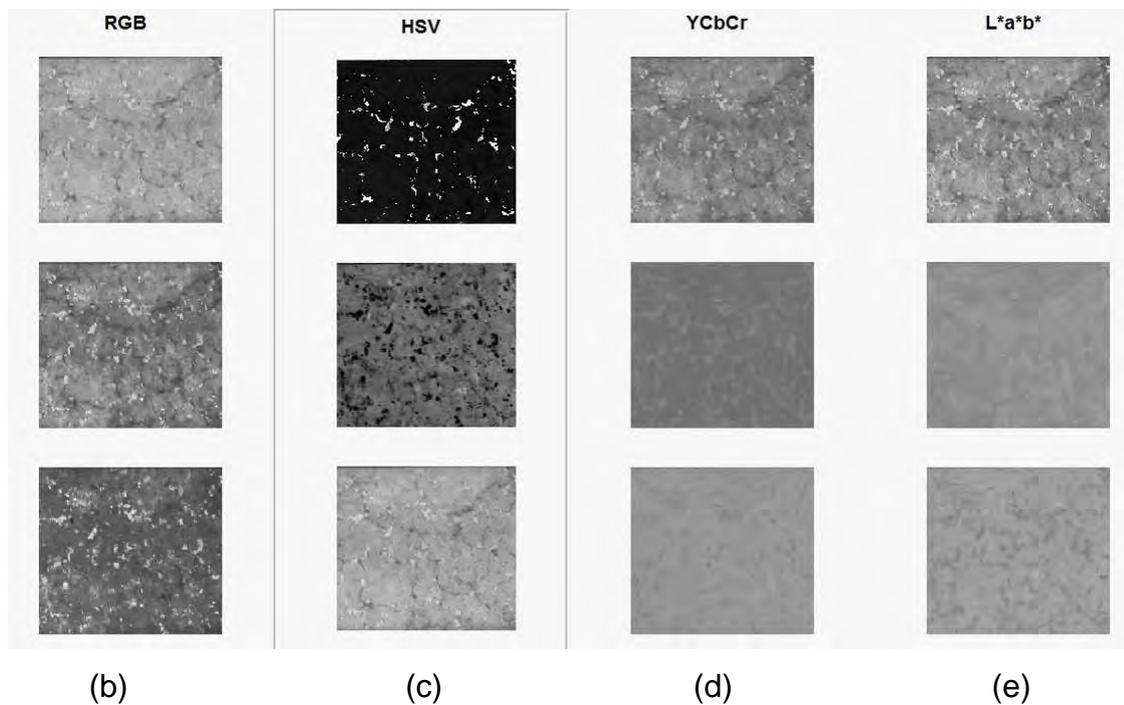


Fig. 61. Aplicación Colorthresholder de Matlab aplicada a una fotografía (a) de un casquillo objeto de estudio, Espacios de color RGB (b); HSV (c); YCbCr (d) y L*a*b* (e)

Por los motivos referidos anteriormente, se seleccionará el espacio HSV, tras lo cual se abrirá una interfaz que muestra la imagen y el color de los controles de los componentes para este espacio de color. El espacio de color HSV utiliza un mando de doble dirección para el componente H y dos deslizadores histograma para los componentes S y V. En este espacio de

color, H representa el matiz, S para la saturación , y V para el valor, Figura 62.

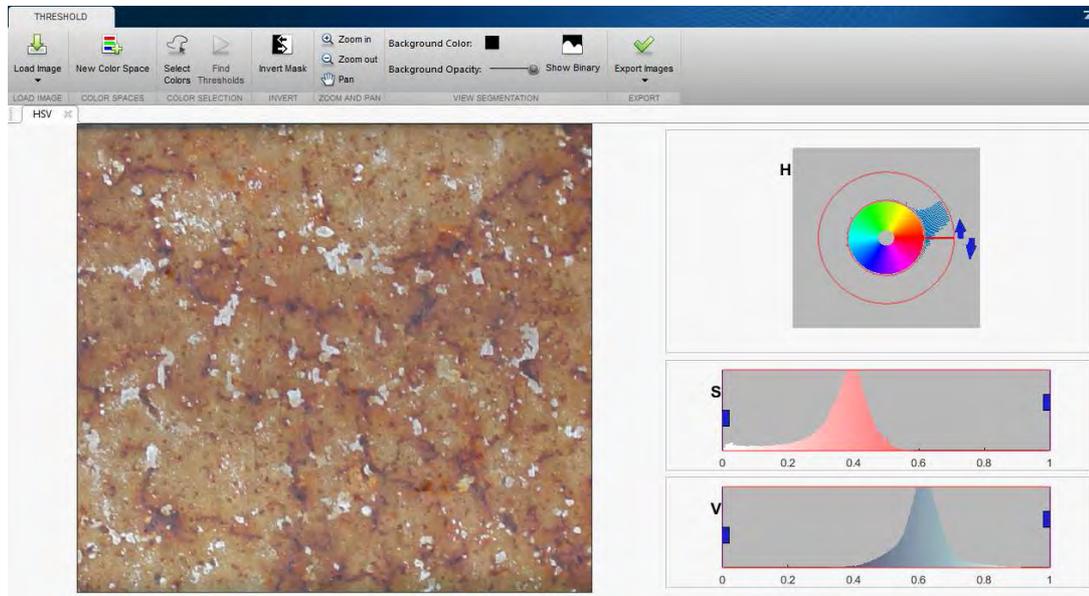


Fig. 62. Aplicación Colorthreshold de Matlab a una fotografía de un casquillo objeto de estudio, caso espacio de color HSV”

Se segmentará la fotografía de forma interactiva. A medida que se utilizan los controles, se puede ver la segmentación en curso. Con el ratón, se toma una de las manijas del mando H y se mueve en la dirección de la flecha. A continuación se detalla el procedimiento seguido para calcular, mediante Matlab, las variables abruptas.

- Área ocupado por grietas y picaduras

Visualmente se distingue este área por ser mucho más oscuro que el resto y por sus formas singulares. Los óxidos oscuros corresponden a espinelas de óxidos de hierro de diferente estequiometría, entre las que abundan, fundamentalmente, las hematitas, magnetita y mustita. De cara a

la aplicación utilizada, esto se traduce en matices comprendidos entre el rosa y el naranja y valores de saturación generalmente por encima de 0,4 (en torno a 0,45).

Además, el histograma asociado, nos da información importante: Generalmente el área ocupado por grietas y picaduras tiende a ser mucho menos que aquel de corrosión incipiente. En éstos casos se observa un salto apreciable en el histograma correspondiente a los matices, H, lo que indica que, en torno a ese punto, estará el límite entre área ocupada por grietas y picadura y área incipiente.

La Figura 63, muestra una segmentación de la fotografía correspondiente al casquillo 2, Sección 2 de la zona C.

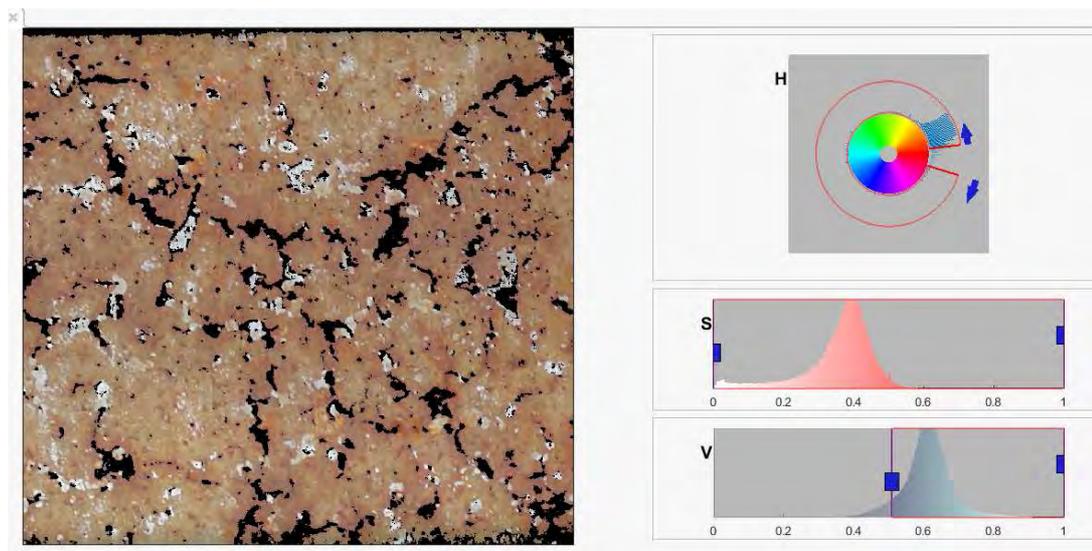


Fig. 63. Interfaz de Matlab en la segmentación del área ocupado por grietas y picaduras de un casquillo objeto de estudio

- Área de corrosión incipiente

A nivel visual se diferencia del resto por su color en diferentes tonos de marrones, pues corresponden a los primeros óxidos de hierro de menor

contenido en este elemento que los de las grietas, no tan oscuro como el área de las fisuras y picaduras. Junto con el área libre de corrosión (cuyos colores irían del blanco al grisáceo) completarían el área total de 4 cm² de la fotografía. A efectos del espacio de color HSV, generalmente este área viene dado por matices comprendidos entre el color límite del área anterior y el amarillo, así como a niveles de saturación bajos. En la Figura 64 se muestra una segmentación de esta área para un casquillo objeto de estudio.

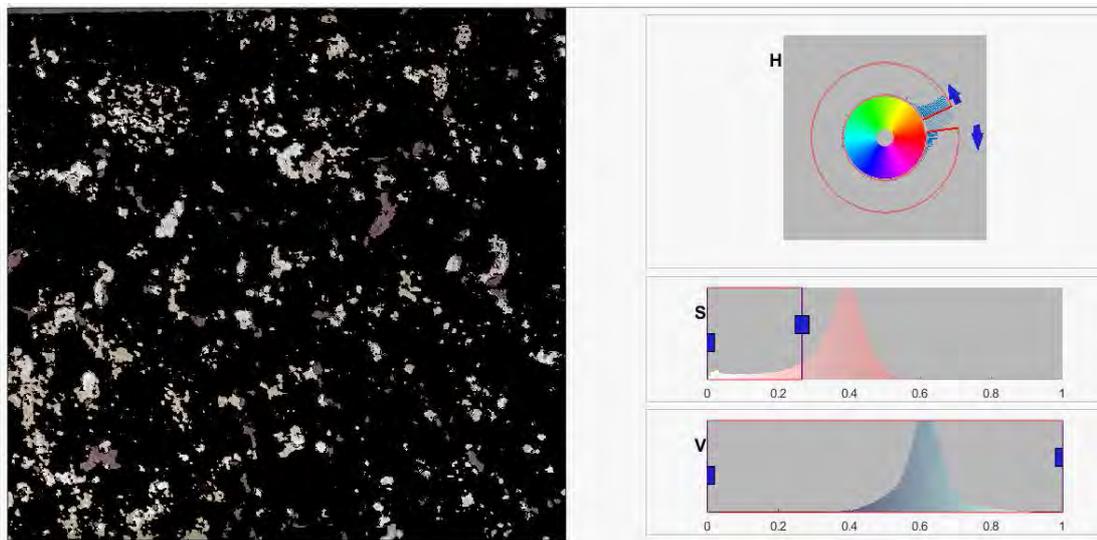


Fig. 64. Interfaz de Matlab en la segmentación del área de corrosión incipiente de un casquillo objeto de estudio

Conversión de la imagen segmentada a imagen binaria

Las imágenes serán convertidas directamente a binarias mediante la herramienta Show binary, representado en la Figura 65., tras lo cual se exportarán al área de trabajo de Matlab.

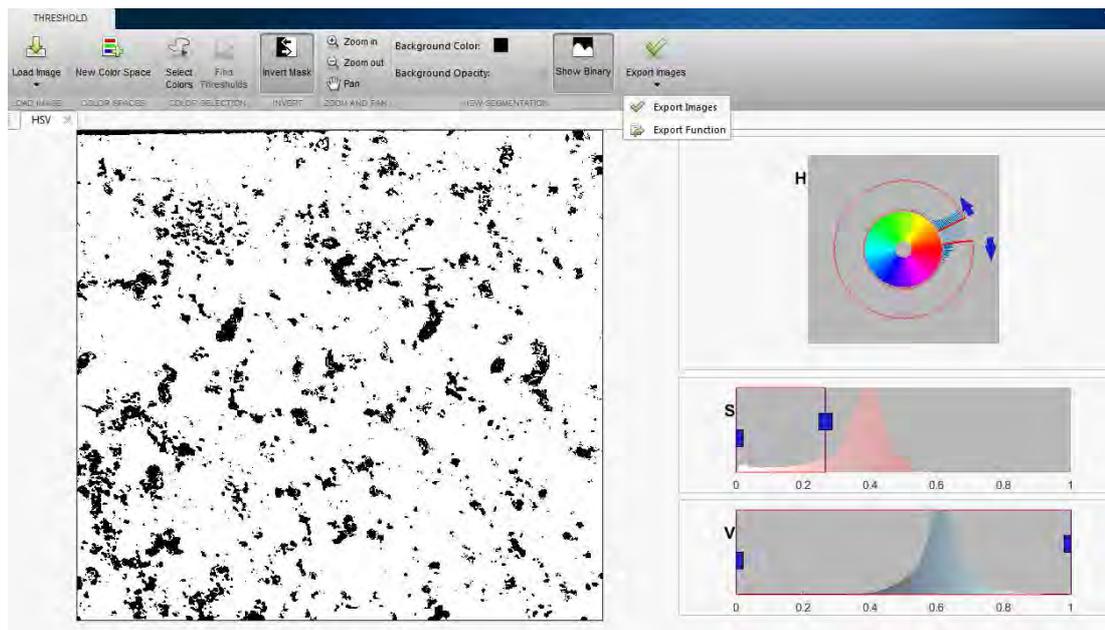


Fig. 65. Imagen binaria obtenida mediante el comando show binary, Matlab

Cálculo de áreas

En el área de trabajo, la Imagen binaria de la Figura anterior, se habrá transformado en una matriz de ceros y unos, donde los unos corresponderán al área blanco, el área que buscamos conocer. Para hallarlo implementaremos la función de la Figura 66, que recorrerá la matriz contando el número de unos. La dimensión de la matriz (filas x columnas) su número de elementos, píxeles.

Cada fotografía ocupa un área de 4 cm², por tanto, cada píxel representará la superficie dada por la siguiente expresión:

$$\text{Area de un píxel} = \frac{4}{\text{filas} \times \text{columnas}} \quad (30)$$

Y el área de interés:

$$\text{Area de interés} = \text{número de unos de la matriz} * \text{Area de un píxel} \quad (31)$$

```

function Superficie = blanco(M)
    cont=0
    [filas,columnas]=size(M);

    for i=1:filas
        for j=1:columnas
            elemento=M(i,j);
            if elemento==1
                cont=cont+1;
            end
        end
    end

    Superficie=cont*4/(r*z)

    %UNTITLED Summary of this function goes here
    % Detailed explanation goes here

end

```

Fig. 66. Función implementada en Matlab para el cálculo de áreas

Anotación de resultados

Cada una de las áreas de cada una de las superficies de cada escenario del casquillo seleccionado, se anotará en una hoja libro Excel como muestra la Figura 67, donde cada hoja se corresponderá con una de las zonas.

	C1			C2			C3			C4			C5			TOTAL
	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 1	Sección 2	Sección 3	
Área ocupada por...	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Carruajín incipient...	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Área libre de carro...	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fig. 67. Anotación de resultados tras el cálculo de áreas

Se hará una suma de las áreas correspondientes a cada zona, variables que a continuación pasarán a formar parte de los valores de entrada del método Fuzzy.

3.4- Método Fuzzy aplicado al presente proyecto

3.4.1- Conjuntos de entrada

Las variables de entrada escogidas tras un análisis de los casquillos son los siguientes, para cada uno de los escenarios (zona A, zona B, zona C y zona D):

- *Área ocupada por grietas y picaduras*: Representa el área total ocupado por grietas y picaduras de todos los casquillos objeto de estudio para una zona determinada.
- *Área de corrosión incipiente*: Representa el área total ocupado por los productos derivados del fenómeno de corrosión de todos los casquillos objetos de estudio, y para una zona determinada.
- *Área libre de corrosión*: Representa el área total donde la corrosión no se refleja de todos los casquillos objeto de estudio para una zona dada.

3.4.2- Conjuntos de salida

CA, CB, CD Y CC, serán los grados o niveles de corrosión presentada por, consecutivamente, los escenarios A, B, C y D respectivamente.

Estará dada por un porcentaje, que oscilará entre valores extremadamente bajos y valores extremadamente altos:

0% —→ Grado de corrosión extremadamente bajo

100% —→ Grado de corrosión extremadamente alto

3.4.3- Etapas del proceso

Se aplicará la teoría expuesta en el Capítulo dos describiendo cada uno de los pasos.

A) Fuzzyficación

Las variables obtenidas hasta ahora, áreas totales, no son compatibles con el método Fuzzy, por lo que deberemos comenzar con un proceso intermedio que transforme estas entradas abruptas en entradas Fuzzy. Se determinaran para ello las funciones de pertenencia de cada variable, mediante la asignación de etiquetas dentro del Universo de Discurso.

VARIABLES DE ENTRADA

o Area ocupada por grietas y picaduras

- * Muy pequeña (MP)
- * Pequeña (P)
- * Media (M)
- * Grande (G)
- * Muy grande (MG)

o Area de corrosión incipiente

- * Muy pequeña (MP)
- * Pequeña (P)
- * Media (M)
- * Grande (G)
- * Muy grande (MG)

o Area libre de corrosión

- * Muy pequeña (MP)
- * Pequeña (P)
- * Media (M)
- * Grande (G)
- * Muy grande (MG)

VARIABLE DE SALIDA

o Grado de corrosión

- * Extremadamente bajo (EB)
- * Muy bajo (MB)
- * Bajo (B)
- * Medio (M)
- * Alto (A)
- * Muy alto (MA)
- * Extremadamente alto (EA)

En la Figura 68 se muestra un esquema de los términos lingüísticos empleados.

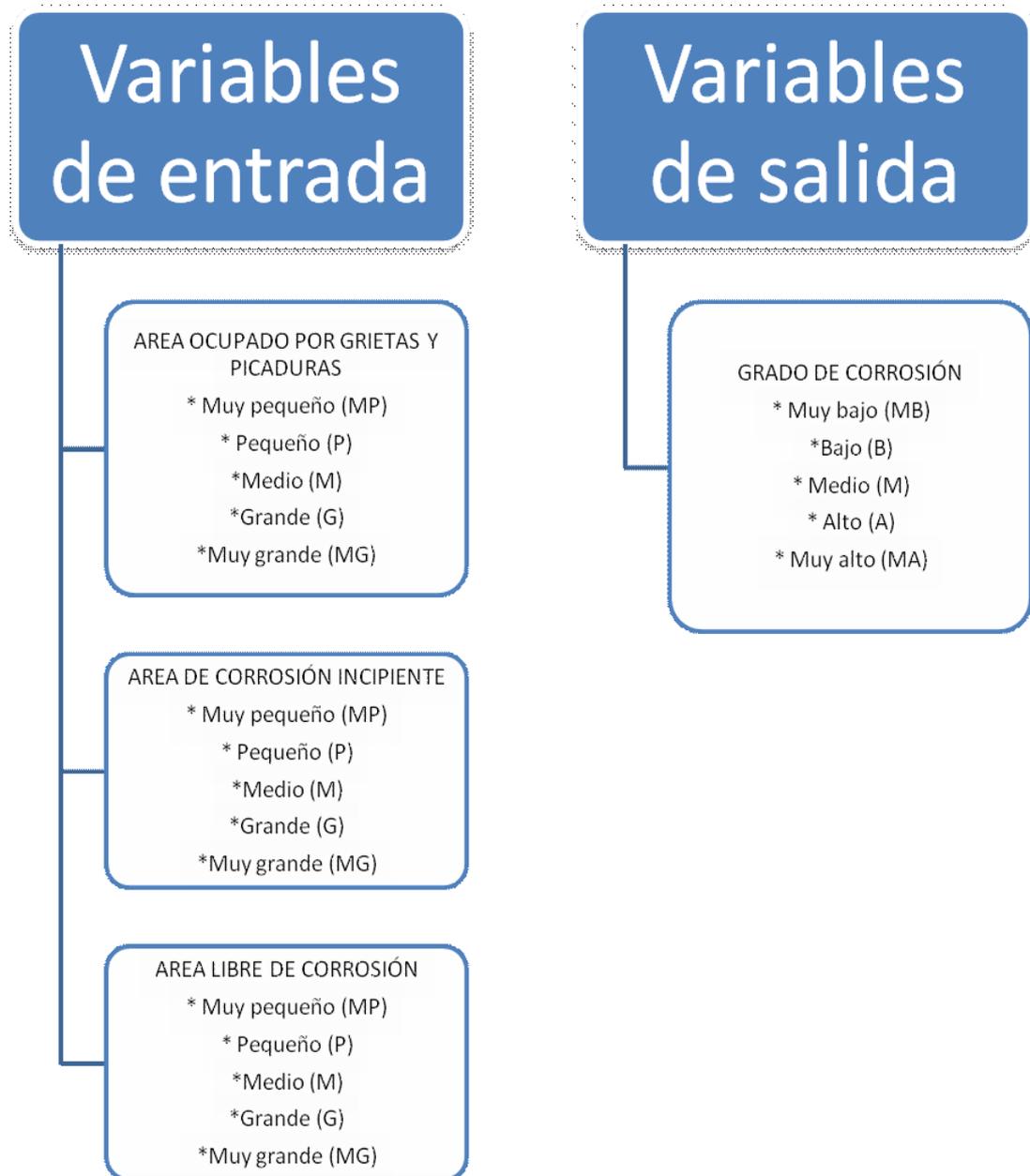


Fig. 68. Variables de entrada y salida, Método Fuzzy

Estas funciones se representan en gráficas que permitirán transformar los términos lingüísticos en entradas Fuzzy.

La función de pertenencia, FP, puede interpretarse como el grado en que el elemento considerado cumple con las especificaciones que definen a los elementos del conjunto en cuestión, y no debe interpretarse como la probabilidad de pertenencia. Si la probabilidad de que un elemento pertenezca a un conjunto es 0,7 y se afirma que ese elemento pertenece al conjunto, se tendrá un 70% de probabilidad de acierto, pero el elemento intrínsecamente pertenece o no pertenece al conjunto.

Debido a que el objetivo del proyecto es realizar una comparativa entre los diferentes escenarios diferenciados, se establecerá el siguiente criterio para establecer los valores críticos de las funciones de pertenencia asignadas a cada etiqueta: Como valores críticos de cada variable se tomarán los valores máximo y mínimo de área observados para esa variable dada. Para el resto de valores se realizará un estudio estadístico basado en la Distribución normal de los datos obtenidos tras el análisis de imágenes.

Variable área ocupado por grietas y picaduras

Se observó que el máximo área ocupado por grietas y picaduras correspondía al casquillo C3, escenario D, sección 2, superficie 2, Figura 69 a, con un área total de 1,77 cm².

$$\text{Área máximo ocupado por grietas y picaduras} = 1,77 \text{ cm}^2 \quad (32)$$

Teniendo en cuenta que las variables que se introducirán en el método son el promedio de cada escenario, se multiplicará este área por el número de superficies analizadas por escenario:

$$\begin{aligned} &\text{Valor del área de la etiqueta muy grande para FP 1 =} \\ &\text{Área máximo ocupado por grietas y picaduras} \times 30 \text{ fotografías} \quad (33) \end{aligned}$$

Así, el grado de pertenencia de la FP correspondiente a la etiqueta *muy grande* de la variable *área ocupada por grietas y picaduras*, tomará un valor 1 hasta un área de **53,1 cm²**.

Análogamente se tomará como valor extremo de la etiqueta *muy pequeño* 0,106 cm², área correspondiente al casquillo C7, escenario A, sección 2, superficie 1, Figura 69 b.

$$\text{Área mínimo ocupado por grietas y picaduras} = 0,106 \text{ cm}^2 \quad (34)$$

Del mismo modo que se procedió para la etiqueta *muy grande*:

$$\begin{aligned} &\text{Valor del área de la etiqueta muy pequeña para FP 1 =} \\ &\text{Área mínimo ocupado por grietas y picaduras} \times 30 \text{ fotografías} \quad (35) \end{aligned}$$

Esto es, 0,106 cm² x 30 fotografías, **3,18 cm²**.

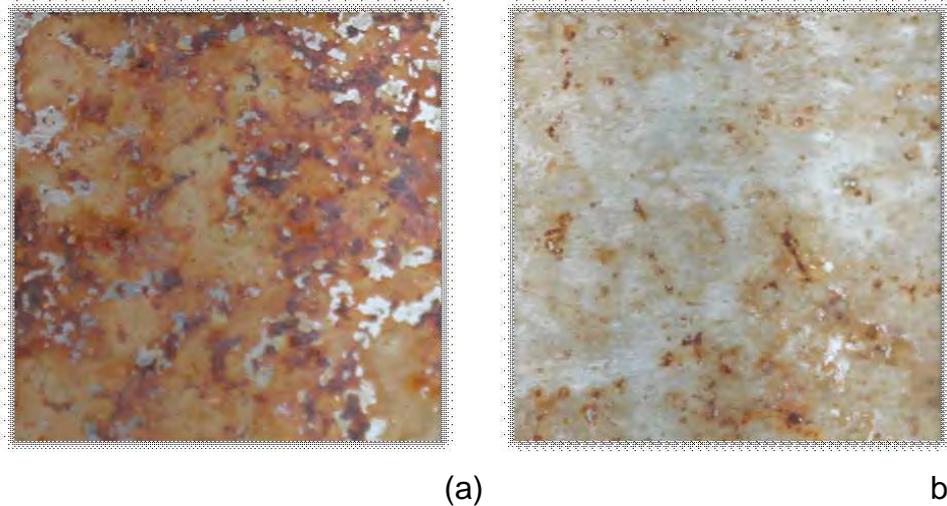


Fig. 69. Área máximo (a) y mínimo (b) ocupado por grietas y picaduras

Para el cálculo de los valores del resto de etiquetas, se utilizará la Campana de Guss. En este caso la campana obtenida se muestra en la Figura 70.

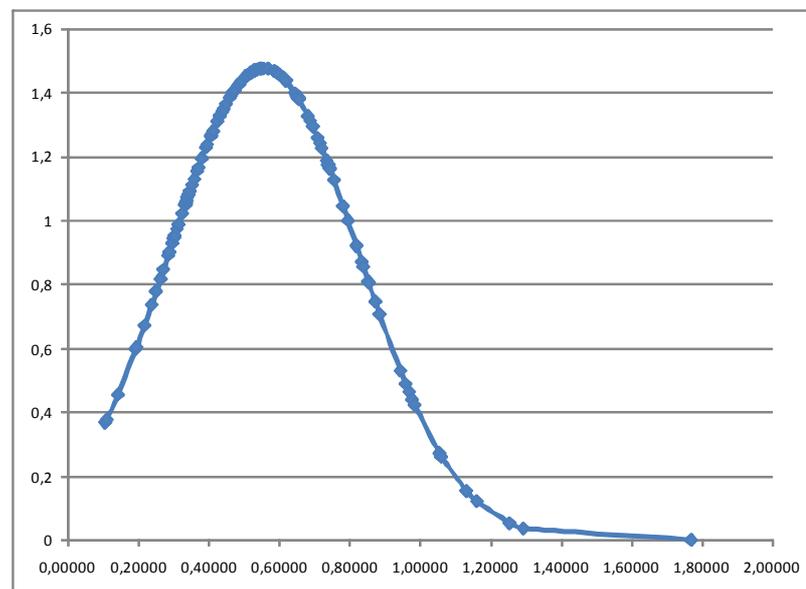


Fig. 70. Distribución normal del área ocupada por grietas y picaduras

El valor de la etiqueta *media* para una función de pertenencia de 1 se le asignará al promedio de todas las áreas, es decir, $0,55723 \times 30$ fotografías, $16,71 \text{ cm}^2$

La teoría dice que un 68,3% de la población estará situada entre los valores:

$$\text{Promedio} - \text{Desviación} \leq X \leq \text{Promedio} + \text{Desviación} \quad (36)$$

Es decir:

$$0,55723 - 0,2703 \leq X \leq 0,55723 + 0,2703 \quad (37)$$

Que, multiplicado x 30 fotografías nos dará el intervalo escogido para la etiqueta *media*:

$$8,5269 \leq \text{Medio} \leq 24,826 \quad (38)$$

Así quedará definida la variable área ocupada por grietas y picaduras tal y como muestra la Figura 71.

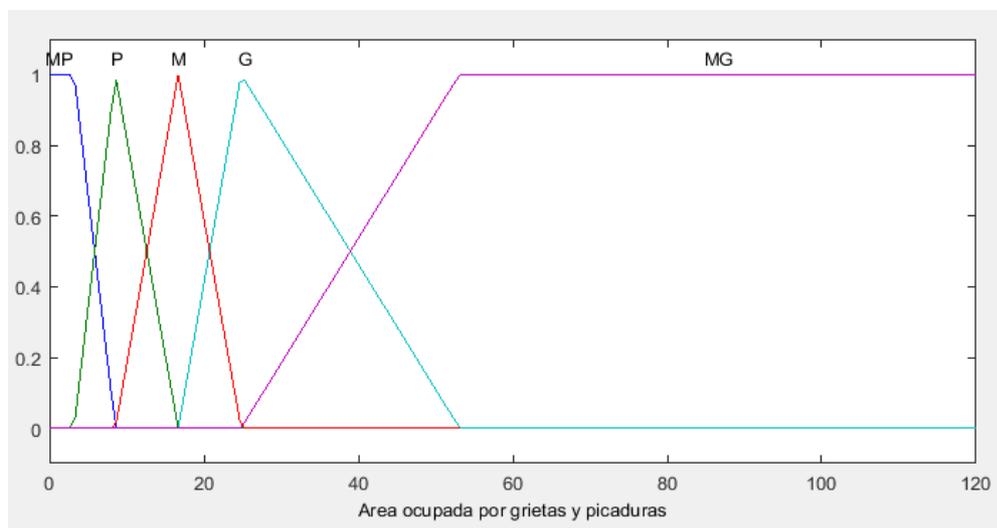


Fig. 71. Gráfica Fuzzy: del área ocupado por grietas y picaduras

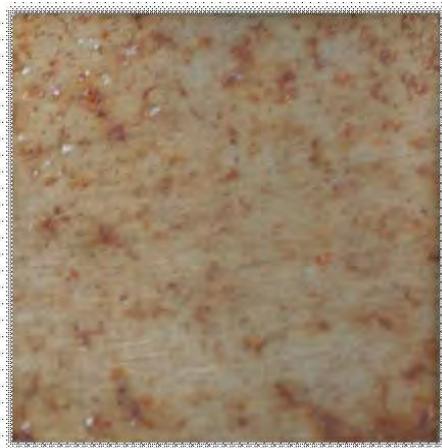
Variable área de corrosión incipiente

Se observa que el valor máximo de área de corrosión incipiente corresponde a casquillo 4 ubicado en el escenario D, sección 1, superficie 2, con un valor de $3,6892 \text{ cm}^2$, Figura 72a.

El valor a partir del cual la etiqueta *muy grande* corresponderá a un grado de pertenencia igual a uno será: $3,6892 \times 30 = 110,676 \text{ cm}^2$.

Análogamente el valor mínimo de área de corrosión incipiente corresponde al casquillo 1 ubicado en el escenario A, sección 3, superficie 2, siendo su valor $1,1478 \text{ cm}^2$, Figura 72b.

Así, la etiqueta *muy pequeño* tomará un grado de pertenencia igual a uno hasta una superficie de $0,2689 \times 30 = 8,067 \text{ cm}^2$.



(a)



b)

Fig. 72. Área máximo (a) y mínimo (b) de corrosión incipiente

El valor de la etiqueta *media* que adquiere un valor 1 de la función de pertenencia será la media de la suma de todos los valores, que para este caso serán **78,697 cm²**.

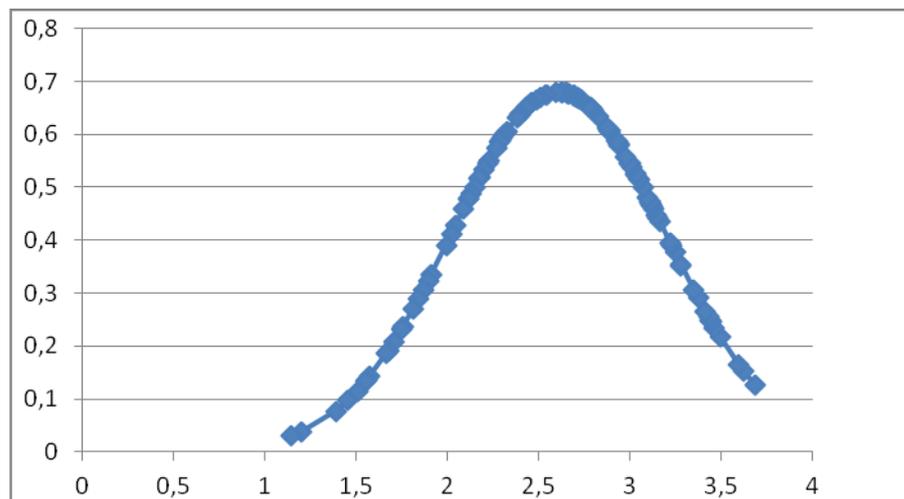


Fig. 73. Distribución normal del área de corrosión incipiente

Del mismo modo que para la variable anterior, se establecen los límites para la etiqueta *media*:

$$2,6112 - 0,5864 \leq X \leq 2,5112 + 0,5864 \quad (39)$$

Que, multiplicando por 30 fotografías se obtendrá el siguiente intervalo

$$60,744 \leq X \leq 3,0976 \quad (40)$$

Así, se definirá la gráfica Fuzzy de esta variable como muestra la Figura 74.

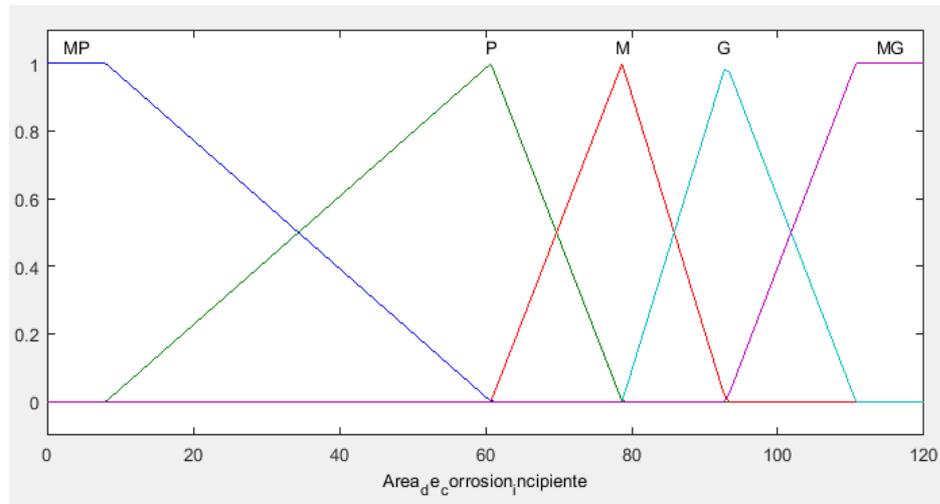


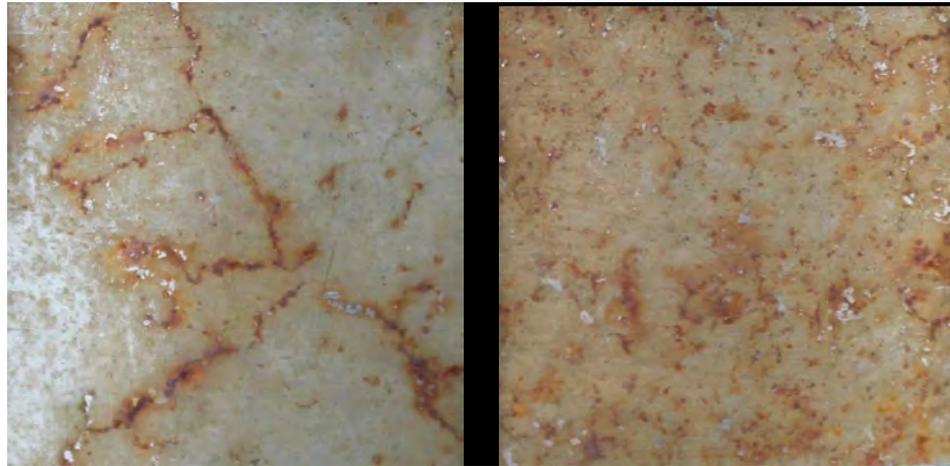
Fig. 74. Gráfica Fuzzy del área de corrosión incipiente

Variable área libre de corrosión

Se observa que el valor máximo de área libre de corrosión se da en el escenario A, casquillo 1, sección 3, superficie 2, Figura 75a, tomando un valor de $2,5183 \text{ cm}^2$.

Así, la función de pertenencia de la etiqueta *muy grande* tomará un valor igual a uno a partir de un área de $2,5183 \times 30 = 75,549 \text{ cm}^2$.

El valor mínimo, $0,082 \text{ cm}^2$, se da en el escenario C, casquillo 4, sección 1, superficie 1, Figura 75b, con lo que la función de pertenencia de la etiqueta *muy pequeña* tomará un valor igual a uno hasta el área de $0,088 \times 30 = 2,64 \text{ cm}^2$.



(a)

b)

Fig. 75. Área máximo (a) y mínimo (b) libre de corrosión

24,78215 cm² será el valor de área para el cual la etiqueta *medio* tomará valor 1.

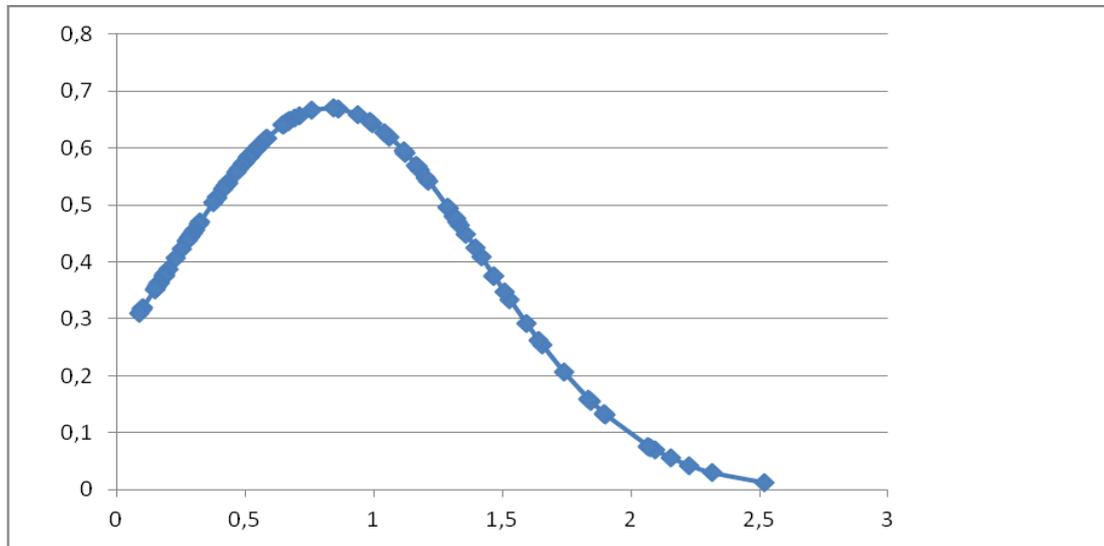


Fig. 76. Distribución normal del área libre de corrosión

$$0,8261 - 0,595 \leq X \leq 0,8261 + 0,595 \quad (41)$$

Es decir,

$$6,933 \leq X \leq 42,633 \quad (42)$$

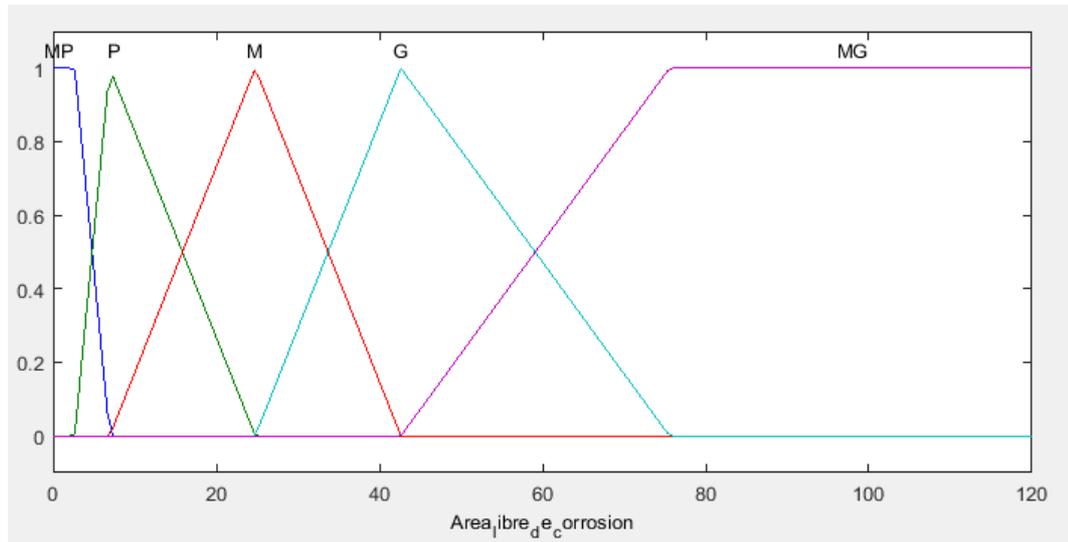


Fig. 77. Gráfica Fuzzy del área libre de corrosión

B) Motor de Interferencia Fuzzy

En esta etapa se construirá el motor de interferencia Fuzzy, donde aparecerán las tres variables, área ocupado por grietas y picaduras, área de corrosión incipiente y área libre de corrosión. Su objetivo es convertir el conjunto difuso de entrada en un conjunto difuso de salida, a través de un proceso de deducción.

