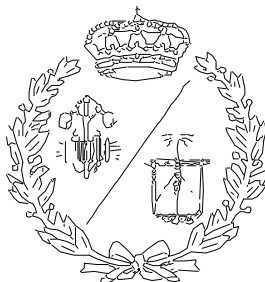


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto / Trabajo Fin de Carrera

**Corrosión por picadura: Caso particular de
estudio del
“Puente Juan José Arenas” de Santander**

Para acceder al Título de

**INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL
ESPECIALIDAD MECÁNICA**

Autor: Andrés Prieto Alba
Director: M. Victoria Biezma
Julio 2014

Índice

	Páginas
Capítulo 1. Objetivo y planteamiento	
1.1.- Objetivo	2
1.2.- Justificación	2
1.3.- Planteamiento	3
Capítulo 2. Estado del Arte	
2.1.- El fenómeno de la corrosión	7
2.2.- Relación del medioambiente y corrosión	10
2.3.- Tipos y morfologías que presenta la corrosión	16
2.3.1.- Corrosión uniforme o generalizada	17
2.3.2.- Corrosión galvánica o bimetálica	19
2.3.3.- Corrosión en resquicios	24
2.3.4.- Corrosión selectiva	26
2.3.5.- Corrosión fatiga	28
2.3.6.- Corrosión erosión	30
2.3.7.- Corrosión por fricción o frotamiento	33
2.3.8.- Corrosión cavitación	35
2.3.9.- Corrosión microbiológica	37
2.3.10.- Corrosión Intergranular	39
2.3.11.- Corrosión bajo tensión (CBT)	41
2.4.- Corrosión por picadura	43
2.4.1.- Métodos de evaluación de corrosión por picadura	45

2.4.2.- Conocimiento del fenómeno de corrosión por picadura atendiendo a los distintos criterios de cuantificación	45
Capítulo 3. Metodología de trabajo	
3.1.- Ubicación y planteamiento	50
3.2.- Material y diseño	55
3.3.- Metodología de trabajo adoptado en el desarrollo del Proyecto Fin de Carrera	58
3.3.1.- Terminología empleada	58
3.3.2.- Secuencia de trabajo	64
3.3.2.1.- Paso 1: Selección de “lock cover”	65
3.3.2.2.- Paso 2: Toma de fotografías de la selección	68
3.3.2.3.- Paso 3: Primera fotografía	72
3.3.2.4.- Paso 4: Mallado de la fotografía	73
3.3.2.5.- Paso 5: Selección de zonas de estudio (3 x cara)	75
3.3.2.6.- Paso 6: Diferenciar y contabilizar picaduras	80
3.3.2.7.- Paso 7: Anotación de los resultados	82
3.3.2.8.- Paso 8: Siguiendo fotografía y final del proceso	84
3.3.3.- Método de medición de tamaño medio de picadura	87
3.3.4.- Estudios adicionales	88
3.3.4.1.- Método empleado de estimación del tráfico	88
3.3.4.2.- Método de medición de la deformación existente en los casquillos debido a su diseño	89
Capítulo 4. Resultados y Análisis	
4.1.- Estimación de tránsito de tráfico sobre el puente	92
4.2.- Tamaño medio de picadura	93

4.3.- Deformación existente en los casquillos	95
4.4.- Resultados globales obtenidos del estudio de las picaduras en los casquillos del “Puente Juan José Arenas”	99
4.4.1.- Evolución de la tipología de picaduras	107
4.4.2.- Evolución de la superficie corroída considerando cada tipología	115
4.4.3.- Evolución de daños globales	123
4.4.4.- Evolución del diámetro medio de picadura	130
4.4.5.- Grietas de corrosión	132
4.4.5.1.- Cuantificación de las grietas de corrosión	132
4.4.5.2.- Modelización de las grietas de corrosión	133
4.4.6.- Estudio detallado de cada soporte	135
4.4.6.1.- Estudio técnico de Casquillo 1	136
4.4.6.2.- Estudio técnico de Casquillo 2	140
4.4.6.3.- Estudio técnico de Casquillo 3	144
4.4.6.4.- Estudio técnico de Casquillo 4	148
4.4.6.5.- Estudio técnico de Casquillo 5	152
4.4.6.6.- Estudio técnico de Casquillo 6	156
4.4.6.7.- Estudio técnico de Casquillo 7	160
4.4.6.8.- Estudio técnico de Casquillo 8	164
4.4.6.9.- Estudio técnico de Casquillo 9	168
4.4.6.10.- Estudio técnico de Casquillo 10	172
4.4.6.11.- Comparación de los estudios realizados a los casquillos	176
4.4.6.12.- Evolución visual de la picadura en los casquillos	192

4.4.7.- Modelización de la corrosión por picadura	198
4.4.7.1.- Leyes aproximadas que rigen la cinética de corrosión	205
4.4.7.2.- Estado tensional de los casquillos	215
4.5.- Estudio económico	219
Capítulo 5. Conclusiones	
5.- Conclusiones	223
Capítulo 6. Líneas de trabajo futuras	
6.- Líneas de trabajo futuras	226
Capítulo 7. Referencias Bibliográficas	
7.- Referencias Bibliográficas	228
Anexo 1. Índice de Figuras	
Anexo 2. Índice de Tablas	
Anexo 3. Planos de Macalloy	
Anexo 4. Póster de EUROCORR y documento presentado	

Capítulo 1

Objetivo y planteamiento

Se definirá el objetivo del Proyecto Fin de Carrera, porque se seleccionó esta temática y como se ha desarrollado.

1.1.- Objetivo

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera de investigación, de carácter científico-teórico de la rama de Deterioro de Materiales, es conocer cómo evoluciona la corrosión por picadura, también conocida como “pitting”, en el caso real de una infraestructura civil perteneciente a la ciudad de Santander, como es el “Puente Juan José Arenas”.

Este documento además, es la extensión del estudio “Study of the pitting corrosion evolution of stainless steel structures in marine environments by finite element modeling” ya presentado en Estoril (Portugal) en “EUROPEAN CORROSION CONGRESS”, EUROCORR 2013 con una gran aceptación, y elaborado por el mismo autor con la directora del Proyecto Fin de Carrera. La figura 1 es el logotipo de este congreso que se celebra anualmente, y es el de mayor reconocimiento europeo en el ámbito de la Corrosión y Degradación de los materiales.



Figura 1. “Logotipo de EUROCORR 2013” (1)

1.2.- Justificación

La inquietud por realizar este estudio se debe a que, en la ruta para llegar a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones de la Universidad de Cantabria se observó, que el estado de los casquillos del “Puente Juan José Arenas”, con el paso del tiempo, estaban cada vez más corroídos. Al ser una pieza de acero inoxidable corroída en un puente de diseño actual y, debido al desconocimiento de lo que estaba sucediendo y porqué, se despertó el interés en realizar un estudio para dar explicación a tales inquietudes. Hay que destacar además que, hace dos años, se inauguró este puente y, esos casquillos, soportes o “Lock cover,” ya presentaban un estado importante de daño por corrosión.

1.3.- Planteamiento

Profundizando en la tipología del ataque de corrosión que han experimentado dichos casquillos, y con una detallada inspección visual, se pudo determinar que correspondía y corresponde a corrosión por picadura altamente localizada. Por ello se ha planteado el estudio del proceso de evolución que describe la picadura en este caso, observando durante ocho meses, cómo se generan en función del tiempo, cómo se propagan y cómo aumentan el tamaño siguiendo un flujograma secuencial de trabajo creado para este estudio mostrado en el subcapítulo “3.3.2.- *Secuencia de trabajo*”.

La figura 2 es el “Puente Juan José Arenas”, la estructura que incorpora los casquillos que se van a estudiar.



Figura 2. “Puente Juan José Arenas”, Santander

Las piezas que rodean a los tirantes en su parte inferior serán nuestro objeto de estudio y los denominaremos “casquillo” o “soporte” (*“lock cover”*). Al aparecer 72 veces en el inventario de este puente, resulta interesante conocer y analizar este proceso de corrosión particular, obteniendo la cinética de corrosión con el fin de obtener información suficiente para poder profundizar en el proceso que está experimentando y poder llegar a obtener un modelo extrapolable a otras estructuras con daños de corrosión por picadura.

Hay que destacar que coexisten varios tipos de corrosión, pero sólo vamos a estudiar la corrosión por picadura, que se encuentra en la parte central de la pieza, dejando los extremos sin ser estudiados. El otro tipo de corrosión es tanto por aireación diferencial como corrosión en resquicios en la zona de contacto de la parte inferior y la superior por el mecanizado del material.

La figura 3 está tomada en el “Puente Juan José Arenas” y se puede apreciar, a simple vista, el estado pésimo de estas piezas y, por lo tanto, el interés por realizar este estudio.



Figura 3. Tirantes y casquillos del “Puente Juan José Arenas”, Santander

Para ello, se ha usado la técnica de la fotogrametría para analizar los datos obtenidos en campo, provenientes de fotografías reales y, medidas “in situ” para determinar el tamaño de las picaduras. También se elaborará un modelo matemático para la representación del proceso en un programa de elementos finitos. Asimismo, nos apoyaremos en la forma de obtención de datos para poder obtener más información sobre el proceso; a modo de ejemplo, se ha tomado la diferencia de lo que ocurre al este y oeste del puente para ver la importancia de la orientación geográfica, en tanto en cuanto afecta el régimen de lluvias, viento, etc. desde el punto de vista de la corrosión.

Así el objetivo del presente Proyecto fin de Carrera es conocer el proceso de corrosión por picadura que sufren los casquillos o soportes del “Puente Juan José Arenas” por medio de datos obtenidos en campo de forma discreta a lo largo del tiempo, y que pueda ser extrapolable a otro tipo de componentes o estructuras.

En la figura 4 se puede observar la diferencia entre un casquillo sin estar afectado por la corrosión por picadura (su estado inicial) y los pertenecientes instalados tras ocho meses.



Figura 4. “Comparación de casquillos, con y sin ataque de corrosión por picadura”

Capítulo 2

Estado del Arte

Para poder conocer y estudiar lo que está ocurriendo en los casquillos necesitaremos profundizar en diferentes aspectos, principalmente en la corrosión y cómo la afecta el medio en el que se encuentra y otras variables físico-mecánicas. Por ello, en este capítulo se detallarán:

- El fenómeno de la corrosión
- Relación del medioambiente con la corrosión
- Tipologías de la corrosión
- La corrosión por picadura

2.1.- El fenómeno de la corrosión

“El deterioro es un fenómeno natural mediante el cual los materiales pierden sus propiedades iniciales, al reaccionar con el medio ambiente, mediante fenómenos químicos, electroquímicos, físicos, mecánicos o varios simultáneamente.” (2)

El deterioro en sistemas metálicos se denomina corrosión. Hay muchas definiciones para explicar este fenómeno tales como:

“Destrucción paulatina de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma” (3).

“La corrosión puede definirse como la reacción química o electroquímica de un metal o aleación con su medio circundante con el consiguiente deterioro de sus propiedades” (4).

En este caso la figura 5 es un ejemplo de corrosión en el caso real de una señal de tráfico situada en Loredó (Cantabria), con falta de mantenimiento en donde los productos de corrosión voluminosos del acero desprenden las capas de pintura.



Figura 5. “Ejemplo de corrosión en señal de tráfico, Loredó (Cantabria)”

Un metal, además siempre tiende a alcanzar su estado de mínimo energético, que es en forma combinada, que dependiendo del ambiente, serán óxidos, carbonatos, sulfuros, sulfatos, etc... y también es su estado más estable. De esta forma, se sitúa la metalurgia extractiva y la corrosión como procesos opuestos en donde el mineral, busca el equilibrio termodinámico en donde la función de Gibbs alcanza el mínimo energético.

Al corroerse un metal, sus propiedades mecánicas y químicas cambian. Esto, por lo tanto, puede provocar el fallo o rotura de una pieza en servicio, ya bien sea una barandilla que no va a poder soportar la carga con la que se diseñó, una tubería que va a derramar fluido, o una unión rota.

El impacto económico de este fenómeno es muy elevado, estimándose entre el 1 y el 5% del PIB de un país (sobre todo, en ambientes marinos, actividad química, textil y petroquímica). En 1971, se presentó el informe Hoar. Este informe mostraba de qué manera podrían reducirse los gastos de cada país si se utilizaran los conocimientos disponibles de una manera óptima. En la tabla 1 se observa un resumen del informe Hoar.

Tabla 1. “Resumen del Informe Hoar” (5)

Industria o sector	Coste estimado (millones de libras)	Ahorro potencial estimado (millones de libras)
Construcción	250 (\$190.000.000.000)	50 (\$38.000.000.000)
Alimentación	40 (\$30.400.000.000)	4 (\$3.040.000.000)
Ingeniería en general	110 (\$83600000000)	35 (\$26.600.000.000)
Agencias y dptos. gubernamentales	55 (\$41.800.000.000)	20 (\$15.200.000.000)
Marina	280 (\$212.800.000.000)	55 (\$41.800.000.000)
Refino del metal y semielaborados	15 (\$11.400.000.000)	2 (\$1.520.000.000)
Petróleo y productos químicos	180 (\$136.800.000.000)	15 (\$11.400.000.000)
Energía	60 (\$45.600.000.000)	25 (\$19.000.000.000)
Transporte	350 (\$266.000.000.000)	100 (\$76.000.000.000)
Agua	25 (\$19.000.000.000)	4 (\$3.040.000.000)
TOTAL	1365 (\$1.037.400.000.000)	310 (\$235.600.000.000)

Como puede extraerse del informe Hoar, los sectores de transporte, marina y construcciones son los de mayores costes, debido al fuerte impacto de la intemperie y el agua de mar sobre la corrosión en los metales. Los costes del sector ingeniería no son tan elevados, pero es de destacar el ahorro potencial que, en proporción, es considerable.

La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo y forma más común de ataque a los metales; su funcionamiento está basado en el de una celda electroquímica. Para que exista este fenómeno se tienen que cumplir cuatro condiciones las cuales son:

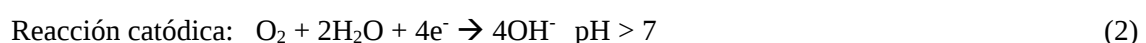
- Existencia de un ánodo.
- Existencia de un cátodo.
- Existencia contacto eléctrico entre ambos metales.
- Existencia de un electrolito que une ánodo y cátodo

El ánodo es llamado al metal que se corroe y el que cede iones metálicos y electrones al circuito, asimismo, el cátodo será quien recibe los electrones cedidos. El electrolito es un fluido que está en contacto con el ánodo y el cátodo, y cierra el circuito eléctricamente, permitiendo que en todo momento exista un torrente de electrones circulante entre ambos metales, como muestra la figura 6.



Figura 6. “Ejemplo de celda electroquímica”

Este efecto es una reacción oxidación-reducción, también conocido como reacción redox y, dependiendo del estado del metal, (ánodo o cátodo) tendrá lugar un determinado tipo de reacción. La reacción anódica es única, mientras que pueden darse varias catódicas. Las reacciones se detallan a continuación.



Las distintas reacciones catódicas dependerán normalmente del medio en el que se encuentran siendo, la ecuación (2) equivalente a un medio neutro o aireado, la ecuación (3) un medio ácido y la ecuación (4) un par galvánico.

2.2.- Relación del medioambiente y corrosión

En los últimos años se ha prestado gran atención a los cada vez mayores problemas que presenta la corrosión metálica, provocados por el progresivo deterioro del medio ambiente. Numerosos trabajos han puesto de relieve la influencia de la contaminación atmosférica, especialmente en zonas urbanas e industriales, sobre la velocidad de corrosión de diferentes materiales. Los estudios han incidido en la relación que la contaminación del medio ambiente ejerce sobre la corrosión. En cambio, se ha dedicado mucha menos atención a la relación inversa, el efecto que la corrosión tiene sobre el medio ambiente. Esto podría ser debido a que la acción de la corrosión sobre el medio ambiente suele presentarse de una manera menos general, con efectos más puntuales, tanto en su localización como en el tiempo, si bien casi siempre revestidos de gravedad.

Por otra parte, la misma naturaleza de este tipo de problemas hace que en ellos se encuentren comprometidos técnicos como ingenieros de proceso o jefes de seguridad, la mayoría de las veces poco interesados en los fenómenos de corrosión. Cabe señalar aquí las propuestas realizadas con anterioridad con el objeto de mejorar la formación de recursos humanos en corrosión. Analizando aquellos sectores en los cuales pueda tener más repercusión la corrosión sobre el medio ambiente, se pueden seleccionar los correspondientes a las centrales nucleares, la extracción de petróleo, la industria química y sectores vinculados con el sector marítimo.

En relación con los dos primeros, existe muy poca información publicada sobre casos en los cuales la corrosión haya sido la causa directa de la fuga de radiactividad o de hidrocarburos, respectivamente. En el caso de las centrales nucleares, el estricto control de los materiales y componentes, así como el relativamente pequeño número de instalaciones y una cierta tipificación en las mismas, podrían explicar este hecho. Recientemente se ha efectuado una revisión de los problemas que afectan a las centrales nucleares del tipo BWR (agua en ebullición) (6).

En el caso de las plataformas marinas de explotación de petróleo, si bien los accidentes son más numerosos y muchos de ellos ocasionan fugas de crudo, sus causas suelen ser ajenas a la corrosión (errores humanos, fallas estructurales debidas a tempestades, etcétera), o bien no salen a las vías de distribución de información periodística, por estar afectadas por importantes implicaciones económicas. Es en el sector químico, pues, donde la corrosión ha tenido una mayor repercusión. Sin embargo, es difícil reunir datos estadísticos significativos sobre cuáles son los tipos o formas de corrosión más representativos.

No obstante, puede suponerse que la frecuencia es prácticamente la misma que la existente en los casos usuales de corrosión en las plantas químicas, la cual sí se conoce aunque de manera aproximada. Gavelli (7) y colaboradores han estudiado 1115 casos del banco de datos sobre corrosión del Instituto Guido Donegani, y han encontrado la siguiente distribución, mostrada a continuación y representada por la figura 7:

“Distribución del ataque de corrosión en plantas químicas”

<u>Tipo de corrosión</u>	<u>%</u>
Corrosión bajo tensión	21
Corrosión uniforme	20
Corrosión fatiga	18
Corrosión por picaduras	10
Corrosión erosión	7
Corrosión en resquicios	6
Corrosión a alta temperatura	6
Fluencia	4
Corrosión intergranular	3
Fragilización por hidrógeno	1
Corrosión galvánica	1
Otros casos	3

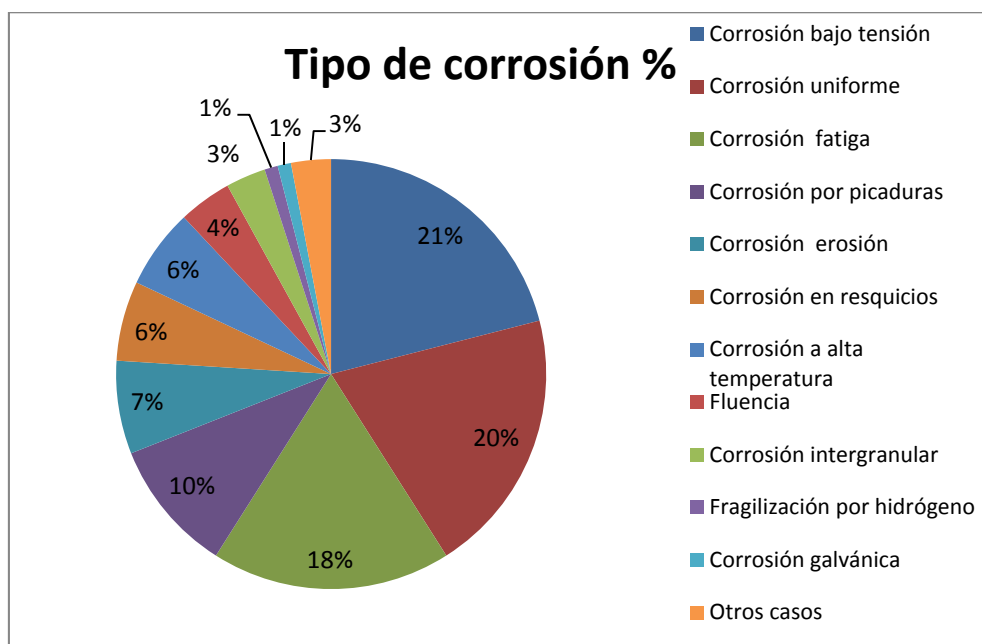


Figura 7. “Tipo de corrosión en porcentaje en plantas químicas”

A partir de los datos de la figura 7, se sitúa la corrosión bajo tensión, la uniforme y fatiga como los principales tipos de ataque que, equivalen a casi un 60% del total, suponiendo el principal problema de la industria química. Los tipos de corrosión se describirán más a fondo y de forma individual a lo largo de este capítulo.

2.2.1- Corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente de la destrucción de los metales y aleaciones. El mecanismo de corrosión es de naturaleza electroquímica. El electrolito es una capa de humedad sobre la superficie del metal cuyo espesor varía desde capas muy delgadas (invisibles) hasta capas que ocupan varios cm del metal. La gravedad del proceso de corrosión depende, sobre todo del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica.

Como el mecanismo de corrosión es electroquímico, su característica principal es la presencia de un proceso anódico y otro catódico, con un electrolito de resistencia óhmica determinada. En el proceso anódico el metal se disuelve en el electrolito, en el que la concentración se eleva hasta la precipitación de un compuesto poco soluble. La resistencia óhmica entre las zonas anódica y catódica de las minúsculas pilas de corrosión que se distribuyen sobre el metal es grande cuando el espesor de la capa de humedad es pequeño.

La corrosión atmosférica depende del tipo de atmosfera en el que el material se encuentra, pudiéndose diferenciar entre atmosfera rural, urbana, industrial, alta temperatura... caracterizándose por:

- **Atmosfera rural:** En este ambiente la corrosión atmosférica es la menor de todas y se caracteriza por niveles de compuestos ácidos muy bajos.
- **Atmosfera urbana:** La corrosión atmosférica es mayor que en la rural estando fuertemente influenciado por la contaminación y las causas que esto provoca. La influencia de la contaminación se desarrolla en el apartado (2.4.4) de este documento
- **Atmosfera industrial:** Esta atmosfera contiene muchos compuestos sulfurosos, nitrosos además de otros agentes ácidos que facilitan la corrosión en los metales. Además, esta atmosfera suele tener partículas transportadas por el aire que producen un aumento en la corrosión. La influencia de la contaminación por lo tanto, también está presente en la industria.
- **Alta temperatura:** Esta atmosfera es más particular de la industria y en esta ocasión los gases a muy altas temperaturas pueden reaccionar sin la presencia de un electrolito. Esto se debe a que se forma una película o pequeña capa sobre el metal de electrolito (gas). Empañamiento, Escamamiento o corrosión por altas temperaturas es el nombre común que recibe este efecto.

2.2.2- Corrosión marina

La mayoría de los sistemas metálicos cuando están expuestos a la atmósfera salina de cloruro sódico, propia del ambiente marino húmedo (hasta 2,5 – 3 km del litoral) y en presencia de oxígeno, sufren alteraciones químicas estructurales basadas en fenómenos de oxidación-reducción. Estos cambios químicos acaban por desembocar en un proceso de desintegración conocido comúnmente como corrosión.

El tiempo necesario para que comience a desencadenarse el proceso de corrosión, depende de la composición de los metales, la temperatura, el grado de humedad, la concentración de sales, presencia de otros contaminantes, etc., y del grado de protección de los acabados.

El sector marítimo es el segundo más dañado por la corrosión por detrás del transporte. La figura 8 es un ejemplo de una estructura en ambiente marino afectada por la corrosión y muestra el aspecto típico de este tipo de corrosión.



Figura 8. “Corrosión marina”

2.2.3.- Influencia de las condiciones meteorológicas

La característica atmosférica más importante que se relaciona directamente con el proceso de corrosión es la humedad, que dota del electrolito necesario en el proceso electroquímico.

La figura 9 muestra la relación que existe entre la corrosión atmosférica y el espesor de la capa del electrolito sobre la superficie metálica. Se observa que en espesores pequeños la corrosión no existe, pues la resistencia óhmica de la capa del electrolito sobre la superficie metálica es muy grande y la disolución del metal es difícil. Al aumentar el espesor disminuyen la resistencia de la capa del electrolito y la polarización catódica, lo que origina un aumento en la velocidad de corrosión hasta que alcanza un nivel máximo, que disminuye después con el aumento del espesor. En esta zona, la reacción catódica es determinante en el proceso de corrosión; el factor óhmico y la polarización anódica pierden importancia, pues la difusión de oxígeno en la superficie metálica es muy lenta y, por tanto, determinante del proceso global.

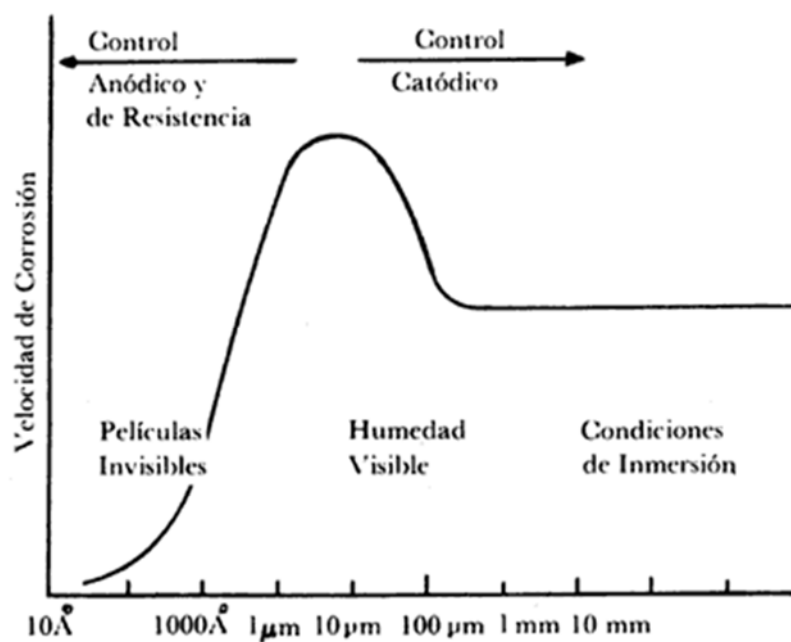


Figura 9. “Influencia del espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión” (8)

Esto nos permite comprobar la importancia del conocimiento de las causas y los factores que influyen en la formación de películas de humedad sobre la superficie metálica. La causa más importante es la precipitación atmosférica (en forma de lluvia o niebla espesa). Existe también la condensación de humedad, que se origina cuando la humedad relativa de la atmósfera sobrepasa el 100%. Es importante mencionar también la condensación por adsorción, la condensación capilar y la condensación química.

2.2.4.- Influencia de la contaminación

Se puede definir la contaminación atmosférica como "la presencia en el aire de sustancias extrañas, sean éstas gaseosas, sólidas o la combinación de ambas, en cantidad y durante un tiempo de permanencia que puede provocar efectos nocivos para la salud humana y un deterioro de los bienes de uso y del paisaje".

En relación a su toxicidad, los contaminantes producen efectos nocivos en el ser humano y su medio ambiente, como irritación en los ojos, nariz y garganta. Además, atacan a muchos metales y materiales de construcción, deterioran equipo eléctrico, superficies pintadas, etcétera.

Los contaminantes atmosféricos de mayor importancia son: partículas suspendidas totales, ozono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. Los agentes contaminantes inorgánicos son generados por los vehículos y las industrias; los orgánicos, por los basureros. Las centrales termoeléctricas, las refinerías y las fábricas de papel contribuyen con el 85% del SO_2 en la atmósfera; los automóviles con un 95% de CO, en el caso de la ciudad de México (9).

Esto implica, por consiguiente, la necesidad de medir la cantidad de los distintos contaminantes dispersados dentro de la capa de aire; puede lograrse usando equipo adecuado o mediante el uso de los modelos de difusión de gases contaminantes.

La concentración de los contaminantes se mide en partes por millón (ppm o mg/m^3) o en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Cada contaminante tiene un tiempo específico de exposición. La figura 10 es una imagen de una fábrica y el contraste de la contaminación producida con el aire despejado.



Figura 10. “Fábrica contaminante”

2.3.- Tipos y morfologías que presenta la corrosión

Una vez definida la corrosión, podemos estudiarla agrupando sus distintas tipologías, basándonos en la morfología del ataque. Con este criterio generalmente se identifican 12 formas distintas, que pueden aparecer de forma única o combinando varias a la vez en una misma pieza metálica.

La figura 11 es un esquema, donde vamos ya a diferenciar dos aspectos de inicio que distinguen a esta variedad de tipos de corrosión, como son el tipo de ataque que sufre el metal (a partes localizadas o a toda la superficie completa), y el nivel a escala del ataque; ya sea macroscópico (se identifica el ataque) o microscópico (se requiere de instrumental apropiado).

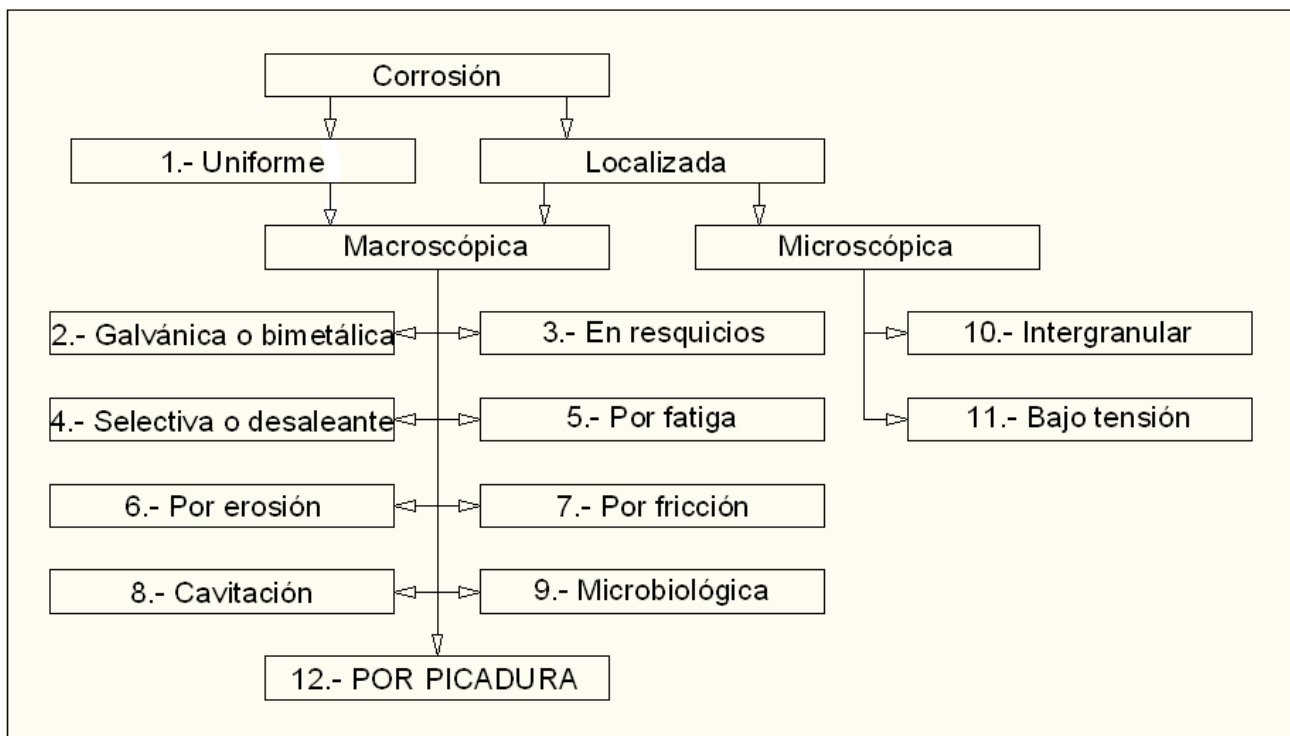


Figura 11. “Esquema de tipología de corrosión”

No obstante esta clasificación es aproximada, pues, los estados iniciales a veces pasan desapercibidos y se resaltan macroscópicamente cuando el proceso ha avanzado notablemente en el interior del material o la macroscópica no ha permitido identificar. A continuación se presentan estas tipologías de forma más detallada.

2.3.1.- Corrosión uniforme o generalizada

El sistema metálico es atacado por toda su superficie uniformemente; así, esta superficie ya no tiene la misma composición que su matriz, y crea así una capa externa con distintas propiedades. Además, esta forma de corrosión es la más común de todas las que vamos a tratar. El aspecto es el que se muestra en la figura 12, en donde se reflejan los óxidos superficiales de distintas coloraciones en una chapa de acero. Estas coloraciones son debidas a las diferentes acumulaciones químicas de los productos de corrosión: hematites, magnetitas y wüstitas.



Figura 12. “Pieza de hierro con corrosión generalizada”

Cuando un metal es corroído de esta manera, nos permite calcular fácilmente la cinética de pérdida de material que va a sufrir y, por ello, facilitar el dimensionamiento de una pieza y el cálculo dimensional de estructuras metálicas. Esto se debe a que al igual que toda la superficie es corroída, también en profundidad se mantiene una penetración homogénea. De esta forma se puede calcular la vida útil de un sistema metálico en el caso de sufrir este tipo de ataque.

Para poder proteger una pieza de este tipo de corrosión, la recubriremos con una capa impermeable que impida el contacto con agentes agresivos específicos para ese material (normalmente pinturas específicas) aunque hay casos en que no es necesario, ya que el metal se protege solo, como los aceros Corten que son utilizados para fines estéticos y facilitando el ataque para así, mostrar este tipo de corrosión por toda su superficie.

En la mayoría de los casos, la capa de óxido, u óxidos de distintas estequiometrias superficial no protege al metal y ésta, se va deteriorando con el tiempo; pero hay casos más especiales que surgen cuando generan una superficie llamada “capa de pasivación”. Esta superficie que se genera es una capa de óxido que genera el metal en contacto con el medio y protege al material impidiendo que la oxidación se extienda o penetre más y por lo tanto, detiene la cinética de corrosión que sufre.