Se introducirán en una tabla las distintas probabilidades de grado de corrosión y todas las variables quedarán relacionadas mediante sencillas reglas IF-THEN.

A continuación se presenta la Tabla 78, “Motor de deducción Fuzzy”, que permite hallar la probabilidad de grado de corrosión a través de la interferencia entre las tres variables.

Para un correcto procedimiento se colocará la variable de mayor peso en el encabezamiento de las tablas del Motor de deducción. En este caso, establecemos *área ocupada por grietas y picaduras* como variable de encabezamiento, pues de las tres es la más significativa.

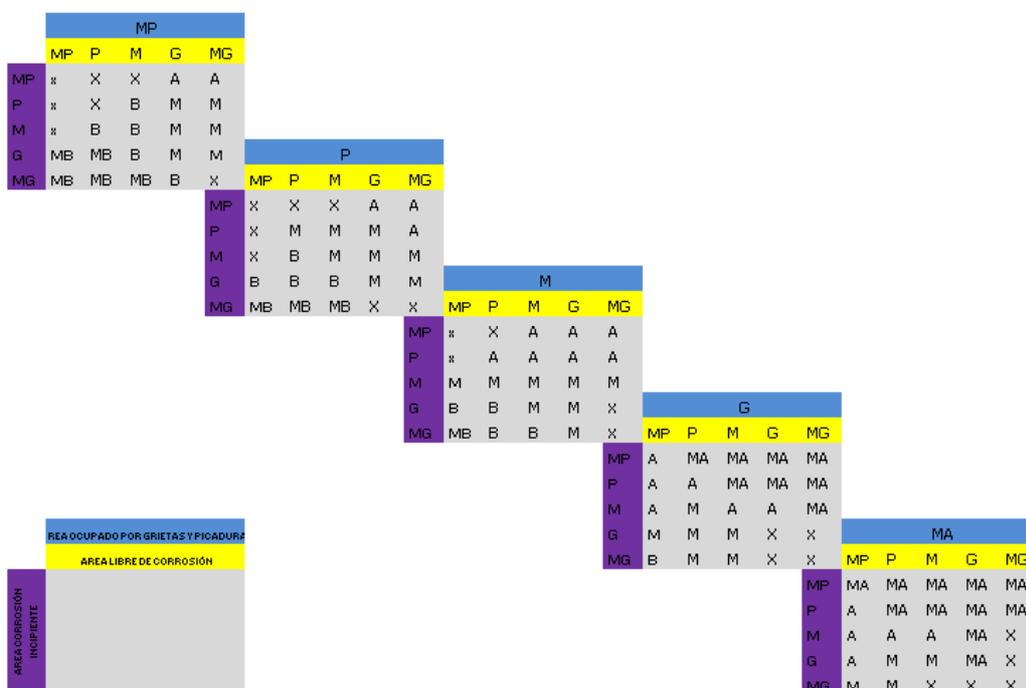


Fig. 78. Motor de Interferencia Fuzzy

Donde A, MA, M, B y MB son, como se ha visto, las variables lingüísticas asociadas a la variable de salida, *grado de corrosión*. X representa un caso imposible de dar según se han definido las funciones de pertenencia. Así, por ejemplo, un área ocupado por grietas y picaduras muy pequeño y un área de corrosión incipiente muy pequeño será incompatible con un área libre de corrosión muy pequeño, pues juntos no sumarían la superficie.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se expondrán los Resultados obtenidos tras la realización del Presente Estudio.

En el presente capítulo se expondrán los resultados que han sido obtenidos mediante el procesado de imágenes y la aplicación del método Fuzzy a cada escenario planteado. El organigrama de la Figura 79, muestra el procedimiento, y cada paso se expondrá en un apartado específico:

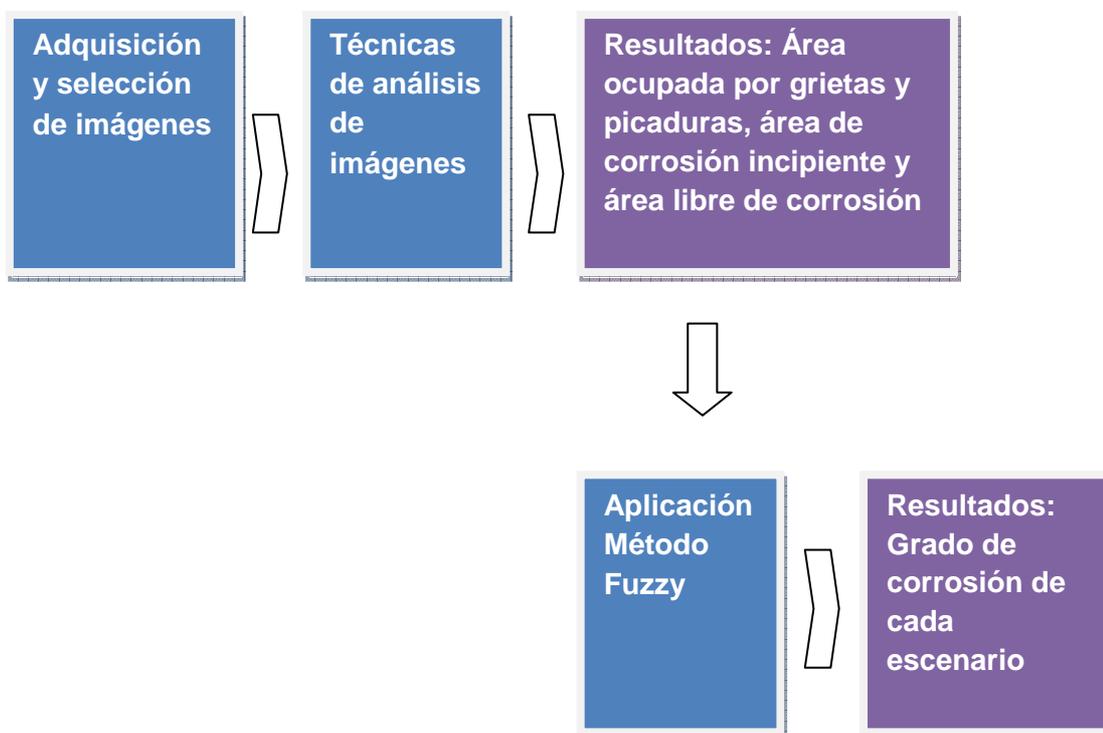


Figura 79. Organigrama, resultados generales

4.1- Resultados del procesado de imágenes

La segmentación de cada una de las imágenes, Anexo I, permitió separar las áreas de interés del resto de regiones de la imagen haciendo uso de una herramienta de Matlab enfocada al procesado de imágenes digitales. Como ya se presentó en el Capítulo 3, estas regiones se tradujeron en área expresadas en centímetros cuadrados mediante la aplicación de un algoritmo.

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos así como una serie de gráficos que facilitarán su visualización. Se organizarán los resultados en función de los distintos escenarios: A, B, C y D. Dentro de cada escenario se valorarán las variables *área ocupado por grietas y picaduras*, *área con corrosión incipiente* y *área libre de corrosión*, Figura 80:



Fig. 80. Organigrama, resultados procesado imágenes

4.1.1- Escenario A

En la Tabla 3 se muestra una recopilación de las medidas de las variables, áreas, agrupadas por:

- Tipo (área ocupada por grietas y picaduras, área de corrosión incipiente y área libre de corrosión.
- Número de casquillo.
- Sección.
- Superficie (1 ó 2).

En la última columna se muestra la suma de cada una de las variables pertenecientes al escenario A. Estos últimos datos serán las entradas abruptas del proceso Fuzzy.

El porcentaje de superficie total ocupada por cada una de éstas áreas, así como la implicación de las tres secciones en cada variable, se muestran en la Figura 81.

La dispersión de los datos medidos queda reflejada en la Figura 82.

Tabla 3. Resultados numéricos procesado de imágenes, Escenario A

	C6						C7					
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 1		Sección 2		Sección 3	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Área ocupado por grietas y picaduras	0,59260	0,94400	0,78200	0,88560	0,23840	0,33390	0,53110	0,54780	0,10660	0,49420	0,28850	0,87280
Área corrosión incipiente	2,28990	2,77640	2,94260	2,26890	1,66710	1,14780	2,89540	2,78370	1,81570	2,83010	1,55680	2,66270
Área libre de corrosión	1,11750	0,27960	0,27540	0,84550	2,09450	2,51830	0,57350	0,66850	2,07770	0,67570	2,15470	0,46450

	C8						C9					
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 1		Sección 2		Sección 3	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Área ocupado por grietas y picaduras	0,30170	0,33490	0,65610	0,72210	0,27200	0,34350	0,56930	0,56730	0,47410	0,68250	0,30310	0,58770
Área corrosión incipiente	2,30300	3,16730	2,63430	3,12110	2,40050	1,76020	3,11210	3,28390	3,11230	3,13220	3,11320	3,22300
Área libre de corrosión	1,39530	0,49780	0,70960	0,15680	1,32750	1,89630	0,31860	0,14880	0,41360	0,18530	0,58370	0,18930

	C10						TOTAL
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		
	1	2	1	2	1	2	
Área ocupado por grietas y picaduras	1,13190	0,58670	0,43300	0,50790	1,06090	0,44930	16,60150
Área corrosión incipiente	2,54330	3,11850	2,38690	2,80110	2,29390	3,03130	78,17520
Área libre de corrosión	0,32480	0,29480	1,18010	0,69100	0,64520	0,51940	25,22330

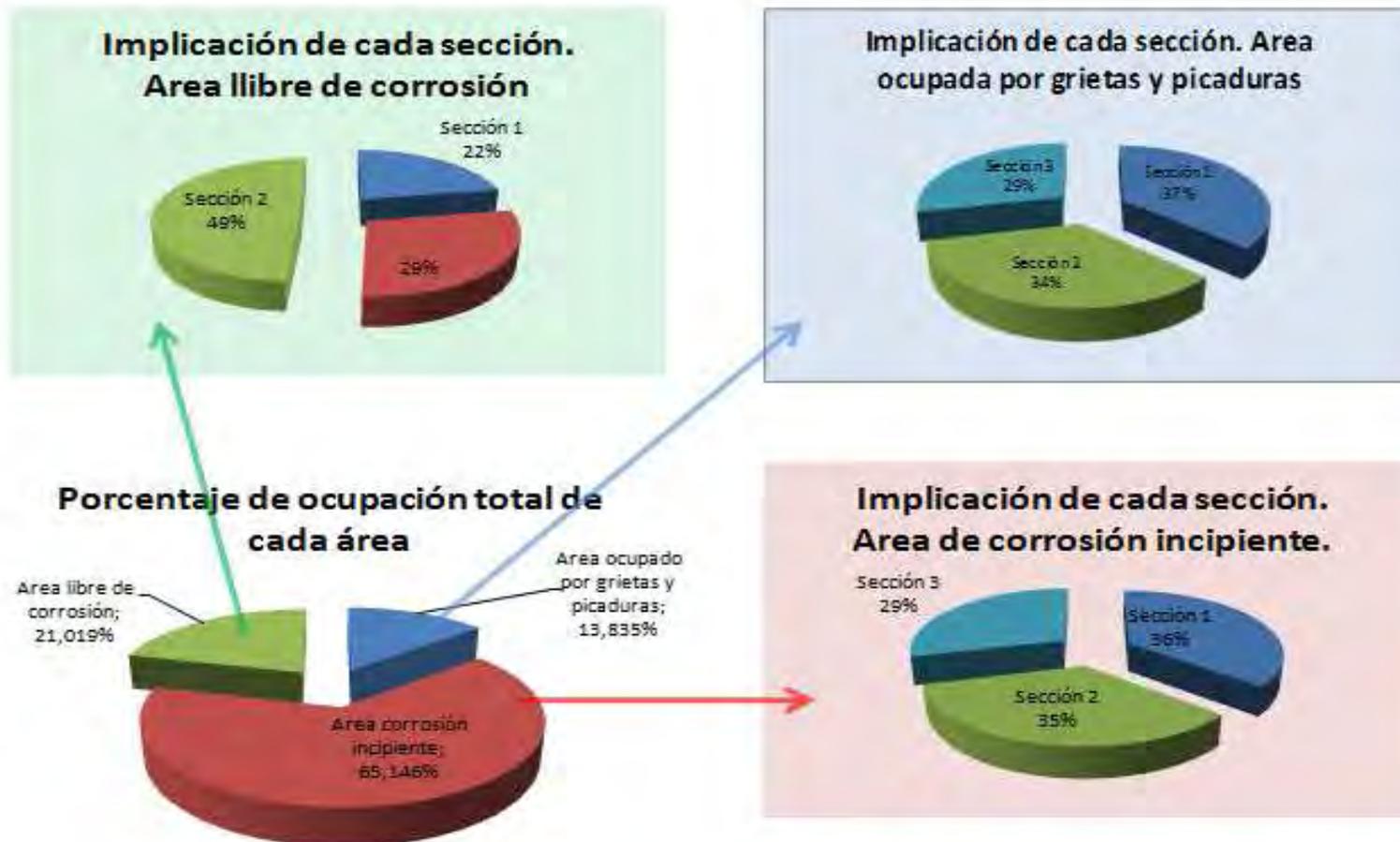


Fig. 81. Porcentaje de área ocupada por cada variable, Escenario A

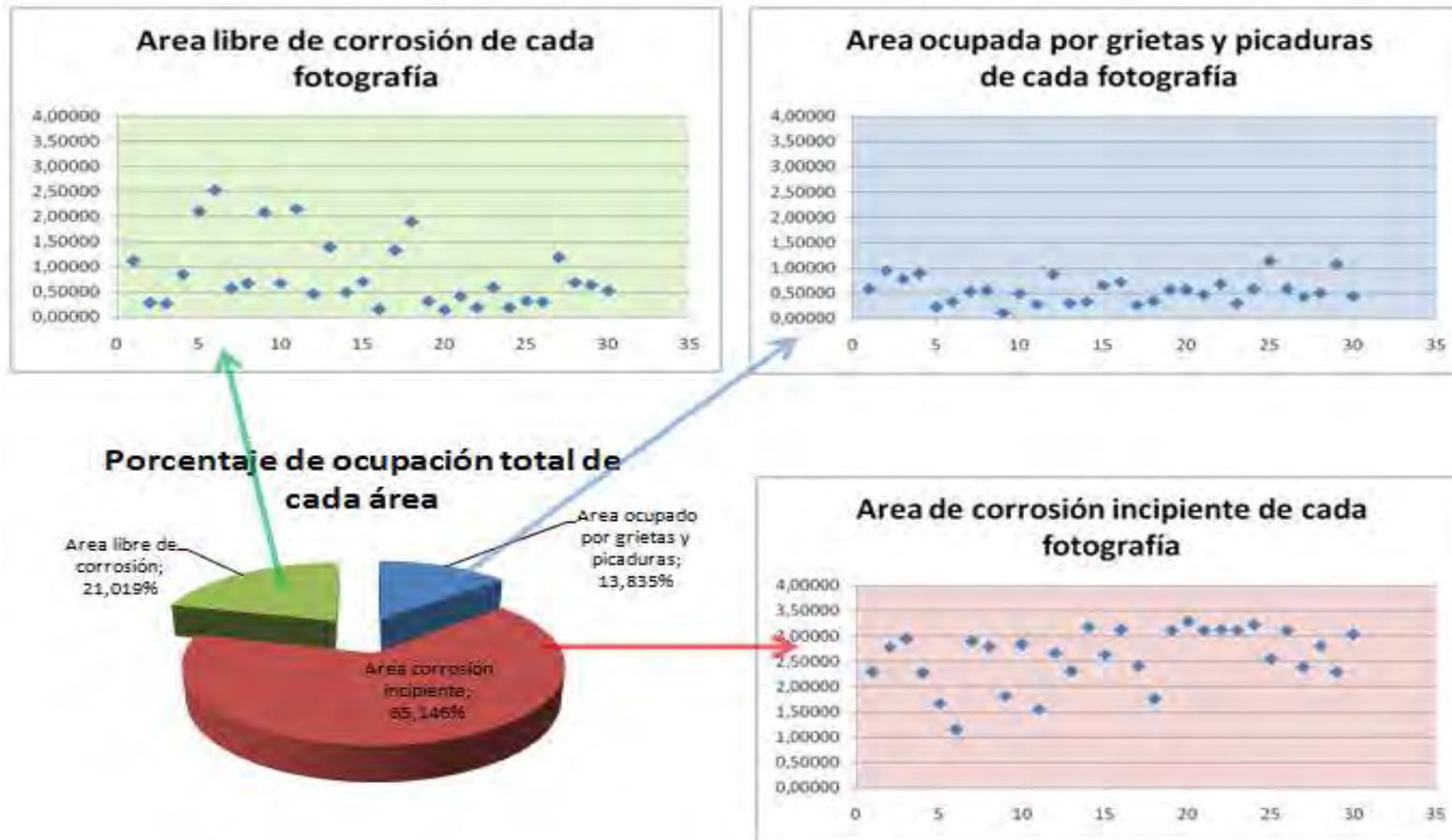


Fig. 82. Dispersión de variables abruptas, Escenario A

4.1.2- Escenario B

Siguiendo el proceder de la expresión de resultados en el caso del escenario A, en la Tabla 4 se muestra una recopilación de las medidas de las variables, áreas, agrupadas por:

- Tipo (área ocupada por grietas y picaduras, área de corrosión incipiente y área libre de corrosión.
- Número de casquillo.
- Sección.
- Superficie (1 ó 2).

En la última columna se muestra la suma de cada una de las variables pertenecientes al escenario A. Estos últimos datos serán las entradas abruptas del proceso Fuzzy.

En la Figura 83, se muestra el porcentaje total que ocupa cada una de las áreas, así como la implicación de las tres secciones en cada variable. La dispersión de los datos medidos queda reflejada en la Figura 84.

Tabla 4. Resultados numéricos procesado de imágenes, Escenario B

	C1						C2					
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 1		Sección 2		Sección 3	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Area ocupada por grietas y picaduras	0,31510	0,53550	0,97790	1,25440	0,46880	0,74380	0,65180	0,54660	0,59530	0,65410	0,43220	1,29390
Corrosión incipiente	2,39590	2,15260	2,72160	2,54400	3,15580	3,00000	2,79390	2,51320	1,50760	2,13330	1,91260	2,04760
Area libre de corrosión	1,28900	1,31190	0,30050	0,20160	0,37540	0,25620	0,55430	0,94020	1,89710	1,21260	1,65520	0,65850

	C3						C4					
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 1		Sección 2		Sección 3	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Area ocupada por grietas y picaduras	0,50990	0,64610	0,73550	0,29740	0,33580	0,40640	0,55120	0,31070	0,52080	0,52460	0,5572	0,6547
Corrosión incipiente	1,89610	1,45430	1,19890	1,38850	2,02430	1,75790	1,71050	1,84570	2,43790	2,98040	1,9143	2,2231
Area libre de corrosión	1,59400	1,89960	2,06560	2,31410	1,63990	1,83570	1,73830	1,84360	1,04130	0,49500	1,52850	1,12220

	C5						TOTAL
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		
	1	2	1	2	1	2	
Area ocupada por grietas y picaduras	0,2179	0,9594	0,7403	0,8538	0,6964	0,7961	18,78360
Corrosión incipiente	1,5575	1,8712	1,7508	1,6790	2,0926	2,4652	63,12630
Area libre de corrosión	2,22460	1,16940	1,50890	1,4672	1,4672	1,4672	39,07480

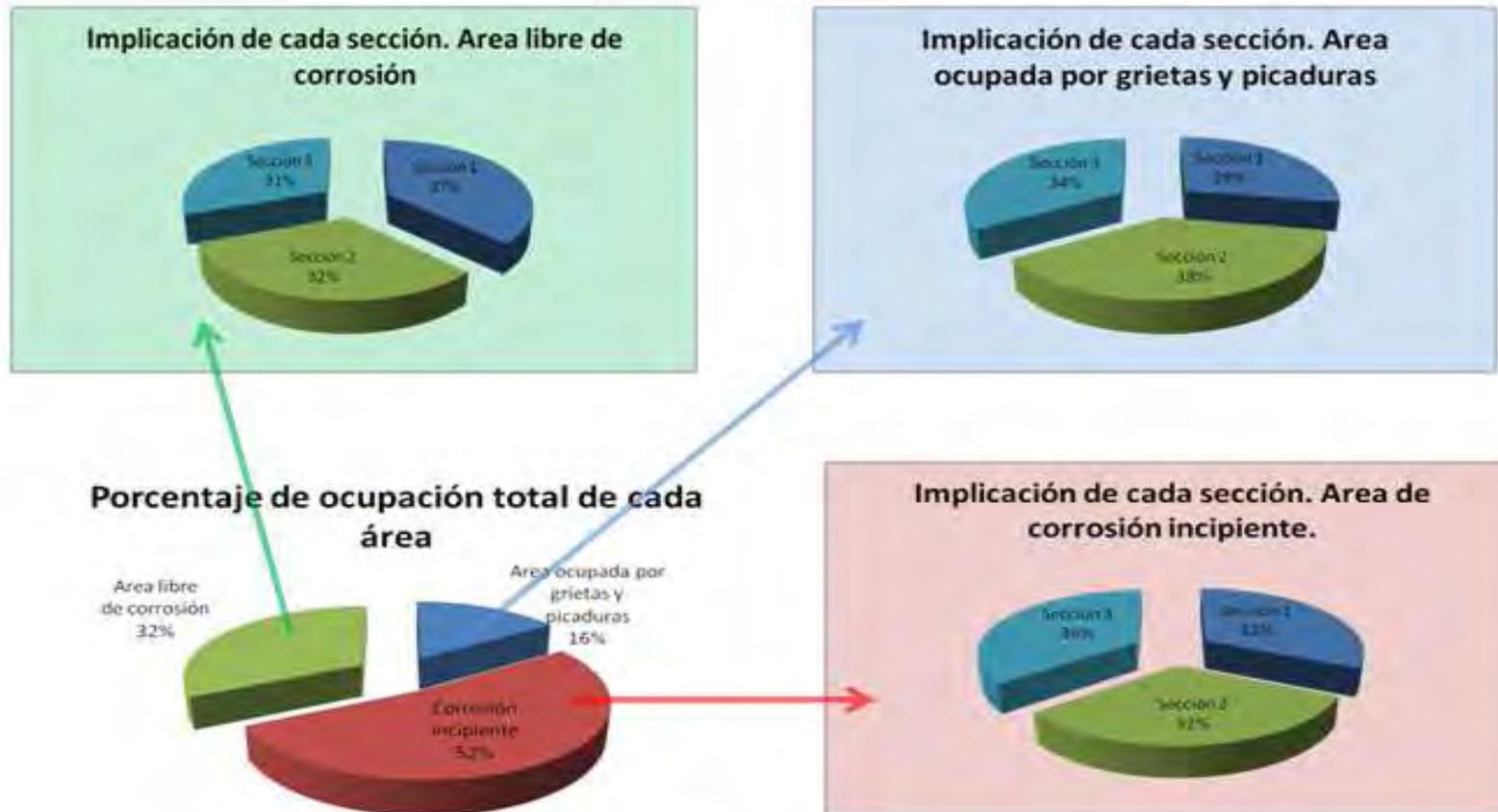


Fig. 83. Porcentaje de área ocupada por cada variable, Escenario B

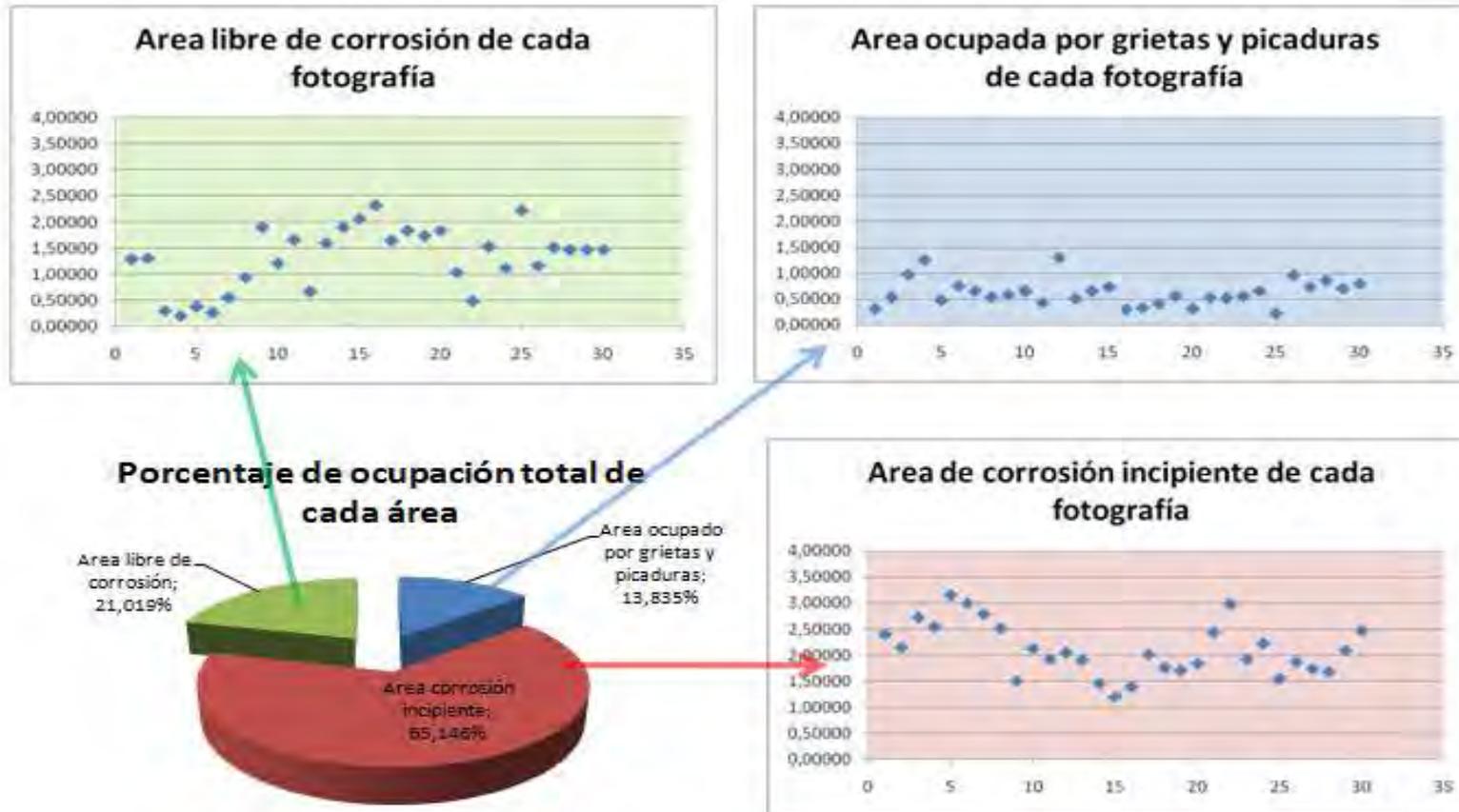


Fig. 84. Dispersión de variables abruptas, Escenario B

4.1.3- Escenario C

En la Tabla 5 se muestra una recopilación de las medidas de las variables, áreas, agrupadas por:

- Tipo (área ocupada por grietas y picaduras, área de corrosión incipiente y área libre de corrosión.
- Número de casquillo.
- Sección.
- Superficie (1 ó 2).

En la última columna se muestra la suma de cada una de las variables pertenecientes al escenario A. Estos últimos datos serán las entradas abruptas del proceso Fuzzy.

En la Figura 85 se muestra el porcentaje total que ocupa cada una de las áreas, así como la implicación de las tres secciones en cada variable. La dispersión de los datos medidos queda reflejada en la Figura 86.

Tabla 5. Resultados numéricos procesado de imágenes, Escenario C

	C1						C2					
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 1		Sección 2		Sección 3	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Area ocupada por grietas y picaduras	0,35330	0,40680	0,60230	1,05430	0,32520	0,39350	0,19350	0,75630	0,85490	0,71620	0,35940	0,33640
Corrosión incipiente	3,12540	3,05210	3,23110	2,65180	3,44320	3,41610	2,48770	2,11990	2,66780	2,89180	2,43630	2,66840
Area libre de corrosión	0,52130	0,54110	0,16660	0,29390	0,23160	0,19040	1,31880	1,12380	0,47730	0,39200	1,20430	0,99520

	C3						C4					
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 1		Sección 2		Sección 3	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	3	1	2
Area ocupada por grietas y picaduras	0,83950	0,39680	0,34720	0,34090	0,14270	0,53720	0,28530	0,11080	0,26290	0,25120	0,46320	0,46060
Corrosión incipiente	2,72660	2,93340	3,46640	3,37630	2,69310	2,60000	3,62660	3,49910	3,44950	3,59890	3,43350	3,44250
Area libre de corrosión	0,43390	0,66980	0,18640	0,28280	1,16420	0,86280	0,08810	0,39010	0,28760	0,14990	0,10330	0,09690

	C5						TOTAL
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		
	1	2	1	2	1	2	
Area ocupada por grietas y picaduras	0,48390	0,40810	0,54210	0,81990	0,52050	0,83480	14,39970
Corrosión incipiente	3,35410	3,07310	2,69660	3,01220	2,11970	1,99450	89,28770
Area libre de corrosión	0,16200	0,51880	0,76130	0,16790	1,35980	1,17070	16,31260

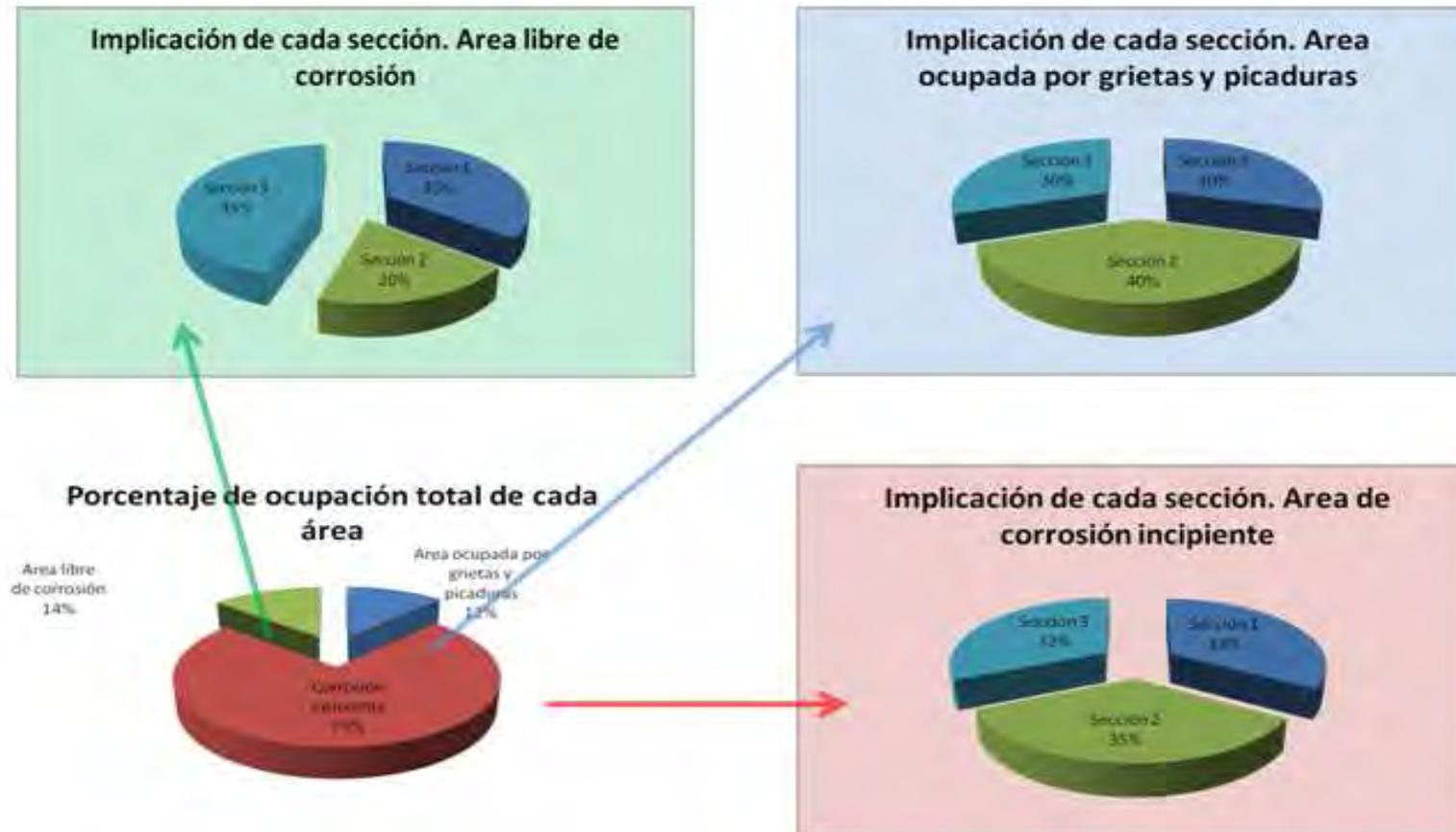


Fig. 85. Porcentaje de área ocupada por cada variable, Escenario

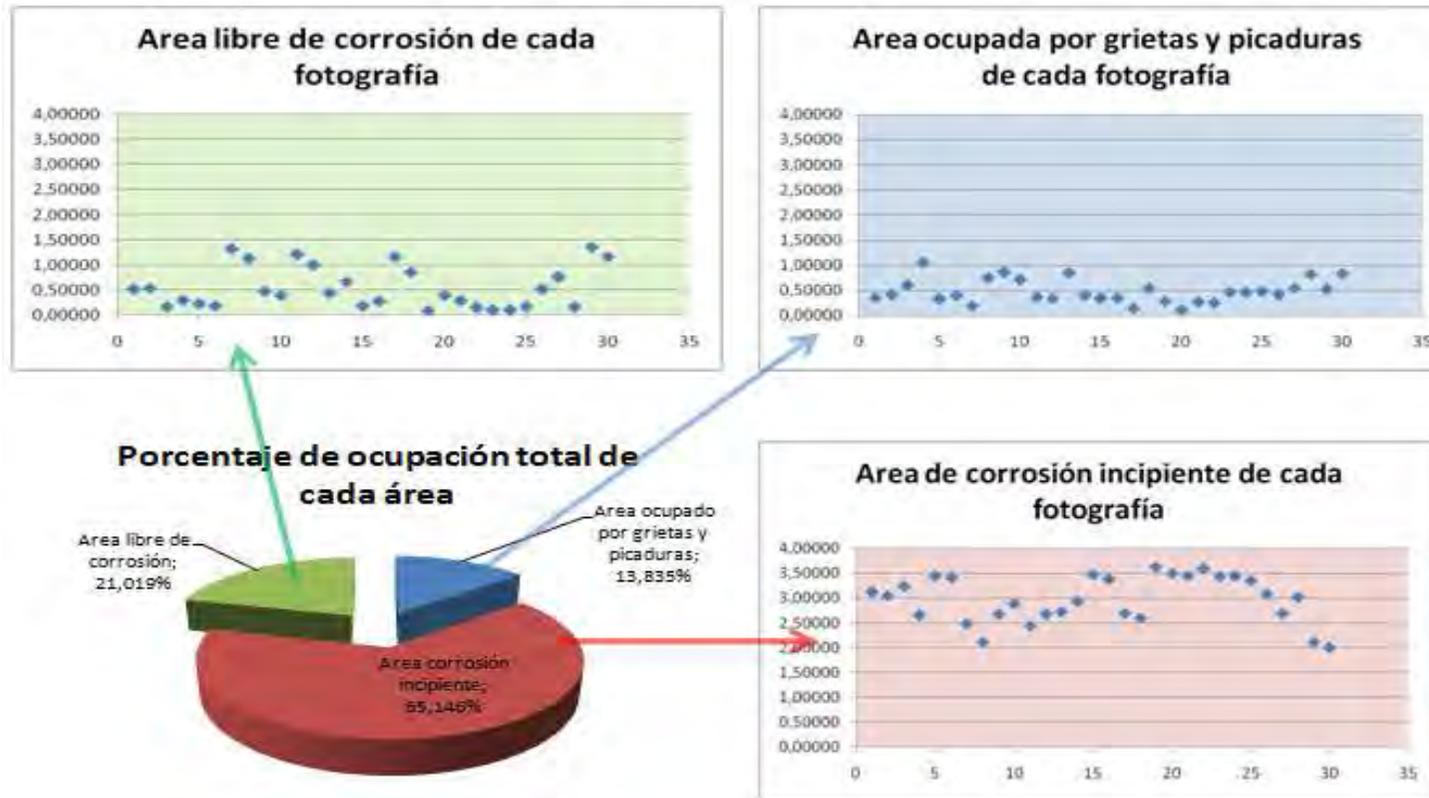


Fig. 86. Dispersión de variables abruptas, Escenario C

4.1.4- Escenario D

En la Tabla 6 se muestra una recopilación de las medidas de las variables, áreas, agrupadas por:

- Tipo (área ocupada por grietas y picaduras, área de corrosión incipiente y área libre de corrosión.
- Número de casquillo.
- Sección.
- Superficie (1 ó 2).

En la última columna se muestra la suma de cada una de las variables pertenecientes al escenario A. Estos últimos datos serán las entradas abruptas del proceso Fuzzy.

En la Figura 87 se muestra el porcentaje total que ocupa cada una de las áreas, así como la implicación de las tres secciones en cada variable. La dispersión de los datos medidos queda reflejada en la Figura 88.

Tabla 6. Resultados numéricos procesado de imágenes, Escenario D

	C1						C2					
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 1		Sección 2		Sección 3	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Area ocupada por grietas y picaduras	0,38110	0,30320	0,69580	0,61230	0,41270	0,36800	0,30440	0,33820	0,51830	0,34420	0,26340	0,48750
Corrosión incipiente	2,32780	2,71120	2,87890	2,73840	3,28170	3,09970	2,63400	3,00270	2,92960	3,22350	2,31790	2,17590
Area libre de corrosión	1,29110	0,98560	0,42530	0,64930	0,30560	0,53230	1,06160	0,65910	0,55210	0,43230	1,41870	1,33660

	C3						C4					
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 1		Sección 2		Sección 3	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Area ocupada por grietas y picaduras	0,61970	0,65050	0,47050	1,77000	0,43870	0,96860	0,19590	0,25170	0,50610	0,42550	0,71000	0,65670
Corrosión incipiente	2,88920	3,24940	2,94440	2,23000	2,17910	2,78930	3,14750	3,68920	2,94270	3,03630	3,00000	3,04570
Area libre de corrosión	0,49110	0,10010	0,58510	0,51280	0,51280	0,51280	0,51280	0,51280	0,51280	0,51280	0,51280	0,51280

	C5						TOTAL
	Sección 1		Sección 2		Sección 3		
	1	2	1	2	1	2	
Area ocupada por grietas y picaduras	0,37110	0,44260	0,74500	0,98480	0,68880	1,16140	17,08670
Corrosión incipiente	1,57800	2,71530	2,45150	2,78840	2,20210	2,62240	82,82180
Area libre de corrosión	0,51280	0,51280	0,51280	0,51280	0,51280	0,51280	18,51790

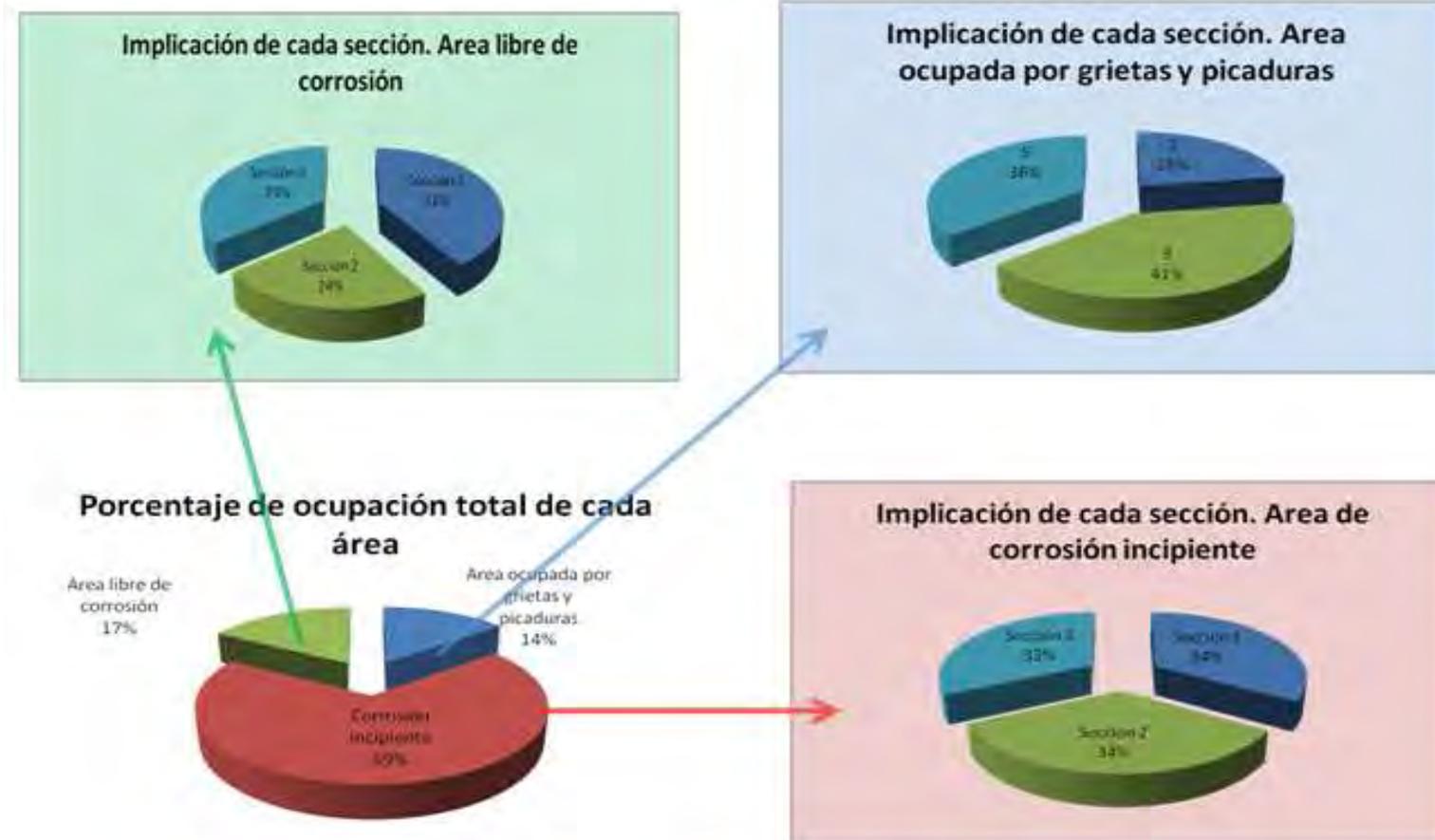


Fig. 87. Porcentaje de área ocupada por cada variable, Escenario D

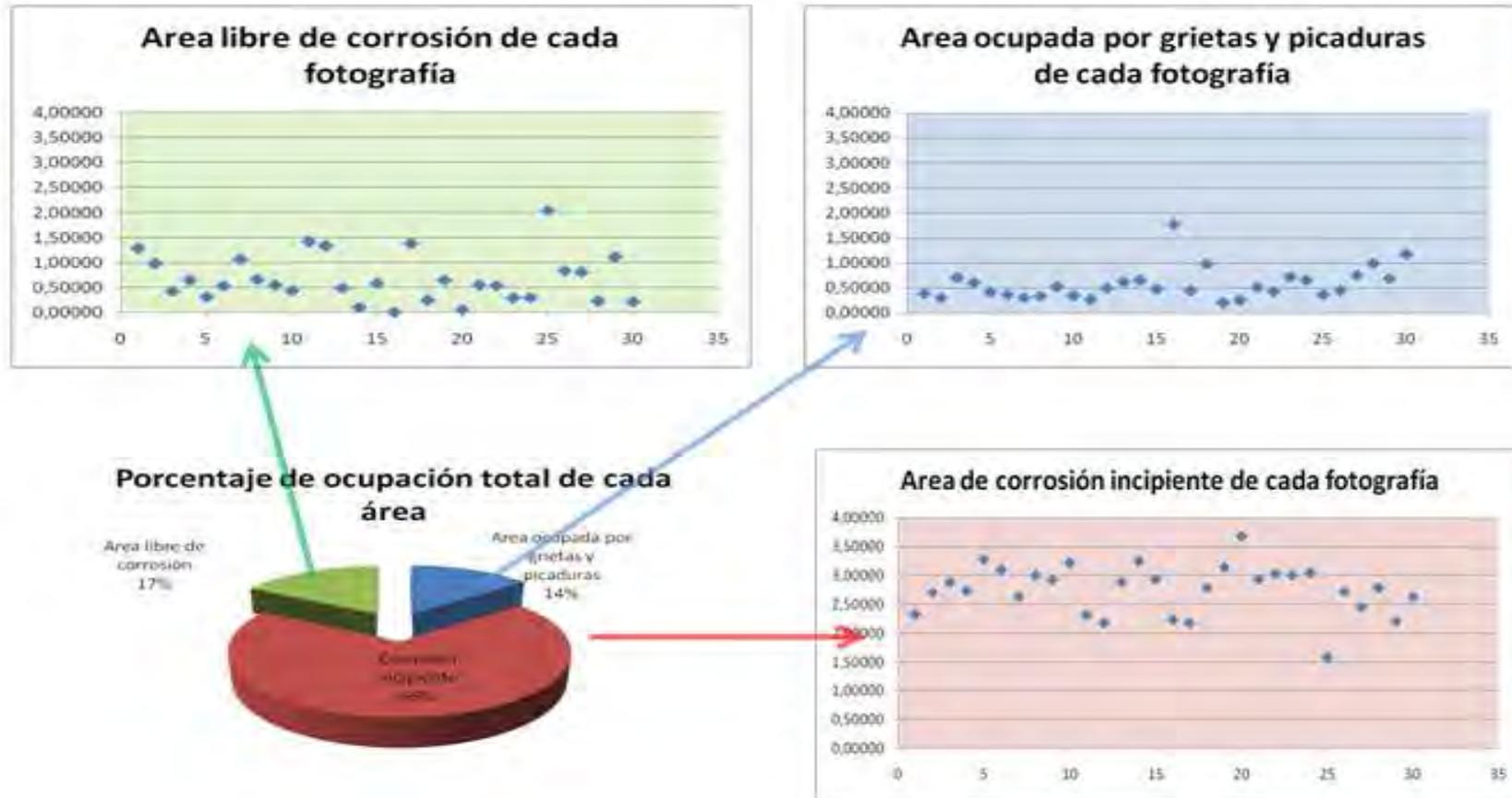


Fig. 88. Dispersión de variables abruptas, Escenario D

4.2- Grado de corrosión de cada escenario

El procedimiento para la obtención de estos resultados, descrito anteriormente, sigue los siguientes pasos, que se aplicarán a cada uno de los escenarios:

- 1- Lectura de los valores físicos: *área ocupada por grietas y picaduras, área de corrosión incipiente y área libre de corrosión.*
- 2- Cálculo de las funciones de pertenencia, FP, de los términos lingüísticos de cada una de las variables. **Fuzzificación.**
- 3- Generación de reglas IF-THEN basadas en el *Motor de interferencia Fuzzy.*
- 4- Cálculo del valor físico de la variable de salida, *grado de corrosión.* **Defuzzificación.**

Siguiendo este proceder se expondrán los resultados.

4.2.1- Escenario A

Paso 1

De la Tabla 3 se extrae la siguiente información: los valores físicos de cada una de las variables de entrada para el caso del Escenario A:

Tabla 7. Áreas totales, escenario A

Área ocupado por grietas y picaduras	16,60150
Área corrosión incipiente	78,17520
Área libre de corrosión	25,22330

Paso 2

Se calcularán las funciones de pertenencia de los términos lingüísticos de cada una de ellas, basándose en los criterios establecidos en el Capítulo 3.

Área ocupada por grietas y picaduras

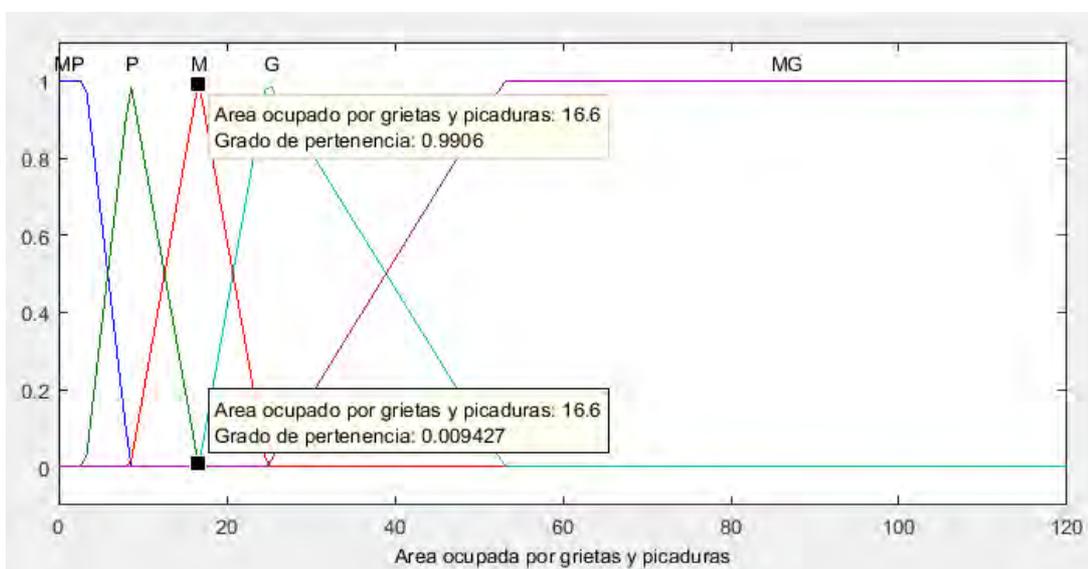


Fig. 89. Gráfica Fuzzy: área ocupada por grietas y picaduras, Escenario A

Área de corrosión incipiente

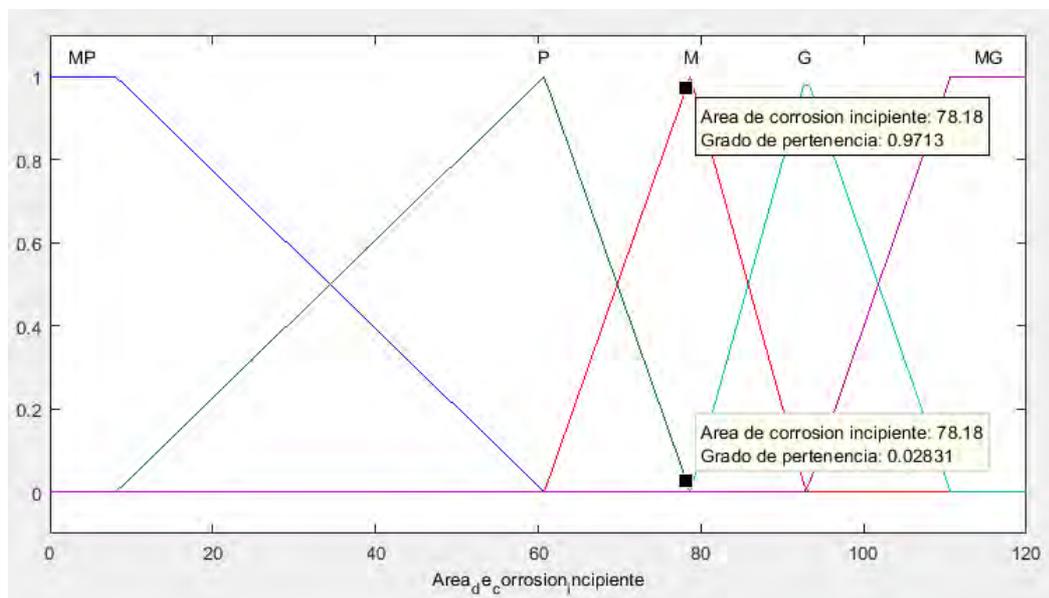


Fig. 90. Gráfica Fuzzy: área de corrosión incipiente, Escenario A

Área libre de corrosión

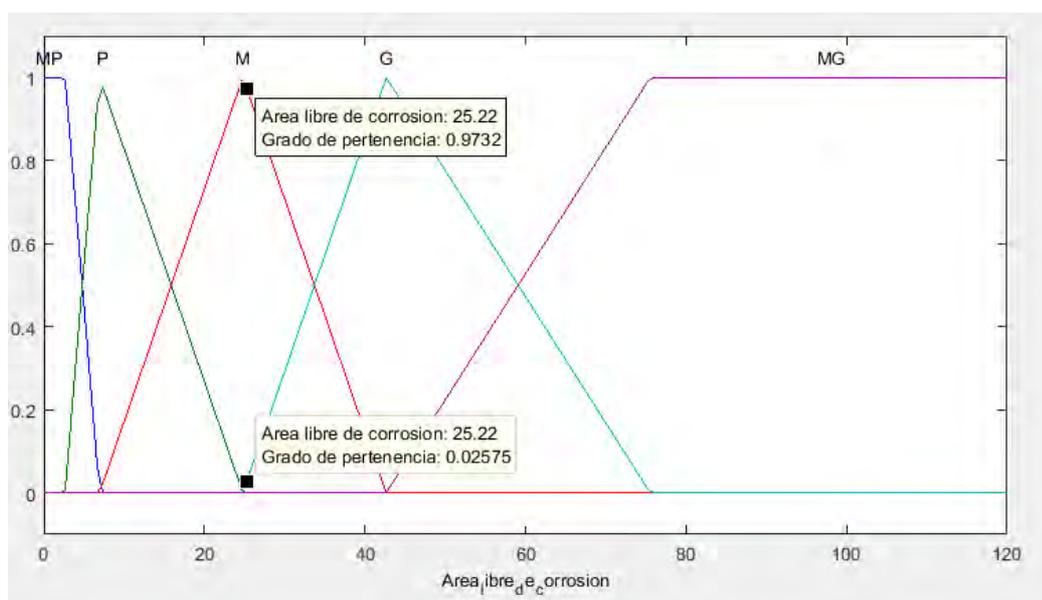


Fig. 91. Gráfica Fuzzy: área libre de corrosión, Escenario A

En la Tabla 8 se resumen los resultados del proceso de Fuzzificación:

Tabla 8. “Fuzzificación Escenario A”.

Área ocupado por grietas y picaduras	Área de corrosión incipiente	Área libre de corrosión
M: 0,9906	M: 0,9713	M: 0,9732
P: 0,009427	P: 0,02831	G: 0,02571

Paso 3

Se generan las reglas IF-THEN basadas en el motor de inferencia Fuzzy, Figura 75.

Aplicadas a este escenario se tomarán las matrices correspondientes a área ocupado por grietas y picaduras medio y bajo, pues, como se observa en la Tabla anterior, a esta área le corresponden unos valores M:0,9906 y P:0,009427 de la función de pertenencia. Así, el motor de Inferencia aplicado al Escenario A queda representado en la Figura 86.

	P						M				
	MP	P	M	G	MG		MP	P	M	G	MG
MP	X	X	X	A	A	MP	x	X	A	A	A
P	X	M	M	M	A	P	x	A	A	A	A
M	X	B	M	M	M	M	M	M	M	M	M
G	B	B	B	M	M	G	B	B	M	M	X
MG	MB	MB	MB	X	X	MG	MB	B	B	M	X

Fig. 92. Motor de inferencia aplicado al Escenario A

Se representan las reglas Fuzzy para el Escenario A en la Tabla 9.

Tabla 9. Reglas Fuzzy, Escenario A

Regla 1	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 2	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es grande, G
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 3	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es pequeño, P, y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 4	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es pequeño, P, y el <i>área libre de corrosión</i> es grande, G
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es B, bajo
Regla 5	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es P, pequeño, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M, y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 6	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es P, pequeño, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M, y el <i>área libre de corrosión</i> es grande, G
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es B, bajo
Regla 7	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es P, pequeño, el <i>área de corrosión incipiente</i> es pequeño, P, y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es B, bajo
Regla 8	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es P, pequeño, el <i>área de corrosión incipiente</i> es pequeño, P, y el <i>área libre de corrosión</i> es grande, G
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es B, bajo

Paso 4

Se evalúan los miembros izquierdos de las reglas de interferencia asignándole el valor mínimo (operación AND) de ambos operandos al miembro derecho.

Tabla 10. Composiciones de resultados de las partes IF de las reglas, Escenario A

Regla	Composición de resultados
1	$(0,9906^{0,9713^{0,9732}}) = \mathbf{0,9911}$
2	$(0,9906^{0,9713^{0,0257}}) = \mathbf{0,99976}$
3	$(0,9906^{0,02831^{0,9732}}) = \mathbf{0,99974}$
4	$(0,9906^{0,02831^{0,0257}}) = \mathbf{0,999993}$
5	$(0,009427^{0,9713^{0,9732}}) = \mathbf{0,01217}$
6	$(0,009427^{0,9713^{0,0257}}) = \mathbf{0,89}$
7	$(0,009427^{0,02831^{0,9732}}) = \mathbf{0,8794}$
8	$(0,009427^{0,02831^{0,0257}}) = \mathbf{0,9966}$

La intersección de estos valores con sus correspondientes etiquetas lingüísticas dará un área de la función de salida, “grado de corrosión”. El grado de corrosión se podrá obtener mediante diferentes métodos de defuzzificación, en el presente proyecto se hará uso del método del centroide.

Este proceso se automatizará mediante el uso de la herramienta FIS de Matlab, toolbox de Fuzzy. De este modo, bastará con introducir las gráficas Fuzzy, las reglas Fuzzy, y los valores de las variables abruptas, obteniendo directamente el grado de corrosión, Figura 93.

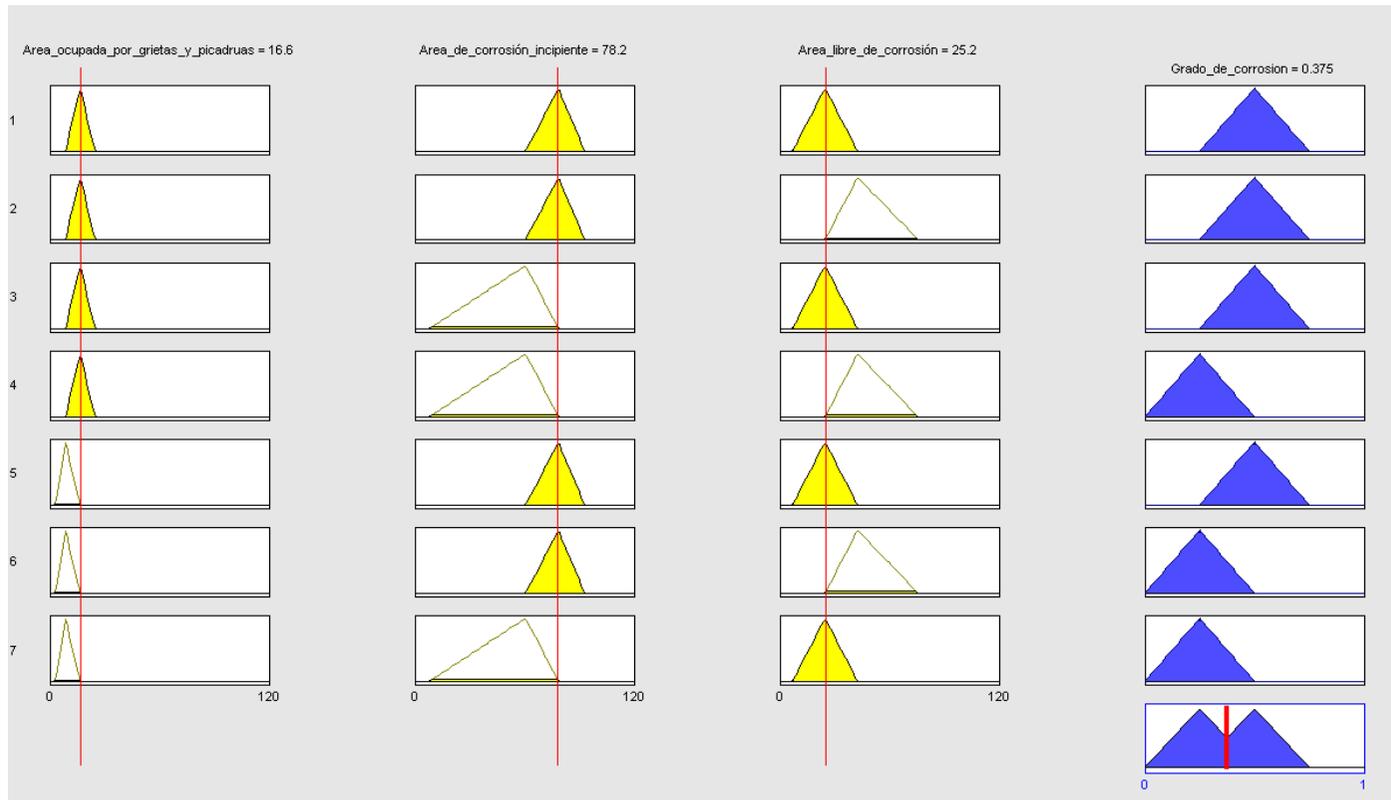


Fig. 93. Defuzzificación Escenario A

El grado de corrosión para el Escenario A es de **0,375**

4.2.2- Escenario B

Paso 1

De la Tabla 4 se extraen los valores físicos de cada una de las variables de entrada:

Tabla 11. Áreas totales, Escenario B

Area ocupado por grietas y picaduras	18,78360
Area corrosión incipiente	63,12630
Area libre de corrosión	39,07480

Paso 2

Se calcularán las funciones de pertenencia de los términos lingüísticos de cada una de ellas, basándonos en los criterios establecidos en el Capítulo 3.

Área ocupada por grietas y picaduras

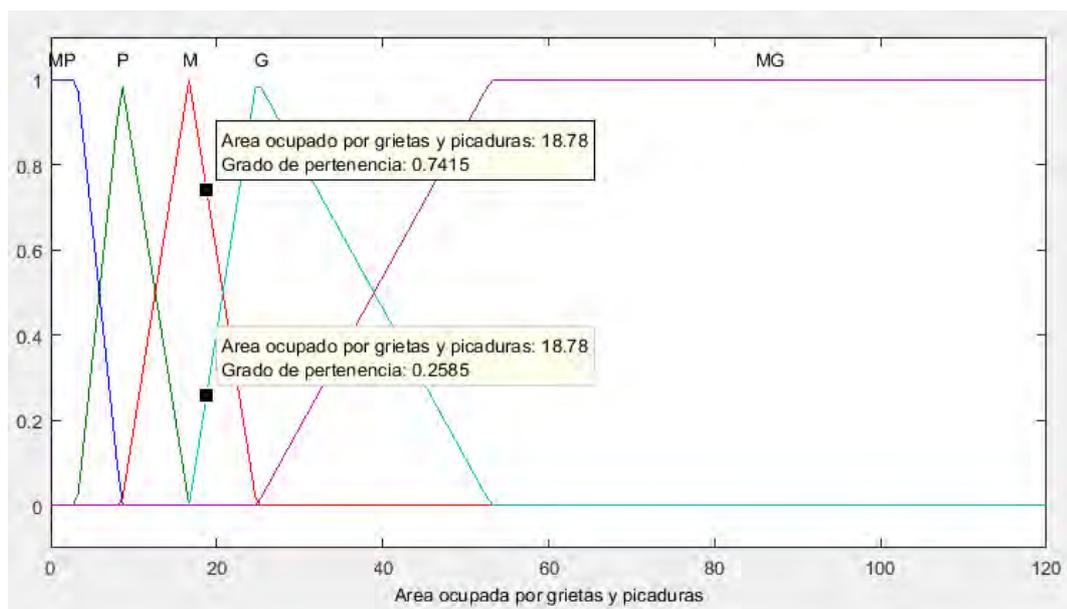


Fig. 94. Gráfica Fuzzy: área ocupada por grietas y picaduras, Escenario B

Área de corrosión incipiente

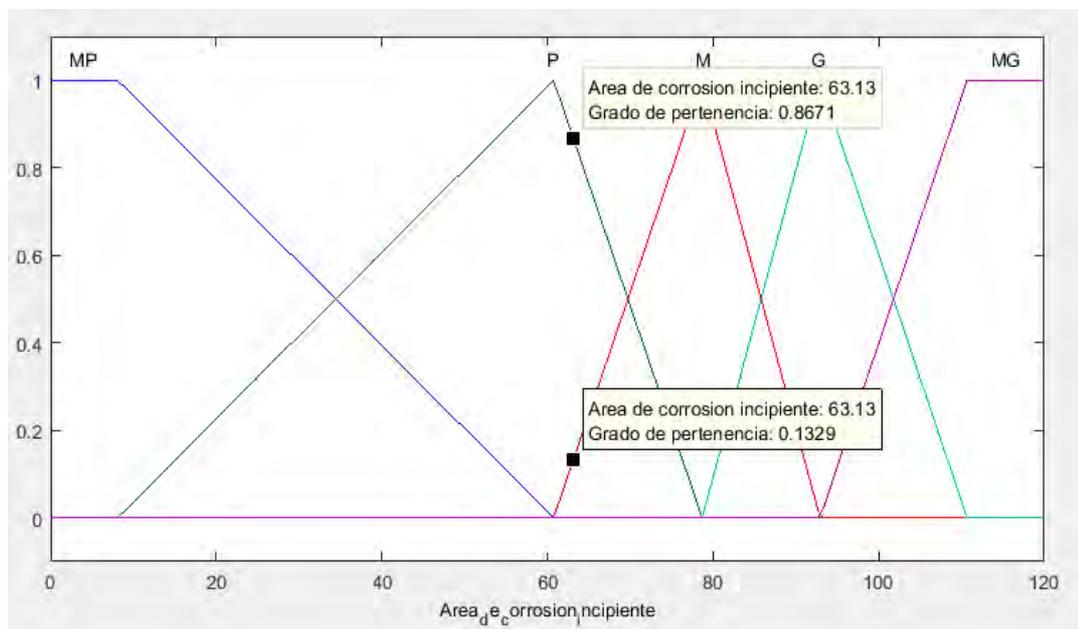


Fig. 95. Gráfica Fuzzy: área de corrosión incipiente, Escenario B

Área libre de corrosión

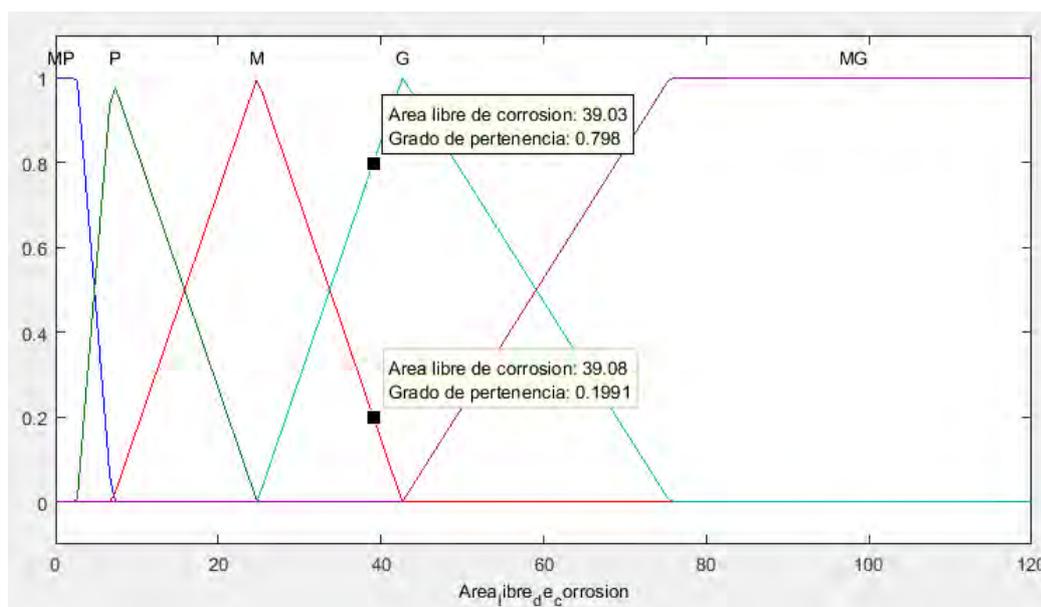


Fig. 96. Gráfica Fuzzy: área libre de corrosión, Escenario B

En la Tabla 11 se resumen los resultados del proceso de Fuzzificación.

Tabla 12. Fuzzificación, Escenario B

Area ocupado por grietas y picaduras	Area de corrosión incipiente	Area libre de corrosión
M: 0,7415	M: 0,1329	M: 0,1991
G: 0,2585	P: 0,8671	G: 0,798

Paso 3

Se generan las reglas IF-THEN basadas en el motor de interferencia Fuzzy, Figura 75.

Aplicadas a este escenario se tomarán las matrices correspondientes a área ocupado por grietas y picaduras medio y grande, pues, como se observa en la Tabla anterior, a esta área le corresponden unos valores M:0,7415 y G:0,2585 de la función de pertenencia.

Así, se obtiene el Motor de Interferencia Fuzzy aplicado al presente Escenario, Figura 97, y sus correspondientes Reglas Fuzzy, Tabla 13.

	M				
	MP	P	M	G	MG
MP	x	X	A	A	A
P	x	A	A	A	A
M	M	M	M	M	M
G	B	B	M	M	X
MG	MB	B	B	M	X

	G				
	MP	P	M	G	MG
MP	A	MA	MA	MA	MA
P	A	A	MA	MA	MA
M	A	M	A	A	MA
G	M	M	M	X	X
MG	B	M	M	X	X

Fig. 97. Motor de interferencia Fuzzy aplicado al Escenario B

Tabla 13. Reglas Fuzzy, Escenario B

Regla 1	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 2	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es grande, G
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 3	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es pequeño, P, y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 4	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es pequeño, P, y el <i>área libre de corrosión</i> es grande, G
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es B, bajo
Regla 5	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es G, grande, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M, y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es A, alto
Regla 6	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es G, grande, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M, y el <i>área libre de corrosión</i> es grande, G
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 7	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es G, grande, el <i>área de corrosión incipiente</i> es pequeño, P, y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 8	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es G, grande, el <i>área de corrosión incipiente</i> es pequeño, P, y el <i>área libre de corrosión</i> es grande, G
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio

Paso 4

Tras introducir las reglas en la herramienta FIS, se obtiene un grado de corrosión de **0,436** para el escenario B, Figura 98.

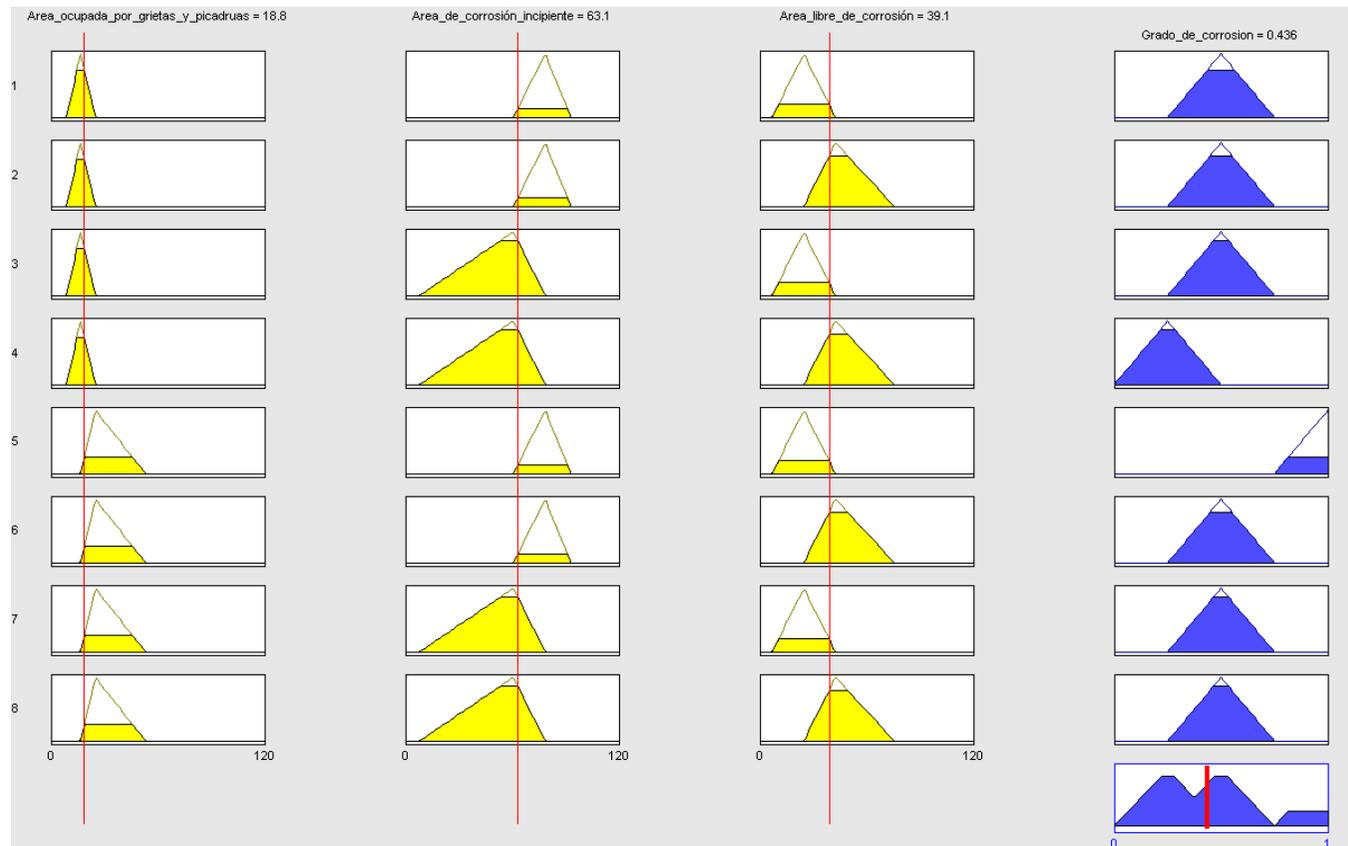


Fig. 98. Defuzzificación, Escenario B

4.2.3- Escenario C

Paso 1

De la Tabla 5 se extrae la siguiente información, valores físicos de cada una de las variables de entrada:

Tabla 14. Áreas totales, Escenario C

Area ocupado por grietas y picaduras	14,39970
Area corrosión incipiente	89,28770
Area libre de corrosión	16,31260

Paso 2

Se calcularán las funciones de pertenencia de los términos lingüísticos de cada una de ellas, basándonos en los criterios establecidos en el Capítulo 3.

Área ocupada por grietas y picaduras

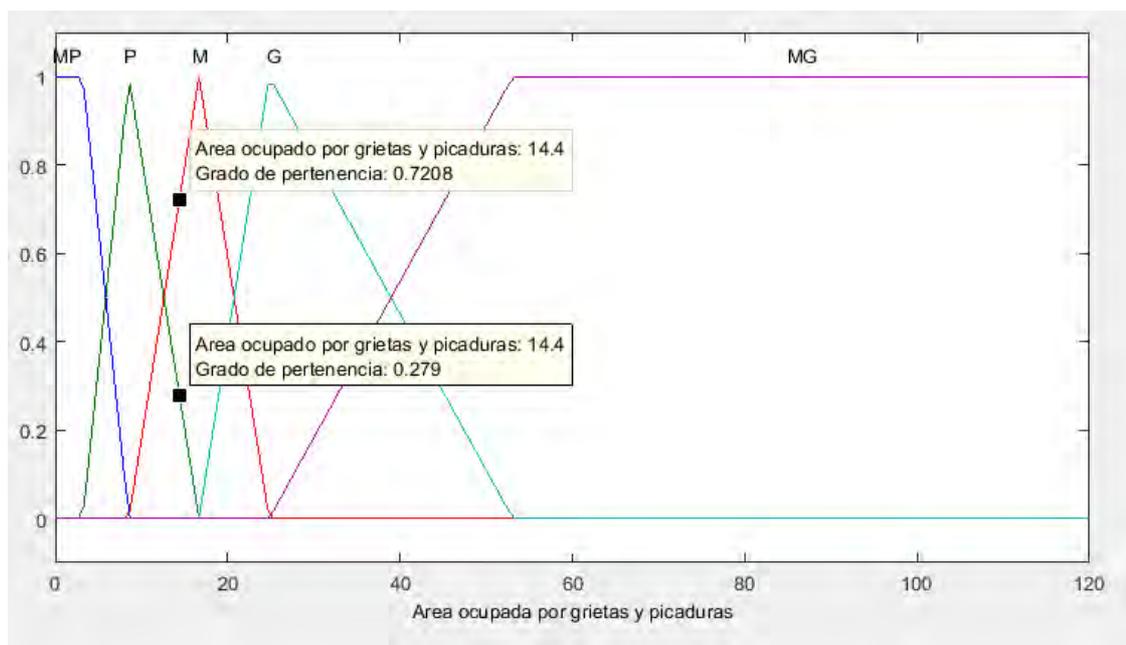


Fig. 99. Gráfica Fuzzy: área ocupada por grietas y picaduras, Escenario C

Área de corrosión incipiente

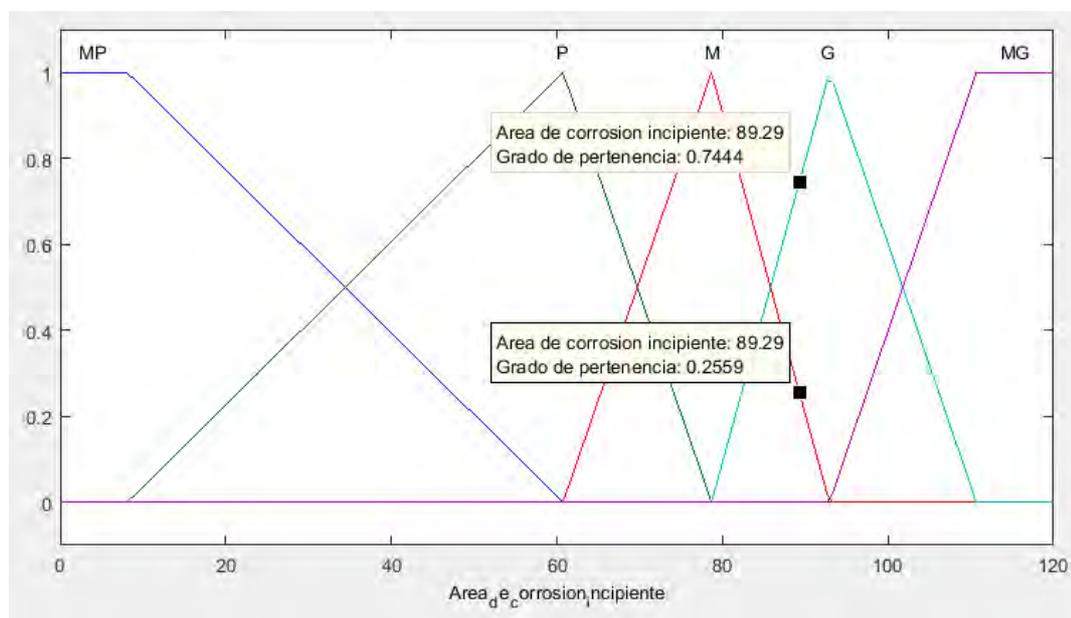


Fig. 100. Gráfica Fuzzy: área de corrosión incipiente, Escenario C

Área libre de corrosión

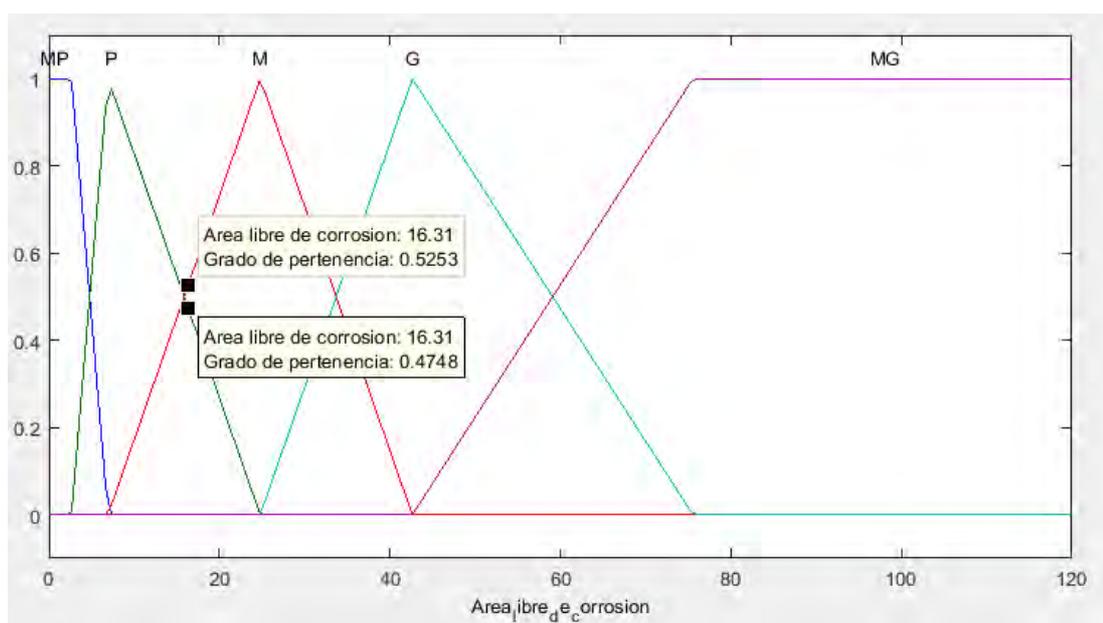


Fig. 101. Gráfica Fuzzy: área libre de corrosión, Escenario C

En la Tabla 15 se resumen los resultados del proceso de Fuzzificación de este escenario.