Entre los sistemas metálicos que se pasivan destacan los aceros inoxidables (Figura 13), aluminio (Figura 14), las aleaciones de titanio, berilio, etc.



Figura 13. “Pieza de acero inoxidable pasivada”



Figura 14. “Pieza de aluminio pasivada”

En el caso del acero inoxidable, como el soporte que vamos a estudiar en este proyecto, la capa superficial que crea, impide que el material se corroa en la mayoría de electrolitos. El cromo junto al níquel y molibdeno que lleva el acero inoxidable, reaccionan con el ambiente generando una capa protectora. Hasta que esta capa no se desprenda, por algún medio agresivo o físico, el acero inoxidable no perderá esta resistencia tan elevada a la corrosión.

Ahora bien, esta capa protectora está muy vinculada con la corrosión por picadura y extenderemos la información en el capítulo “2.4.- Corrosión por picadura”.

Otra capa protectora habitual, es en el caso del aluminio, en el cual la alúmina (óxido de aluminio) protege al sistema metálico en numerosos ambientes.

2.3.2.- Corrosión galvánica o bimetálica

La corrosión galvánica surge con el contacto eléctrico entre dos metales distintos. Por ello, siempre y cuando dos metales al tener diferente electronegatividad estén en contacto, uno de ellos se va a corroer, a éste lo llamaremos ánodo. El otro metal, no se corroerá y recibe el nombre de cátodo. Que un metal sea ánodo o cátodo, depende de su actividad electroquímica; la cual está tabulada en las series galvánicas y electroquímicas.

Los metales más inactivos, los más nobles, son los que mayor potencial eléctrico (E^0) tienen y, por tanto suelen actuar como cátodo; por ejemplo el oro y el platino. Por contrario, los activos son los de menor potencial, como hemos llamado, ánodos; metales como el zinc, aluminio, magnesio. Cuanta mayor diferencia de potencial eléctrico (en valor absoluto) haya entre los dos metales, más rápidamente se va a corroer el ánodo.

Las siguientes figuras 15 y 16 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
$Bi_2O_3 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons 2BiO^+ + 2H_2O$	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

Figura 15. “Serie electroquímica, parte 1/2”

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

Figura 16. “Serie electroquímica, parte 2/2”

La figura 17 son diferentes ejemplos muy comunes y reales de corrosión galvánica o bimetálica:

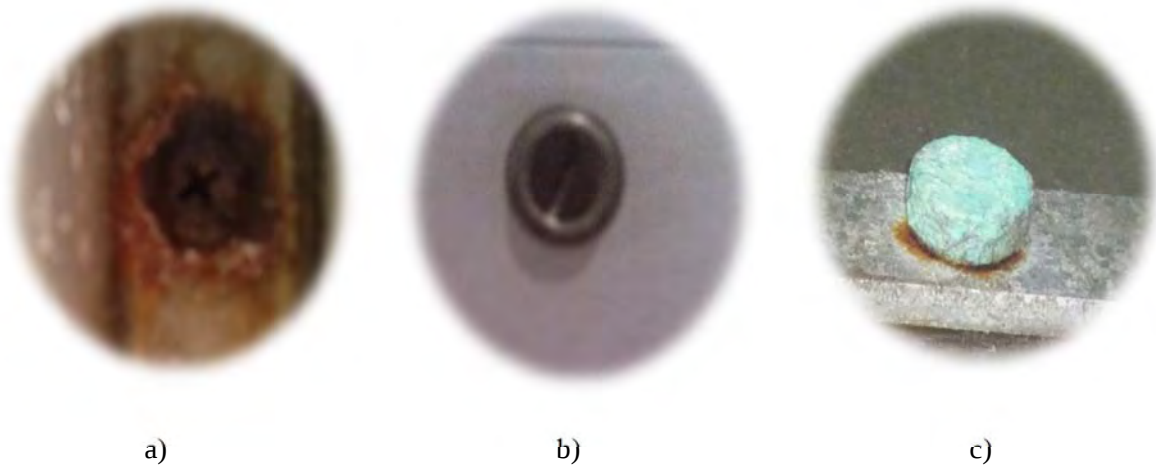


Figura 17. “Ejemplos de corrosión galvánica”

En este caso las imágenes mostradas en la figura 17 son:

- a) Par galvánico hierro – acero inoxidable
- b) Par galvánico aluminio- acero al carbono
- c) Par galvánico acero inoxidable – cobre

Por lo tanto, si tenemos que unir distintos metales y no queremos que se deteriore alguno de ellos, tendremos que intentar usar materiales lo más próximos en la tabla galvánica o serie electroquímica (para que la oxidación sea lo más lenta posible) o, aislarlos eléctricamente (con una junta aislante como se ve en la figura 18).

A pesar de la tendencia electroquímica de los metales, para poder distinguir en una unión quien será el ánodo y el cátodo, tenemos que mantener una cierta relación de áreas; ya que si el ánodo es mucho más pequeño que el cátodo, la densidad de corriente de corrosión que marca la cinética del ataque, es muy elevada, y el ánodo se corroerá rápidamente.



Figura 18. “Abrazadera isofónica para tuberías de cobre”

También hay ciertos casos en que nos conviene o nos aprovechamos del efecto de la corrosión galvánica; como es en el caso de los pares galvánicos usados como “Termopares”; dispositivos que están formados por dos materiales con diferente potencial que, al calentarse, varía el potencial que están generando. La figura 19 recoge la forma y disposición de los elementos que lo forman. Al medir esa diferencia y, comparándolo con una tabla de valores referenciada, tendremos la medición de temperatura. Este proceso se puede usar en otros ámbitos totalmente diferentes en el campo de la experimentación como puede ser alimentar un satélite por medio de un generador termoelectrónico de radioisótopos donde, al calentar unos termopares, se genera la energía eléctrica. “Efecto Seebeck” se llama al “El efecto termoelectrónico es la conversión directa de la diferencia de temperatura a voltaje eléctrico y viceversa”

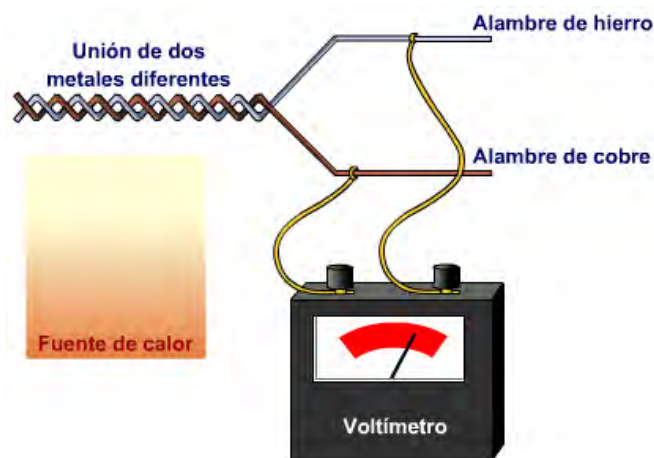


Figura 19. “Ejemplo de un termopar”

2.3.3- Corrosión en resquicios

La corrosión en resquicios es aquella que surge en las zonas de los metales mal aireadas y angulosas como se aprecia en la figura 20, perteneciente a la parte inferior de los casquillos que se estudiarán.



Figura 20. “Corrosión en resquicios que se aprecia en la parte inferior de los casquillos”

Entendemos por zona mal aireada a la cual el oxígeno no llega de forma directa, zonas de grietas o hendiduras, y eso provoca zonas de aireación diferencial. La reacción del material difiere, por lo tanto en la zona externa e interna de este tipo de superficie y se generan celdas electrolíticas en donde el interior es más activo (menor potencial) y comienza el proceso de la corrosión. La zona angulosa, es aquella que, por su geometría, surgen aristas vivas o con ángulos muy grandes o muy pequeños como vemos en la figura 21. Esto supone la generación de zonas de mala aireación (ángulos exteriores muy pequeños) y zonas de mayor potencial (en caso de ángulos exteriores muy grandes; puntas). Ambos casos, provocan un mayor potencial localizado y potencia la corrosión.

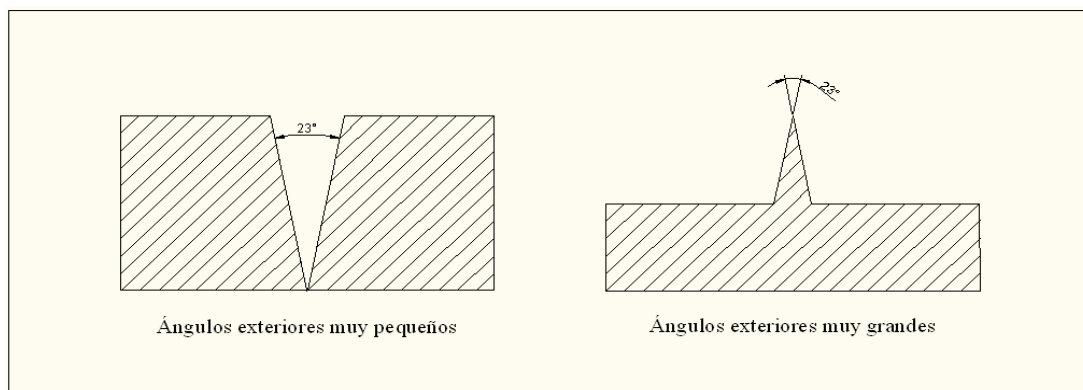


Figura 21. “Zonas propensas a corrosión en resquicios”

También este tipo de corrosión, es debido a una acumulación de electrolito y a una situación en zona de mala aireación, siendo por ello, la geometría de la pieza y el diseño, las claves para poder evitar este tipo de corrosión. Las medidas más frecuentes a adoptar para minimizar el riesgo de corrosión en resquicios son:

- Evitar ángulos de 90° o inferiores; nos permitirá reducir la corrosión en esa zona angulosa. Un canto redondeado será menos susceptible a corroerse que un canto vivo.
- Evitar uniones atornilladas y remachadas; empleando uniones soldadas o adhesivas.
- Favorecer el drenaje del electrolito a través del metal y evitar su estanqueidad.
- Reducir la humedad, aislar bien las juntas para que no haya orificios y limpiar el material.

Su aspecto es muy semejante al de picadura, pero el origen es diferente, la picadura se extiende por la pieza en puntos localizados; pero la corrosión en resquicios sólo aparece en puntos angulosos, zonas solapadas y en zonas de acumulación de electrolito. En las figuras 22 y 23 se ven dos ejemplos de zonas con mala aireación, para el caso particular del acero inoxidable.



Figuras 22 y 23. “Ejemplos de zonas propensas a corrosión en resquicios”

El aluminio y el titanio son dos grandes elecciones para enfrentarnos a este problema, ya que su resistencia a este tipo de ataque es muy elevada.

2.3.4.- Corrosión selectiva

La corrosión selectiva ataca a uno de los elementos químicos, o fases de una aleación metálica provocando la aparición de zonas porosas y un empobrecimiento de las propiedades de la aleación en particular mecánicas y de resistencia a la corrosión. La figura 24 es un ejemplo de este tipo de corrosión que experimenta el latón, en el proceso conocido como descincificación, o pérdida selectiva del Zn de la aleación que se puede ver a escala microscópica.

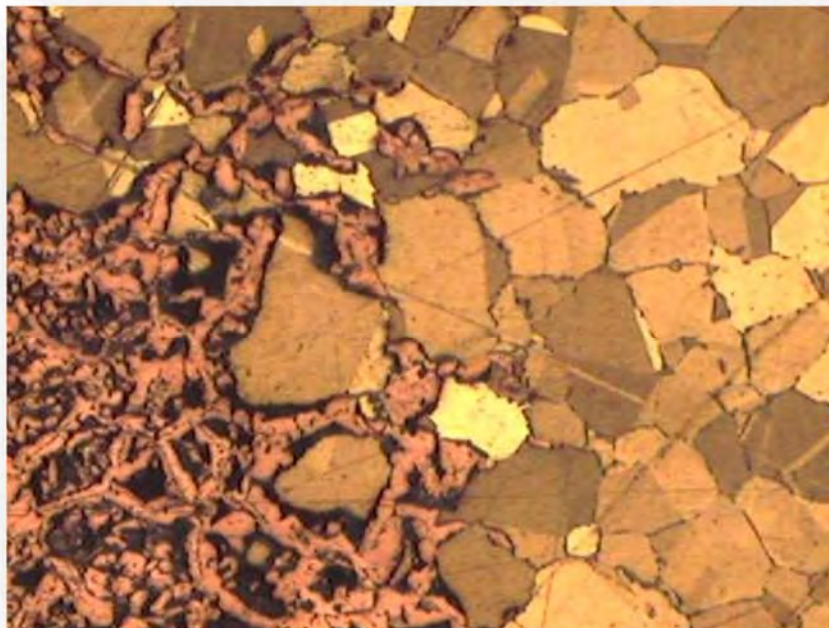


Figura 24. “Corrosión selectiva del latón” (10)

El descincado del latón es el mejor ejemplo de este tipo de corrosión, donde, con la influencia del agua de mar, el zinc se separa del cobre. Por tanto, nos quedaría una base de latón empobrecida de zinc; lo cual, aquí nos iniciará un proceso galvánico hasta la oxidación completa de la pieza.

Para poder prevenir este tipo de corrosión, deberemos reducir la cantidad de zinc en los latones, o añadir elementos aleantes que no permitan que el zinc se disuelva, y pueda alearse con ellos.

La aparición de la corrosión selectiva no es muy variada, siendo acusada en el caso del latón, de la fundición gris, proceso de grafitización, y en aleaciones a elevada temperatura.

La figura 25 también ha sufrido este proceso de corrosión siendo este el aspecto que muestra la fundición gris ante una corrosión selectiva en donde se produce un ataque selectivo, debido a la grafitización, definiéndose ésta como:

“Grafitización: Proceso de corrosión que provoca un deterioro en componentes de fundición, cuando los elementos constituyentes son lixiviados de forma selectiva o son convertidos en productos de corrosión, sin alteración del grafito” (11)



Figura 25. “Pieza de fundición gris corroída”

Un caso de corrosión selectiva también ocurre en el acero inoxidable, donde sólo reacciona el cromo con el medio para formar su capa pasiva y protectora. De esta forma, al igual que con el resto de capas pasivas, la corrosión provoca un efecto positivo y deseable manteniendo lejos el aspecto no beneficioso de la corrosión.

2.3.5.- Corrosión fatiga

La corrosión fatiga aparece en materiales metálicos que trabajan en un ambiente agresivo, cíclico y con estados tensionales provocando que los valores de resistencia a fatiga esperados sea mucho menor de la esperada (menor ciclo de vida). De tal forma que no se puede hacer específicamente de una resistencia a fatiga, pues desaparece el valor límite, atendiendo al trabajo de las curvas de Wöhler (ejemplo en la figura 27). En la figura 26 se puede apreciar como un tornillo sometido a un régimen de esfuerzos cíclicos acaba corroyéndose sin necesidad de contactos galvánicos u otros procesos.



Figura 26. “Tornillos sometidos a fatiga”

Este fenómeno está muy asociado a la corrosión por picadura, ya que, los metales propensos a este tipo de corrosión y trabajando las características descritas, sufrirán este ataque. El metal no puede regenerar bien su capa de pasiva y será más 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.

Para poder evitar este fenómeno, deberemos elegir un material no propenso al ataque por picadura y resistente a este tipo de corrosión (como las aleaciones base Berilio, también válido para corrosión bajo tensión); en caso de que no sea posible, tendremos que reducir las tensiones de trabajo y aplicar recubrimientos superficiales adecuados. También podríamos añadir inhibidores en el electrolito y pues reducirán el ataque sobre el metal.

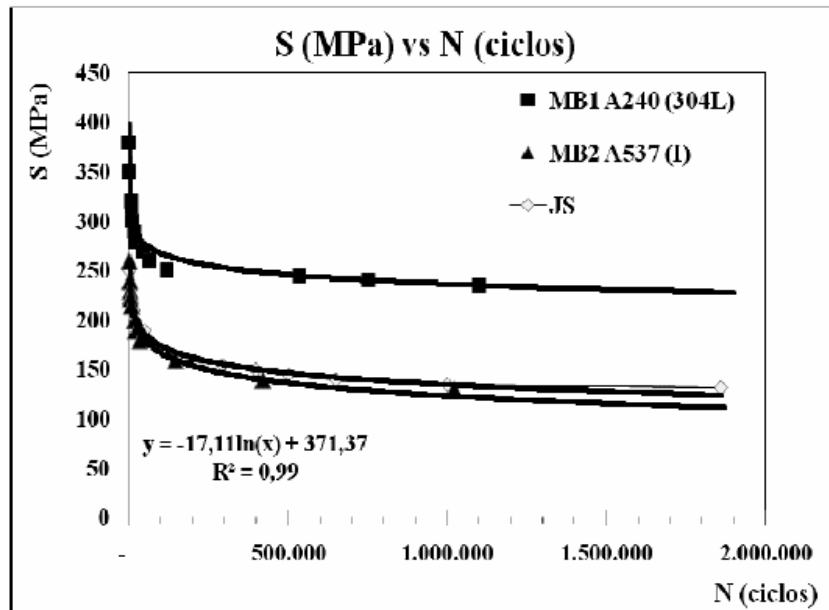


Figura 27. “Ejemplos de curva de Wöhler”

Las siguientes figuras 28 y 29 son ejemplos de engranajes corroídos y quitados del servicio debido a la aparición de este proceso corrosivo.