Tabla 15. Fuzzificación, Escenario C

Área ocupado por grietas y picaduras	Área de corrosión incipiente	Área libre de corrosión
M: 0,7208	M: 0,2559	M: 0,5253
P: 0,279	G: 0,7444	P: 0,4748

Paso 3

Se generan las reglas IF-THEN basadas en el motor de interferencia Fuzzy, Figura 75.

Aplicadas a este escenario se tomarán las matrices correspondientes a área ocupado por grietas y picaduras medio y grande, pues, como se observa en la Tabla anterior, a esta área le corresponden unos valores M:0,7208 y P:0,279 de la función de pertenencia.

Así, el Motor de Interferencia para el Escenario C queda representado en la Figura 102.

	M						P				
	MP	P	M	G	MG		MP	P	M	G	MG
MP	x	X	A	A	A	MP	X	X	X	A	A
P	x	A	A	A	A	P	X	M	M	M	A
M	M	M	M	M	M	M	X	B	M	M	M
G	B	B	M	M	X	G	B	B	B	M	M
MG	MB	B	B	M	X	MG	MB	MB	MB	X	X

Fig. 102. Motor de interferencia Fuzzy aplicado al Escenario C.

Tabla 16. Reglas Fuzzy, Escenario C

Regla 1	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el grado de corrosión es M, medio
Regla 2	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es pequeño, P
THEN	Entonces el grado de corrosión es A, alto
Regla 3	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es grande, G, y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el grado de corrosión es M, medio
Regla 4	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es grande, G, y el <i>área libre de corrosión</i> es pequeño, P
THEN	Entonces el grado de corrosión es A, alto
Regla 5	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es P, pequeño, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el grado de corrosión es M, medio
Regla 6	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es P, pequeño, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es pequeño, P
THEN	Entonces el grado de corrosión es M, medio
Regla 7	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es P, pequeño, el <i>área de corrosión incipiente</i> es grande, G, y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el grado de corrosión es M, medio
Regla 8	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es P, pequeño, el <i>área de corrosión incipiente</i> es grande, G, y el <i>área libre de corrosión</i> es pequeño, P
THEN	Entonces el grado de corrosión es M, medio

Paso 4

Tras introducir las reglas en la herramienta FIS, se obtiene un grado de corrosión de **0,641** para el escenario C, Figura 103.

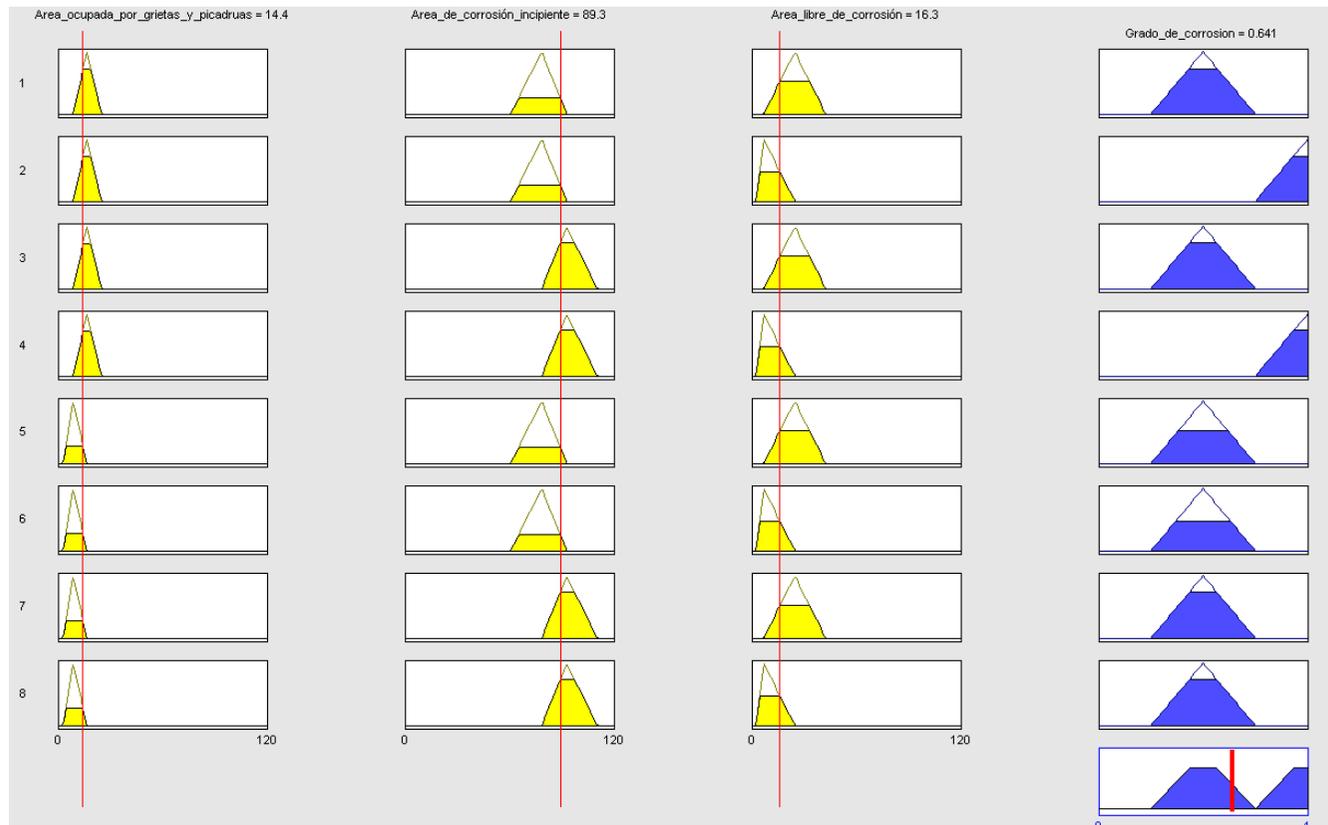


Fig. 103. Defuzzificación, Escenario C

4.2.4- Escenario D

Paso 1

De la Tabla 5 se extrae la siguiente información: los valores físicos de cada una de las variables de entrada:

Tabla 17. Áreas totales, Escenario D

Área ocupado por grietas y picaduras	17,0867
Área corrosión incipiente	82,8218
Área libre de corrosión	18,5179

Paso 2

Se calcularán las funciones de pertenencia de los términos lingüísticos de cada una de ellas, basándonos en los criterios establecidos en el Capítulo 3.

Área ocupada por grietas y picaduras

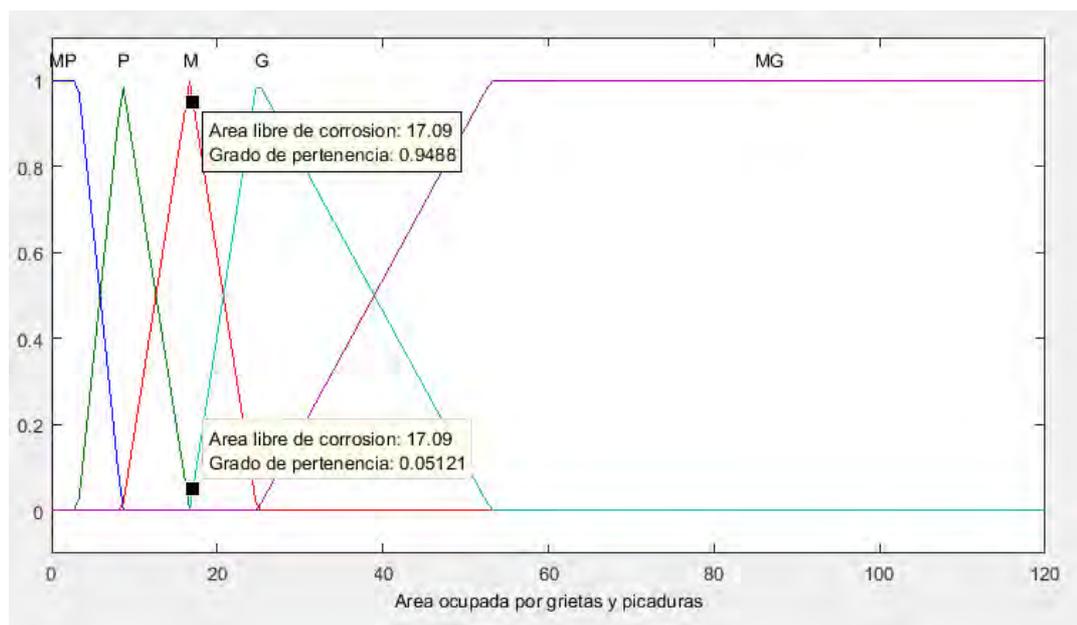


Fig. 104. Gráfica Fuzzy: área ocupada por grietas y picaduras, Escenario D

Área de corrosión incipiente

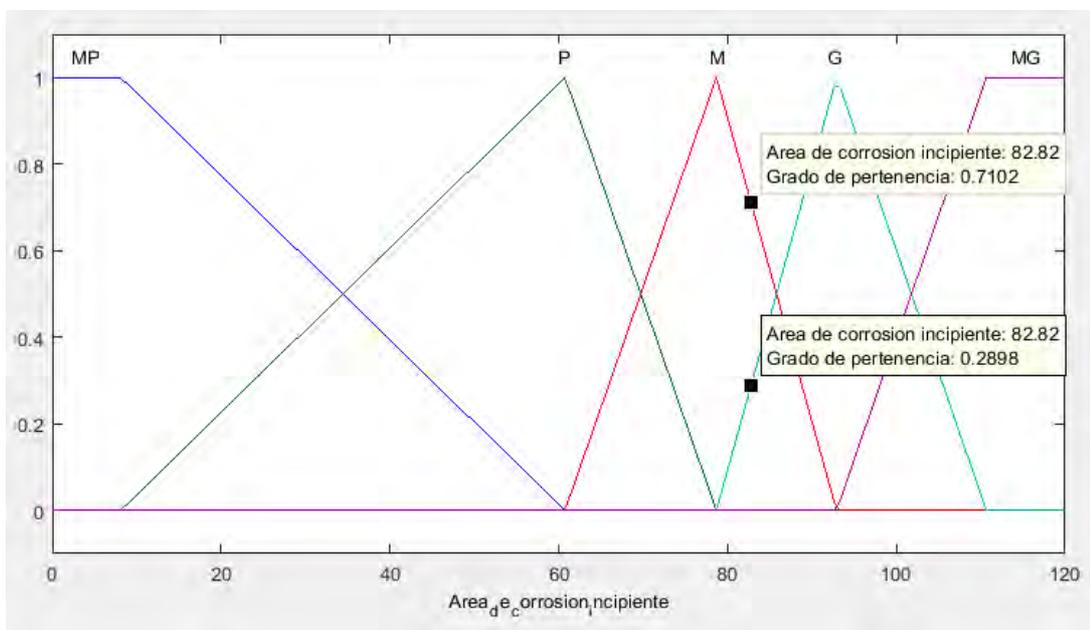


Fig.105. Gráfica Fuzzy: área de corrosión incipiente, Escenario D

Área libre de corrosión

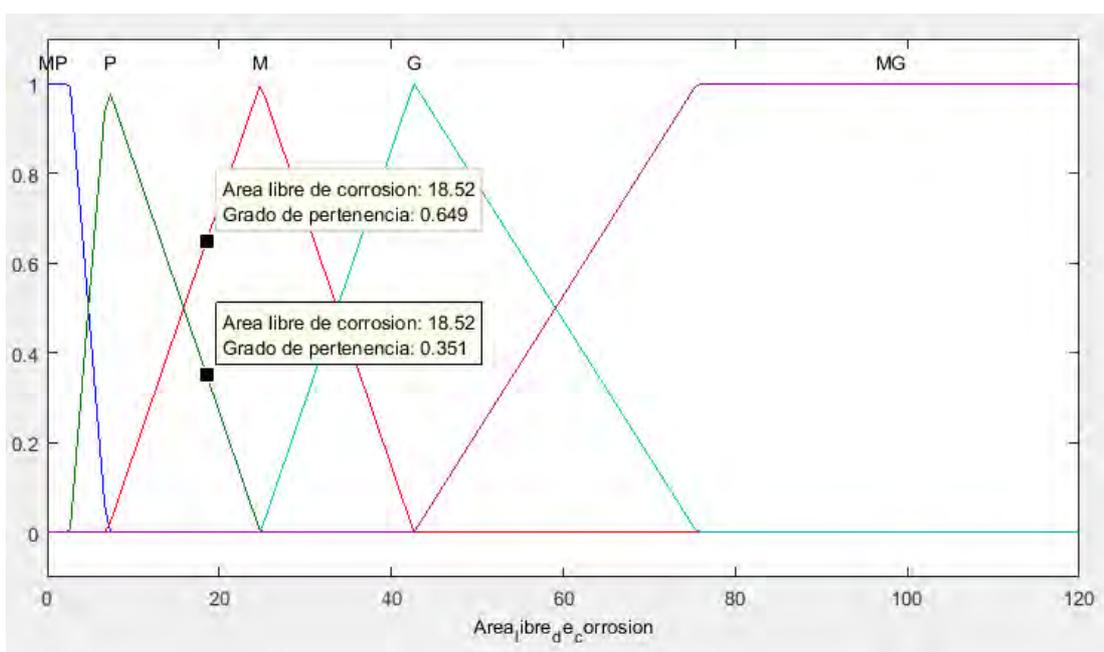


Fig. 106. Gráfica Fuzzy: área libre de corrosión

En la Tabla 18 se resumen los resultados del proceso de Fuzzificación de este escenario.

Tabla 18. Fuzzificación, Escenario D

Area ocupado por grietas y picaduras	Area de corrosión incipiente	Area libre de corrosión
M: 0,9488	M: 0,7102	M: 0,649
G: 0,05121	G: 0,2898	P: 0,351

Paso 3

Se generan las reglas IF-THEN basadas en el motor de interferencia Fuzzy, Figura 75.

Aplicadas a este escenario se tomarán las matrices correspondientes a área ocupado por grietas y picaduras medio y grande, pues, como se observa en la Tabla anterior, a esta área le corresponden unos valores M: 0,9488 y G: 0,05121 de la función de pertenencia.

	M				
	MP	P	M	G	MG
MP	x	X	A	A	A
P	x	A	A	A	A
M	M	M	M	M	M
G	B	B	M	M	X
MG	MB	B	B	M	X

	G				
	MP	P	M	G	MG
MP	A	MA	MA	MA	MA
P	A	A	MA	MA	MA
M	A	M	A	A	MA
G	M	M	M	X	X
MG	B	M	M	X	X

Figura 107. Motor de interferencia Fuzzy aplicado al Escenario D

Tabla 19. Reglas Fuzzy, Escenario D

Regla 1	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 2	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es pequeño, P
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es A, alto
Regla 3	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es grande, G, y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es M, medio
Regla 4	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es M, medio, el <i>área de corrosión incipiente</i> es grande, G, y el <i>área libre de corrosión</i> es pequeño, P
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es A, alto
Regla 5	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es G, grande, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es A, alto
Regla 6	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es G, grande, el <i>área de corrosión incipiente</i> es medio, M y el <i>área libre de corrosión</i> es pequeño, P
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es MA, muy alto
Regla 7	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es G, grande, el <i>área de corrosión incipiente</i> es grande, G, y el <i>área libre de corrosión</i> es medio, M
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es A, alto
Regla 8	
IF	Si el <i>área ocupado por grietas y picaduras</i> es G, grande, el <i>área de corrosión incipiente</i> es grande, G, y el <i>área libre de corrosión</i> es pequeño, P
THEN	Entonces el <i>grado de corrosión</i> es MA, muy alto

Paso 4

Tras introducir las reglas en la herramienta FIS, se obtiene un grado de corrosión de **0,666** para el escenario D, Figura 108.



Fig. 108. Defuzzyficación, Escenario D

4.3- Análisis resultados

En los cuatro escenarios establecidos en el presente Proyecto: A, B, C y D, predomina el área de corrosión incipiente, siempre mayor al 50% de la superficie total, oscilando desde el 52%, escenario B, hasta el 74%, escenario C. La segunda variable abrupta de mayor ocupación, para cualquiera de los escenarios establecidos, corresponde al área libre de corrosión, cuyo porcentaje varía entre el 14% y el 32%. En último lugar, en cuanto a porcentaje de área ocupada, se encuentra el área ocupada por grietas y picaduras, oscilando entre el 12% y el 16%. En la Tabla 20 se muestra un esquema de estos valores.

Tabla 20. “Distribución de la ocupación de cada variable abrupta”

	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D
Área de corrosión incipiente	65%	52%	74%	70%
Área libre de corrosión	21%	32%	14%	17%
Área ocupada por grietas y picaduras	14%	16%	12%	14%

Se observa que la variable menos afectada por la probabilidad de estimación de aparición considerando este método es el área ocupada por grietas y picaduras, cuya diferencia máxima entre distintos escenarios es un 4% de la superficie total. Por el contrario, la variable que muestra una mayor aleatoriedad es el área de corrosión incipiente, con una diferencia máxima del 22% de la superficie total, dada entre los escenarios B y C. El área libre de corrosión muestra, también, una diferencia considerable entre los cuatro escenarios, siendo ésta de un 18%, también entre escenarios B y C. La Tabla 21 muestra éstas diferencias.

Tabla 21. “Diferencias máximas de cada variable entre escenarios”

	Diferencia máxima entre escenarios
Área de corrosión incipiente	22%
Área libre de corrosión	18%
Área ocupada por grietas y picaduras	4%

Los resultados obtenidos del procesado de imágenes fueron anotados teniendo en cuenta las tres secciones distintas de cada escenario. En cuanto a esto, se observa que no existe apreciable aleatoriedad en el caso del área de corrosión incipiente. Así, el peso de cada sección tiene una repartición aproximadamente homogénea para las tres secciones. Para En la Tabla 22, se aprecia el peso que ocupa la variable área de corrosión incipiente en cada sección, para cada escenario, representado en porcentaje de la superficie total. Se observa que la Sección 1 es la más afectada en el caso de los escenarios A, C y D, y la sección 3 en el escenario B.

Tabla 22. Porcentaje de ocupación de la variable área de corrosión incipiente para cada sección, por escenarios

	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D
S1	23,56%	16,83%	25,87%	24,47%
S2	22,54%	16,95%	25%	23,97%
S3	19,05%	18,83%	23,54%	22,26%

Una mayor aleatoriedad se observa en el caso del área libre de corrosión, donde no se da un reparto equitativo entre las tres secciones objeto de estudio, Tabla 23. En este caso, las secciones más afectadas (con menor área libre de corrosión) son: sección 1 caso del escenario A, sección 3 caso del escenario B, sección 2 caso del escenario C y sección 2 caso del escenario D.

Tabla 23. Porcentaje de ocupación de la variable área libre de corrosión para cada sección, por escenarios

	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D
S1	4,68%	12,14%	4,81%	5,53%
S2	6,01%	10,42%	2,64%	4,34%
S3	10,33%	10%	6,15%	5,56%

En el caso del área ocupado por grietas y picaduras, se da un reparto ni tan equitativo como en el área de corrosión incipiente, ni tan disperso como en el área libre de corrosión, siendo las secciones más afectadas: la sección 1 Caso del escenario A, sección 2 para el escenario B, sección 2 para el escenario C y sección 2 para el escenario D.

Tabla 24. Porcentaje de ocupación de la variable área ocupada por grietas y picaduras para cada sección, por escenarios

	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D
S1	5,09%	4,37%	3,53%	3,22%
S2	4,79%	5,96%	4,83%	5,89%
S3	3,96%	5,32%	3,64%	5,13%

Por último, en la Figura 109, se muestran los valores obtenidos tras la aplicación del Método Fuzzy, esto es, los grados de corrosión de cada escenario.

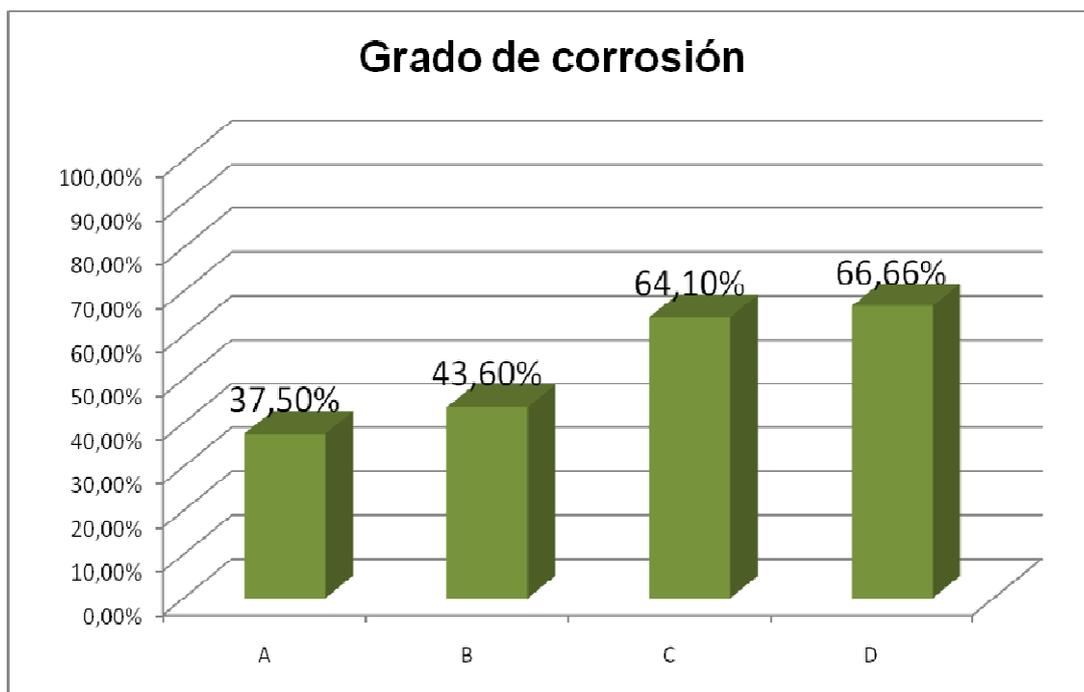


Fig. 109. “Grado de corrosión de cada escenario”

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se mostrarán las principales conclusiones obtenidas tras la realización del presente estudio.

- 1) En el presente Proyecto Final de Carrera, se establecieron cuatro escenarios para los casquillos del Puente Juan José Arenas, Fig. 3. Estos escenarios, A, B, C y D, están gobernados, respectivamente, por el efecto del tráfico rodado y vientos Noroeste, Suroeste y Suroeste; tráfico peatonal y vientos Norte, Noreste, Este y Sureste; tráfico peatonal y vientos Noroeste, Oeste y Suroeste; tráfico rodado y vientos Norte, Noreste, Este y Sureste, tal como se aprecia en la Figura 110. Estos factores favorecen el fenómeno de la corrosión.



Fig. 110. Factores, de cada escenario, que favorecen el fenómeno de la corrosión

En cada escenario se distinguieron, además, tres secciones distintas, reflejadas en la Figura 46. La relación entre el entre el impacto directo del viento (dirección del viento) y cada una de estas superficies queda reflejado en la Figura 110.

- 2) En los cuatro escenarios establecidos en el presente Proyecto: A, B, C y D, predomina el área de corrosión incipiente, siempre mayor al 50% de la superficie total, oscilando desde el 52%, escenario B, hasta el 74%, escenario C y ocupando un 65% y 70% de la superficie total en los escenarios A y D respectivamente. La diferencia máxima entre distintos escenarios es, pues, del 22% de la superficie total, dándose entre los escenarios B y C.
- 3) El porcentaje del área libre de corrosión es el segundo que mayor peso tiene en cuanto a ocupación de la superficie total, y varía entre el 14% y el 32%, escenarios C y B respectivamente. La ocupación en los escenarios A y D es del 21% y 17% de la superficie total respectivamente. La diferencia máxima entre distintos escenarios, es, pues del 18% de la superficie total, y se da entre escenarios B y C.
- 4) El área ocupada por grietas y picaduras es el de menor presencia, oscilando entre el 12% y el 16% de la superficie total, ocupando un 14% en los escenarios A y D. La diferencia máxima entre distintos escenarios, es del 4%, diferencia que se da entre los escenarios A y B.
- 5) La sección 1 es, de las tres secciones, la más afectada por la variable área de corrosión incipiente en todos los escenarios salvo en el B, donde predomina en la sección 3, si bien el reparto del área de corrosión incipiente es bastante homogéneo entre las tres secciones.
- 6) El área libre de corrosión es menor en la sección 2 para los escenarios C y D, y en las secciones 1 y 3 en los escenarios A y B

respectivamente. Se observa una mayor dispersión de porcentaje de área respecto a la superficie total en las tres secciones.

- 7) La sección 2 es la sección más afectada por el área ocupada por grietas y picaduras para todos los escenarios salvo el A, donde es la sección 1 la más afectada por esta variable.

Por otro lado, las estadísticas de los vientos en Santander, muestran que desde el año 2000 hasta el año 2015, se ha dado un claro predominio de la dirección Noreste en el flujo del viento durante las épocas más lluviosas, desde Octubre hasta Febrero, Figura 109.

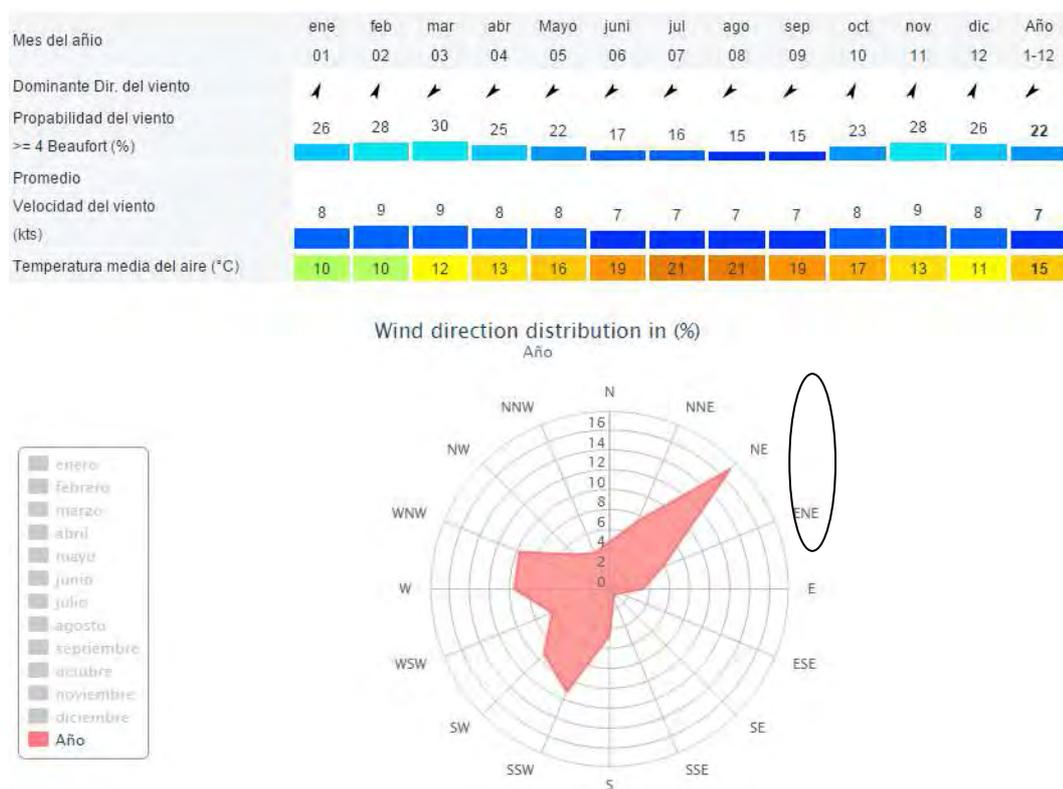


Figura 109. Estadísticas datos meteorológicos en Parayas, Cantabria [22]

El viento Noreste, incide directamente sobre los casquillos ubicados en los escenarios B y D, si bien el escenario B está más resguardado del viento.

Al incidir el viento, junto a la lluvia, en esta dirección sobre el escenario D, se crea una película acuosa sobre el casquillo que actúa como electrolito, favoreciendo que la corrosión tenga lugar. Este fenómeno podría explicar que el área de corrosión incipiente sea mayor en los escenarios C y D, y, por el mismo motivo, el área libre de corrosión sea menor. Explicaría, también, que el área de corrosión incipiente del escenario D predomine en la sección 1.

- 8) El Método Fuzzy ha permitido la interacción con la base de datos patrones, obtenidos tras el análisis de imágenes, con una riqueza que la Lógica Clásica no contempla. En base a las mediciones conjuntas realizadas se crearon las gráficas Fuzzy, exclusivas para el comportamiento de la corrosión del presente estudio. El hecho de que en la corrosión influyan múltiples factores, y que estos se comporten de forma distinta dependiendo de la situación sin responder a un patrón de comportamiento, hizo imprescindible el uso de la Lógica.

- 9) Tras la aplicación del Método Fuzzy, se obtuvieron los siguientes grados de corrosión en los casquillos del Puente: 37,5% escenario A, 43,6% escenario B, 64,1% escenario C y 66,66% escenario D.

- 10) El grado de corrosión es, pues, mucho menor en el caso de los escenarios A y B, frente a los escenarios C y D. Los factores que se han considerado determinantes para el deterioro de los casquillos en cada par de escenarios con grados de corrosión similar, A y B, C y D, son diferentes. Si bien el escenario A está expuesto al tráfico rodado, el escenario B lo está al tráfico peatonal; del mismo modo los vientos que inciden directamente sobre el escenario A no son los que inciden sobre el escenario B.

Capítulo 6

Referencias Bibliográficas

Se muestran las Referencias empleadas durante el desarrollo del presente Proyecto Final de Carrera.

- (1) HISPAGUA, Sistema Español de Información Sobre el Agua. Desastres, colapsos en Puentes. <http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/suplementos/Colapsos%20de%20puentes/desastres.htm>
- (2) Revista técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia. “*Corrosion costs in preventive and corrective maintenance in equipment and facilities in industry*”, Dic. 2008. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702008000400011&script=sci_arttext
- (3) Romina Vergara, José Palacio y Dick Marcelo Espinoza. “*La corrosión*”. Blog fundamentos de la corrosión. <http://fundamentoslacorrosion.blogspot.com.es/2011/10/la-corrosion.html>
- (4) Ricardo Orozco Cruz, Enrique A. Martínez Martínez, Ricardo Galván Martínez, José Luís Ramírez Reyes e Imelda Fernández Gómez. “*Corrosión: fenómeno natural, visible y catastrófico*”. Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Veracruzana. <http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol20num2/articulos/corrosion/>
- (5) Etimologías. <http://etimologias.dechile.net/?corroer>
- (6) Joseph R. Davis. “*CORROSION: Understanding the Basics*”. ASM International. The materials information society. 2000.

- (7) Félix C. Gómez de León Hijes; Diego J. Alcaraz Lorente: “Manual Básico de corrosión para Ingenieros”. Universidad de Murcia. 2006.
- (8) Instituto Lationamericano de la comunicación educativa: “*Incidencia de la corrosión sobre el medio ambiente*”.
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_4.htm
- (9) TROPOSFERA: Portal temático de contaminación atmosférica: “*Bhopal, Historia de un desastre humanitario y medioambiental*”
<http://www.troposfera.org/conceptos/tropoestudios/bhopal-historia-de-un-desastre-humanitario-y-medioambiental/>
- 10) Lecciones de corrosión electroquímica instituto español de corrosión y protección 1987. D.A.Jones.
- 11) M. Victoria Biezma, Cristina Rodriguez. “*Detección de la corrosión por picadura en aceros inoxidables empleando ultrasonidos*”. Revista de metalurgia, Vol 50, nº1. 2014.
- 12) Mónica Chamorras Carbonero: “*Evaluación de la influencia de la adición de cobre y estaño en la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables austeníticos*”. Universidad Complutense de Madrid. 2004.
- 13) Pierre Jean- Cunat. “*Los aceros inoxidables*”. Asociación europea para el Desarrollo del Mercado libre de Aceros Inoxidables.

- 14) Tamara Benito Matías, M^a Isabel Durán Vicente. “Lógica Borrosa”, Universidad Carlos III. <http://www.it.uc3m.es/jvillena/irc/practicas/08-09/10.pdf>
- 15) Conceptos fundamentales de lógica difusa. <http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6887/04Rpp04de11.pdf?sequence=4>
- 16) Guillermo Tejada Muñoz. “Tutorial de Lógica Fuzzy”. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/electronica/Agosto_2000/pdf/logica%20fuzzy.pdf
- 17) Andrés Prieto Alba, M. Victoria Biezma. “Corrosión por picadura: Caso particular de estudio del Puente Juan José Arena, Santander”. Universidad de Cantabria. 2014.
- 18) Wikimapia. <http://wikimapia.org/17883355/es/Puente-de-Las-Llamas-o-Juan-Jos%C3%A9-Arenas>
- 19) Steve Rosius. “Reconocimiento de objetos mediante WebCam en tiempo real”. Universidad Politécnica de Valencia.
- 20) Eduardo Laorden Fiter. “Descripción, comparación y ejemplos de uso de las funciones de la toolbox del procesado de imágenes de MATLAB”. Universidad Politécnica de Madrid. Septiembre 2012.
- 21) José Muñoz Pérez. “Segmentación de imágenes”. Universidad de Málaga

[http://www.lcc.uma.es/~munozp/documentos/procesamiento de imagenes/temas/pi_cap6.pdf](http://www.lcc.uma.es/~munozp/documentos/procesamiento_de_imagenes/temas/pi_cap6.pdf)

22)Windfinder [http://es.windfinder.com/windstatistics/santander parayas](http://es.windfinder.com/windstatistics/santander_parayas)

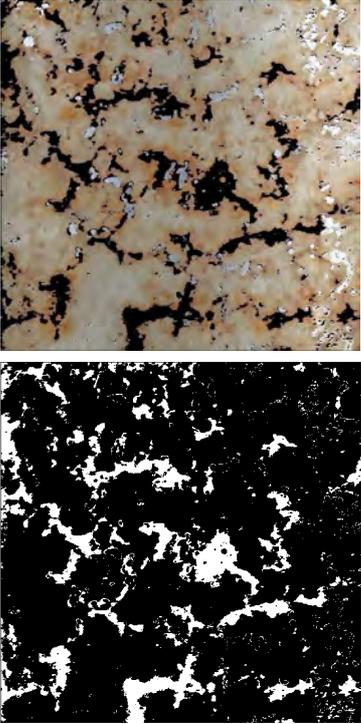
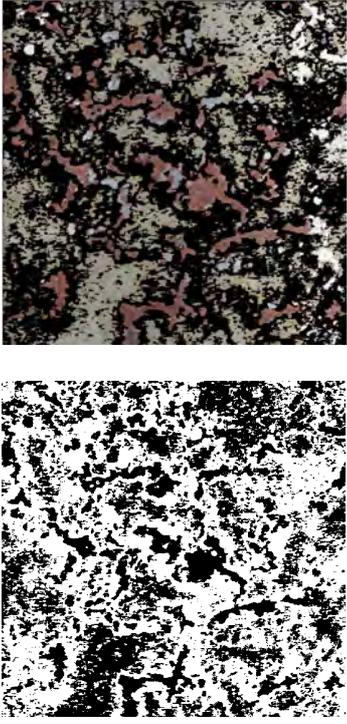
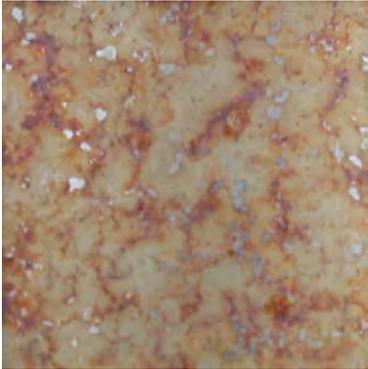
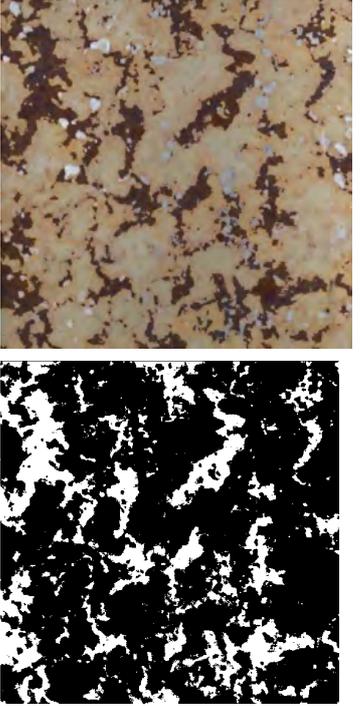
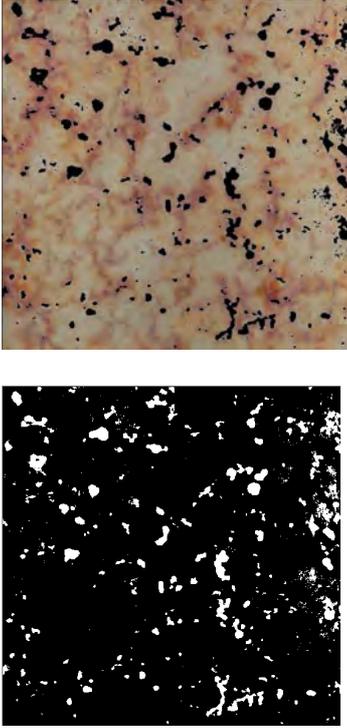
Anexo I

Segmentación de imágenes

En este Anexo se muestran todas las segmentaciones realizadas durante el presente Proyecto Final de Carrera

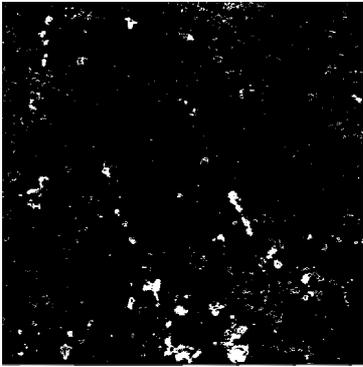
Escenario A.

C1. Sección 1

<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 
<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Área libre de corrosión</p> 

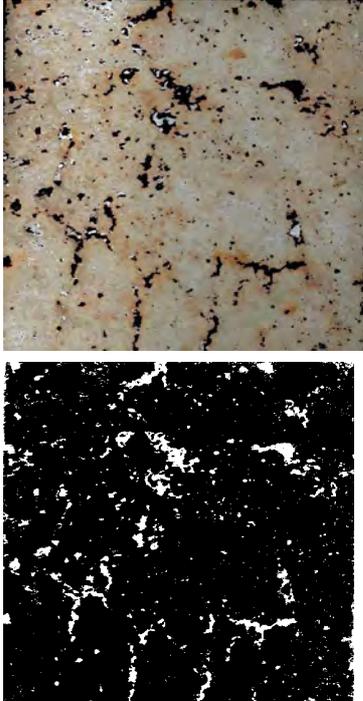
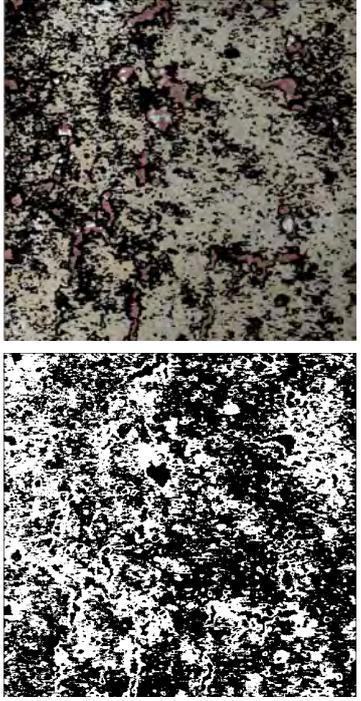
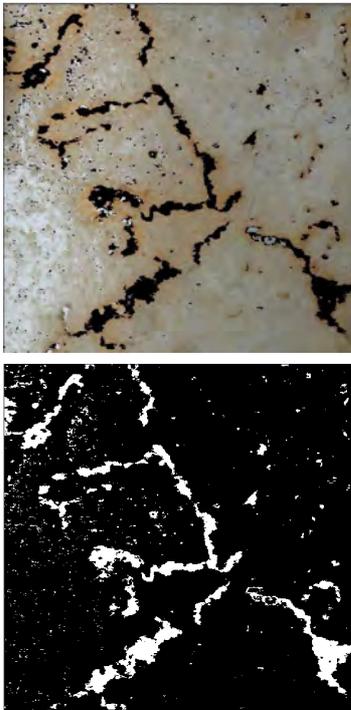
Escenario A.

C2. Sección 2

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	 

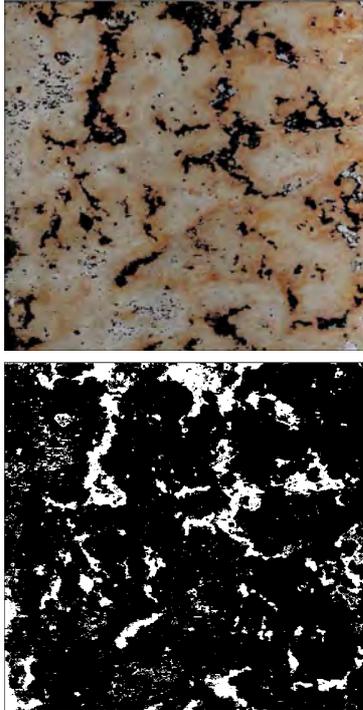
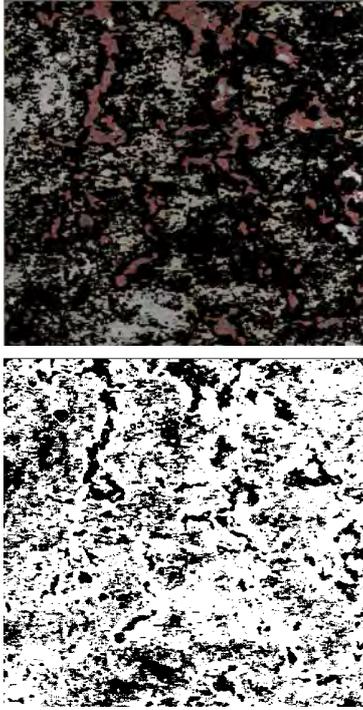
Escenario A.

C1. Sección 3

Fotografía original	Area ocupado por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

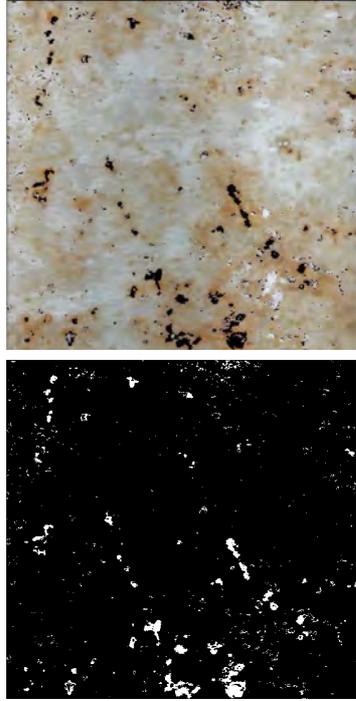
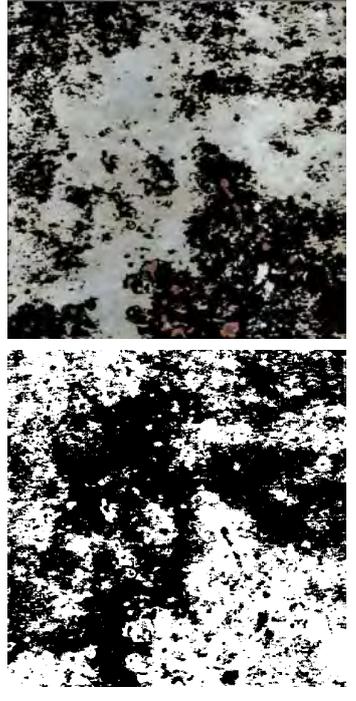
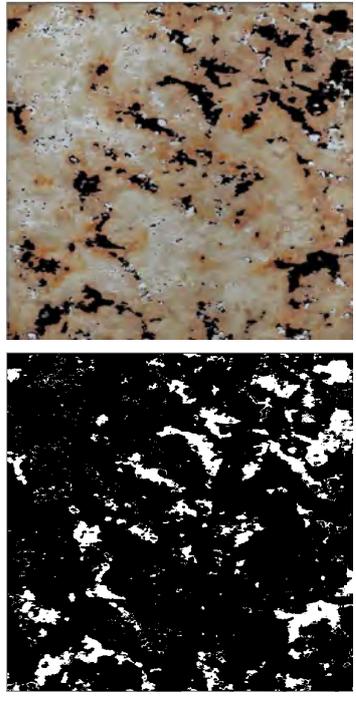
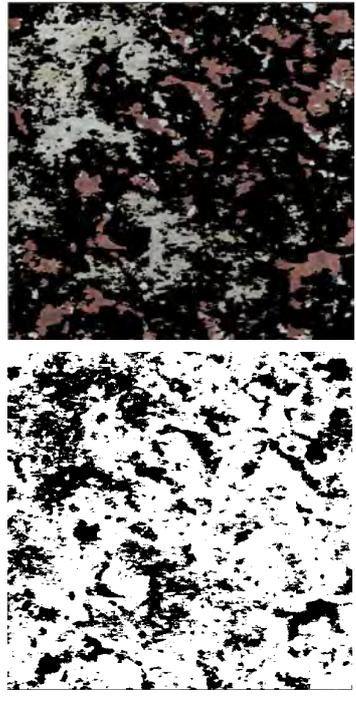
Escenario A.

C2. Sección 1

Fotografía original	Area ocupado por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		

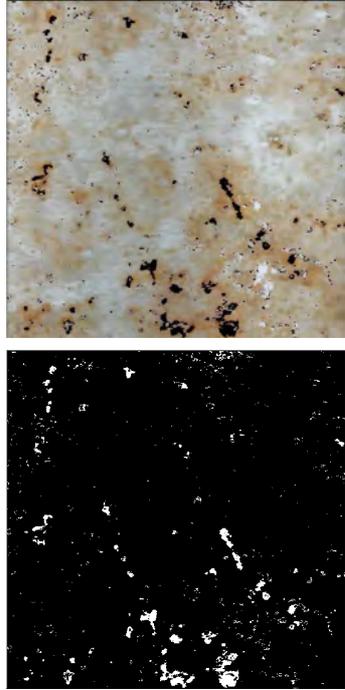
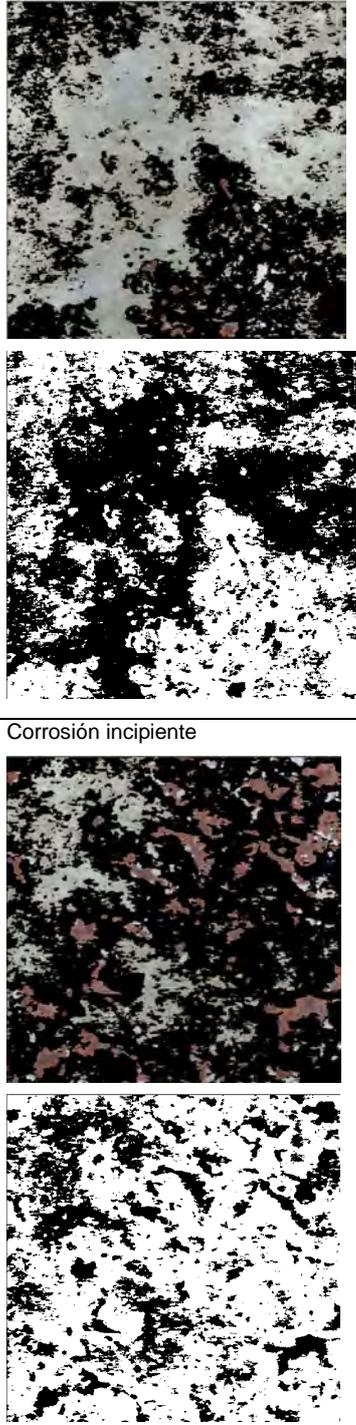
Escenario A.

C2. Sección 2

Fotografía original	Area ocupado por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

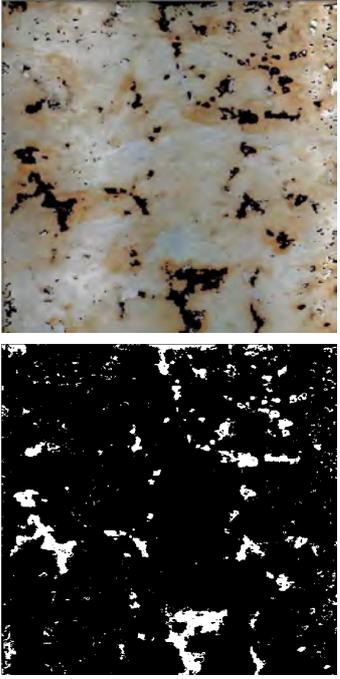
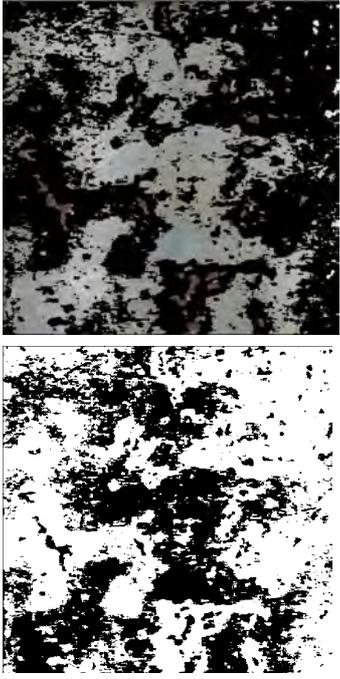
Escenario A.

C2. Sección 3

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		

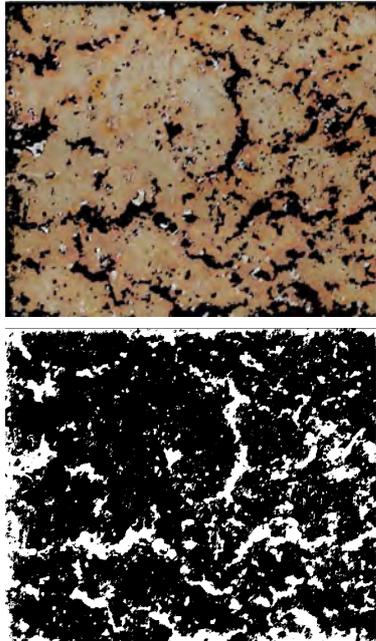
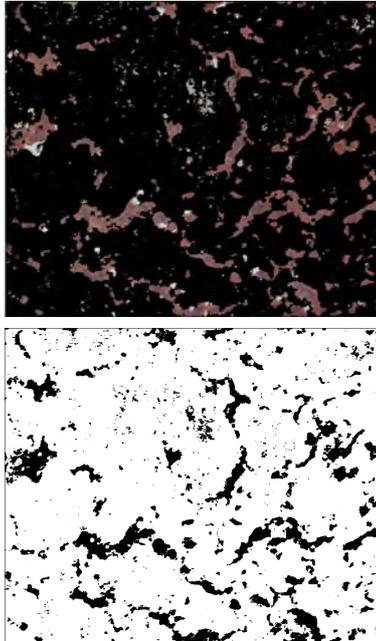
Escenario A.

C3. Sección 1

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		

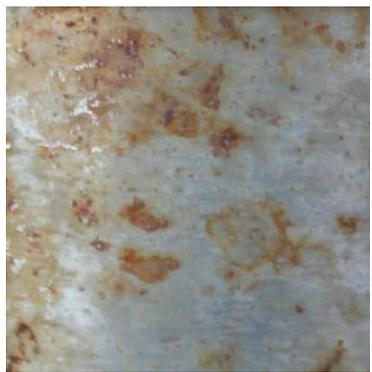
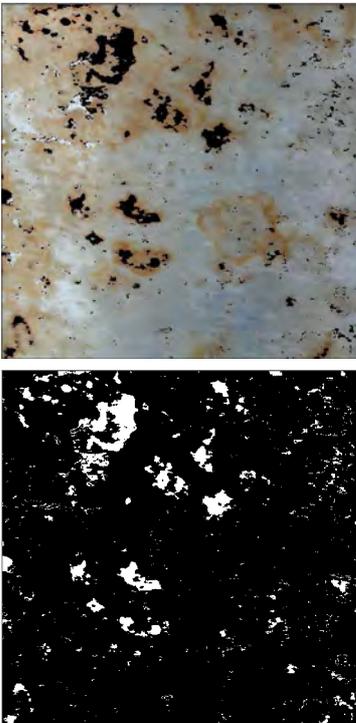
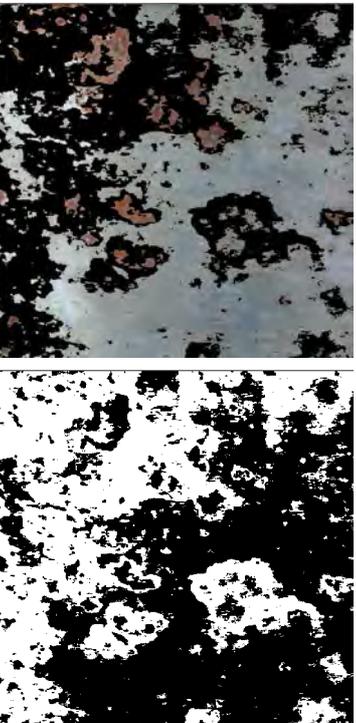
Escenario A.

C3. Sección 2

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

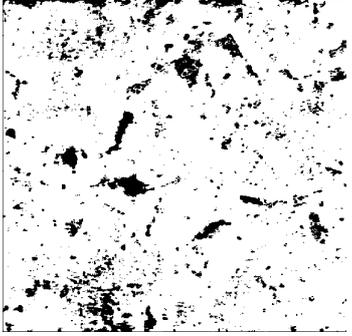
Escenario A.

C3. Sección 3

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

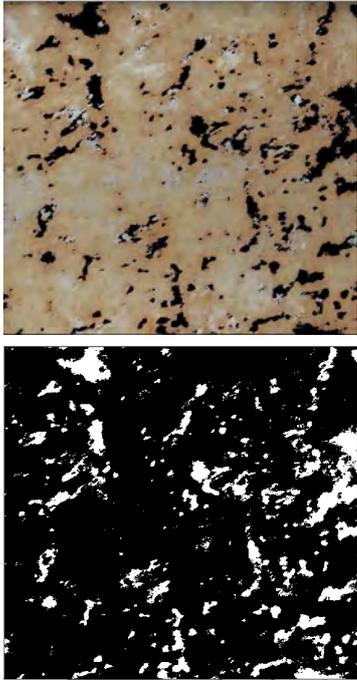
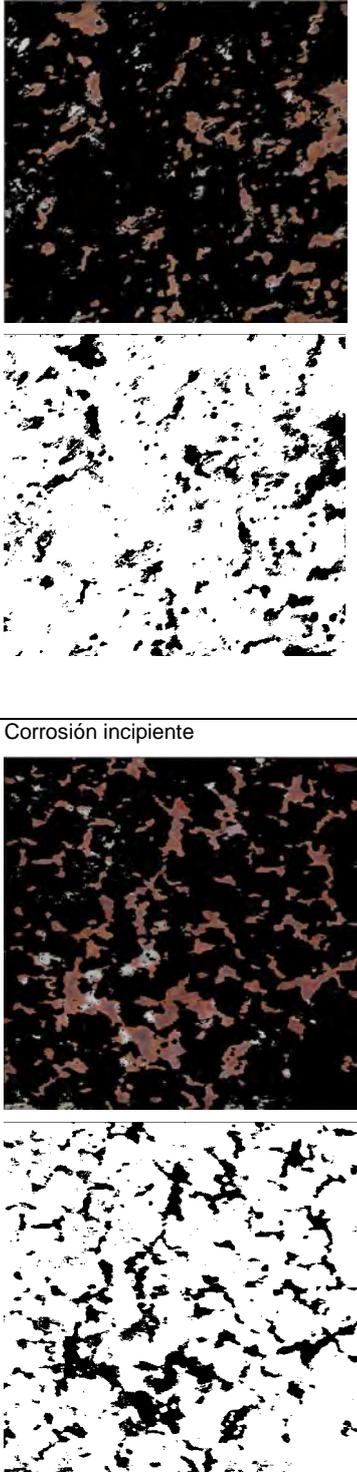
Escenario A.

C4. Sección 1

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	 

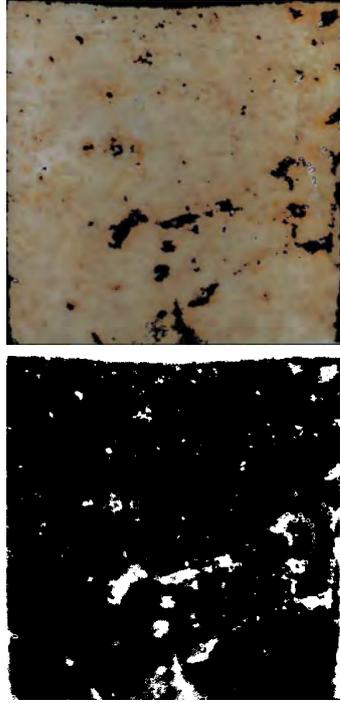
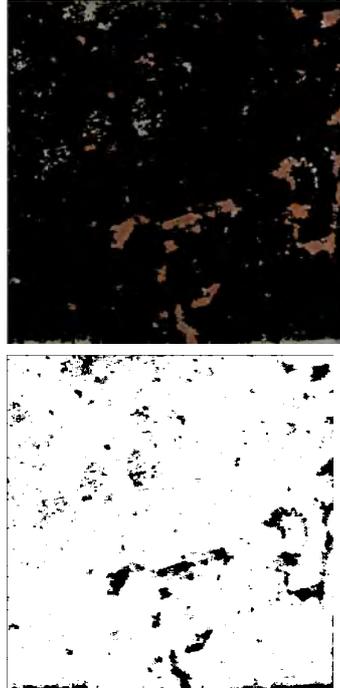
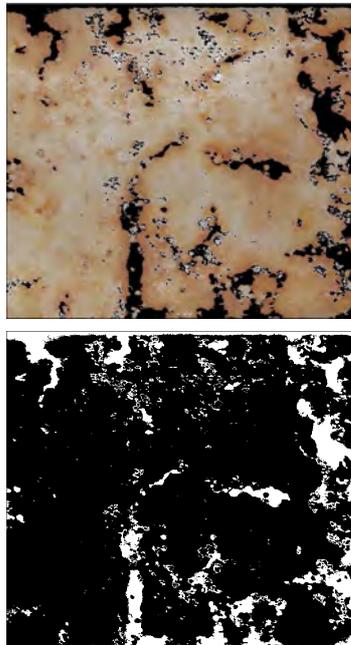
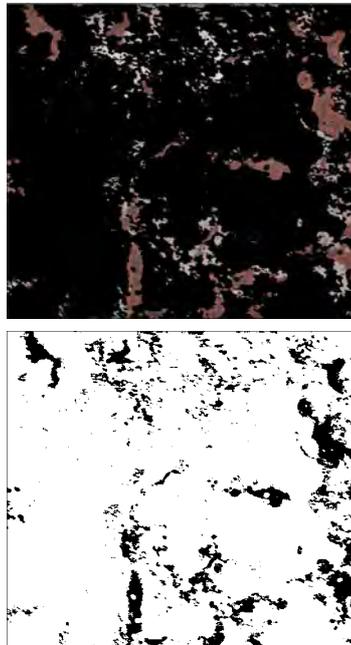
Escenario A.

C4. Sección 2

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		

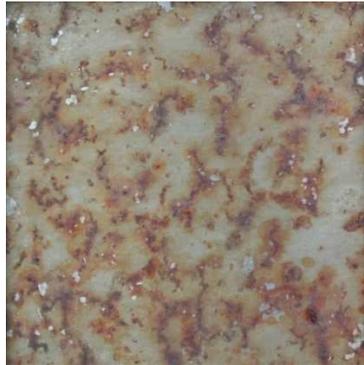
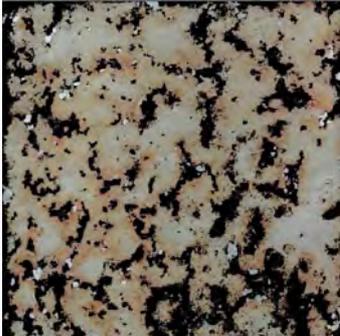
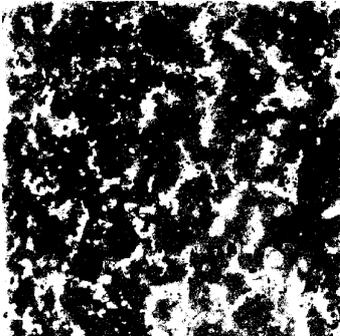
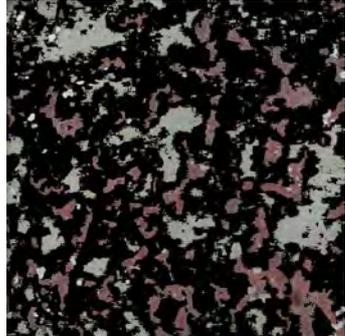
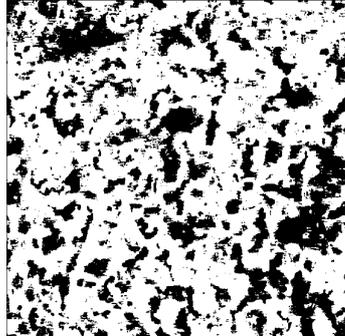
Escenario A.

C4. Sección 3

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

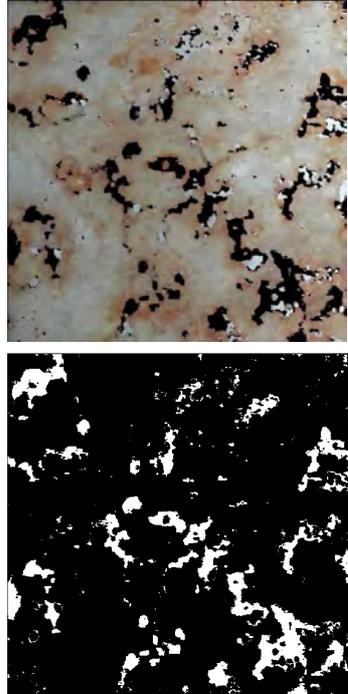
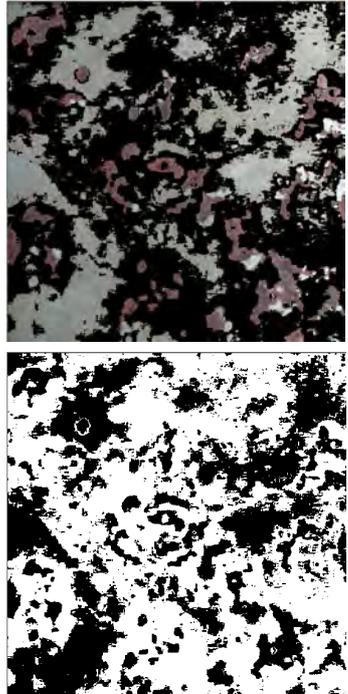
Escenario A.

C5. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	 

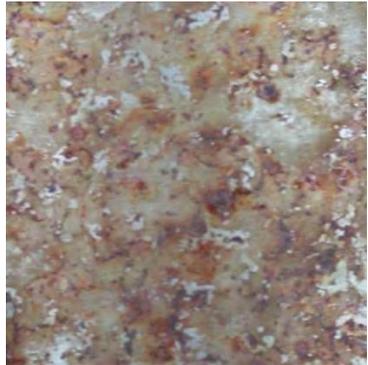
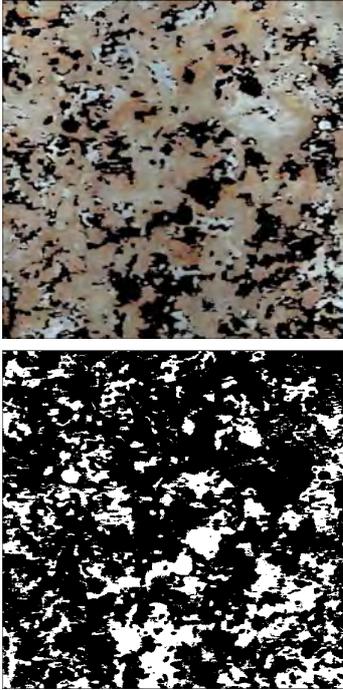
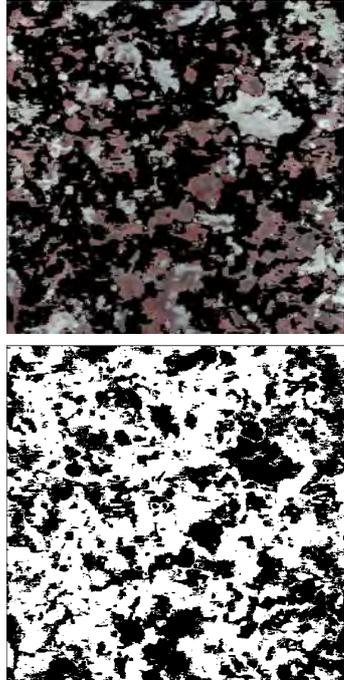
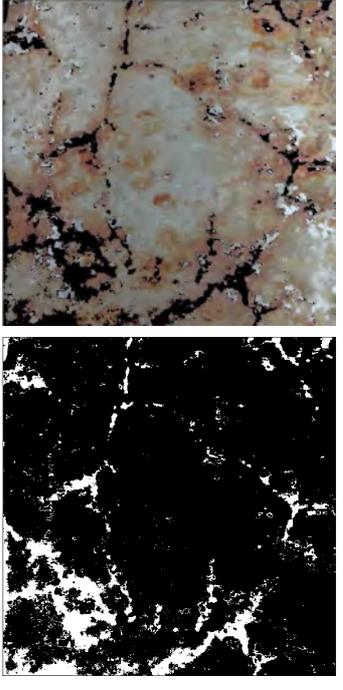
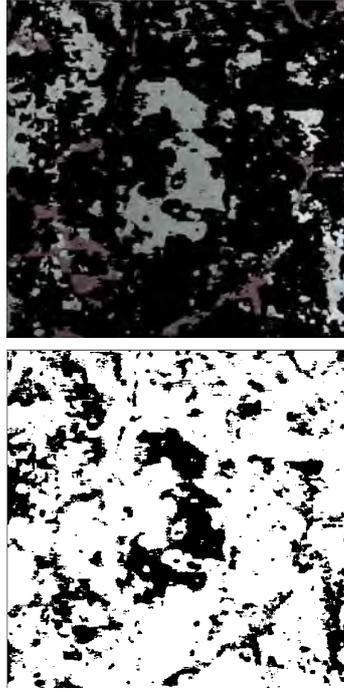
Escenario A.

C5. Sección 2

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		

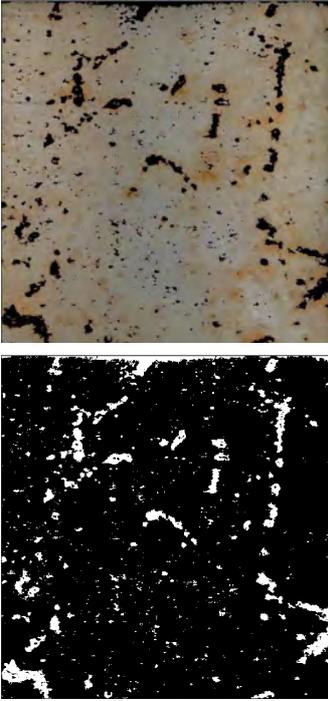
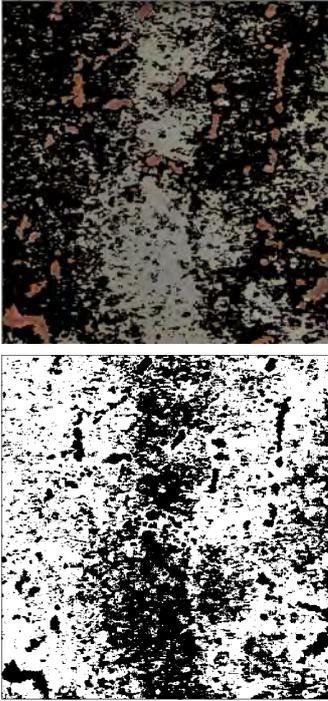
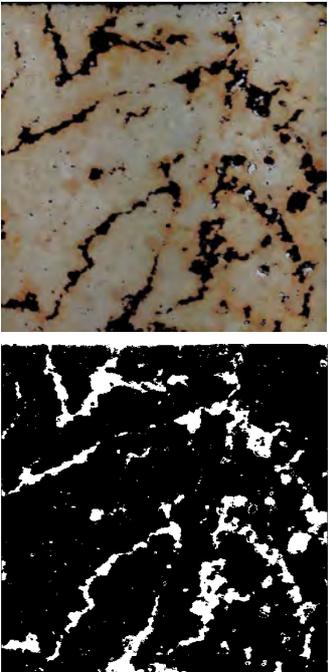
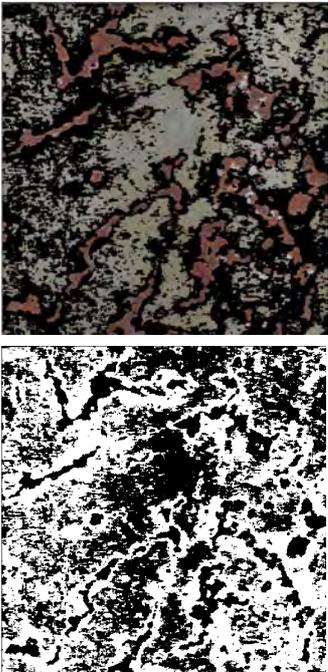
Escenario A.

C5. Sección 3

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

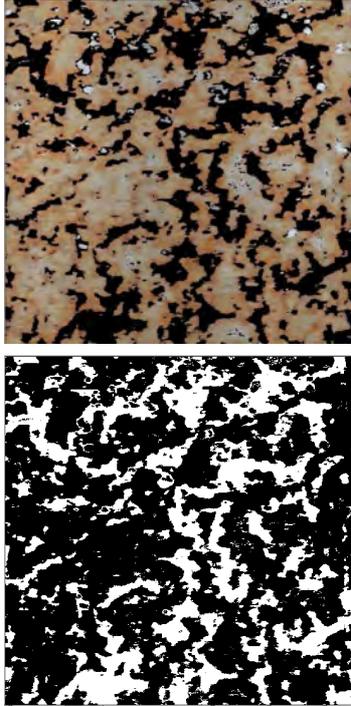
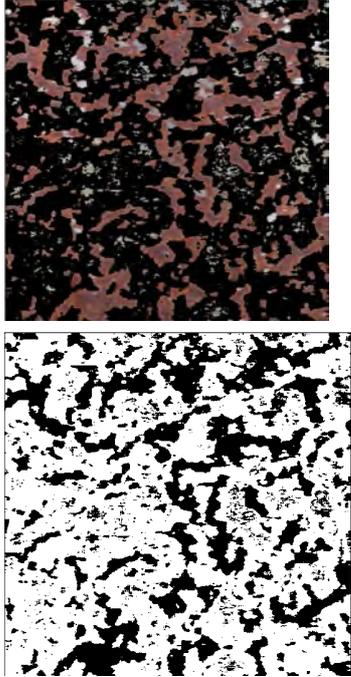
ESCENARIO B.

C1. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 
<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

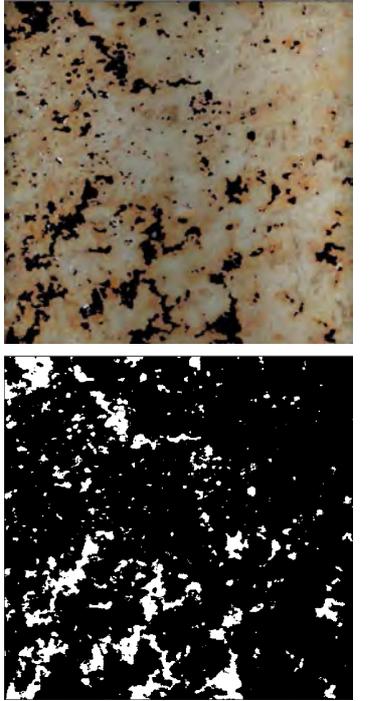
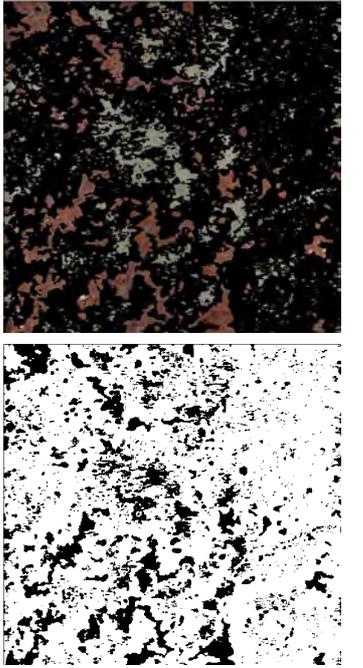
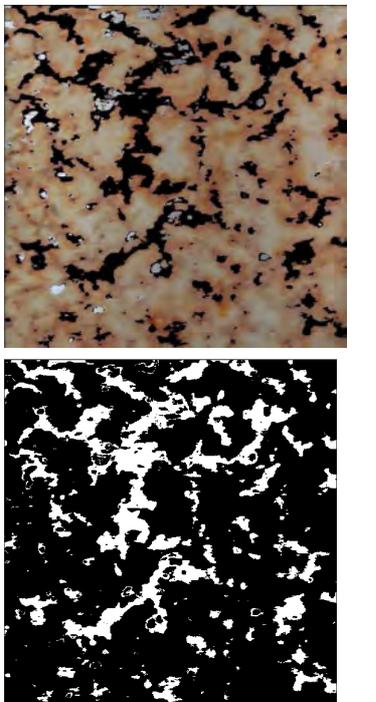
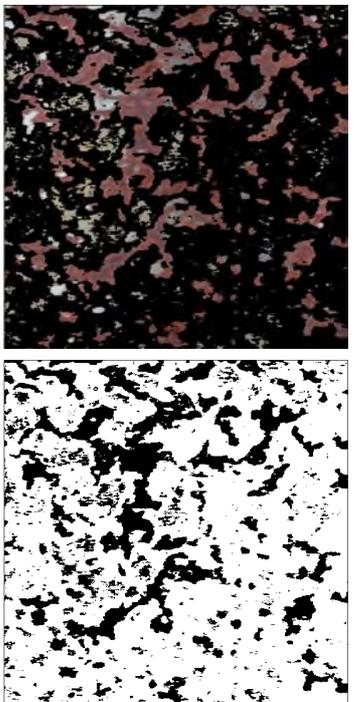
ESCENARIO B.

C1. Sección 2

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

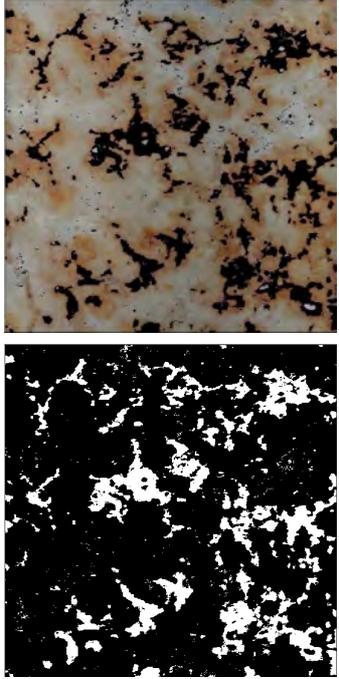
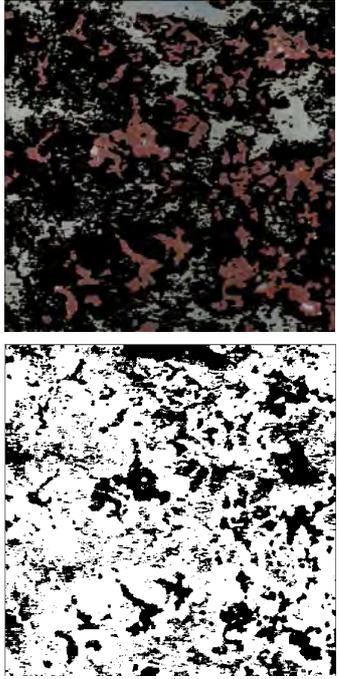
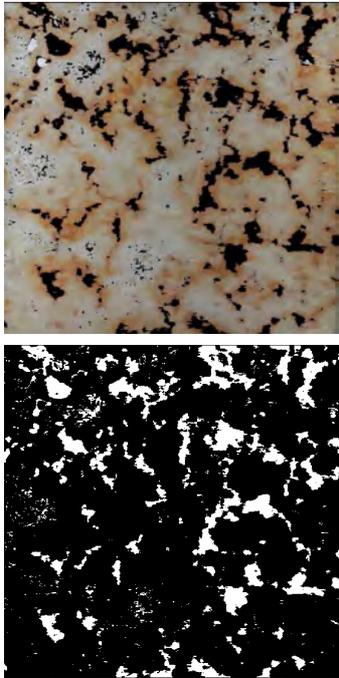
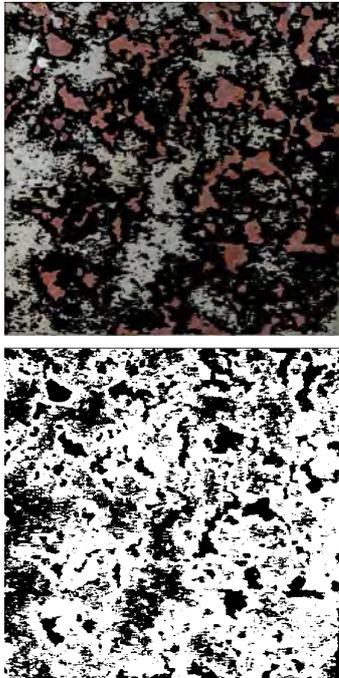
ESCENARIO B.