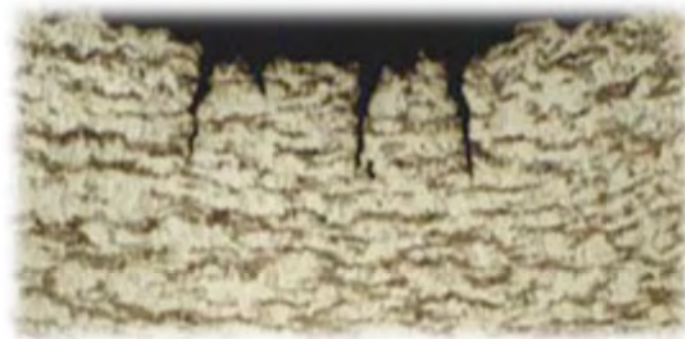


Figura 28. “Corrosión por fatiga y fisuración asociada”



Figura 29. “Engranaje fuera de servicio con defecto de fatiga”

2.3.6.- Corrosión erosión

La corrosión por erosión surge por la fricción fluido-metal. La corrosión se debe a la rotura de la capa protectora del metal al pasar el fluido (con o sin sólidos en suspensión) por encima de su superficie. El aspecto de este tipo de corrosión se puede observar en la figura 30 donde se distingue el tránsito de fluido-metal.



Figura 30. “Efecto de la corrosión erosión”

Un fluido que se arrastre a través de un metal irá provocando este fenómeno; dependiendo de varios factores para ver la importancia del daño entre los que destacan:

- La velocidad relativa entre el fluido y la superficie de metal en contacto.
- El grado de turbulencia del fluido.
- Las propiedades químicas del fluido y cómo se comportan ante el metal.
- El grado de impureza del metal.
- La cantidad de impurezas que transporte el fluido.

La figura 31 ha sido extraída del libro “Corrosión y degradación de los materiales” (4).

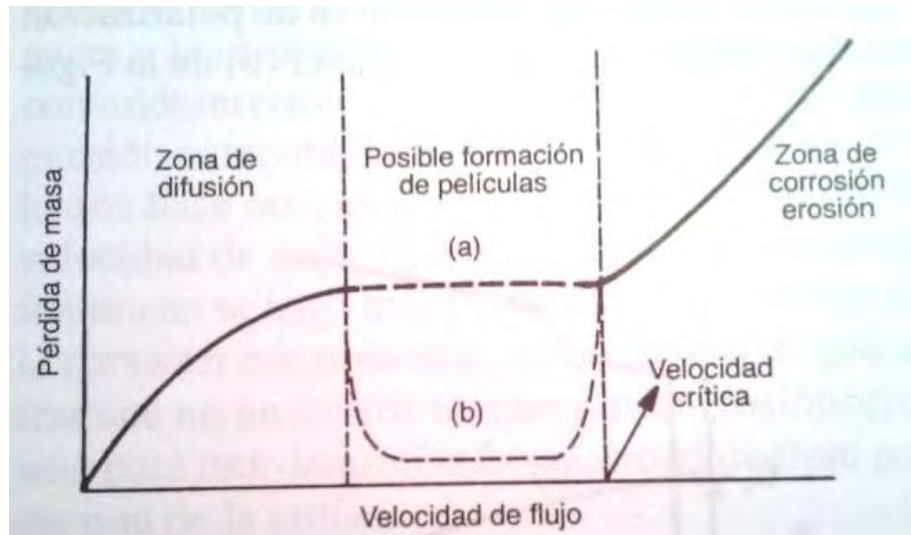


Figura 31. “Relación entre pérdida de masa y velocidad de flujo cuando el fluido no transporta sólidos en suspensión”

Al poner en relación la figura 32 obtenida del mismo autor con la figura anterior; podemos comprobar la importancia de tanto la velocidad del fluido, como la de tener sólidos en suspensión siendo los daños posibles ocasionados muy graves en el caso de tener que sustituir partes de tuberías (parada del sistema y costes de recambio e instalación).



Figura 32. ” Relación entre pérdida de masa y velocidad de flujo cuando el fluido transporta sólidos en suspensión”

El aspecto de este tipo de corrosión, es de pequeños canales que va provocando el paso del fluido, picaduras (ataques localizados en zonas de levantamiento de la capa protectora) y cavidades en la superficie de contacto con el metal. La figura 33 muestra el estado en el que puede acabar una pieza sometida a erosión sin la protección adecuada. En este caso particular se produce un levantamiento de la capa protectora de pintura y el electrolito puede penetrar dentro de la barandilla y producir este tipo de ataque.



Figura 33. “Barandilla de acero al carbono sin mantenimiento con corrosión por erosión.
Segunda playa del Sardinero Santander”

Para evitar o reducir este fenómeno tenemos los siguientes métodos:

- Aplicar recubrimientos superficiales que aíslen el metal del fluido.
- Bajar la velocidad del fluido que circula por el sistema.
- Ayudar con el diseño a la continuidad del mismo a través de la superficie.
- Añadir filtros para evitar los sólidos en suspensión, impurezas y filtraciones.

2.3.7.- Corrosión por fricción o frotamiento

En similitud a la corrosión por erosión, el deterioro viene por el deslizamiento de una superficie metálica sobre otra, en vez de fluido con superficie metálica. El daño es provocado previamente por el contacto entre los dos metales, además, al entrar en fricción, se crea un desgaste, causando microroturas en ambas superficies metálicas, al igual que el fenómeno de corrosión. La figura 34 es un ejemplo del aspecto que presenta la corrosión por fricción en donde un rodamiento sin suficiente lubricación ha causado el deslizamiento de ambas superficies metálicas, bolas y soporte.



Figura 34. “Ejemplo de corrosión por fricción”

El daño por corrosión por fricción o frotamiento se ve agravado en este caso por:

- La velocidad de fricción relativa entre los metales y la amplitud de movimiento de la misma; localizando de esta forma el lugar donde se ocasionará el deterioro.
- La composición química de los materiales al estar en contacto (el contacto galvánico según sean los materiales puede repercutir seriamente siendo un potenciador de la corrosión).
- La fuerza de rozamiento generada (afecta más al deterioro mecánico que a la corrosión).

El daño de este tipo de corrosión se maximiza en las zonas de mayor contacto entre las superficies, y en las zonas de acumulación de residuos, causados por el desgaste mecánico del contacto de las piezas, siendo también la diferencia de áreas de las piezas en contacto otro posible agravante.

El eje que se ve en la figura 35, ha sufrido corrosión por fricción, observándose el cambio de tonalidad y el desgaste producido.



Figura 35. “Corrosión por fricción experimentada en un eje”

Reduciremos el riesgo de corrosión en las zonas afectadas si:

- Si se controla la fuerza de rozamiento generada (afecta más al deterioro mecánico que a la oxidación).
- Usamos lubricantes adecuados para los materiales que vamos a tener en fricción.
- Utilizamos membranas aislantes, para evitar o reducir los movimientos vibratorios.
- Nuestras superficies tienen buenos acabados superficiales.

La técnica del chorreado para los acabados superficiales es la más recomendable para poner en servicio una pieza que va a estar sometida a fricción. Dicha técnica consiste en un proceso para lograr buenos acabados superficiales y limpieza de piezas. Proyectando arena o el material necesario sobre la superficie del metal, desgastándola y puliéndola hasta lograr el acabado deseado. Esta técnica permite que la pintura a tratar se adhiera y nos proteja nuestro metal frente a la corrosión.

Con estas recomendaciones tendríamos también menos residuos en la zona de contacto, lo cual evitaría, en gran medida, la corrosión de nuestras superficies.

2.3.8.- Corrosión cavitación

“Se puede definir como la formación instantánea y el colapso de burbujas de vapor en un líquido debido a que en algunas velocidades, la presión desciende por debajo de la tensión de vapor que corresponde a esa temperatura. El líquido se transforma en vapor sujeto a cambios de presión rápidos intensos y localizados. El daño por cavitación es el deterioro de un material como resultado de su exposición a un fluido que sufre cavitación.” (12)

La corrosión por cavitación es un fenómeno asociado a la cavitación en sí, pero lo englobamos como un tipo de deterioro que sufre la pieza por el origen del daño. Por causa de la cavitación, la capa pasiva del metal se desprende de la matriz; el metal, intentará generar esa capa de nuevo, pero aparecerán pares galvánicos entre la capa de óxido desprendida y la matriz presente, manteniendo la pieza sin protección y deteriorándose así por oxidación y cavitación cada vez de una forma más agresiva. En la figura 36 podemos apreciar los impactos y el deterioro causado por la cavitación.



Figura 36. “Ejemplo de corrosión por cavitación”

Este efecto surge en las turbinas, hélices, válvulas, etc. normalmente en piezas enganchadas a ejes motores sumergidos en un fluido líquido y a grandes revoluciones. Para poder prevenir este efecto las medidas más eficaces son:

- Tener un buen diseño que evite zonas por donde el fluido circule a grandes velocidades.
- Aplicar pinturas y tratamientos superficiales que nos ofrezcan mayor resistencia mecánica.

Otro ejemplo de corrosión por cavitación es la figura 37 en donde las hélices ya han sido casi completamente deterioradas.



Figura 37. “Corrosión por cavitación experimentado por una hélice”

2.3.9.- Corrosión microbiológica

La corrosión microbiológica se refiere a la corrosión provocada por la presencia y actividades de los microorganismos presentes en las biopelículas de la superficie del material corrosivo.

La mayoría de los materiales, incluyendo metales, polímeros, vidrio y cerámica pueden ser degradados de esta manera. Una serie de organismos microbiológicos, en particular las bacterias, los hongos y las algas, han sido asociados a los daños de corrosión en los sistemas de aguas.

Los diferentes tipos de microbios tienden a actuar de manera sinérgica en la corrosión de los materiales con sus interacciones que suelen ser de naturaleza compleja

Estos microorganismos pueden influir en la corrosión por efectos tales como celdas de aireación diferencial, la producción de especies corrosivas, tales como minerales y ácidos orgánicos, amoníaco, y la reducción del sulfato a sulfuro.

El aspecto que puede tomar este tipo de ataque de bacterias, algas u hongos es semejo al de la figura 38.



Figura 38. “Corrosión microbiológica”

Una celda de aireación diferencial se puede considerar, incluso para una pequeña colonia de microorganismos por lo cual, el área directamente debajo de la colonia se convertirá en el ánodo y la superficie metálica a las afueras de la zona de contacto, apoyará la reducción de la reacción del oxígeno, y se convertirá en el cátodo. La disolución del metal se producirá en el depósito de los microorganismos.

Algunas bacterias reductoras de sulfato, SRB, producen sulfuro de hidrógeno con frecuencia producen daños en tuberías de alcantarillados. Los depósitos microbianos pueden producir los componentes que van a cambiar el medio ambiente local y por lo tanto inducirá a la corrosión.

En condiciones anaeróbicas, algunas bacterias pueden reducir el ión sulfato para producir oxígeno y el ion sulfuro. El ión sulfuro se combina con los iones ferrosos para formar sulfuro de hierro y superficie del metal se disuelve.

El oxígeno producido reacciona con el hidrógeno para formar moléculas de agua. Los iones de hidrógeno se producen, junto con los iones hidroxilo, por la descomposición del agua, y los electrones para formar hidrógeno atómico de los iones de hidrógeno que son producidas por la oxidación del hierro atómico. La reacción es por lo tanto en varias etapas, la disociación del agua y las reacciones anódicas bacterianas. La fuente de electrones es la oxidación del metal, mientras que el sumidero de electrones es la reducción de los iones de hidrógeno.

La reacción más común de las tipologías de este ataque es la reacción sulfato-sulfuro, provocado por las bacterias sulfatoreductoras (SRB) y recogida y mostrada a continuación en las ecuaciones (5) y (6):



La corrosión microbiológica es una de las ramas menos desarrolladas y conocidas de todas las tipologías de corrosión suponiendo un campo de investigación muy importante en el cual hay varios expertos de reconocimiento mundial como son Paul Linhardt, W. Sand y P. Wagner.

2.3.10.- Corrosión Intergranular

La corrosión intergranular es otra forma de ataque localizado que puede afectar a un sistema metálico pero a diferencia de todos los casos anteriores, este surge a nivel microscópico, centrándose en el límite de grano como se muestra en la micrografía de la figura 39.

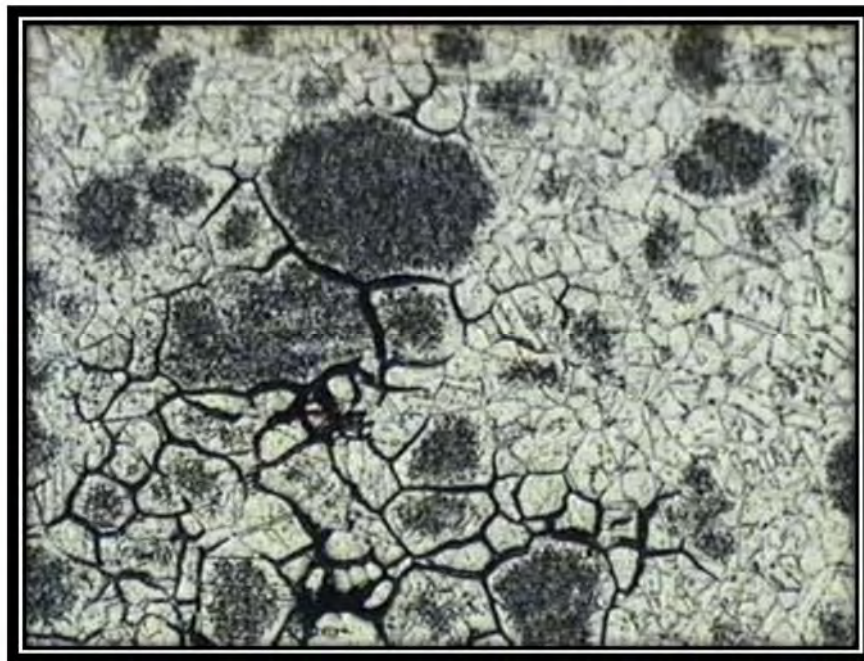


Figura 39. “Micrografía de un ejemplo de corrosión intergranular experimentado por acero inoxidable AISI 304”

Este tipo de ataque puede ser provocado por las siguientes causas principalmente:

- Por pequeños microefectos bimetalicos en sistemas metálicos ya que el borde de grano tiene otra composición distinta que el grano y más reactiva, debido a su elevada actividad energética al estar repleta de dislocaciones.
- La presencia del cromo en las aleaciones puede empobrecerse o enriquecerse en el límite de grano, dañando seriamente a las propiedades mecánicas del material. Esta morfología ataca seriamente a los aceros inoxidables austeníticos de la serie AISI 300.
- Por ataques de ácidos a la pieza. Este efecto, a veces puede ser deseado para el estudio del material; ya que al hacer reaccionar el límite de grano con un ácido, éste rápidamente se corroerá y nos permitirá ver directamente su estructura microscópica.

Para poder evitar la aparición de este tipo de corrosión, en el caso del acero inoxidable, tendremos varias opciones:

- 1.- Volver a disolver el cromo (carburo de cromo) en tratamientos de alta temperatura (550-800°C) y aplicar un enfriamiento.
- 2.- Añadir elementos que reaccionen con el carbono del acero y no pueda el cromo combinarse para crear el carburo. El niobio y el titanio se añaden en las aleaciones dando lugar a los aceros 347 y 321 respectivamente.
- 3.- Limitar el contenido de carbono en el acero por debajo del 0,02% para que éste no tenga oportunidad de combinarse con el cromo. En el caso de los aceros inoxidables se forma por precipitación de carburos de cromo en el límite de grano creando ánodos en la zona adyacente empobrecida en cromo.

Por lo cual, la presencia del cromo en el acero nos da el apellido de inoxidable, pero siempre trae consigo otros problemas; de ahí la gran variedad y versatilidad en los casos del acero y la importancia del estudio de todas las variantes del mismo. La figura 40 muestra el aspecto de la corrosión de una sección en un tubo de escape.

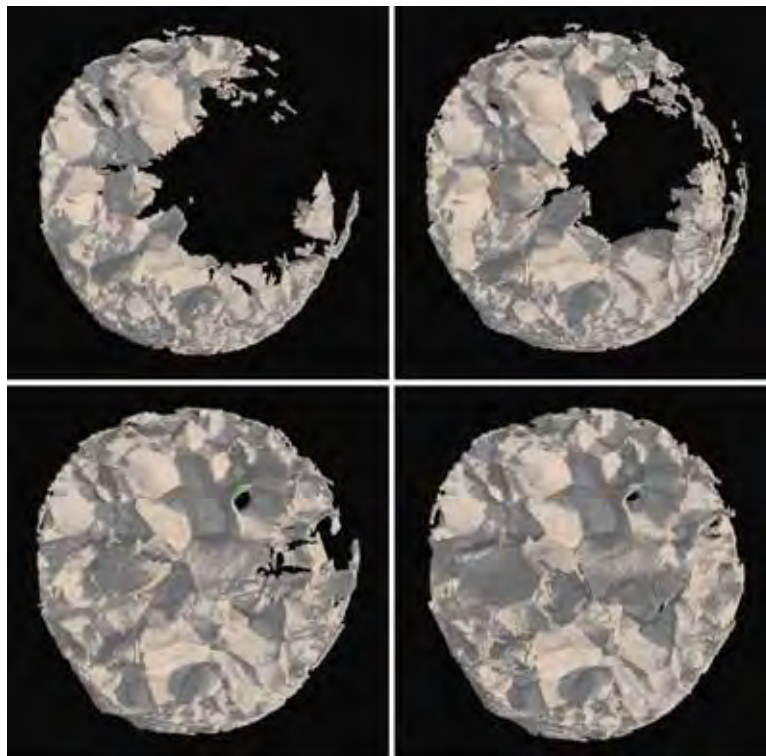


Figura 40. “Ejemplo de evolución en acero inoxidable 304”

2.3.11.- Corrosión bajo tensión (CBT)

La corrosión bajo tensión, o CBT, provoca que un material se fisure y rompa muy por debajo de la tensión de diseño, y aparece únicamente en metales sometidos a un estado tensional elevado, o tensiones residuales en un ambiente específico para ese material. Para observarla necesitaremos tomar micrografías de la pieza como se muestra en la figura 41.

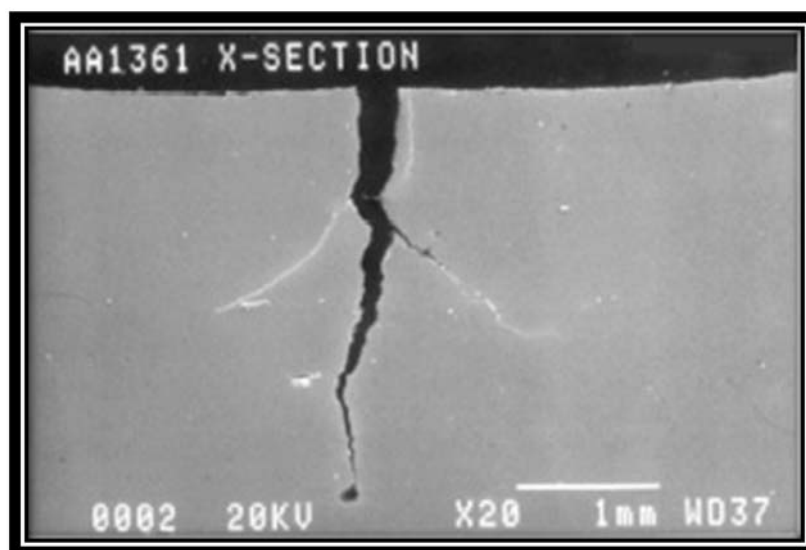


Figura 41. “Radiografía de corrosión bajo tensión”

Esta corrosión surge cuando simultáneamente la pieza está sometida a un estado tensional (no cíclico) y se encuentra en un medio corrosivo (específico para el metal); por lo tanto, si una de estas premisas no se da, tampoco aparecerá esta corrosión.

Normalmente se ve la CBT como pequeñas fisuras superficiales que se extienden hacia el interior de la pieza y se ramifican dentro de ésta. Hoy en día se están buscando técnicas de medición y observación para conocer este fenómeno a través de las fisuras que se originan.

Para poder reducir la CBT tendremos que reducir la tensión sobre la pieza y las tensiones residuales que tenga. También podemos aplicar revestimientos superficiales y eliminar cualquier electrolito agresivo sobre la superficie. Usar un material adecuado para el ambiente y diseño del trabajo es otra de las primeras opciones que deberían contemplarse.

Una vez el ataque se ha globalizado, puede presentar aspectos como el que muestran las barras de acero corrugado de la figura 42.



Figura 42. “Barras de acero corrugado bajo tensión en hormigón carbonatado”

En el caso del hormigón, la carbonatación puede desencadenar el proceso de corrosión, debido a que el descenso de pH que provoca hace posible el paso de las armaduras del estado pasivo al activo, quedando en el estado de la figura anterior. La figura 43 muestra unas grietas de corrosión que se analizarán en este Proyecto Fin de Carrera.

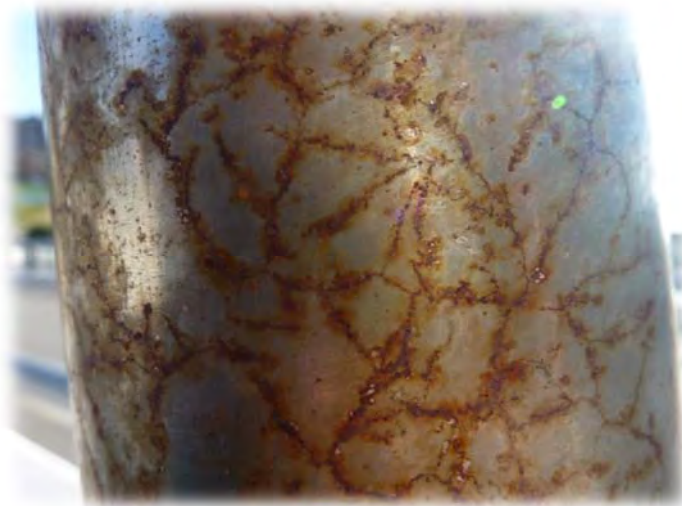


Figura 43. “Grietas de corrosión en Puente Juan José Arenas”

2.4.- Corrosión por picadura

La corrosión por picadura es el ataque localizado que experimenta un metal mediante un proceso de nucleación y crecimiento. En esos puntos, la capa pasiva no se puede regenerar, dando lugar a condiciones químicas locales diferentes. El ataque es interno por lo que el daño es muy elevado, además, esta tipología será el objetivo del estudio de este Proyecto.

La picadura tiene dos formas muy reconocibles. Al comenzar a corroerse, aparecen pequeños puntos en la superficie (marrones en el caso del acero), que se van extendiendo con el tiempo, tanto número como en diámetro de picadura. Después de esta primera fase, cuando el ataque de picadura sobre la superficie metálica está muy extendido, se comienzan a ver “hilos” de óxido por toda la superficie, hasta que el volumen de los óxidos acabe recubriéndola.

Las siguientes figuras (44, 45, 46) son tomadas de los casquillos del Puente Juan José Arenas y muestran como es el desarrollo en diferentes piezas y que aspecto va tomando según el tiempo y material corroído. En ejemplo de la figura 47 es otra forma de ataque por picadura en el caso del Palacio de Deportes de Santander.

En la figura 44, se observa cómo aparecen las primeras picaduras: son pequeñas y sin ramificaciones. Además, la pieza conserva el aspecto característico de su capa pasiva.

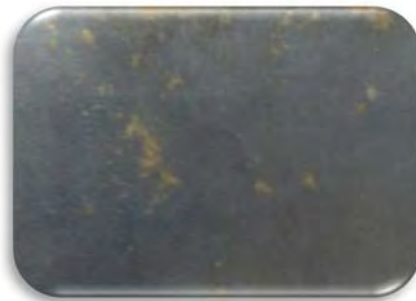


Figura 44. “Aparecen las picaduras”

La figura 45, muestra como las picaduras ya están más extendidas y comienzan a ramificarse. De la misma forma, están son más grandes y el brillo de la capa pasiva se ha perdido.



Figura 45. “Picadura extendida”

La figura 46 ya muestra un proceso más avanzado de la picadura. En este caso la corrosión está afectando a la pieza en más de un 80% y las picaduras se han extendido, agrandado de tamaño y la capa pasiva está rota.

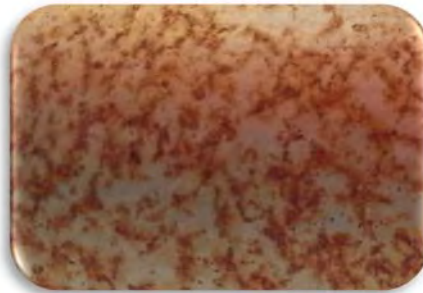


Figura 46. “Pieza corroída a más del 80%”

La figura 47, es una pieza de diferente composición a las mostradas anteriormente. En este caso las picaduras son mucho más grandes pero en menos cantidad; lo cual muestra que este tipo de corrosión puede ser muy extensa en cuanto a forma o generación.

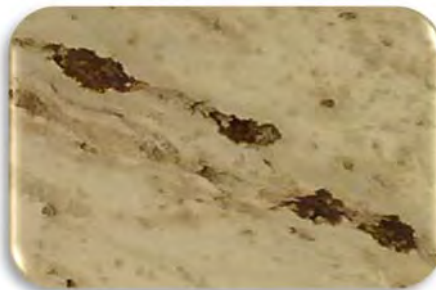


Figura 47. “Recubrimiento del Palacio de Deportes, Santander”

Las picaduras por lo tanto, suelen aparecer en defectos de los metales o debido a la rotura local de las capas de pasivación, como en el caso del acero inoxidable, por agentes agresivos, como los iones de los halógenos cloruros, fluoruros, etc... Normalmente, el cloro actúa directamente con esta superficie y es quien rompe la capa pasiva y, a partir de ese momento, la pieza comenzará a oxidarse por esos puntos localizados e internamente también (por debajo de la capa pasiva). “Estudio de la resistencia a corrosión localizada del acero inoxidable superaustenítico 24,1Cr22Ni7,1Mo en mezclas que contienen iones cloruro y cloruro-fluoruro” (13) habla del efecto de estos iones y cómo actúan. Para poder evitar este tipo de corrosión, deberemos elegir un material que no va a ser atacado en su ambiente de servicio o, uno más resistente a este tipo de corrosión (aceros con Cr, Mo y N).

2.4.1.- Métodos de medición de picadura

Para realizar la medición y estudio del avance de la picadura la norma ASMT G 61-78 (14) compara parámetros básicos de resistencia a picadura de las aleaciones férreas determinando entre otros el potencial de picadura, el cual si es alto será malo y bajo mejor. "Degradación de propiedades de un acero inoxidable dúplex debido a la precipitación de fase sigma" (15) recoge el uso de la norma para para medir los potenciales de picadura. También hay tres formas de poder medir y evaluar la corrosión por picadura atendiendo a tres factores los cuales son; el tamaño medio de picadura, el número de picaduras y la profundidad de las picaduras.

La primera forma, tamaño medio de picadura, se realizarán medidas de las picaduras anotando su evolución. Normalmente recoge picaduras desde 0,0254 cm hasta 0,254 cm de diámetro.

La segunda forma es anotando el número de picaduras por unidad de superficie existentes en una zona característica, de tal forma que, haciendo un seguimiento a lo largo del tiempo, nos dará una tasa de aparición de picaduras.

Por último, para poder medir la profundidad de las picaduras, deberemos realizar un ensayo destructivo tomando un trozo afectado por la corrosión por picadura y medir la profundidad que toman estas picaduras.

2.4.2.- Conocimiento del fenómeno de corrosión por picadura atendiendo a los distintos criterios de cuantificación

Hay métodos aplicados como el API 579 (16) para la evaluación de la corrosión por picadura, donde define la picadura como una región localizada de pérdidas de espesor que se puede caracterizar por el diámetro de la picadura y la profundidad de la misma. Para comenzar el cálculo expone que se usarán gráficos de la picadura según el diámetro y profundidad máxima en el área evaluada, al igual que el ancho de la placa como muestra la figura 48.

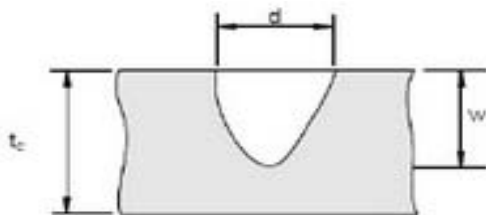


Figura 48. "Grafico API 579"

d: Diámetro de la picadura

w: profundidad de la picadura

t_c : ancho de placa

Para la evaluación del nivel 1 de este método utilizaremos las siguientes ecuaciones (7-10):

$$R_{wt} = \frac{t_c + FCA - w_{max}}{t_c} \quad (7)$$

$$R_{wt} = \frac{(t_c - w_{max})}{(t_{rd} - FCA)} \quad (8)$$

$$t_c = t_{nom} - LOSS - FCA \quad (9)$$

$$t_c = t_{rd} - FCA \quad (10)$$

Donde t_{nom} es el espesor nominal y t_{rd} es el espesor uniforme, medido en las adyacencias de la picadura. Una vez realizado el cálculo, evaluamos el valor de R_{wt} . Si es menos de 0,2 no satisface el nivel 1; si es mayor, deberemos continuar con la evaluación.

Api nos proporciona ocho gráficos como la figura 49 con diferentes grados de picadura y basándonos en el R_{wt} podremos obtener el RSF extrapolando o interpolando, se determinará:

Si $RSF > RSFa = 0,9$ el daño por picadura es aceptable.

Si $RSF < RSFa$ se recomienda reparar o cambiar el elemento.

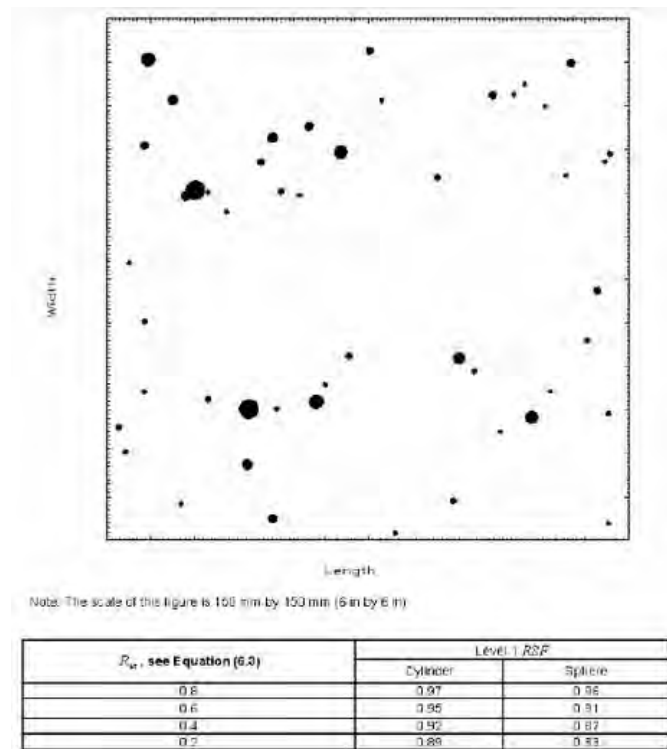


Figura 49. “Evaluación de daño API 579, grafico 1”

Otro de los ocho gráficos aportados sería el mostrado en la figura 50.

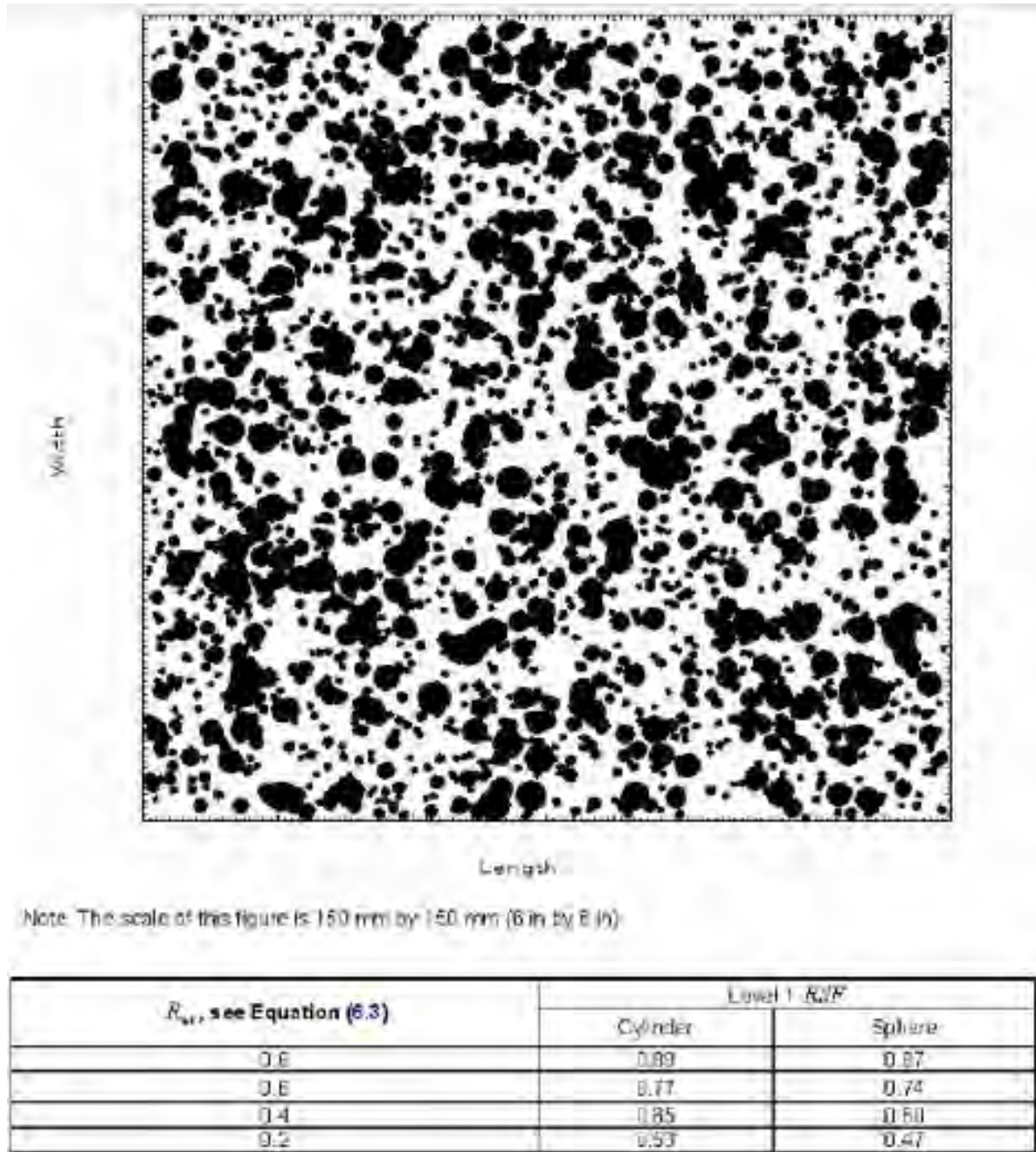


Figura 50. “Evaluación de daño API 579, gráfico 8”

Otro de los criterios, como el empleado en “Detección de la corrosión por picadura en aceros inoxidables empleando ultrasonidos”(17), habla de la posibilidad de marcar un patrón de detección de picaduras con técnicas no destructivas.