C1. Sección 3

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

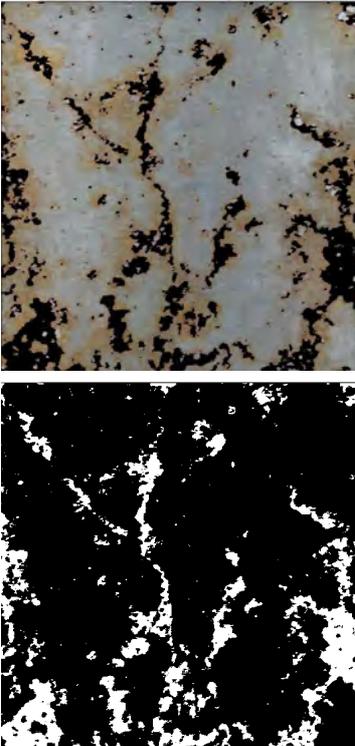
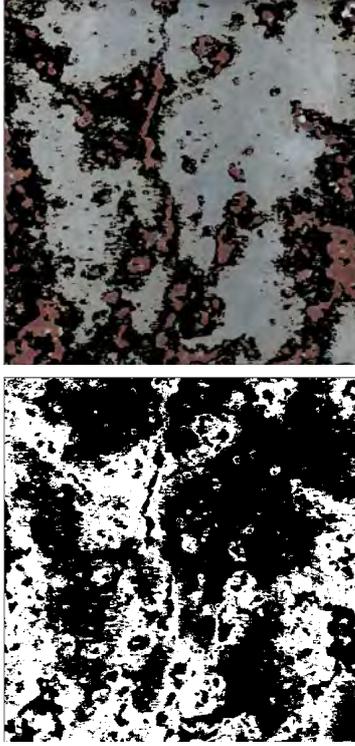
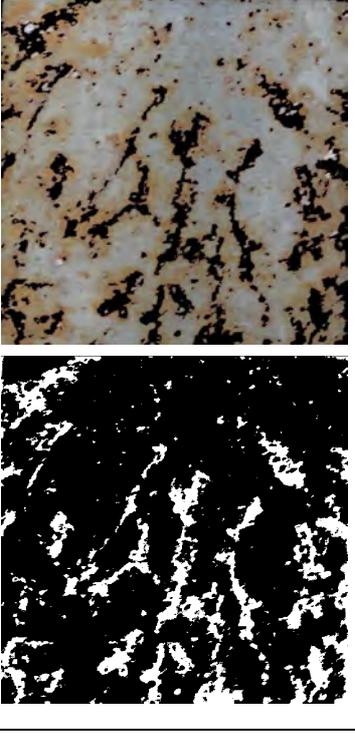
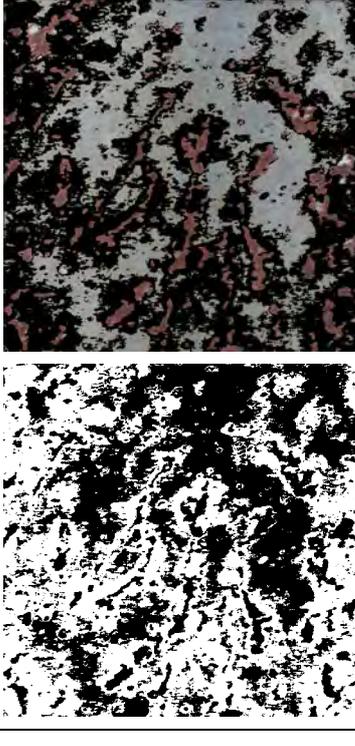
ESCENARIO B.

C2. Sección 1

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

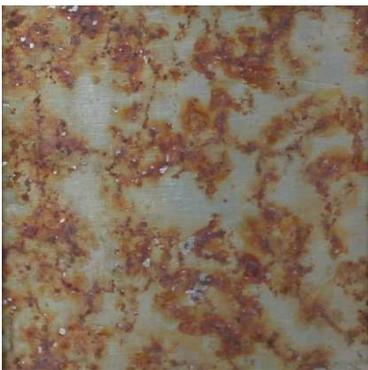
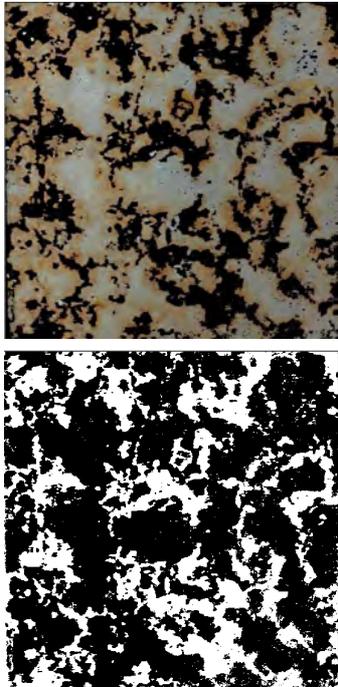
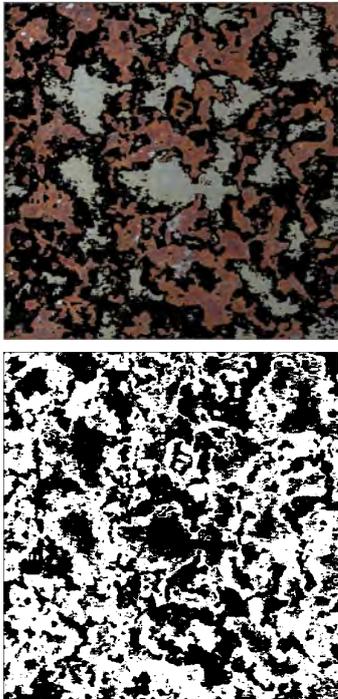
ESCENARIO B.

C2. Sección 2

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

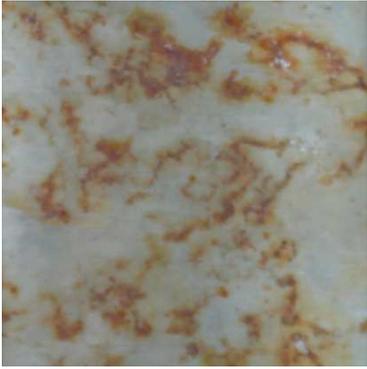
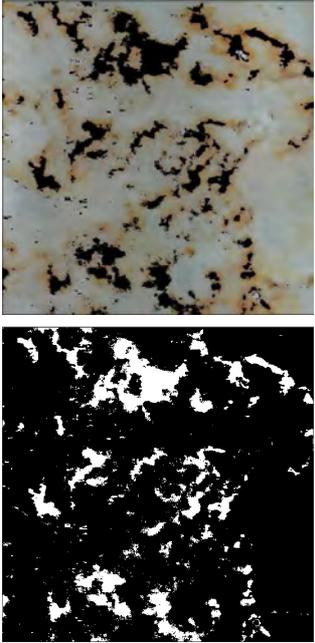
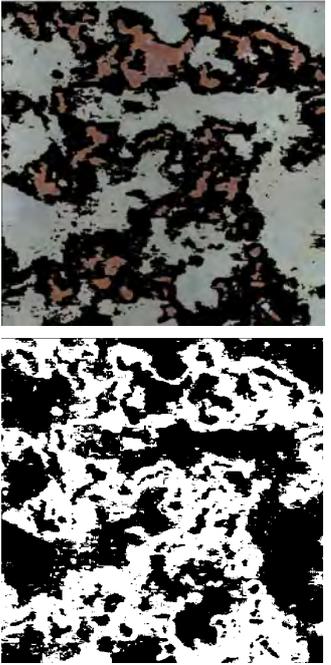
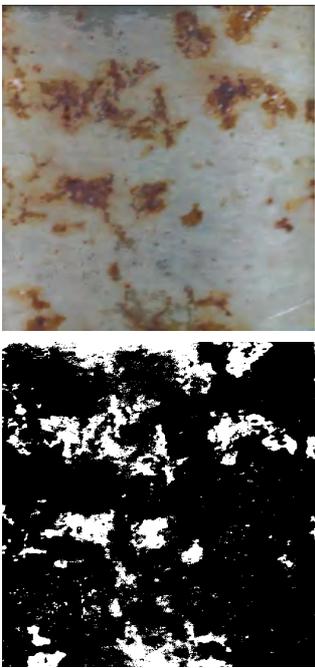
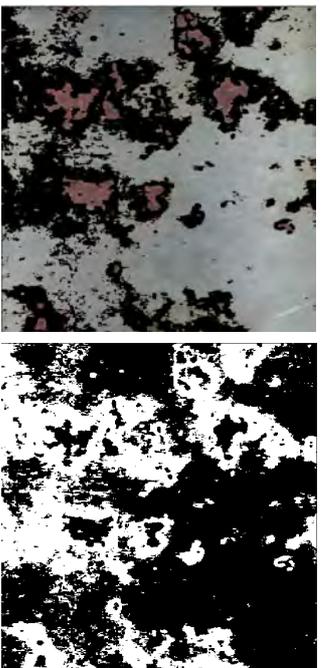
ESCENARIO B.

C2. Sección 3

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

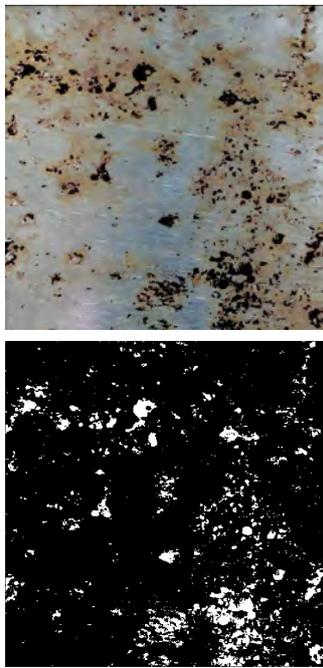
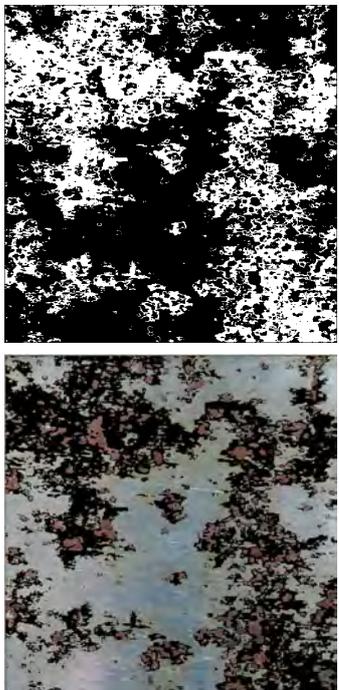
ESCENARIO B.

C3. Sección 1

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

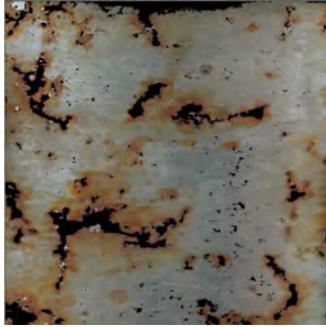
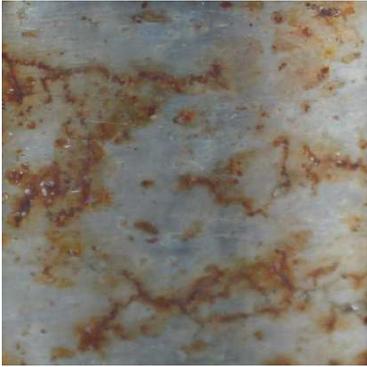
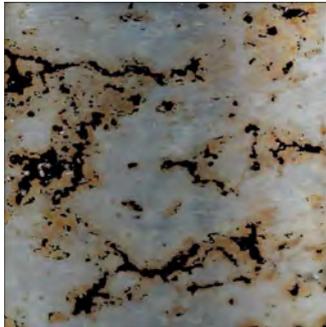
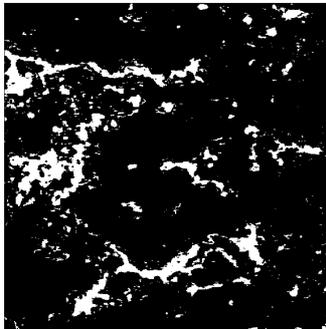
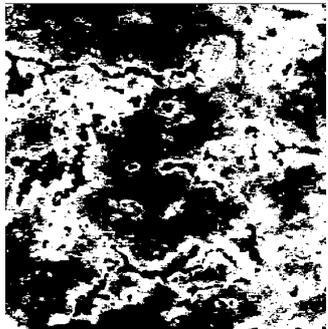
ESCENARIO B.

C3. Sección 2

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

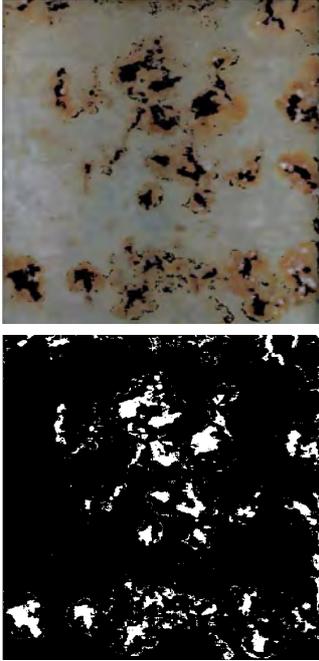
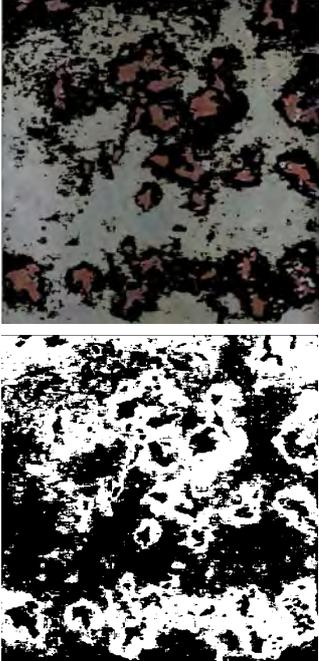
ESCENARIO B.

C3. Sección 3

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	 
	 	 

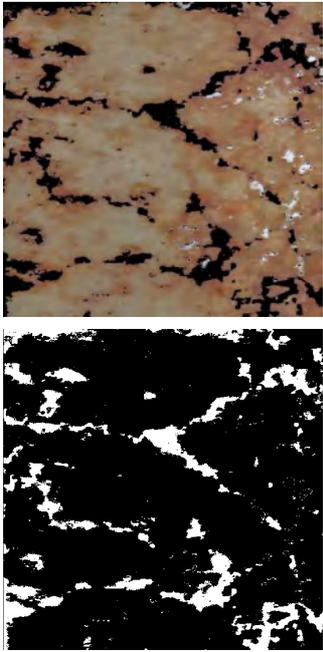
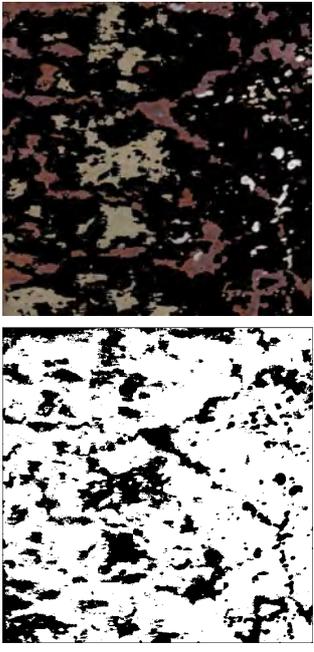
ESCENARIO B.

C4. Sección 1

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

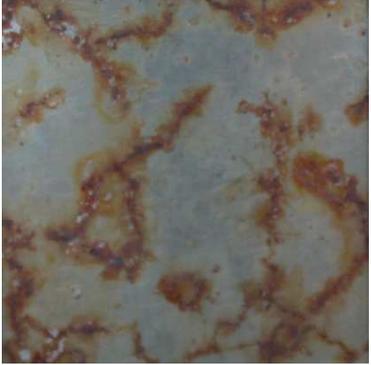
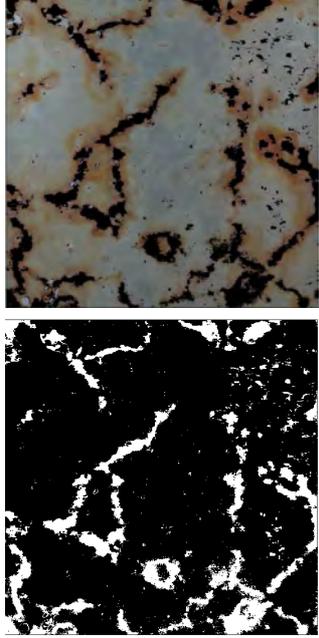
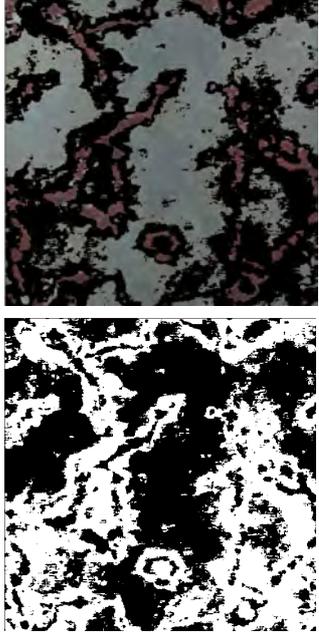
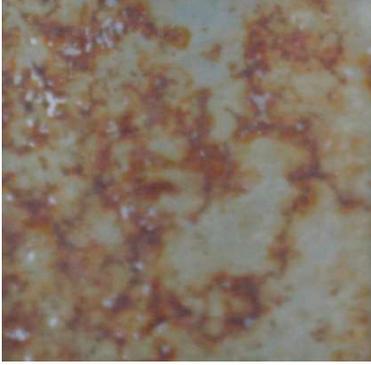
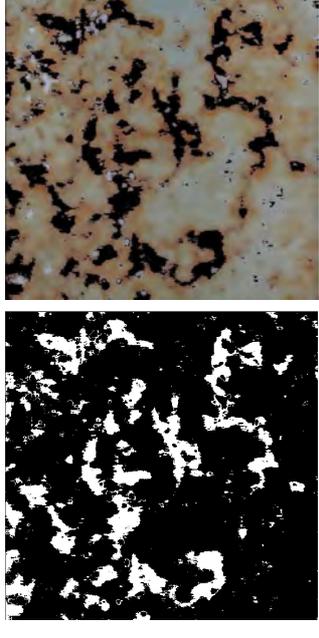
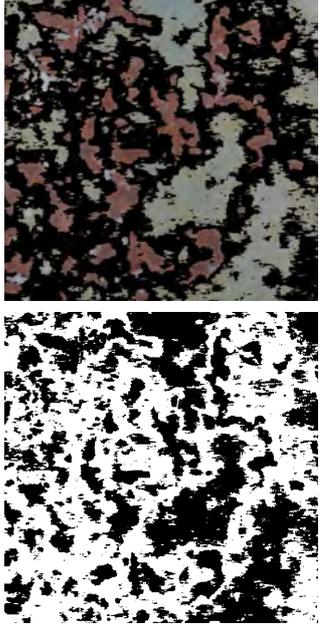
ESCENARIO B.

C4. Sección 2

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

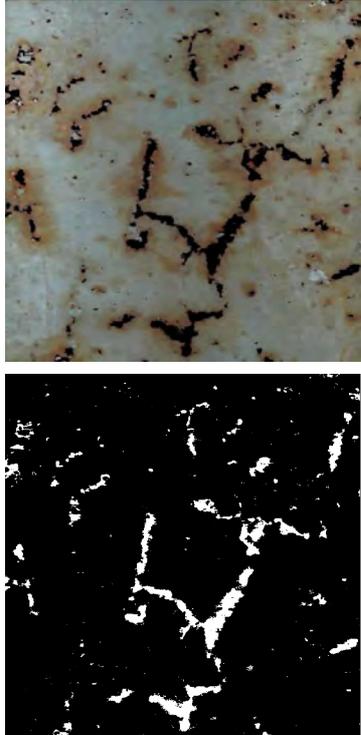
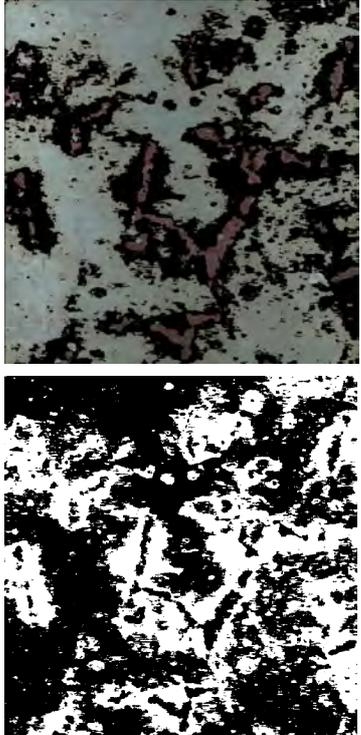
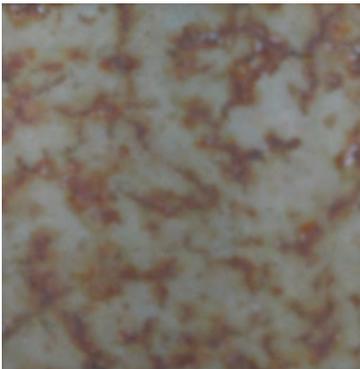
ESCENARIO B.

C4. Sección 3

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

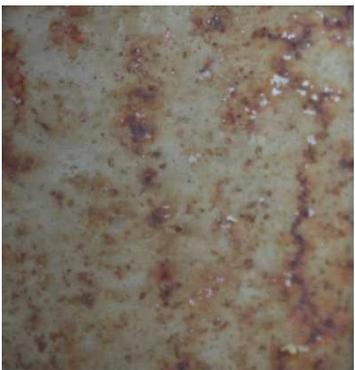
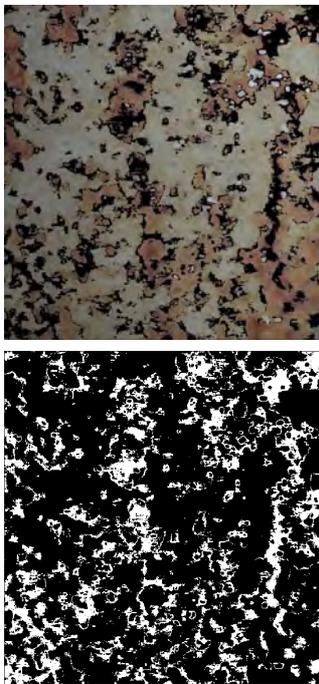
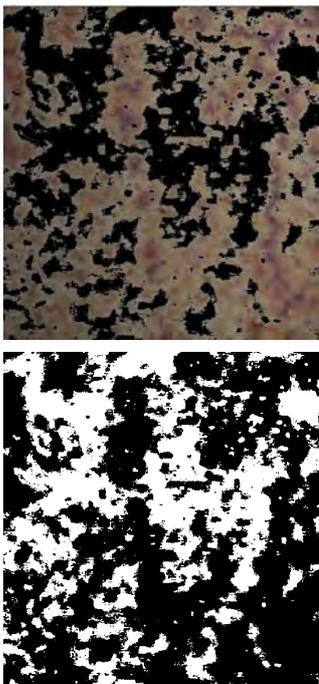
ESCENARIO B.

C5. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

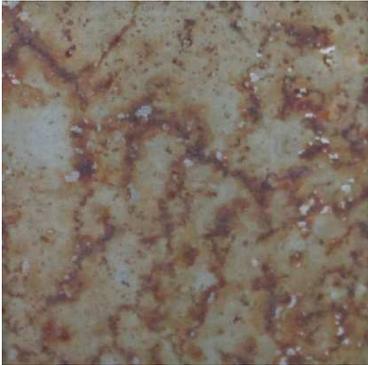
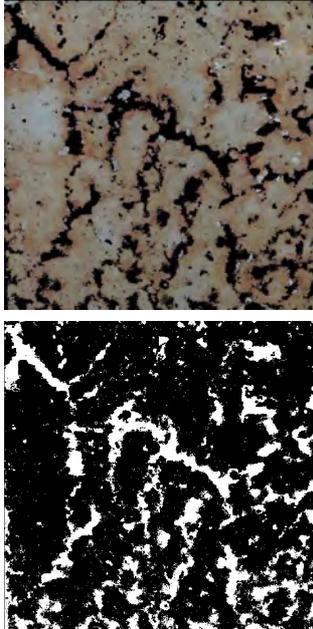
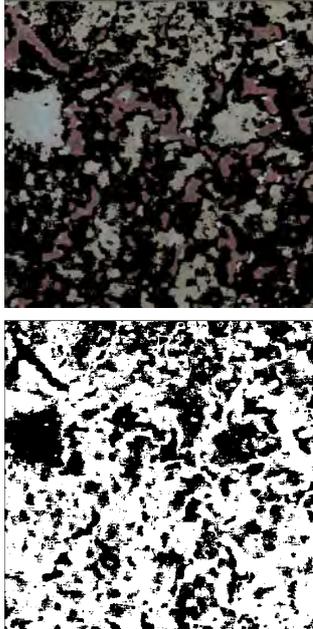
ESCENARIO B.

C5. Sección 2

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Area no corroída</p> 

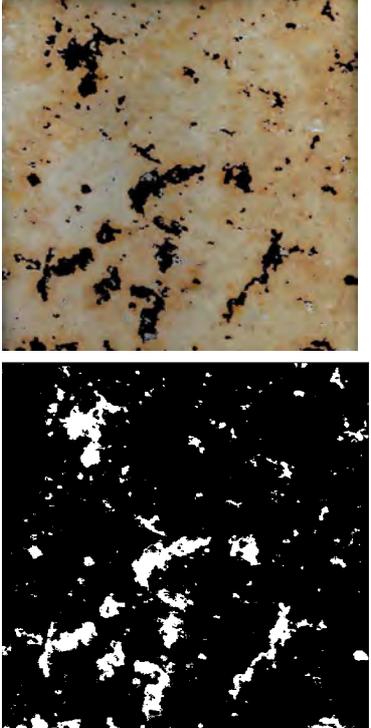
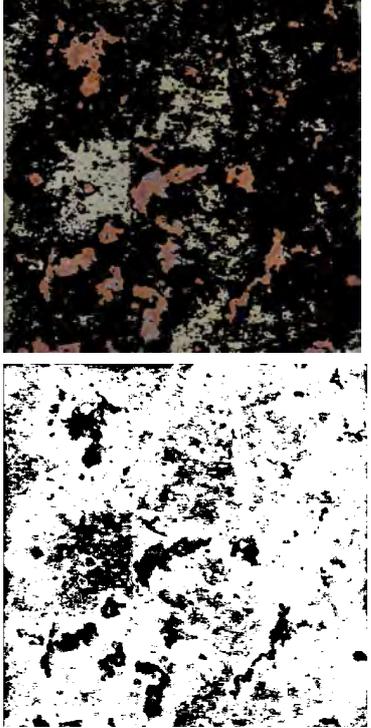
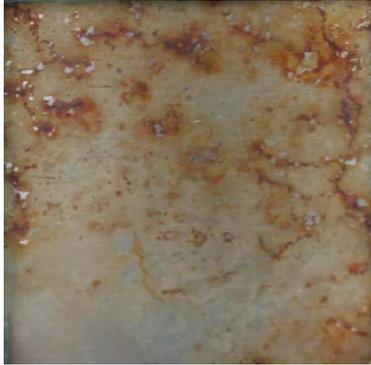
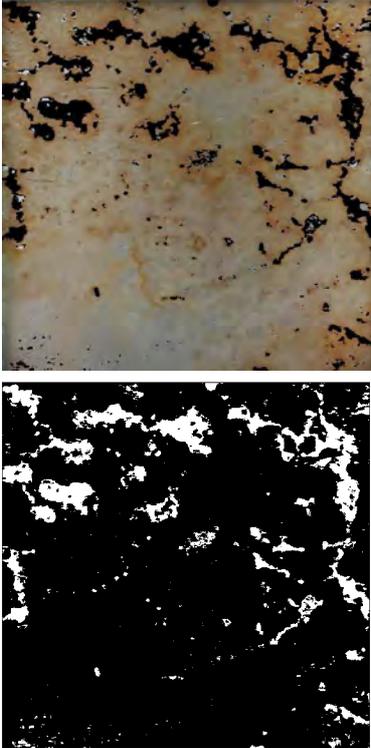
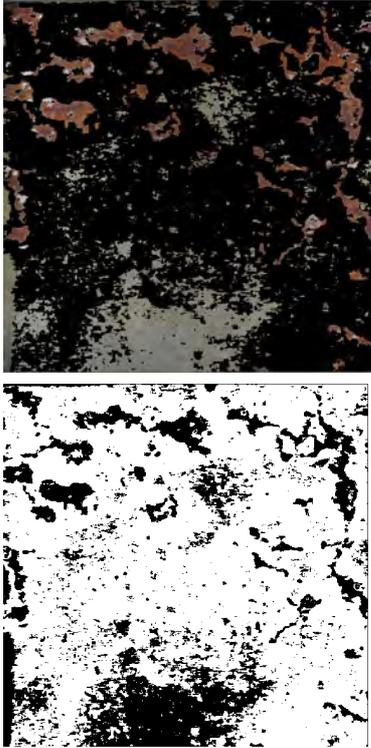
ESCENARIO B.

C5. Sección 3

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

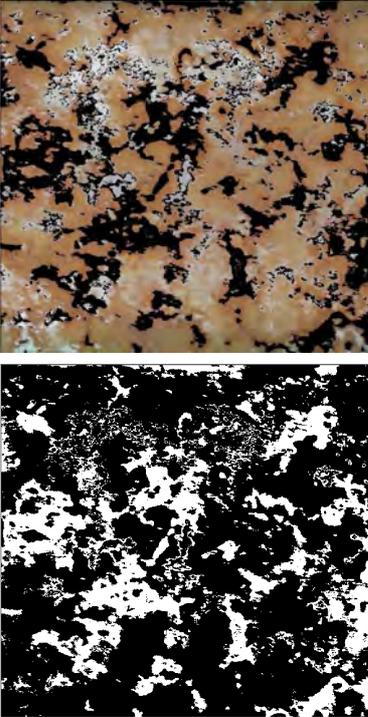
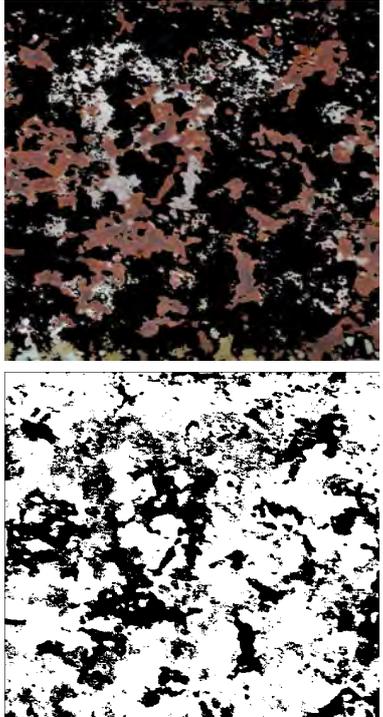
ESCENARIO C.

C1. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

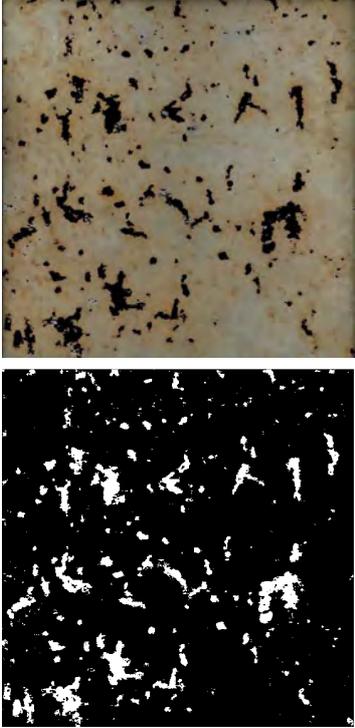
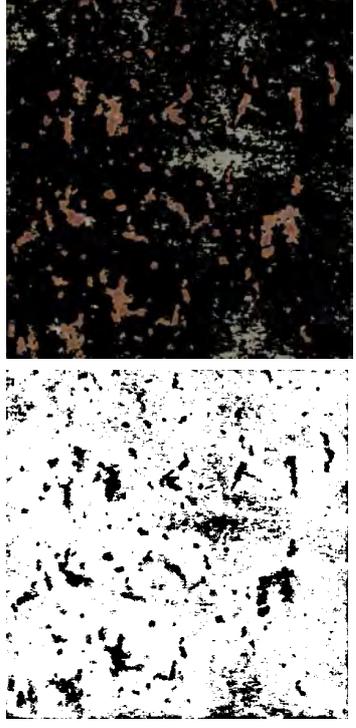
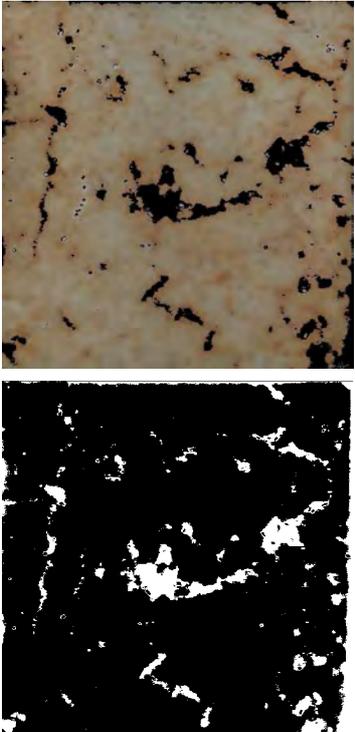
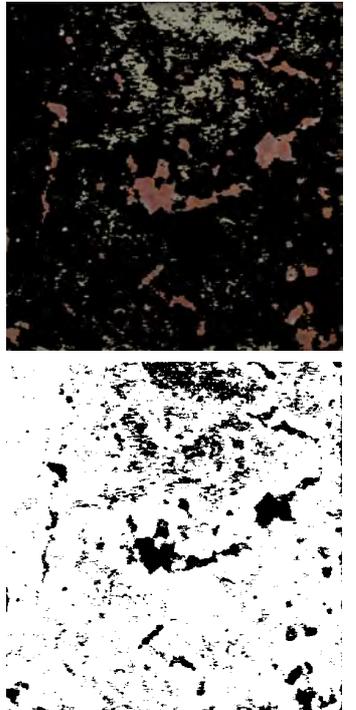
ESCENARIO C.

C1. Sección 2

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		

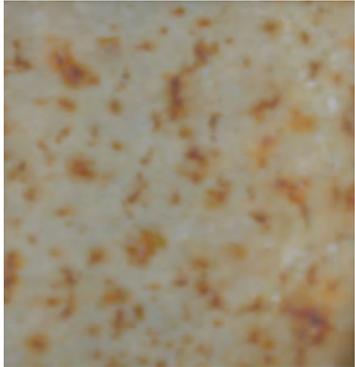
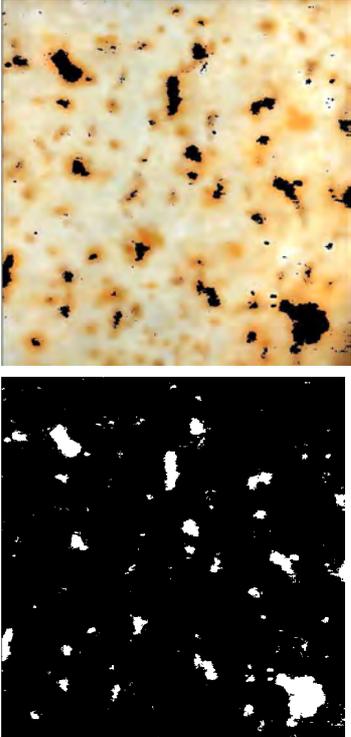
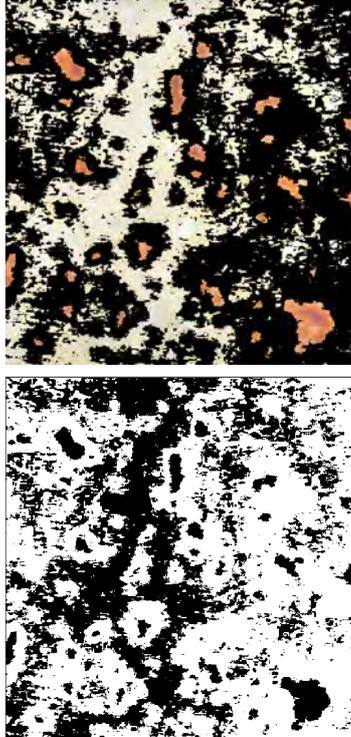
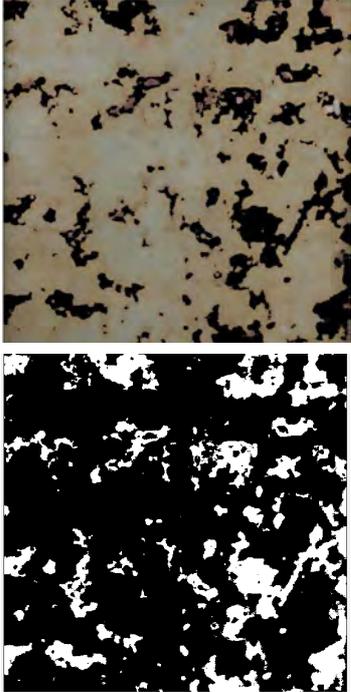
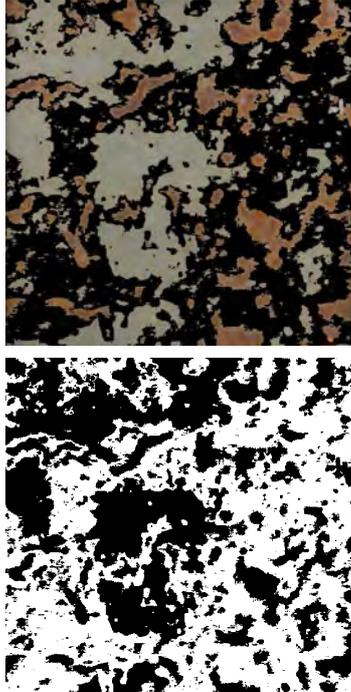
ESCENARIO C.

C1. Sección 3

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

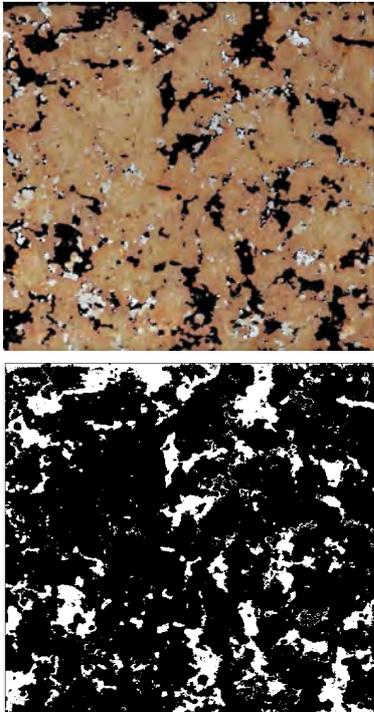
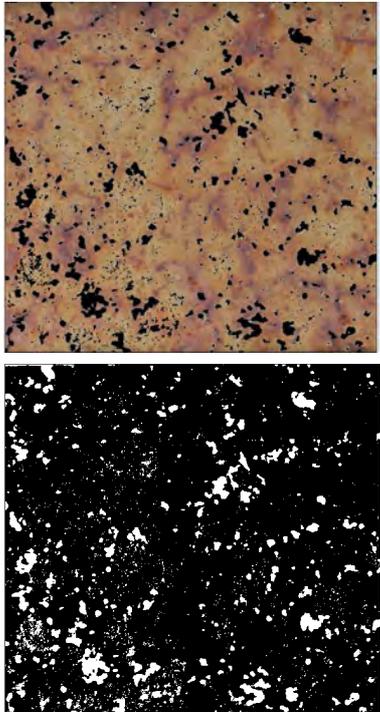
ESCENARIO C.

C2. Sección 1

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

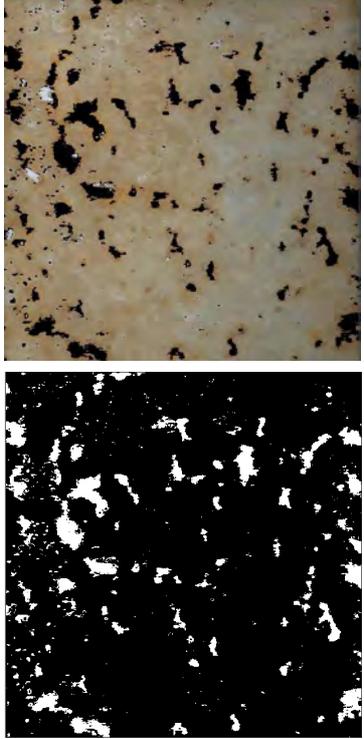
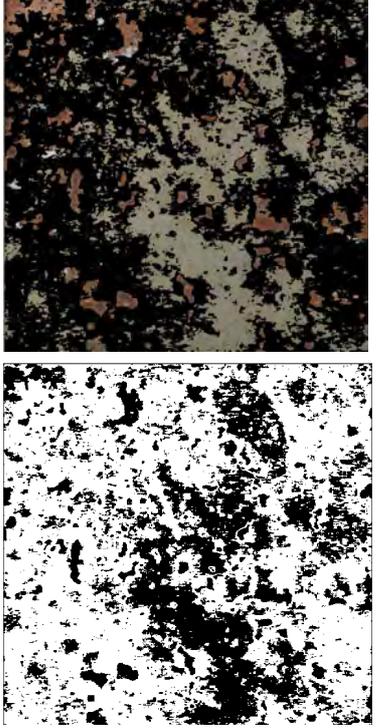
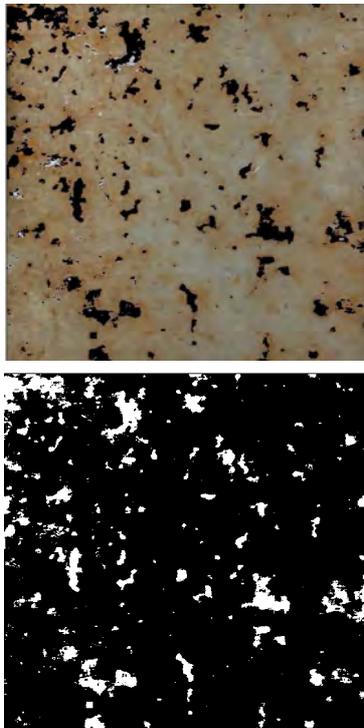
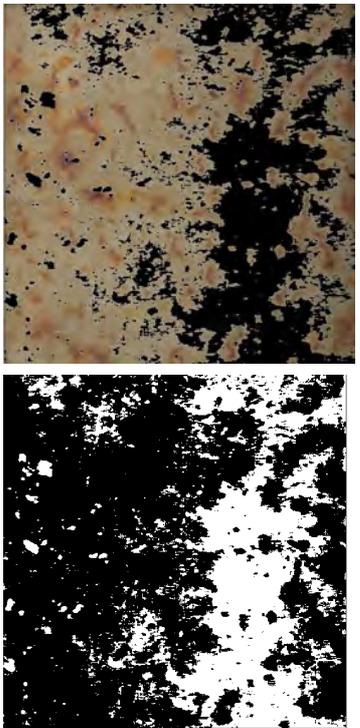
ESCENARIO C.