En cuanto a la modelización de la picadura, hay un nuevo estudio realizado, “Numerical investigation on torsional stress concentration factor at the semi-elliptical corrosión pit” donde Muhammet Cerit (18) no la modela como una superficie redonda, sino elíptica.

Atendiendo a un modelo de evolución de picadura, “Stochastic approach to pitting corrosion-extreme modelling in low-carbon steel” (19), recoge un modelo de evolución por picadura probabilístico.

El espesor y tamaño de picadura, también se estudia en otros casos de corrosión, como por ejemplo, G. Fernández, J. I. Verdeja, J. A. Perosanz en su estudio “Corrosión por picaduras en una tubería de acero”(20), donde tratan el valor de las picaduras de gran tamaño entre los valores de anchura, 80 y 90 mm y profundidades de más de un milímetro. En comparación con el estudio que se realizará en este Proyecto Fin de Carrera, se obtendrán valores semejantes en las picaduras más grandes, que se denominarán, Colapso de picadura.

Por último, dependiendo del material, la corrosión por picadura puede tener mayor o tener tendencia a aparecer, situando el Acero inoxidable AISI 316, en el estudio de L. S. Conde (21) como el más susceptible a presentar corrosión por picadura en su tesis, “Medida de susceptibilidad a la corrosión por picaduras en aceros inoxidables austeníticos”, por detrás de otros como el AISI 304.

A continuación, se muestra la metodología de trabajo empleada en este estudio y creada por el autor para este Proyecto Fin de Carrera.

Capítulo 3

Metodología de trabajo

En este capítulo se expondrá el protocolo de trabajo empleado para el desarrollo del Proyecto Fin de Carrera, así como la metodología empleada y creada específicamente para este estudio.

3.1.- Ubicación y planteamiento

El “Puente Juan José Arenas” está situado en Santander (España), construido por el ingeniero de caminos, Juan José Arenas a menos de dos kilómetros del mar Cantabrico y es la fuente de estudio de este documento. Su construcción fue finalizada el 19 de mayo de 2011 y, en dos años, ya presenta un aspecto nada deseado, desde el punto de vista de la corrosión.

Este puente de arco atirantado supone la unión de la Avenida Constitución con Bajada Polio y el campus universitario de Cantabria, tanto para vehículos como peatones. Por debajo de él se encuentra la Vaguada de las Llamas, una zona de aguas estancadas y con influencia marina.

Esta descripción conlleva a una consideración inicial de cuatro factores influyentes, que pueden potenciar la corrosión, como es el tráfico de vehículos, el contacto y acción humana, las condiciones climatológicas y la influencia marina.

Usando los programas “Google maps” (21) y “Google earth” (22) podemos ver una referencia visual de su situación más exacta haciendo tres zoom respecto a España, Santander y del mismo, obteniendo las figuras (51 a 55) respectivamente.

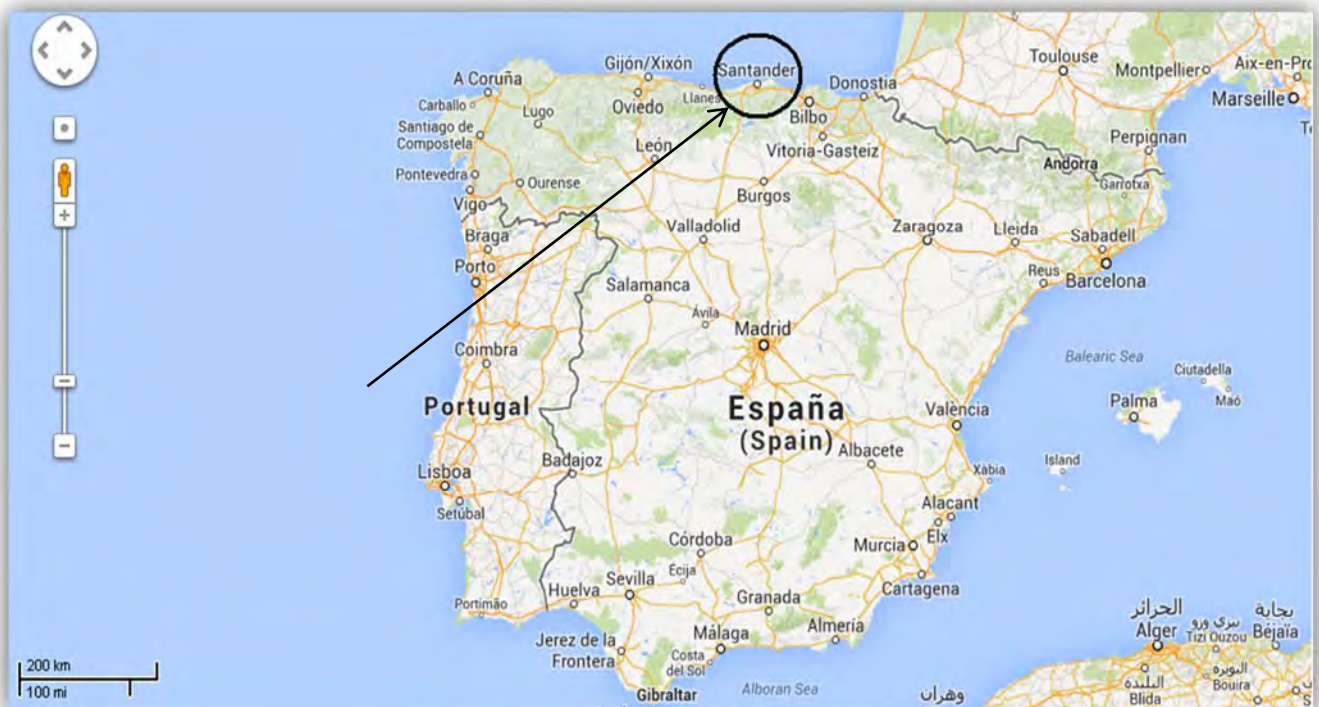


Figura 51. “Ubicación del Puente con referencia a España”

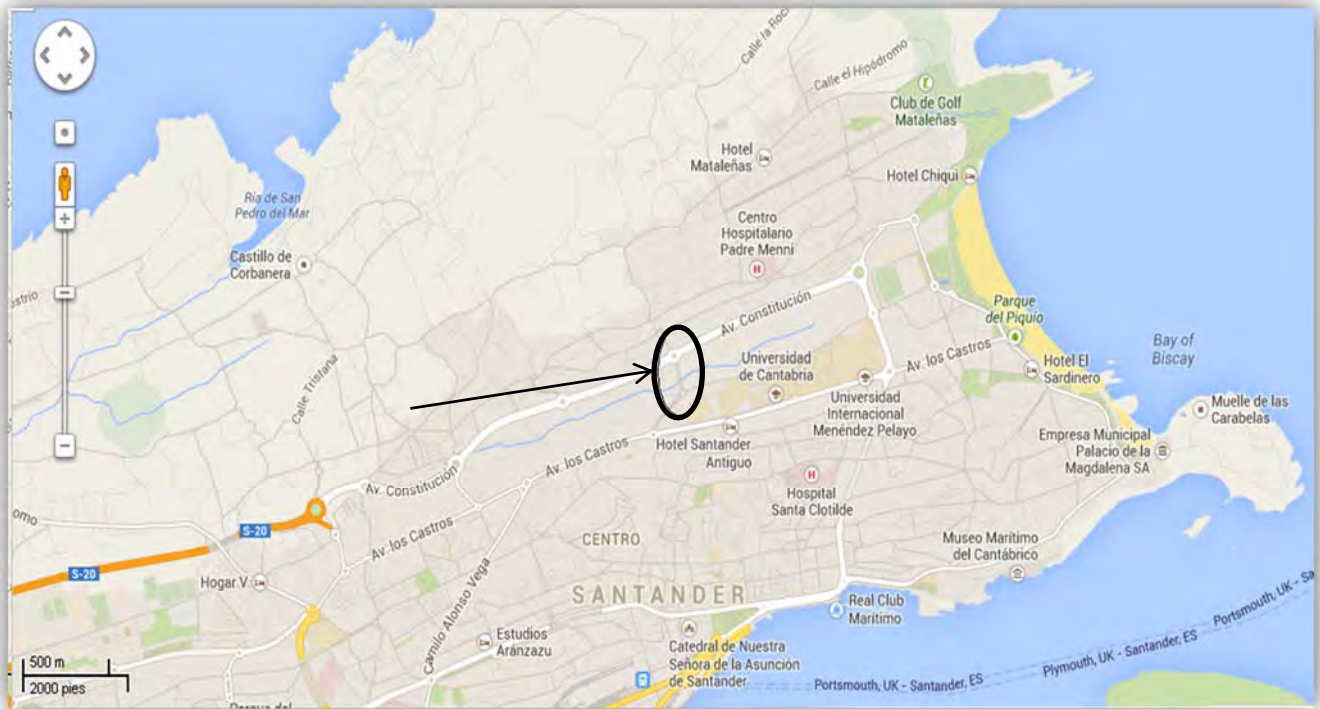


Figura 52. “Ubicación del Puente con referencia a Santander”

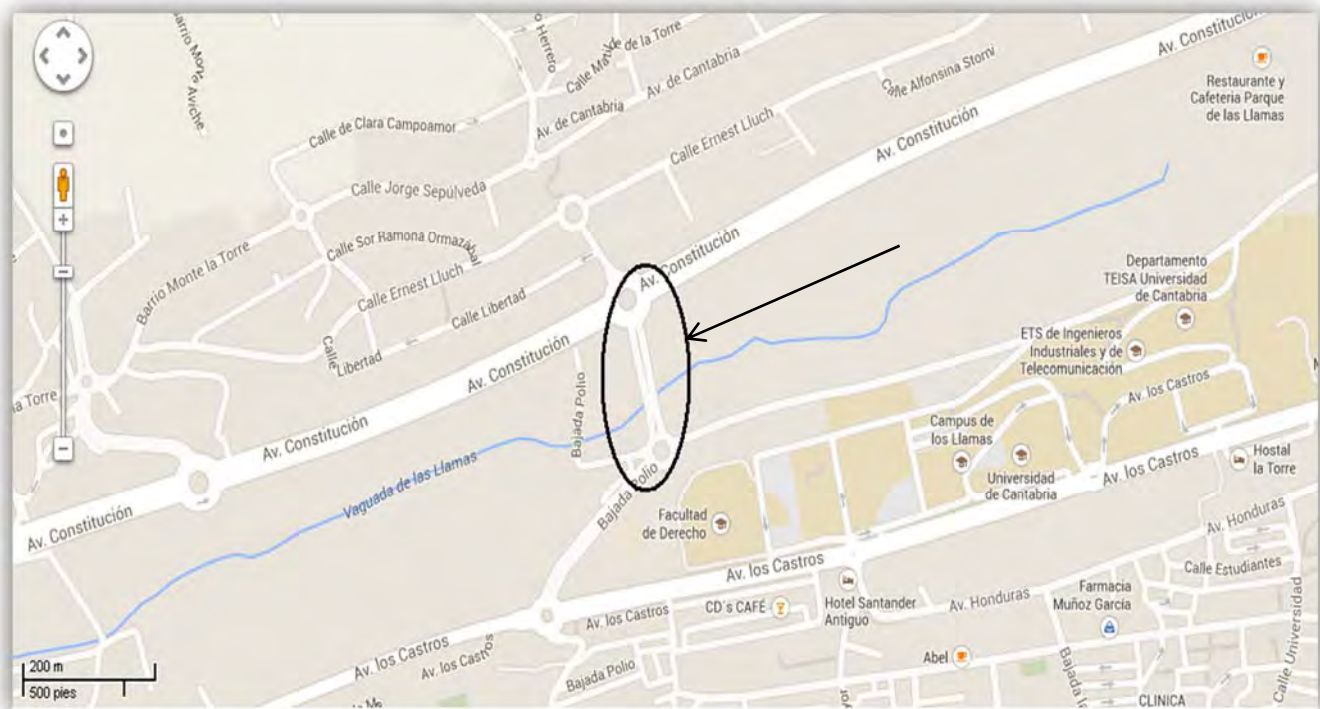


Figura 53. “Puente Juan José Arenas”

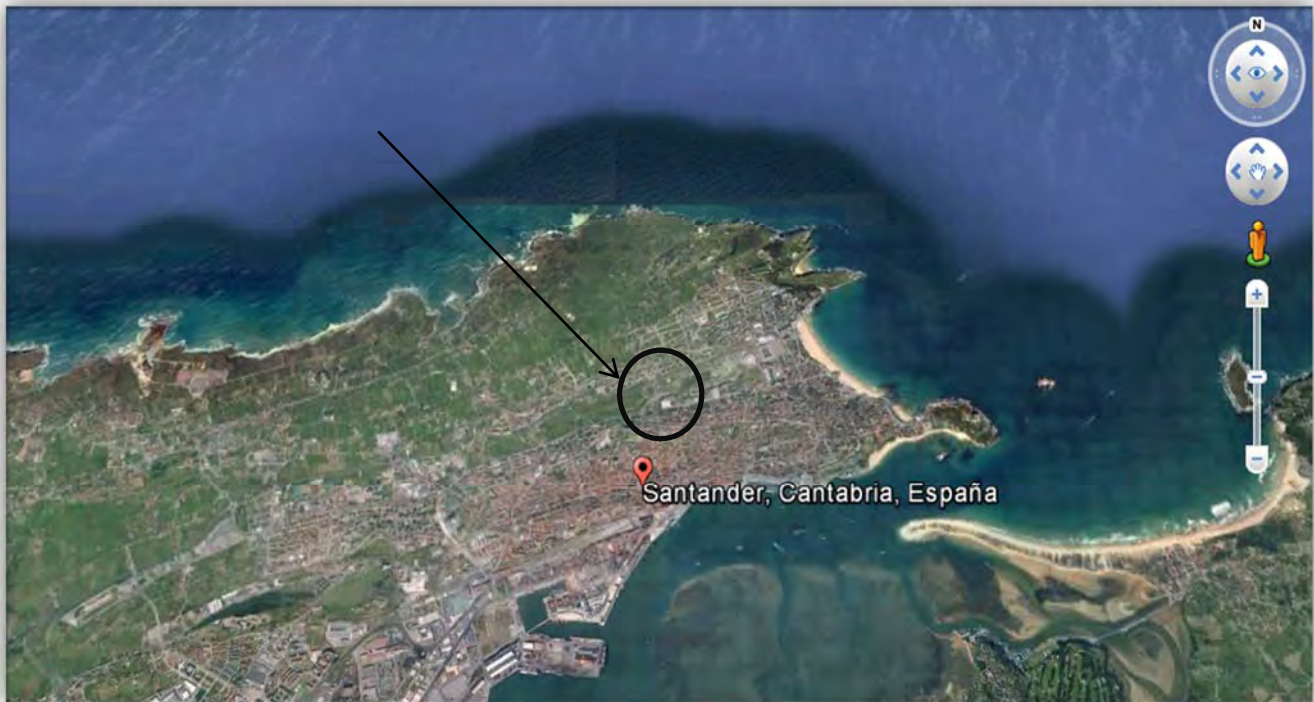


Figura 54. “Imagen de Santander, resaltando la ubicación del Puente”