C2. Sección 2

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Área no corroída
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Área no corroída</p> 

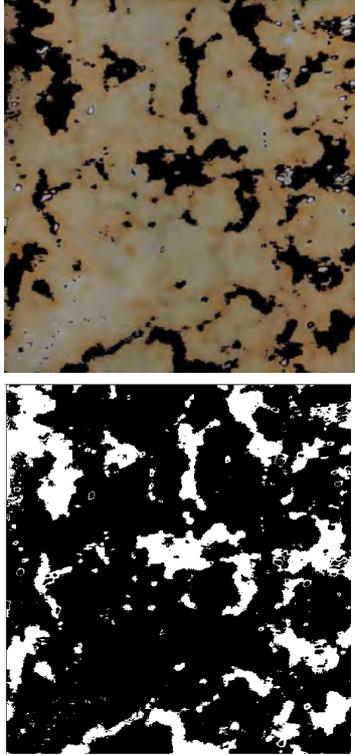
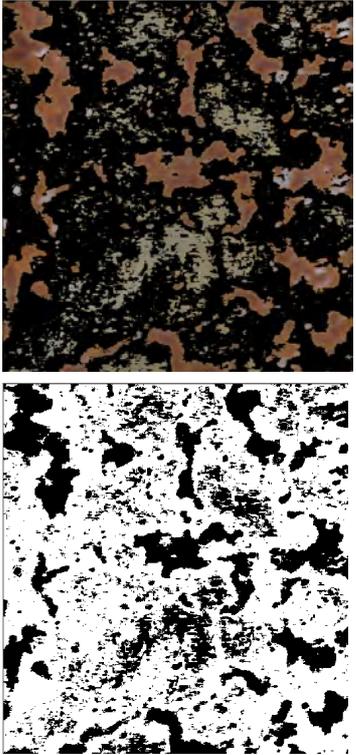
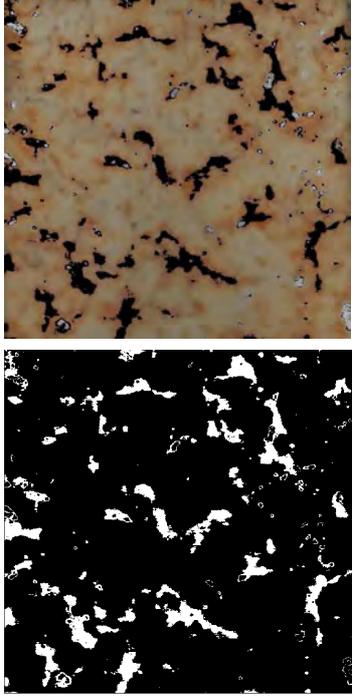
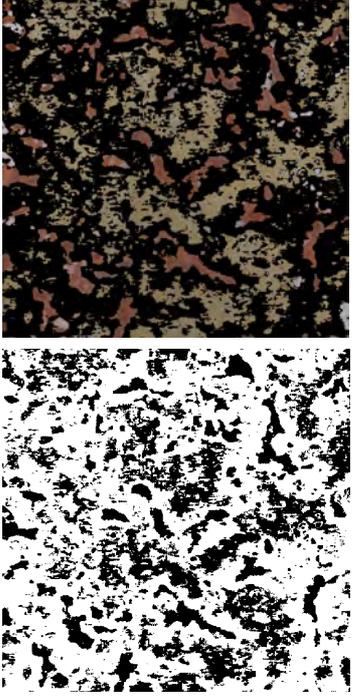
ESCENARIO C.

C2. Sección 3

<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 
<p>Fotografía original</p> 	<p>Area ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Area no corroída</p> 

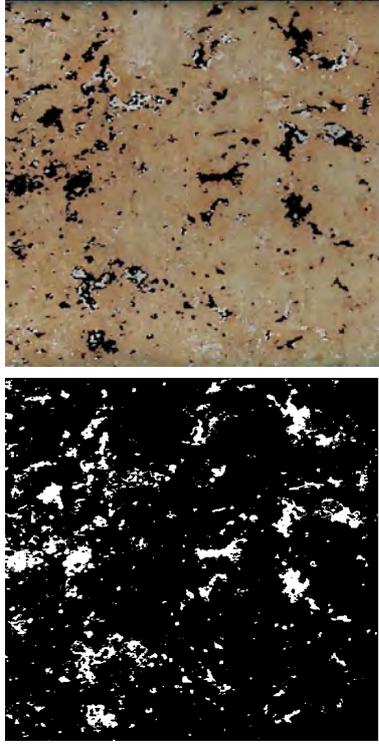
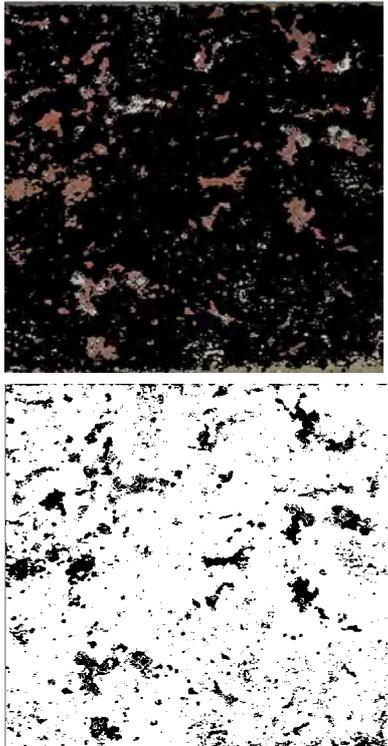
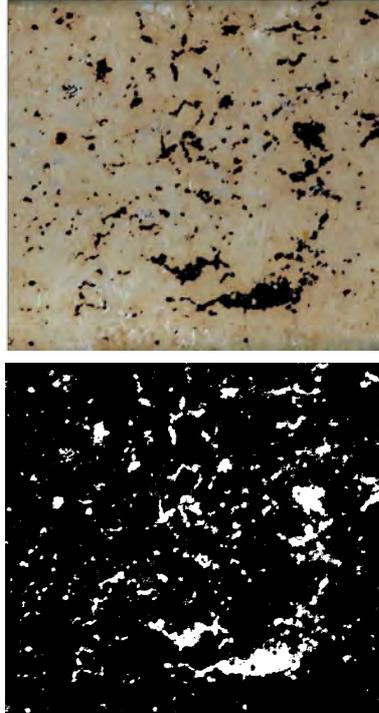
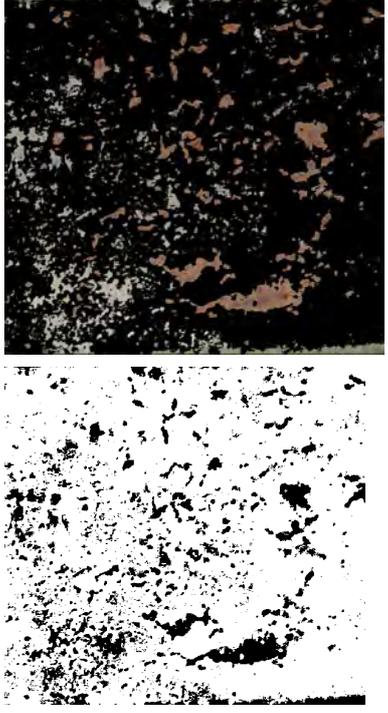
ESCENARIO C.

C3. Sección 1

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

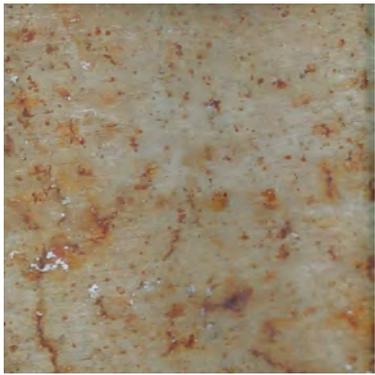
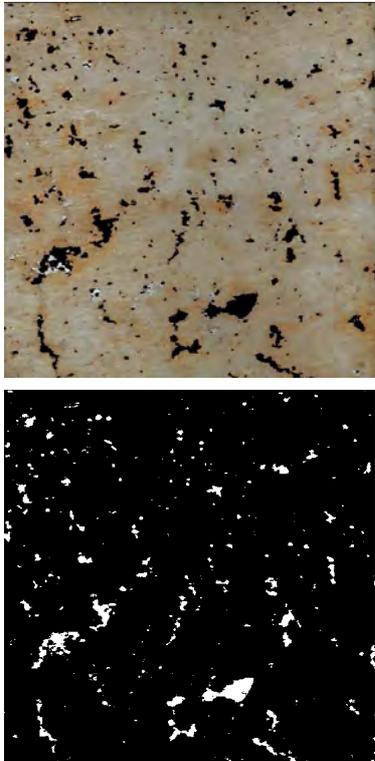
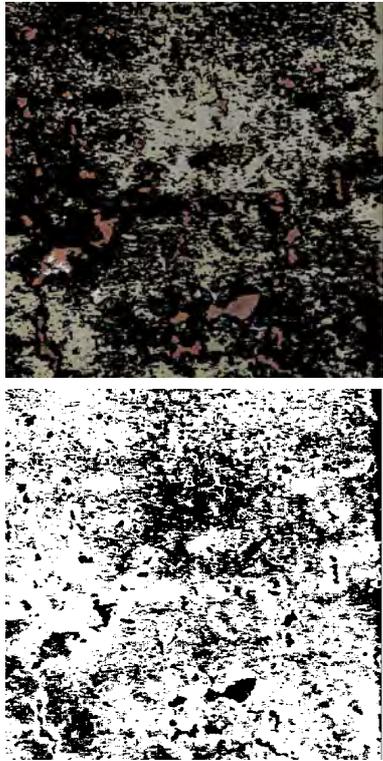
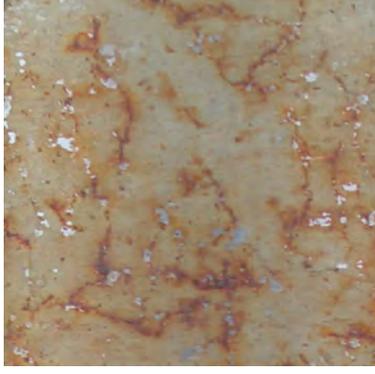
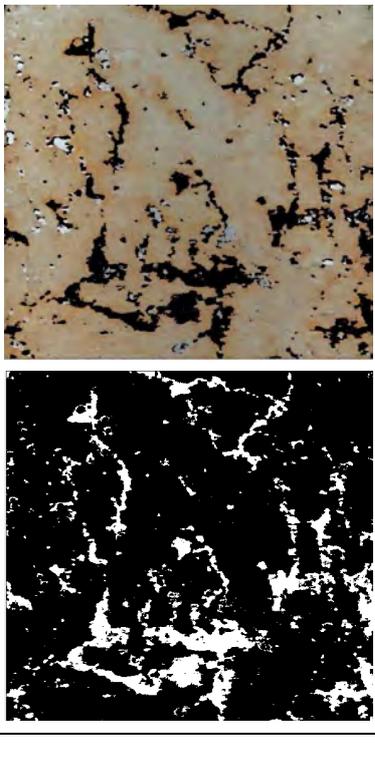
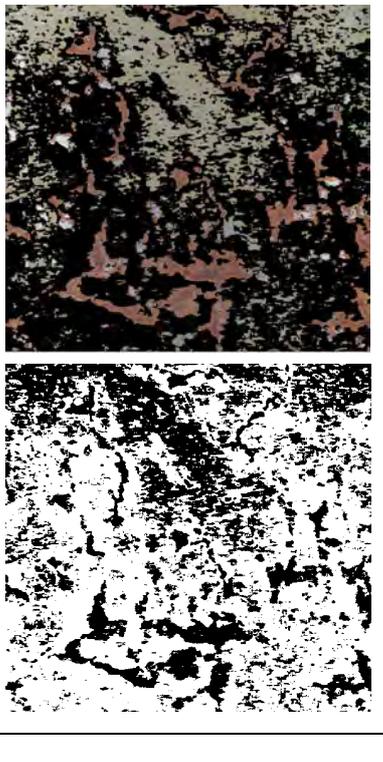
ESCENARIO C.

C3. Sección 2

Fotografía original	Area ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

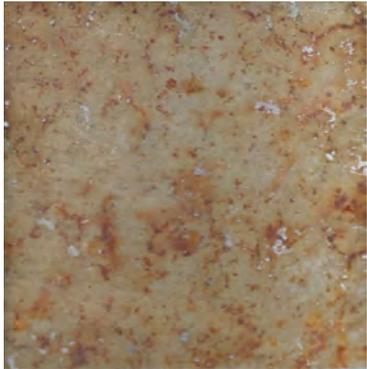
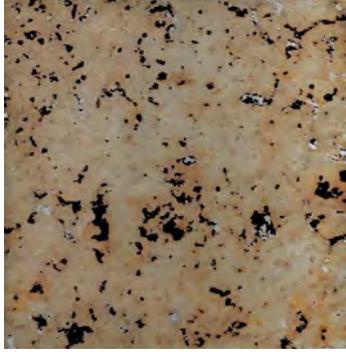
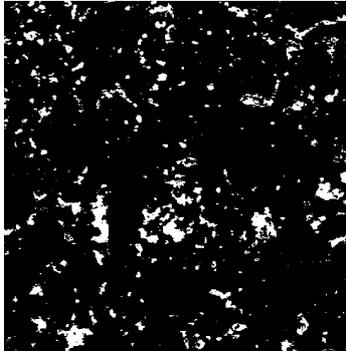
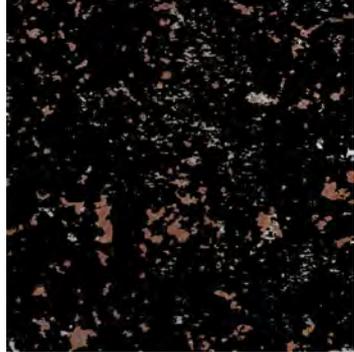
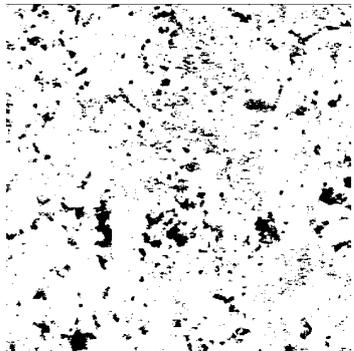
ESCENARIO C.

C3. Sección 3

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Área no corroída
		
		

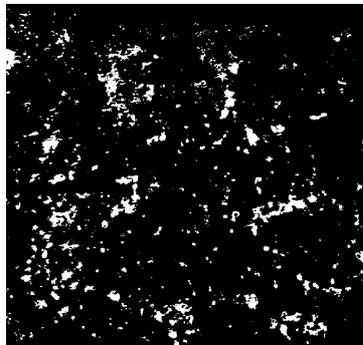
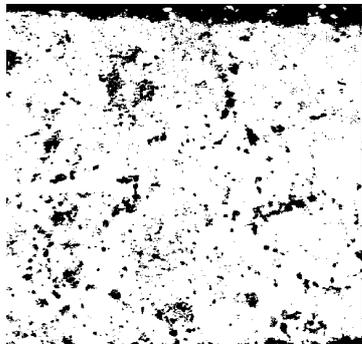
ESCENARIO C.

C4. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	 

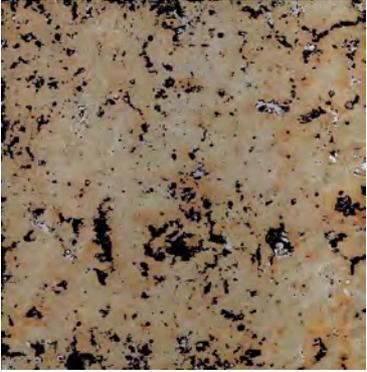
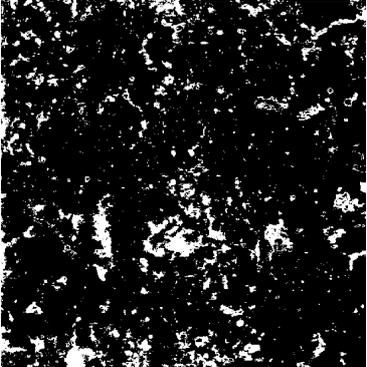
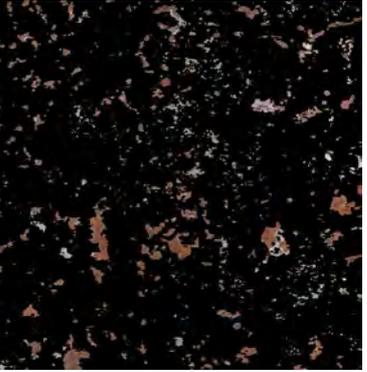
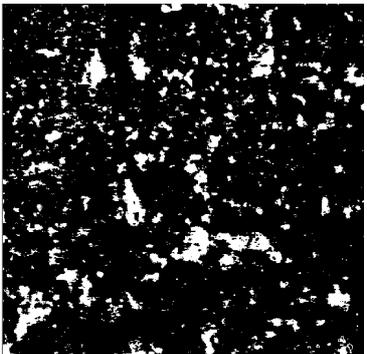
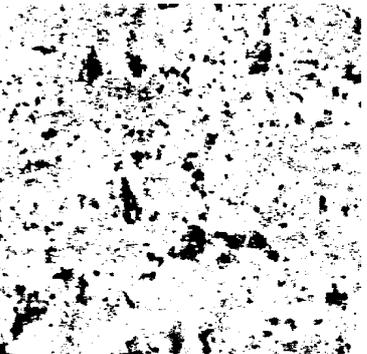
ESCENARIO C.

C4. Sección 2

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	 

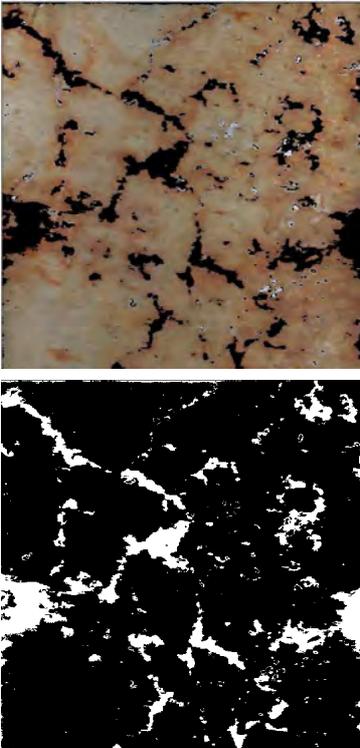
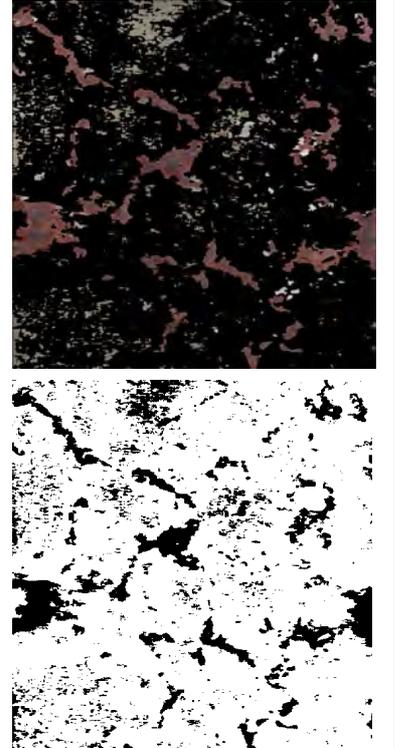
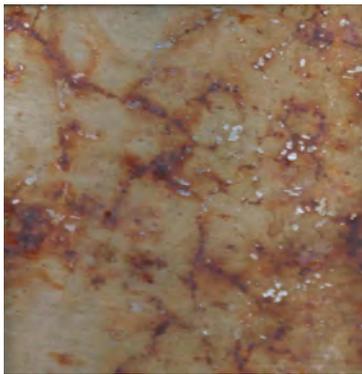
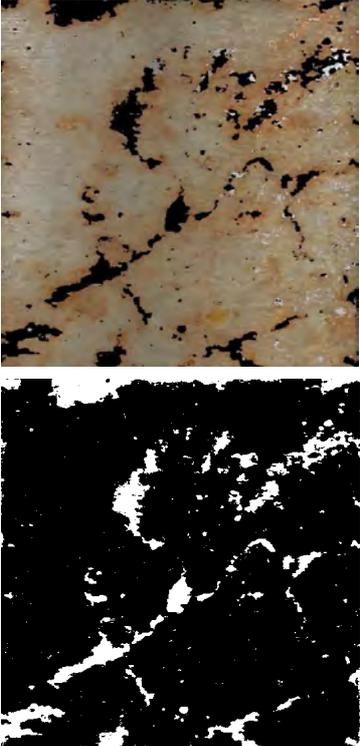
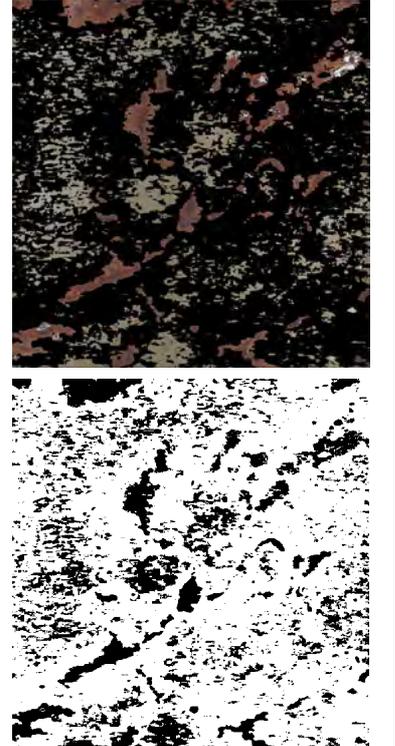
ESCENARIO C.

C4. Sección 3

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	 
	 	 

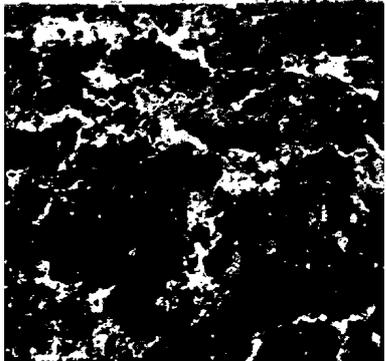
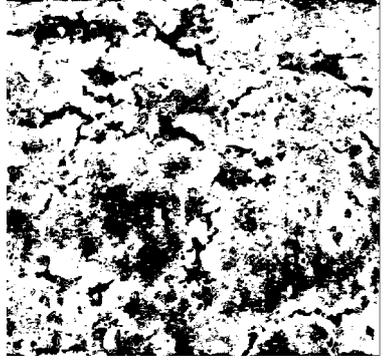
ESCENARIO C.

C5. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

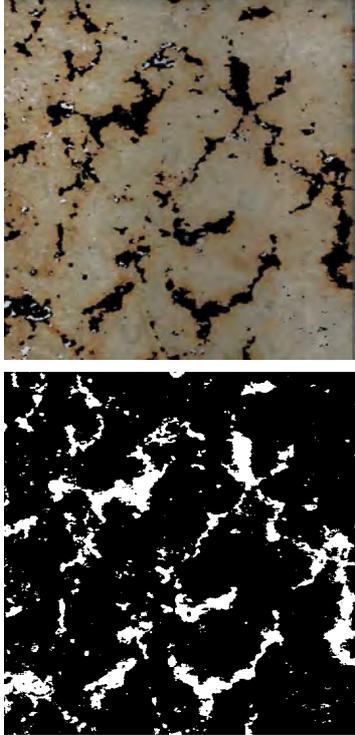
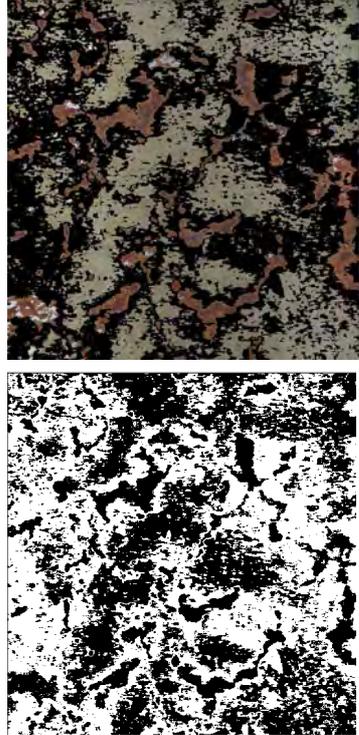
ESCENARIO C.

C5. Sección 2

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	 

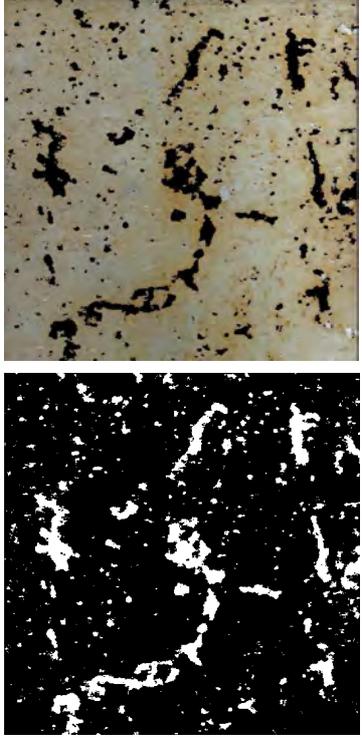
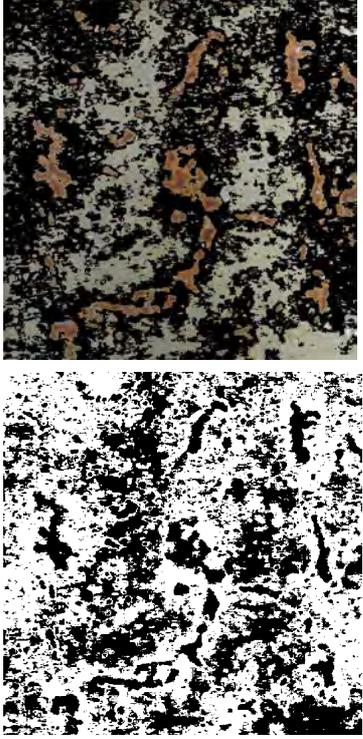
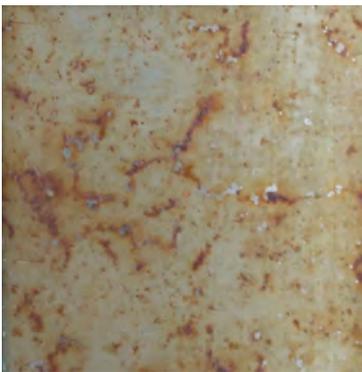
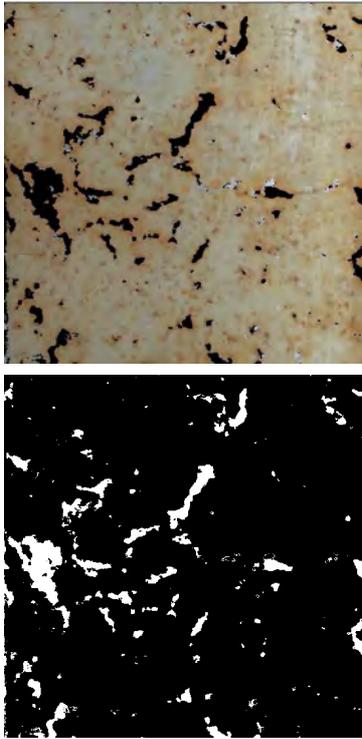
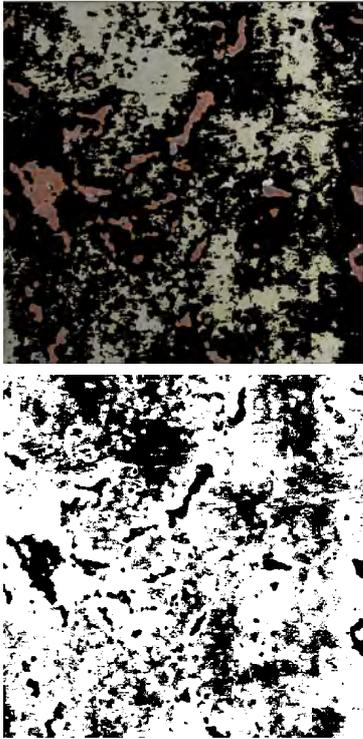
ESCENARIO C.

C5. Sección 3

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		

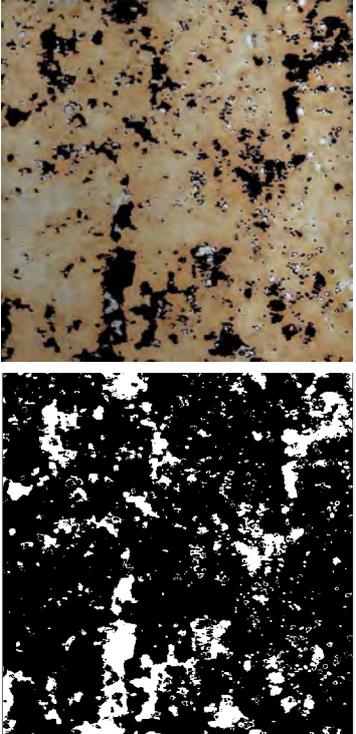
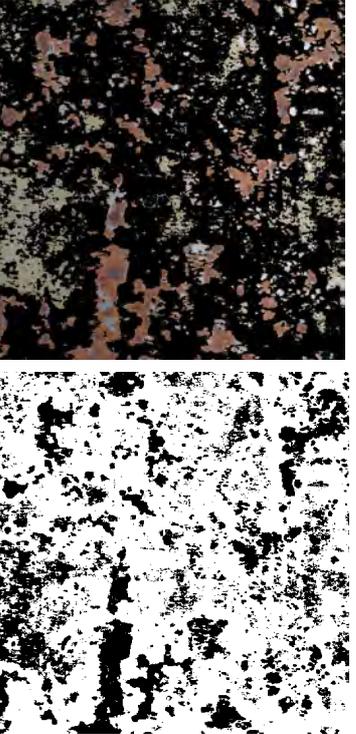
Escenario D.

C1. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 
<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

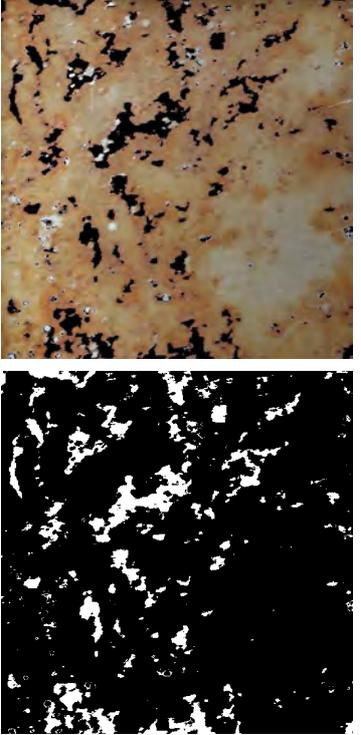
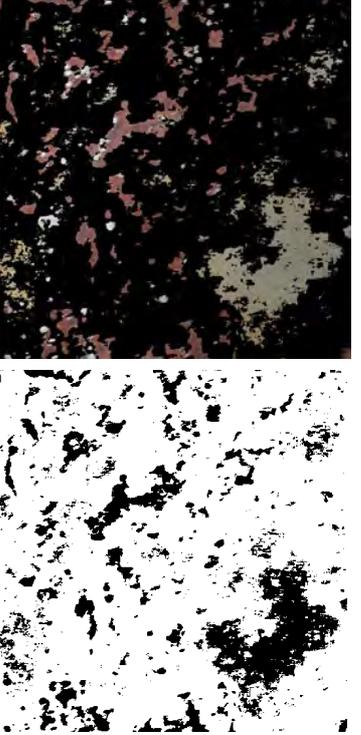
Escenario D.

C1. Sección 2

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

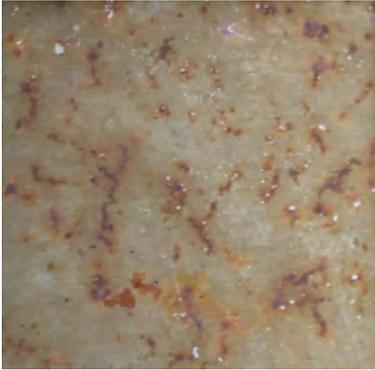
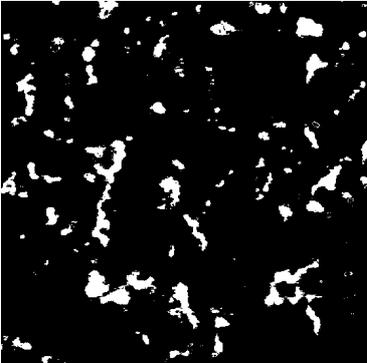
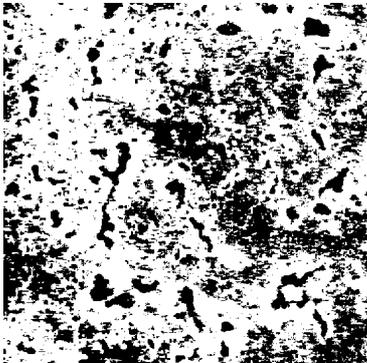
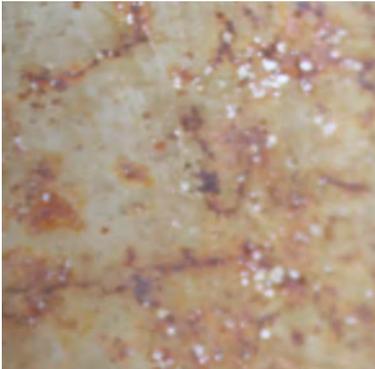
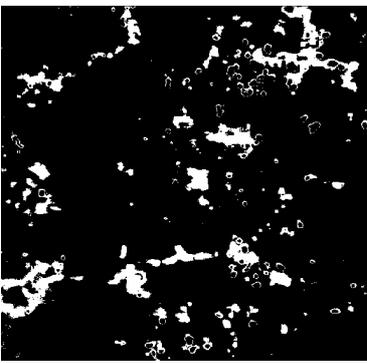
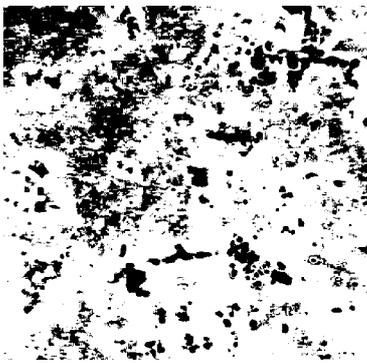
Escenario D.

C1. Sección 3

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		

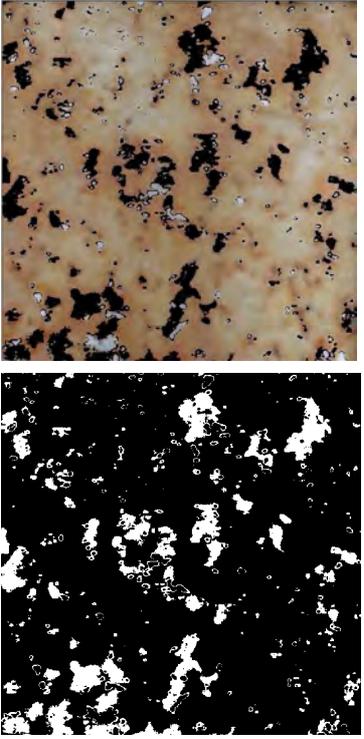
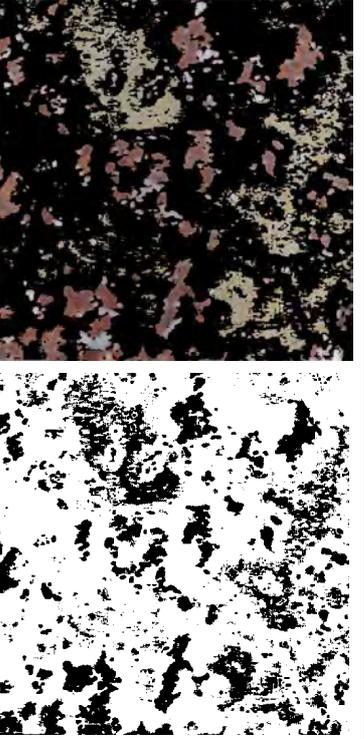
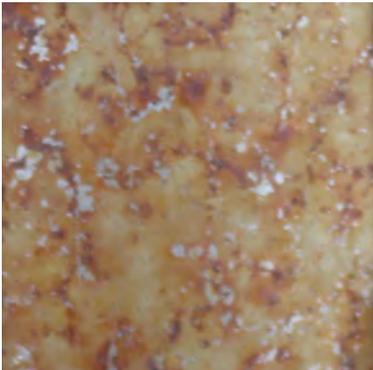
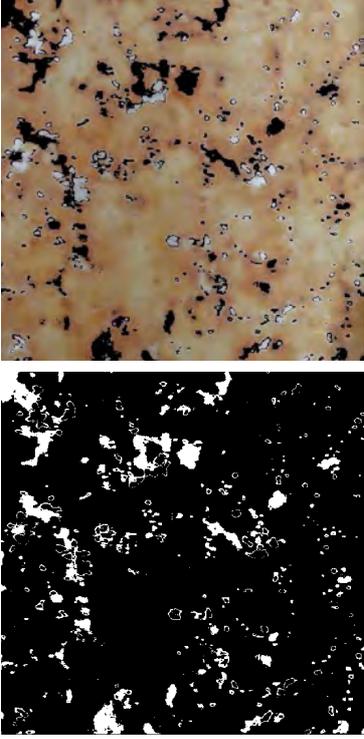
Escenario D.

C2. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	 
	 	 

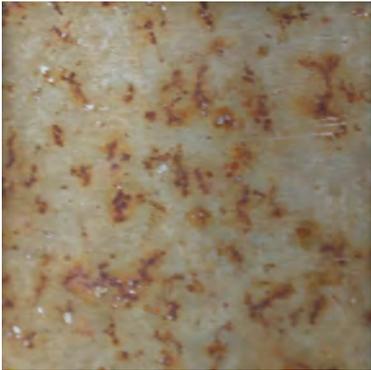
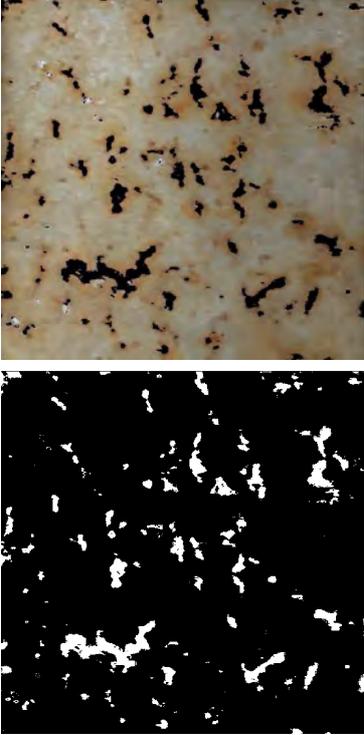
Escenario D.