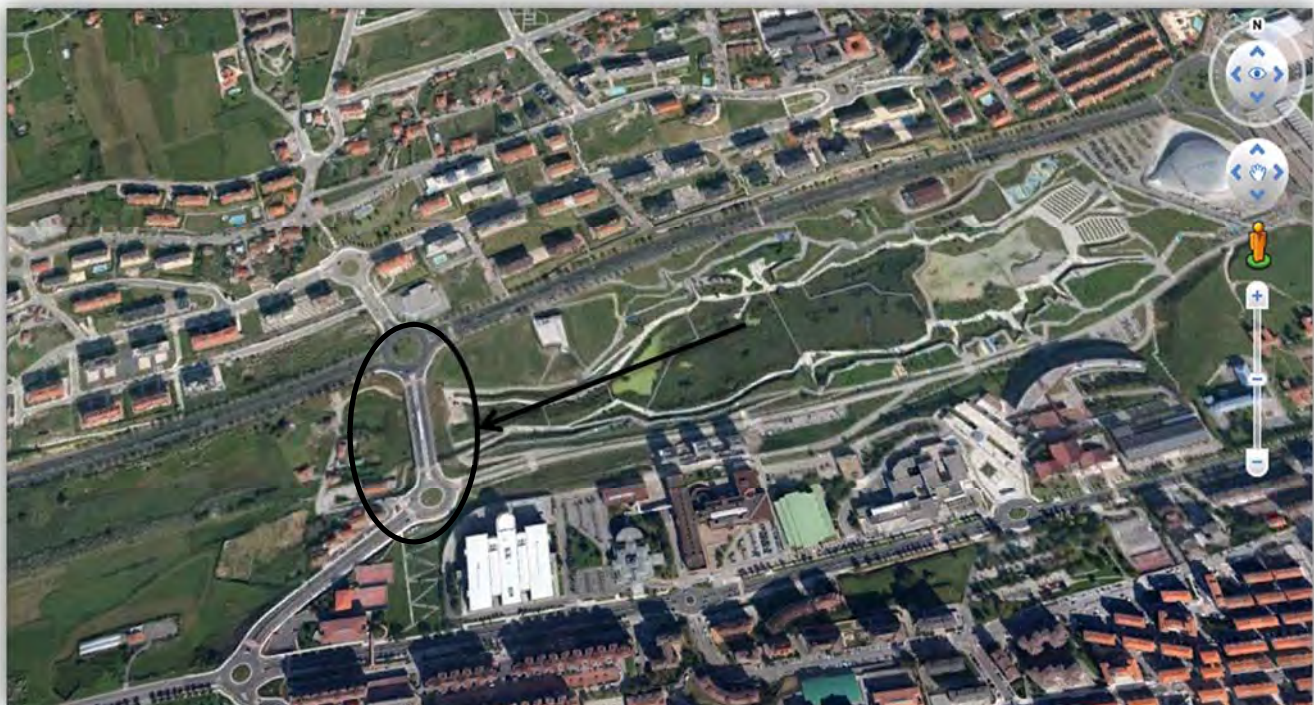


Figura 55. “Imagen de Puente Juan José Arenas”

Una vez hemos definido su posición en el espacio, hemos de localizar dónde se encuentran casquillos que vamos a estudiar en el puente. La corrosión por picadura aparece en todos los casquillos y tirantes del puente, siendo un total de 72 y 36 piezas de cada tipo respectivamente. En nuestro estudio sólo vamos a tratar con los casquillos, ya que su estado de corrosión es mucho más avanzado. En la figura 56 se observa cómo los casquillos abrazan al tirante y muestra un estado general de la corrosión por picadura.

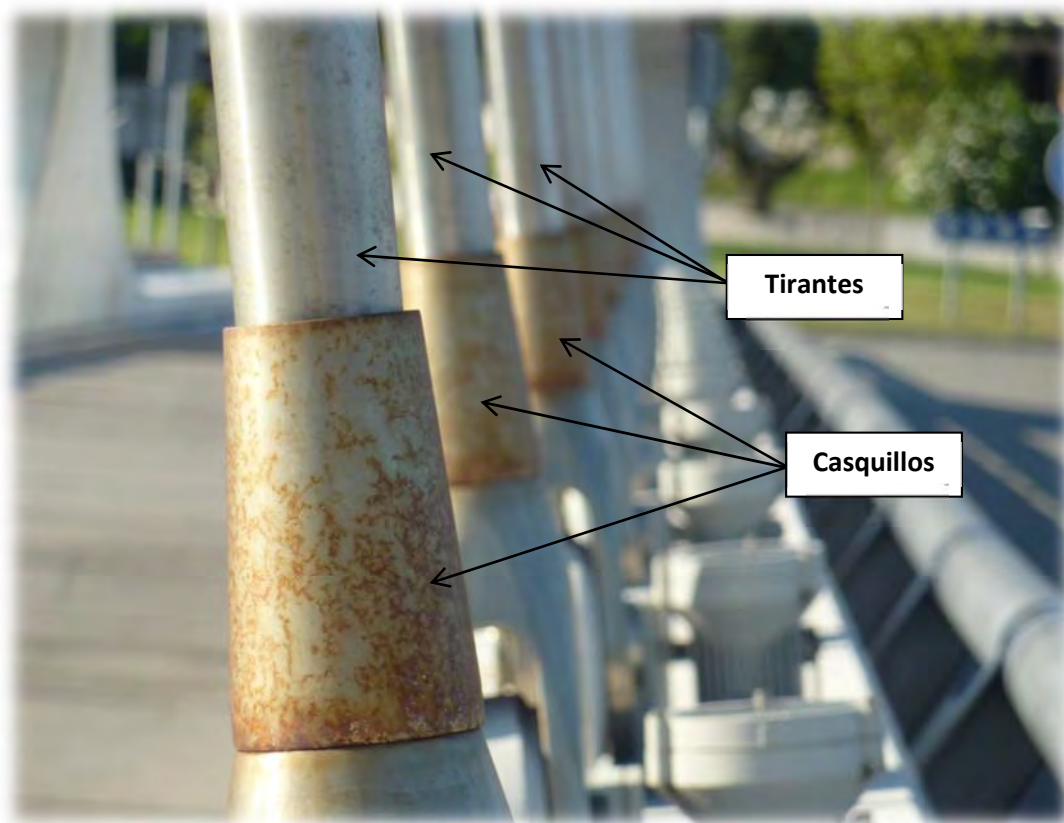


Figura 56. “Ubicación de casquillos y tirantes”

Al igual que los “*lock cover*” situados en la parte inferior del tirante, hay otros situado en la parte superior del mismo. No podemos realizar un estudio de ellos, ya que se encuentran en una zona de mala accesibilidad, pero su aspecto es muy análogo a los que vamos a estudiar. Existen tres diferencias que deberíamos tener en cuenta, si quisiéramos estudiarlos:

- Al estar en mayor altura, la influencia del viento es mayor.
- Debido a su diseño, no tienen la misma capacidad de evacuación de líquidos (precipitaciones).
- Al no tener accesibilidad, no hay alteraciones por influencia humana.

La figura 57 es un detalle para ubicar en el puente los casquillos o “lock cover” superiores e inferiores.

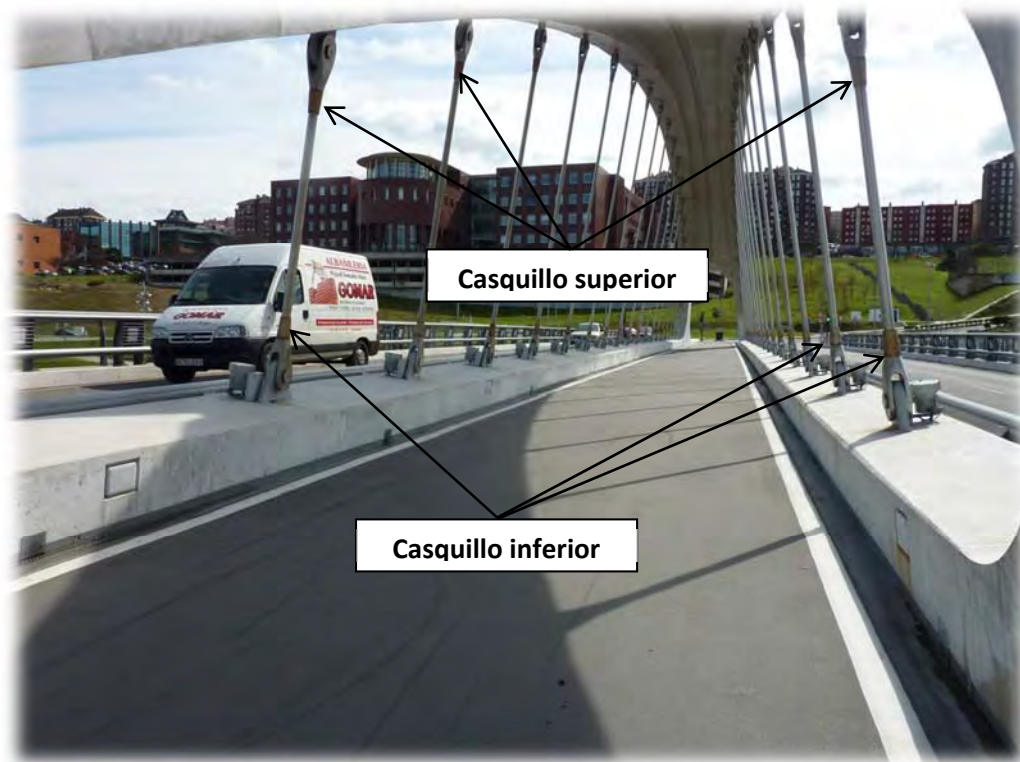


Figura 57. “Casquillos superiores e inferiores”

La última referencia respecto a la ubicación que necesitamos saber es la forma en que seleccionamos una cara este de una oeste. En la figura 58 los círculos dibujados representan los soportes existentes en la zona inferior respecto de su ubicación en el puente.

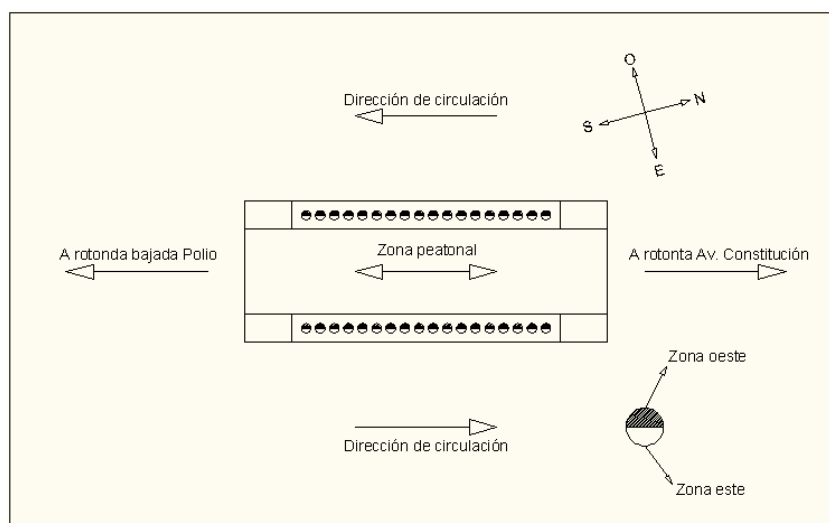


Figura 58. “Distinción de orientación de Puente Juan José Arenas”

3.2.- Material y diseño

El material empleado para fabricar estos casquillos es acero inoxidable AISI 316. Esta aleación férrea consigue sus características por medio de una película o capa pasiva de óxido de cromo fundamentalmente. Esta aleación en particular es un acero inoxidable austenítico con una estructura (CCC) cubica centrada en las caras. Suele añadirse molibdeno para aumentar la resistencia a la corrosión especialmente en entornos que contienen cloruros (ambiente marino). Suele contener bajos contenidos en carbono para una mayor soldabilidad.

Las propiedades eléctricas, físicas, mecánicas y térmicas estimadas de este tipo de acero inoxidable (316) son las proporcionadas a continuación:

Propiedades eléctricas:

- Resistividad eléctrica ($\mu\text{Ohm CM}$): 70-80
- Coeficiente de temperatura (K^{-1}) –

Propiedades físicas:

- Densidad (g/cm^3) 7,96
- Punto de fusión (C) 1370-1400

Propiedades mecánicas:

- Alargamiento (%) < 60
- Dureza Brinell 160-190
- Módulo de elasticidad E (GPa) 190-210
- Impacto Izod (J/m) 20-136
- Resistencia a tracción (MPa) 460-860

Propiedades térmicas:

- Calor específico a 23C (J / KgK^{-1}) 502
- Coeficiente de expansión térmica @20-100C (10^{-6} K^{-1}) 16-18
- Conductividad térmica a 23C (W / m K) 16,3

Gracias a la empresa Macalloy (23) se ha podido obtener la composición química de los casquillos instalados en “Puente Juan José Arenas”, así como una muestra de un casquillo de un tamaño menor pero equivalente para su mejor observación. Asimismo un conjunto de planos de despiece de “tension rod systems”, equivalente a los instalados en el puente. Estos planos componen el Anexo 3 de este Proyecto Fin de Carrera.

La composición química de los casquillos se muestra en la tabla 2, proporcionada por la empresa Macalloy.

Tabla 2. “Composición química de los casquillos (% wt)”

Acero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
AISI 316	0,076	0,534	0,474	0,025	0,005	16,487	10,411	2,224	69,764

La figura 59 es una imagen del casquillo en alzado proporcionado por la empresa.



Figura 59. “Casquillo, Alzado”

En la figura 60 se muestra la vista Isométrica del casquillo representado por el programa de elementos finitos COMSOL 4.3 a.

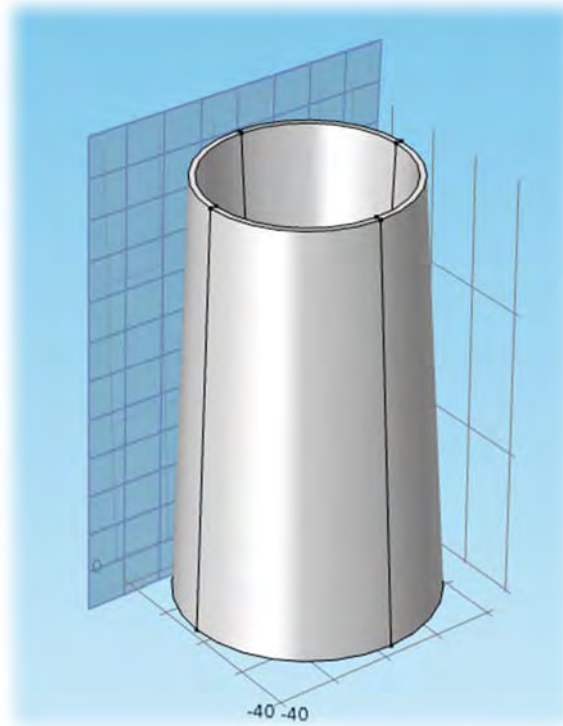


Figura 60. “Casquillo representado por COMSOL 4.3 a”

En la figura 61 se muestra el roscado que posee el casquillo en su parte inferior-interior por la cual se une al soporte del tirante.

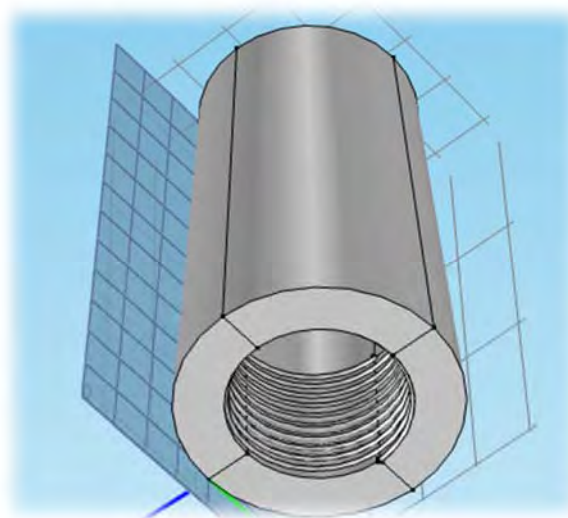


Figura 61. “Roscado del casquillo representado por COMSOL 4.3 a”

3.3.- Metodología de trabajo adoptado en el desarrollo del Proyecto Fin de Carrera

3.3.1.- Terminología empleada

Antes de describir el proceso de trabajo que vamos a realizar en este estudio, necesitaremos conocer unos conceptos básicos, tales como la nomenclatura y forma de selección que vamos a realizar de las picaduras. Para ello, se usará una terminología creada y usada por el autor que nos ayudará y facilitará, en gran medida, el estudio de la evolución de la picadura, siendo el concepto de colapso de picadura totalmente novedoso en el ámbito ingenieril, científico y tecnológico.

Los cuatro términos que deberemos conocer para entender este estudio son:

Nueva picadura, picadura avanzada, colapso de picadura y grietas de corrosión

En la figura 62 se integran todos estos tipos de picadura en una pequeña sección del casquillo.