C2. Sección 2

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

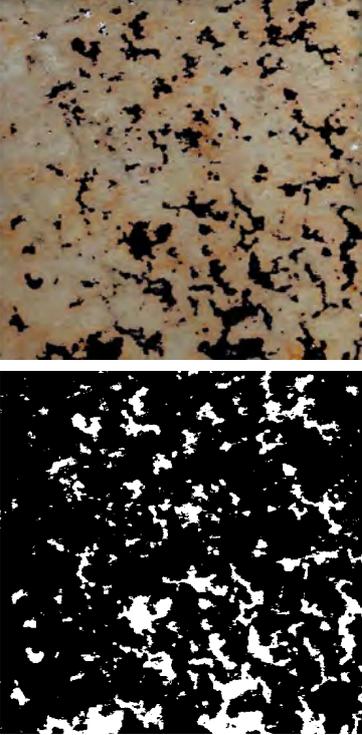
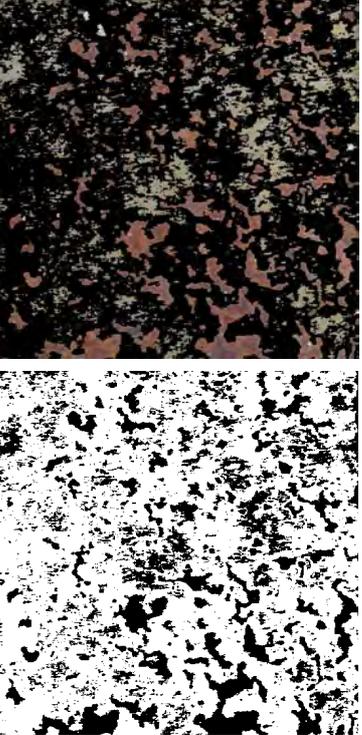
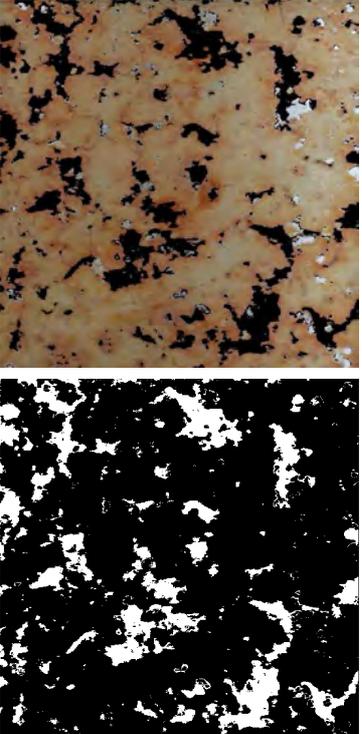
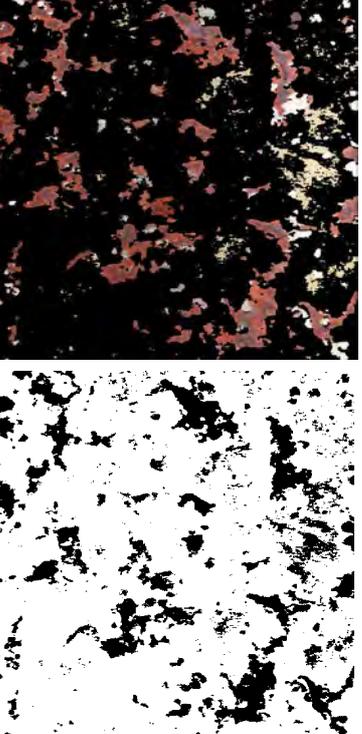
Escenario D.

C2. Sección 3

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		

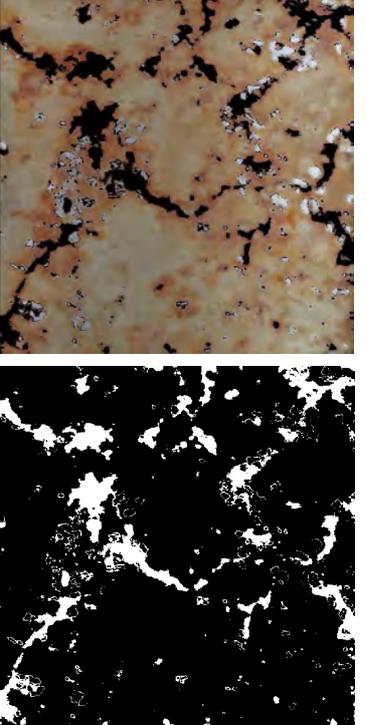
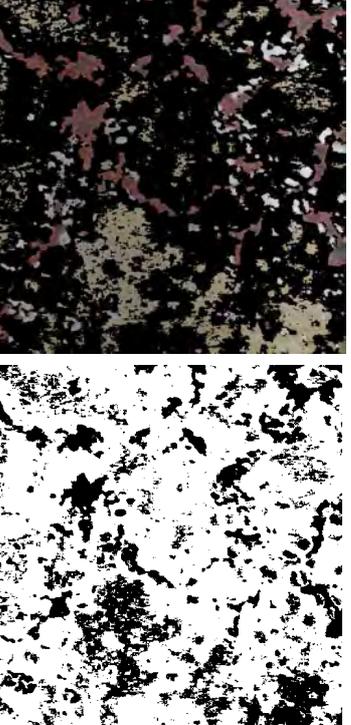
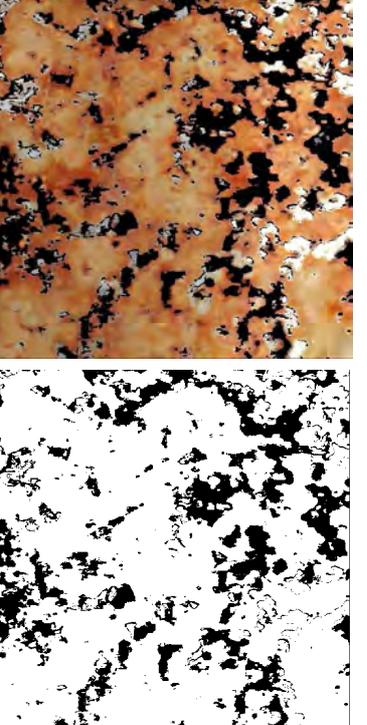
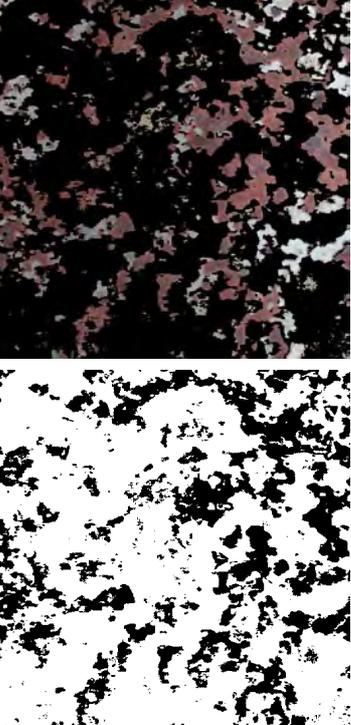
Escenario D.

C3. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 
<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

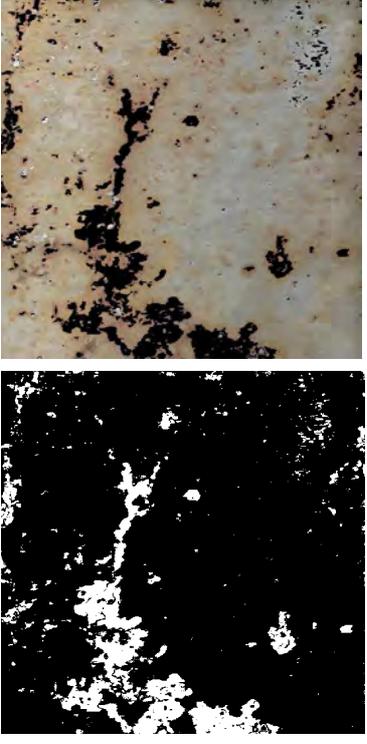
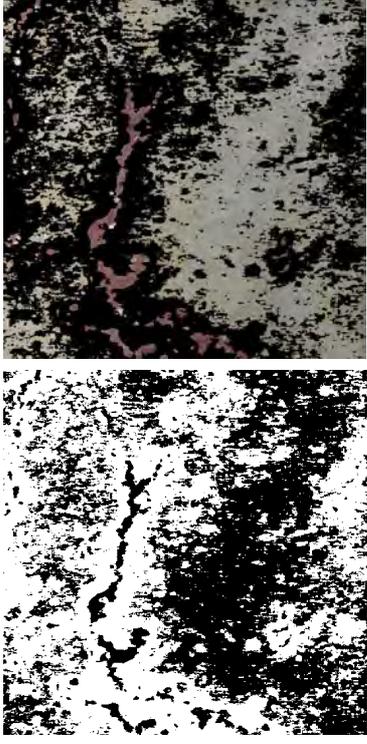
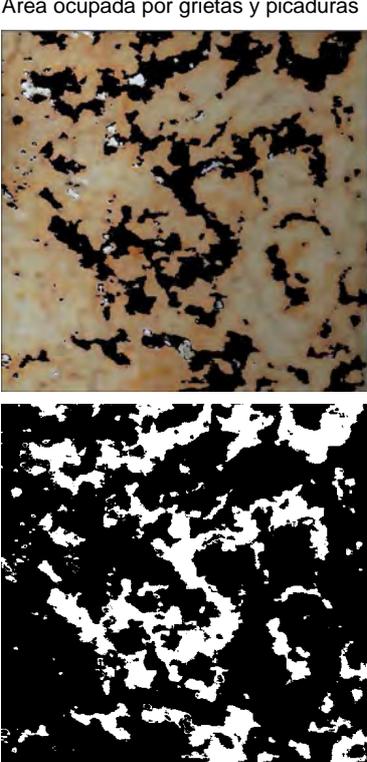
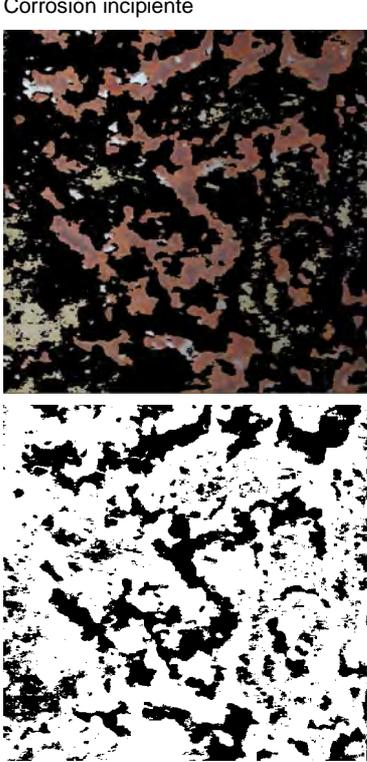
Escenario D.

C3. Sección 2

<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 
<p>Fotografía original</p> 	<p>Área ocupada por grietas y picaduras</p> 	<p>Corrosión incipiente</p> 

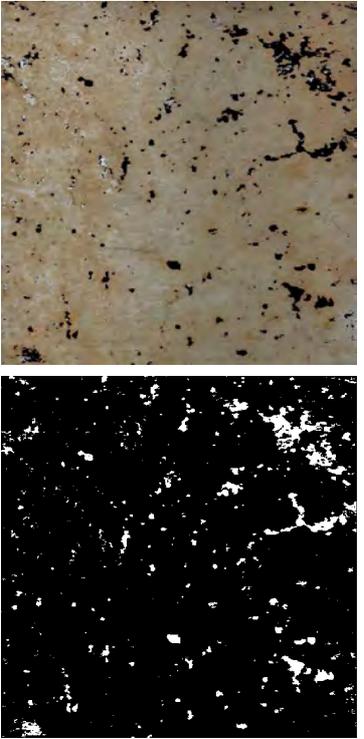
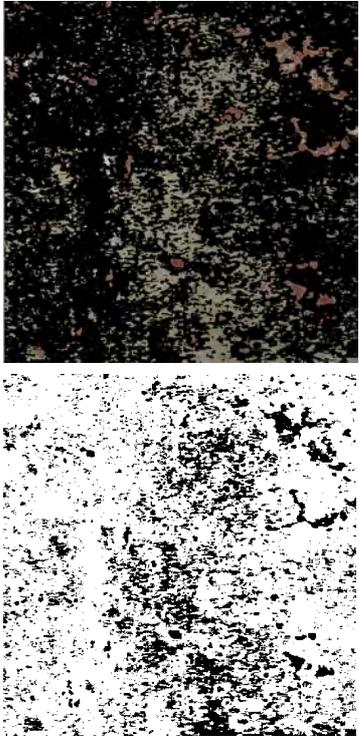
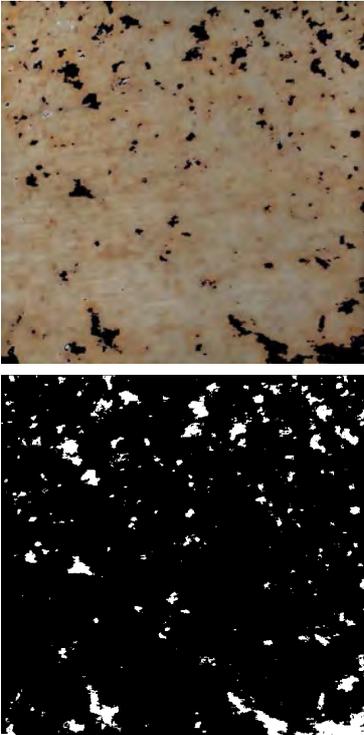
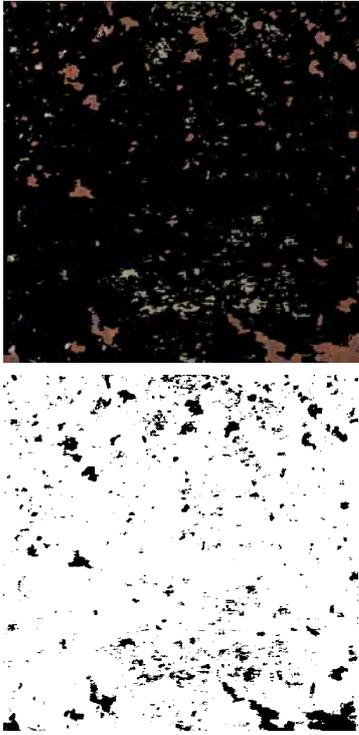
Escenario D.

C3. Sección 3

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

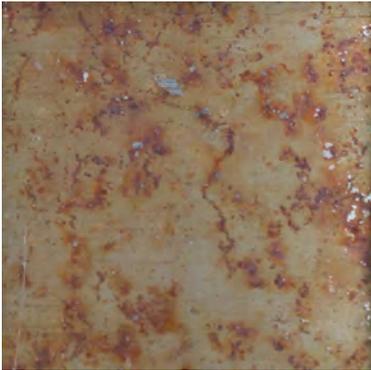
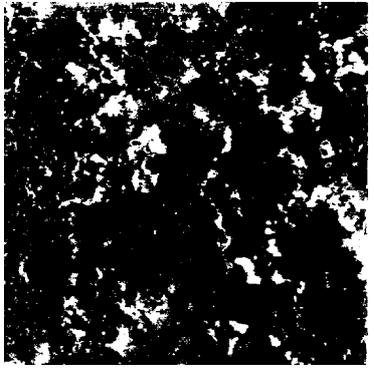
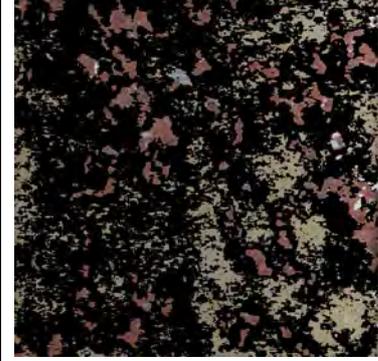
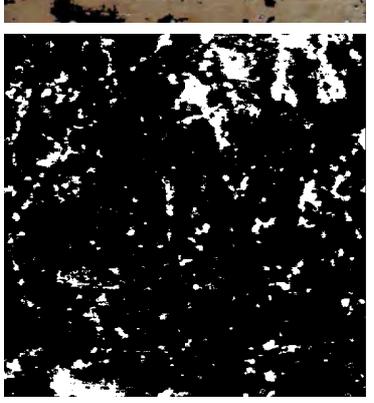
Escenario D.

C4. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

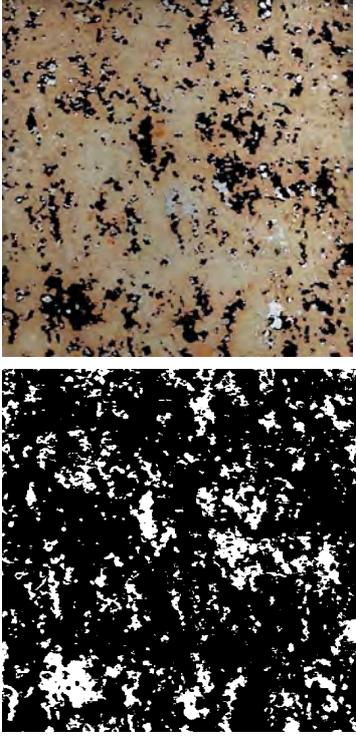
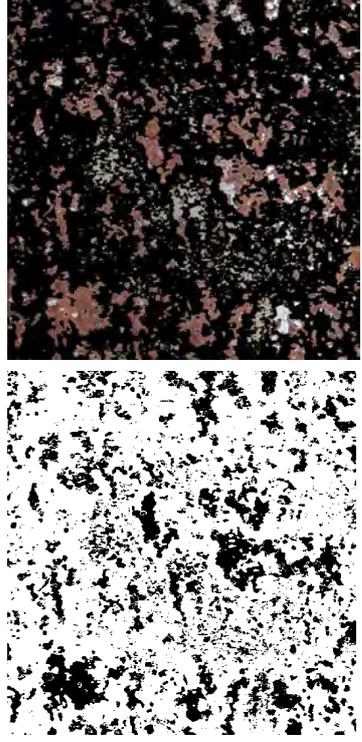
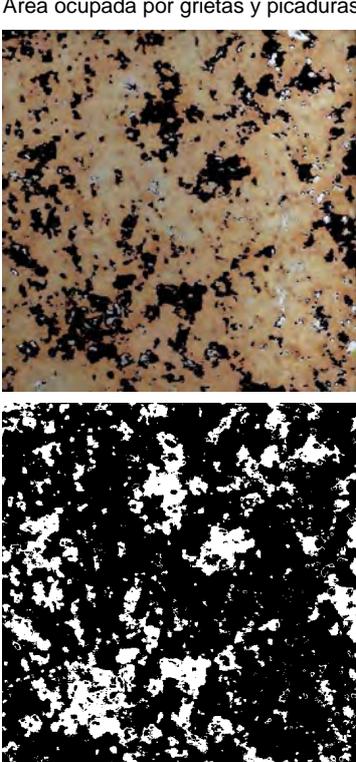
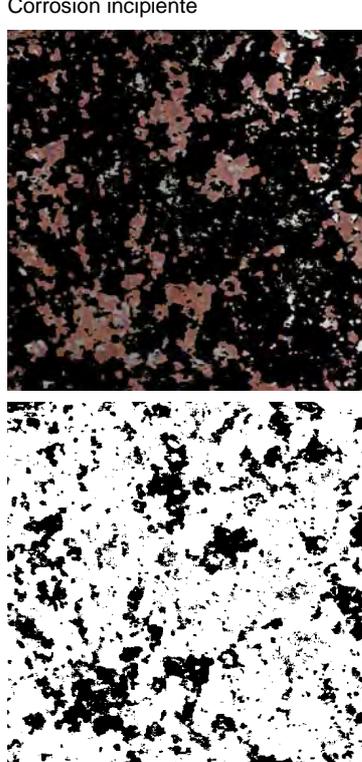
Escenario D.

C4. Sección 2

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	
	 	 

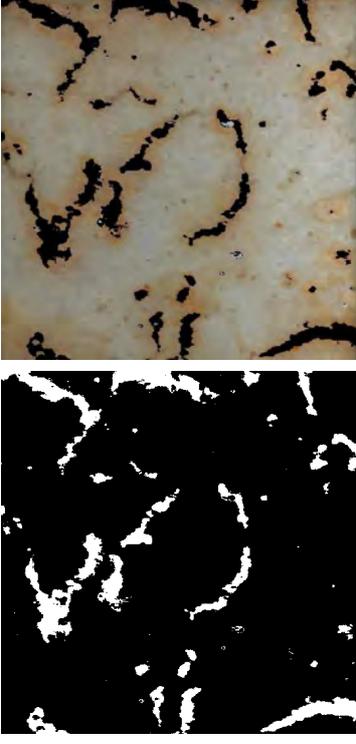
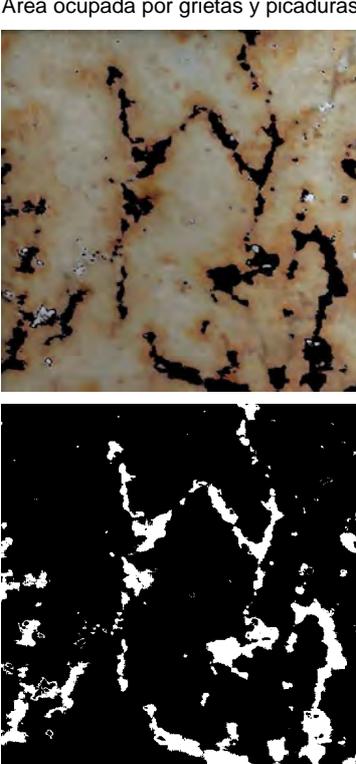
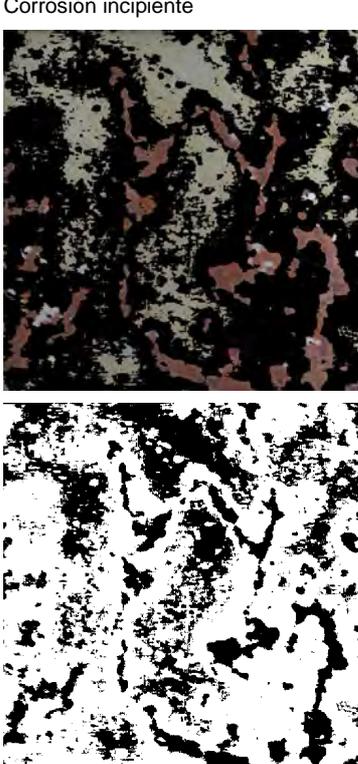
Escenario D.

C4. Sección 3

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

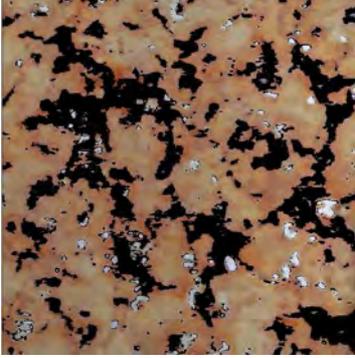
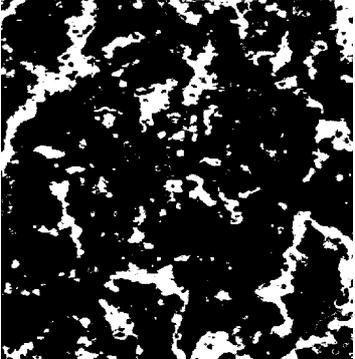
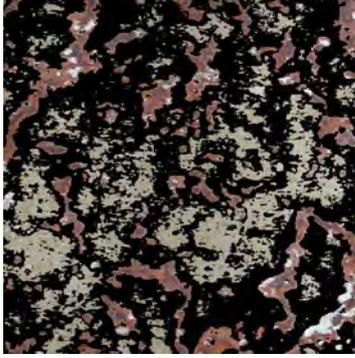
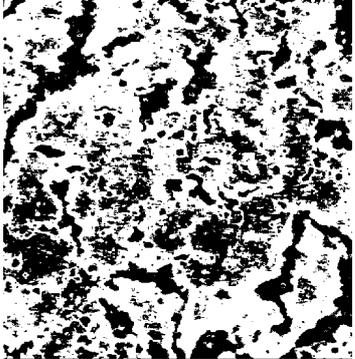
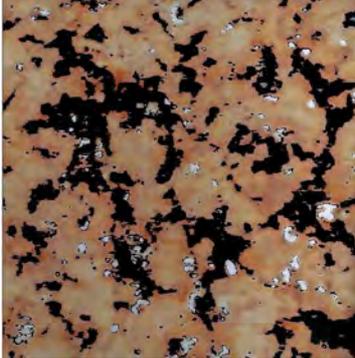
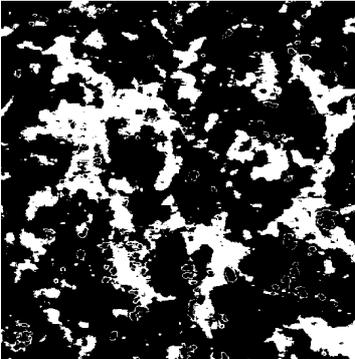
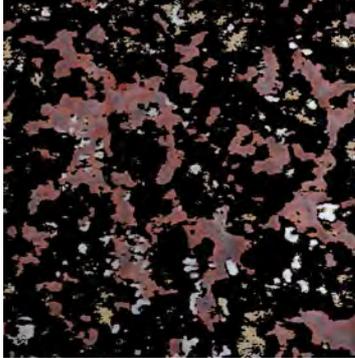
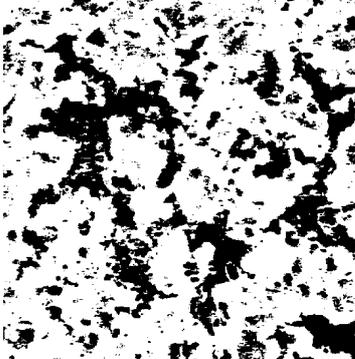
Escenario D.

C5. Sección 1

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

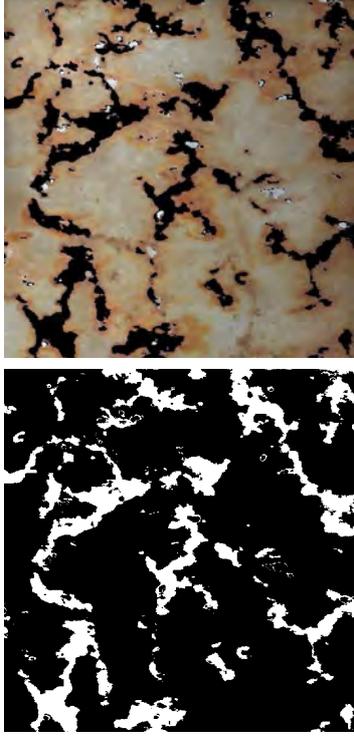
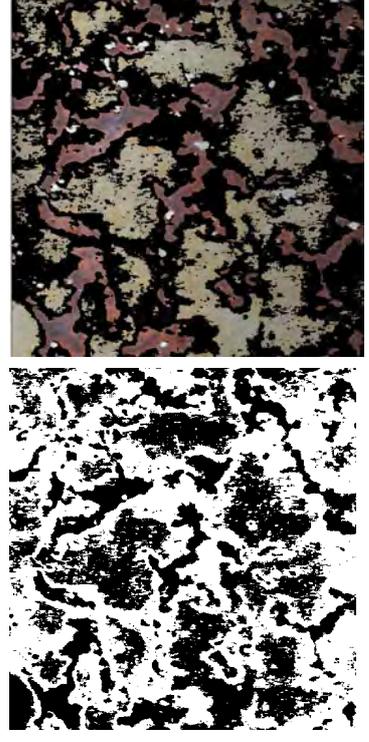
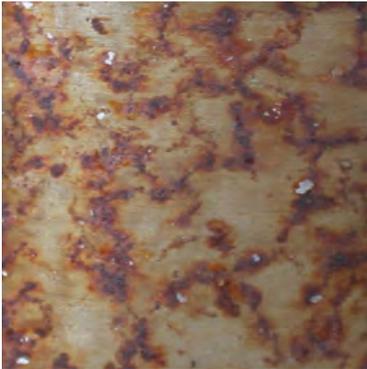
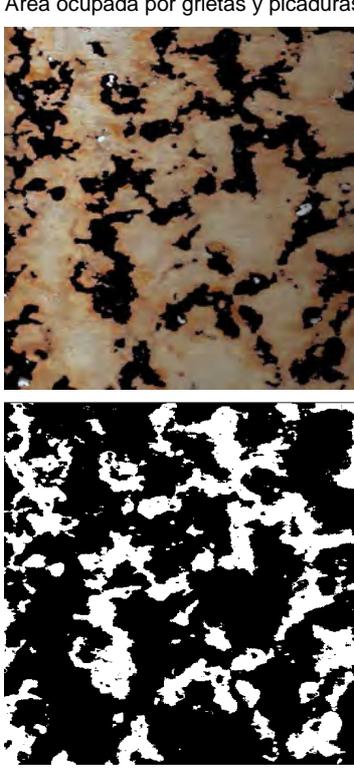
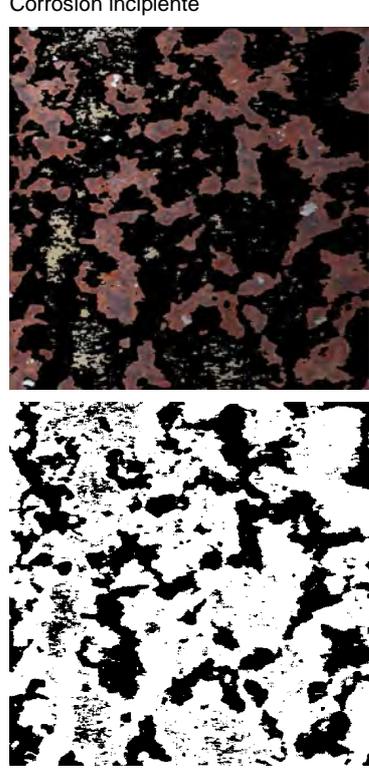
Escenario D.

C5. Sección 2

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
	 	 
	 	 

Escenario D.

C5. Sección 3

Fotografía original	Área ocupada por grietas y picaduras	Corrosión incipiente
		
		

Anexo II

Índice de Figuras

En este capítulo se documentan todas las Figuras que se han utilizado en el presente Proyecto Final de Carrera.

Figuras	Página
Figura 1. Puente Juan José Arenas, Santander	2
Figura 2. Casquillo del puente Juan José Arenas, Santander	3
Figura 3. Escenarios del Puente Juan José Arenas, Santander	4
Figura 4. Casquillos superiores e inferiores del Puente Juan José Arenas Santander	7
Figura 5. Corrosión por resquicios a) en la parte inferior del casquillo b) en la parte superior del casquillo	8
Figura 6. Imagen del estado actual de los casquillos (a) frente al estado inicial de éstos (b)	8
Figura 7. Etapas del Método Fuzzy: Fuzzyficación (a), Motor de interferencia Fuzzy (b) y Defuzzyficación (c)	9
Figura 8. Posibilidades e impactos medioambientales ocasionados por la corrosión, en caso de fuga o derrame	13
Figura 9. Tipos de comportamiento de un metal en un entorno	15
Figura 10. Requisitos para la existencia de una celda electroquímica	17
Figura 11. Clasificación de la corrosión	19
Figura 12. Corrosión uniforme en puerta	21
Figura 13. Metal en estado de equilibrio	22
Figura 14. Chapas de Fe y Cu aisladas (a) y tras entrar en contacto (b)	22
Figura 15. Hierro y cobre en contacto con electrolito	23
Figura 16. Reacción anódica del hierro en una celda galvánica	24

Figuras	Página
Figura 17. Serie electroquímica, parte 1	26
Figura 18. Serie electroquímica, parte 2	27
Figura 19. Proceso de corrosión en resquicios	28
Figura 20. Corrosión por resquicios	29
Figura 21. Corrosión por picaduras en un casquillo del Puente Juan José Arenas, Santander, España	31
Figura 22. Diagrama de equilibrio Cu-Zn, latones	36
Figura 23. Corrosión selectiva	37
Figura 24. Corrosión intergranular microscópica	40
Figura 25. Corrosión por exfoliación	41
Figura 26. Esquema del efecto de la velocidad en la corrosión por erosión	44
Figura 27. Lofty A. Zadeh, primer investigador de Lógica Difusa	50
Figura 28. Cronograma Lógica Difusa	53
Figura 29. Visión de la Lógica Difusa (a) Visión de la lógica clásica (b)	54
Figura 30. Algunas de las funciones características más habituales del método Fuzzy: Triangular (a); Trapezoidal (b); Gaussiana (c) y sigmoideal (d)	56
Figura 31. Etapas del Método Fuzzy: Fuzzyficación (a); motor de interferencia (b); Defuzzyficación (c)	58
Figura 32. Etapa Fuzzyficación, Método Fuzzy	60
Figura 33. Funciones de pertenencia, Método Fuzzy	61

Figuras	Página
Figura 34. Procedimiento de la etapa Motor de Interferencia, Método Fuzzy	61
Figura 35. Tipos de picaduras en los casquillos del Puente Juan José Arenas	67
Figura 36. Nuevas picaduras en un casquillo del Puente Juan José Arenas	68
Figura 37. Picaduras avanzadas en un casquillo del Puente Juan José Arenas	68
Figura 38. Grietas de corrosión en un casquillo del Puente Juan José Arenas	69
Figura 39. Colapso por picaduras en un casquillo del Puente Juan José Arenas	70
Figura 40. Fotografía de una sección de casquillo (a) y su área libre de corrosión (b)	71
Figura 41. Fotografía de una sección de casquillo (a) y su correspondiente área ocupada por grietas y picaduras (b)	71
Figura 42. Fotografía de una sección de casquillo (a) y su correspondiente área de corrosión incipiente (b)	72
Figura 43. Procedimiento seguido para la Recogida de Datos	73
Figura 44. Escenarios predeterminados del Puente Juan José Arenas para el presente estudio	74
Figura 45. Selección de casquillos objeto de estudio	75
Figura 46. Secciones objeto de estudio de los casquillos del Puente Juan José Arenas	76

Figuras	Página
Figura 47. Superficies objeto de estudio de los casquillos del Puente Juan José Arenas	78
Figura 48. Adquisición de fotografía de un casquillo mediante el uso de plantilla	78
Figura 49. Zonas inferior (a) y superior (b) de los casquillos afectadas por corrosión por resquicios	79
Figura 50. Procedimiento de la selección y adecuación de imágenes	79
Figura 51. Fotografía de un casquillo preparada para el procesamiento digital	80
Figura 52. Espectro visible	84
Figura 53. Espacio RGB	85
Figura 54. Espacio de color CMYK	86
Figura 55. Cono de colores del espacio HSV	88
Figura 56. Escala de color Lab luminosidad al 25% (a) y luminosidad al 75% (b)	90
Figura 57. Fotografías de casquillos con distinta saturación	91
Figura 58. Histograma(b) aplicado a una fotografía (a) tomada de un casquillo objeto de estudio	97
Figura 59. Espacio de color RGB aplicado (b) a una fotografía (a) de un casquillo	98
Figura 60. Metodología seguida en el procesado digital de imágenes	100
Figura 61. Aplicación Colorthresholder de Matlab aplicada una fotografía (a) de un casquillo objeto de estudio, Espacios de color RGB (b); HSV (c); YCbCr (d) Y L*a*b (e)	101

Figuras	Página
Figura 62. Aplicación Colorthreesholder de Matlab a una fotografía de un casquillo objeto de estudio, caso espacio de color HSV	102
Figura 63. Interfaz de Matlab en la segmentación del área ocupado por grietas y picaduras de un casquillo objeto de estudio	103
Figura 64. Interfaz de Matlab en la segmentación del área de corrosión incipiente de un casquillo objeto de estudio	104
Figura 65. Imagen binaria obtenida mediante el comando show binary, Matlab	105
Figura 66. Función implementada en Matlab para el cálculo de áreas	106
Figura 67. Anotación de resultados tras el cálculo de áreas	107
Figura 68. Variables de entrada y salida, Método Fuzzy	111
Figura 69. Área máximo (a) y mínimo (b) ocupado por grietas y picaduras”	114
Figura 70. Distribución normal del área ocupado por grietas y picaduras	114
Figura 71. Gráfica Fuzzy del área ocupado por grietas y picaduras	115
Figura 72. Área máximo (a) y mínimo (b) de corrosión incipiente	116
Figura 73. Distribución normal del área de corrosión incipiente	117
Figura 74. Gráfica Fuzzy del área de corrosión incipiente	118
Figura 75. Área máximo (a) y mínimo (b) libre de corrosión	119
Figura 76. Distribución normal del área libre de corrosión	119
Figura 77. Gráfica Fuzzy del área libre de corrosión	120

Figuras	Página
Figura 78. Motor de Interferencia Fuzzy	121
Figura 79. Organigrama, resultados generales	123
Figura 80. Organigrama, resultados procesado imágenes	125
Figura 81. Porcentaje de área ocupada por cada variable, Escenario A	128
Figura 82. Dispersión de variables abruptas, Escenario A	129
Figura 83. Porcentaje de área ocupada por cada variable, Escenario B	132
Figura 84. Dispersión de variables abruptas, Escenario B.	133
Figura 85. Porcentaje de área ocupada por cada variable, Escenario C	136
Figura 86. Dispersión de variables abruptas, Escenario C”	137
Figura 87. Porcentaje de área ocupada por cada variable, Escenario D	140
Figura 88. Dispersión de variables abruptas, Escenario D	141
Figura 89. Gráfica Fuzzy: área ocupada por grietas y picaduras, Escenario A	143
Figura 90. Gráfica Fuzzy: área de corrosión incipiente, Escenario A	144
Figura 91. Gráfica Fuzzy: área libre de corrosión, Escenario A	144
Figura 92. Motor de interferencia aplicado al Escenario A	145
Figura 93. Defuzzificación Esenario A	148
Figura 94. Gráfica Fuzzy: área ocupada por grietas y picaduras, Escenario B	149
Figura 95. Gráfica Fuzzy: área de corrosión incipiente, Escenario B	150

Figuras	Página
Figura 96. Gráfica Fuzzy: área libre de corrosión, Escenario B	150
Figura 97. Motor de interferencia Fuzzy aplicado al Escenario B	151
Figura 98. Defuzzificación, Escenario B	153
Figura 99. Gráfica Fuzzy: área ocupada por grietas y picaduras, Escenario C	154
Figura 100. Gráfica Fuzzy: área de corrosión incipiente, Escenario C	155
Figura 101. Gráfica Fuzzy: área libre de corrosión, Escenario C	155
Figura 102. Motor de interferencia Fuzzy aplicado al Escenario C	156
Figura 103. Defuzzificación, Escenario C	158
Figura 104. Gráfica Fuzzy: área ocupada por grietas y picaduras, Escenario D	159
Figura 105. Gráfica Fuzzy: área de corrosión incipiente, Escenario D	160
Figura 106. Gráfica Fuzzy: área libre de corrosión	160
Figura 107. Motor de interferencia Fuzzy aplicado al Escenario D	161
Figura 108. Defuzzificación, Escenario D	163
Figura 109. Grado de corrosión en cada escenario	167
Figura 110. Factores, de cada escenario, que favorecen el fenómeno de la corrosión	169
Figura 111. Figura 109. Estadísticas datos meteorológicos en Parayas, Cantabria	171

Anexo III

Índice de Tablas

Este Capítulo contiene el listado de todas las Tablas que han sido utilizadas en el presente Proyecto Final de Carrera.

Tablas	Página
Tabla 1. Pérdidas económicas directas e indirectas derivadas de la corrosión	12
Tabla 2. Comportamiento de los metales” [10]	16
Tabla 3. “Resultados numéricos procesado de imágenes, Escenario A	127
Tabla 4. Resultados numéricos procesado de imágenes, Escenario B	131
Tabla 5. Resultados numéricos procesado de imágenes, Escenario C	135
Tabla 6. Resultados numéricos procesado de imágenes, Escenario D	139
Tabla 7. Áreas totales, escenario A	143
Tabla 8. Fuzzificación Escenario A	145
Tabla 9. Reglas Fuzzy, Escenario A	146
Tabla 10. Composiciones de resultados de las partes IF de las reglas. Escenario A	147
Tabla 11. Áreas totales, Escenario B	149
Tabla 12. Fuzzificación, Escenario B	151
Tabla 13. Reglas Fuzzy, Escenario B	152
Tabla 14. Áreas totales, Escenario C	154
Tabla 15. Fuzzificación, Escenario C	156
Tabla 16. Reglas Fuzzy, Escenario C	157
Tabla 17. Áreas totales, Escenario D	159
Tabla 18. Fuzzificación, Escenario D	161
Tabla 19. Reglas Fuzzy, Escenario D	162

Tablas	Página
Tabla 20. Distribución de la ocupación de cada variable abrupta	164
Tabla 21. Diferencias máximas de cada variable entre escenarios	165
Tabla 22. Porcentaje de ocupación de la variable área de corrosión Incipiente para cada sección, por escenarios	165
Tabla 23. Porcentaje de ocupación de la variable área libre de corrosión para cada sección, por escenarios	166
Tabla 23. Porcentaje de ocupación de la variable área ocupada por grietas y picaduras para cada sección, por escenarios	166