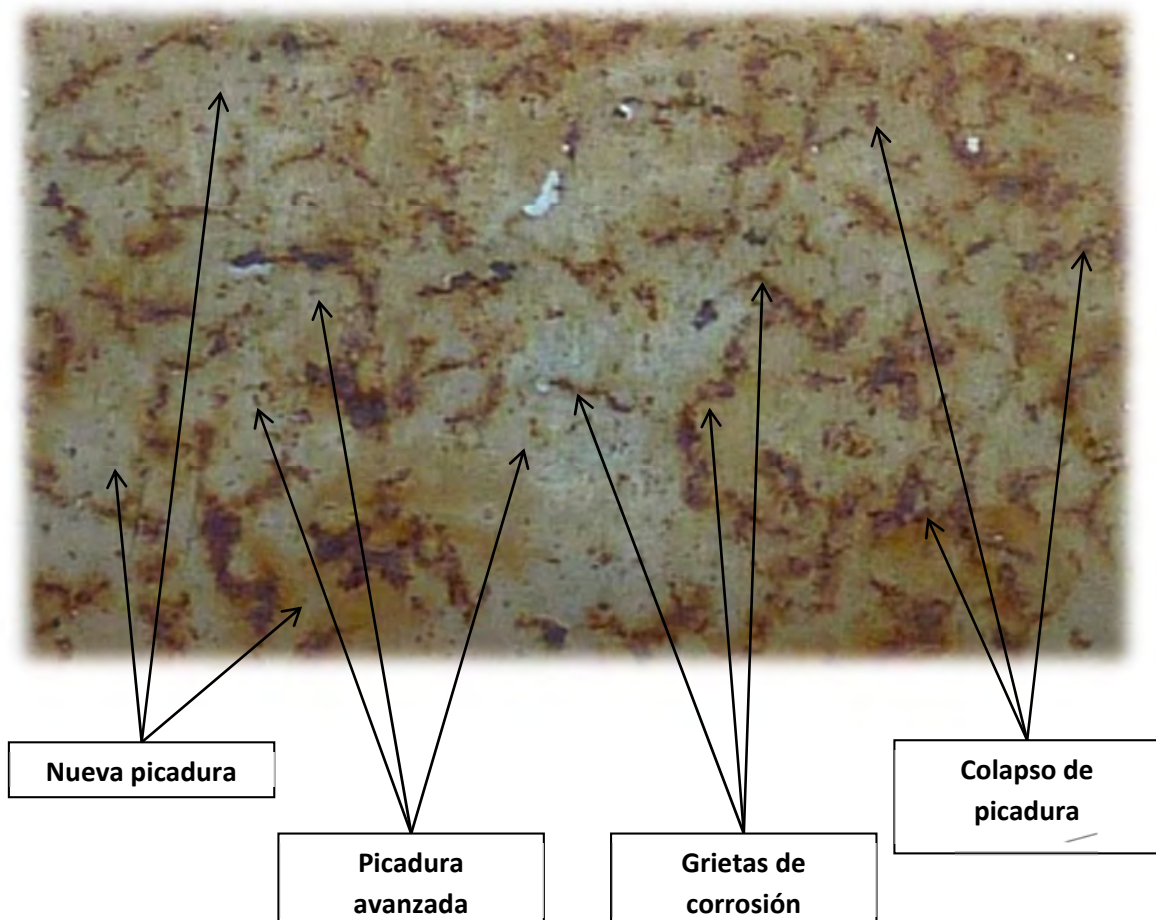


Figura 62. “Tipos de picadura en C 4, Zona Este; en Marzo 2013”

Ahora que hemos visto el aspecto que muestra cada tipo de picadura, vamos a describirlas, según sus aspectos y detalles más característicos que han ayudado en este estudio.

a) Nueva picadura:

Las nuevas picaduras son las más pequeñas, casi inapreciables a simple vista y se pueden confundir fácilmente con el óxido residual de la superficie. El diámetro medio de estas nuevas picaduras, según los cálculos obtenidos, son de 0,03 cm (Los resultados de presentarán en el capítulo correspondiente). Normalmente se genera en las zonas más débiles de la superficie donde se ha roto la capa pasiva. A pesar de ser el tipo con más frecuencia de aparición de picaduras, no supone mucha superficie ocupada, en comparación al resto de tipologías.

b) Picadura avanzada:

Con el paso del tiempo, las nuevas picaduras van aumentando su diámetro hasta el punto que llegan a hacerse bastante apreciables a simple vista. Su diámetro medio obtenido en los resultados es de 0,069 cm. Este sería el segundo estado por el que pasan las nuevas picaduras, y seguirán aumentando su tamaño tanto en diámetro como en profundidad. No podemos obtener datos de su profundidad, ya que no hay acceso a un experimento destructivo de los casquillos “lock cover”. La presencia de este tipo de picadura en los casquillos es menor que el de las nuevas picaduras pero, aun así, la superficie afectada en muchísimo mayor.

c) Colapso de picadura y grietas de corrosión:

Los colapsos de picadura representan el mayor volumen de corrosión en la superficie; son muy grandes, totalmente apreciables y distinguibles a simple vista. Su diámetro medio es de 0,111 cm según los resultados obtenidos. Se pueden generar por varios motivos, pero las dos formas más frecuentes observadas para que se genere un colapso son:

- Por acumulación de picaduras adyacentes: Las nuevas picaduras y picaduras avanzadas pueden ir evolucionando muy próximas unas de otras, hasta el punto en que se juntan, y se unen las superficies corroídas. Los resultados de la unión de estas picaduras resultan, por lo tanto, zonas de gran diámetro (en comparación a los demás tipos).
- Por generación de grietas con productos de corrosión: Un tipo peculiar de corrosión es sin duda este: se genera al haber picaduras adyacentes, pero que no se llegan a tocar en su crecimiento de diámetro; sino que aparece un hilo o grieta de óxido que une ambas picaduras. Esta grieta, crece en longitud y espesor llegando a crear el colapso de una forma, incluso, más grave que el “colapso por picadura por picaduras adyacentes”.

Las siguientes figuras (63 - 67), presentadas separadas, son representativas de cada tipo de picadura atendiendo a la terminología empleada. Todas ellas están extraídas de las fotografías usadas para realizar el estudio.

La figura 63 muestra zonas con nuevas picaduras pertenecientes a diferentes casquillos del “Puente Juan José Arenas”

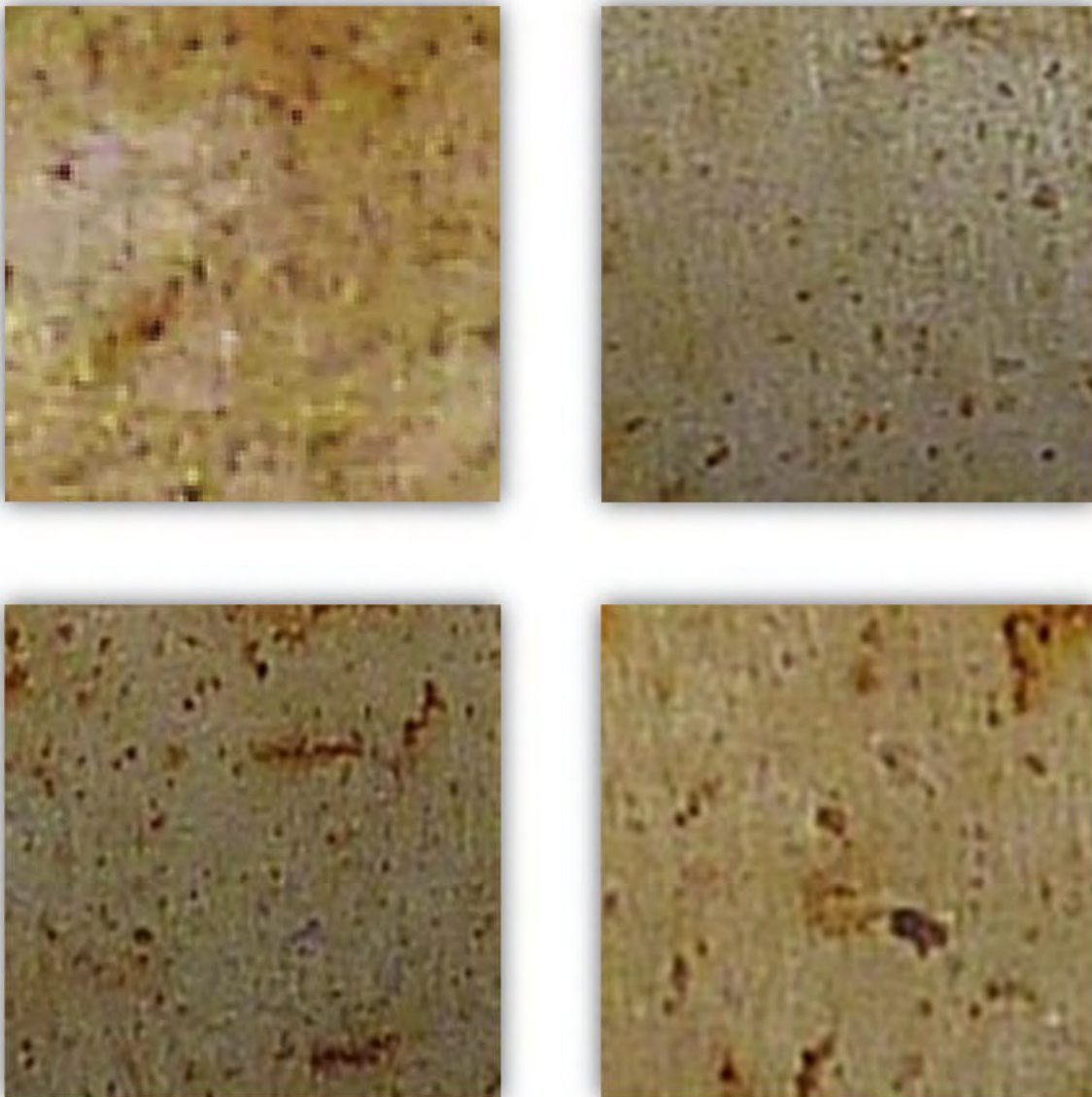


Figura 63. “Ejemplos de nuevas picaduras”

En la figura 64 se muestran varios ejemplos del aspecto que tienen las picaduras avanzadas en distintos casquillos:

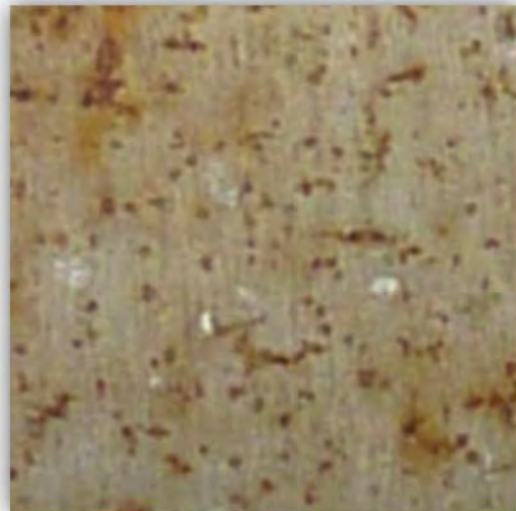
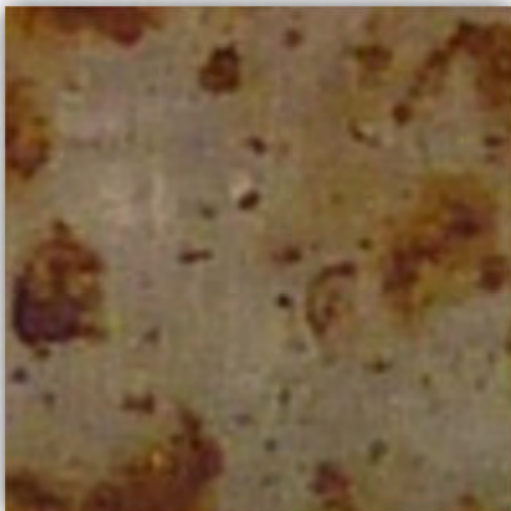
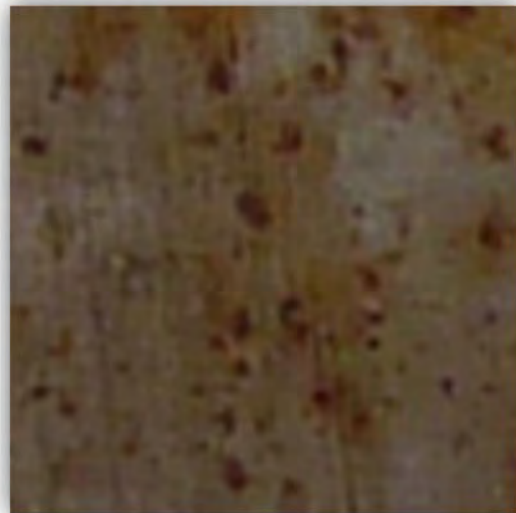
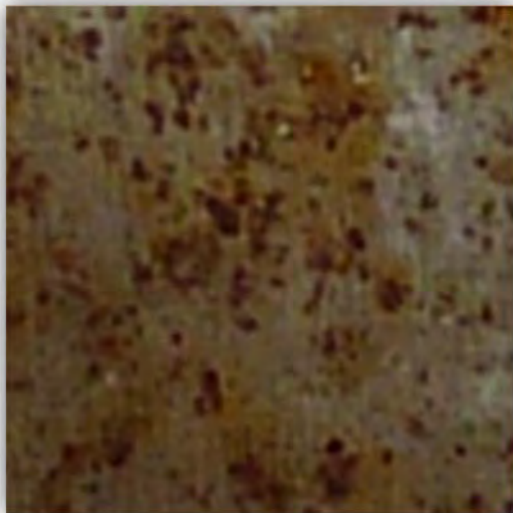


Figura 64. “Ejemplos de picaduras avanzadas”

En la figura 65 se muestran cuatro ejemplos de colapsos de picadura por agrupación de picaduras en distintos casquillos del “Puente Juan José Arenas”.

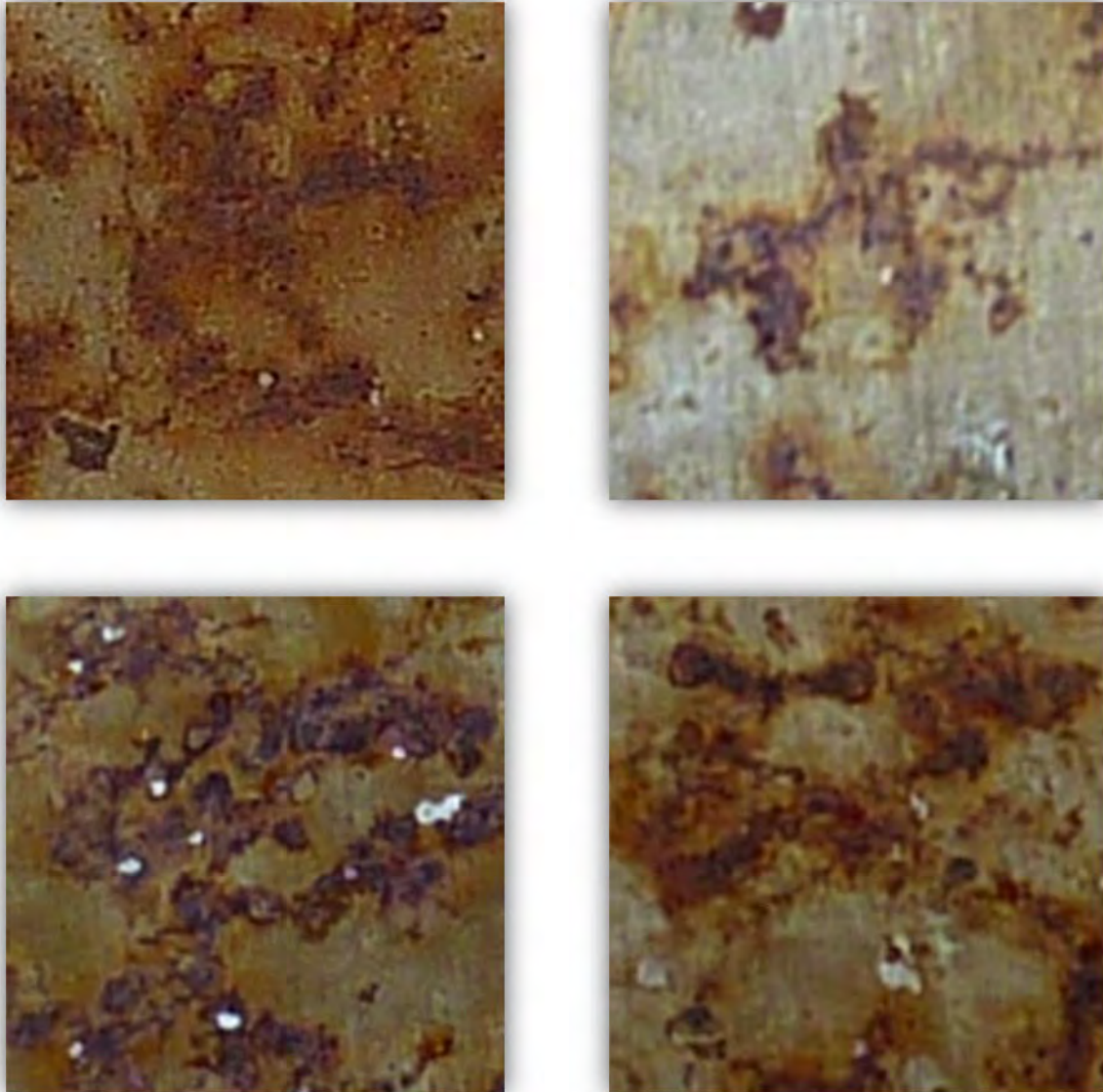


Figura 65. “Ejemplos de colapsos de picadura”

La figura 66 contiene cuatro ejemplos de grietas de corrosión típicas de los casquillos del “Puente Juan José Arenas”.

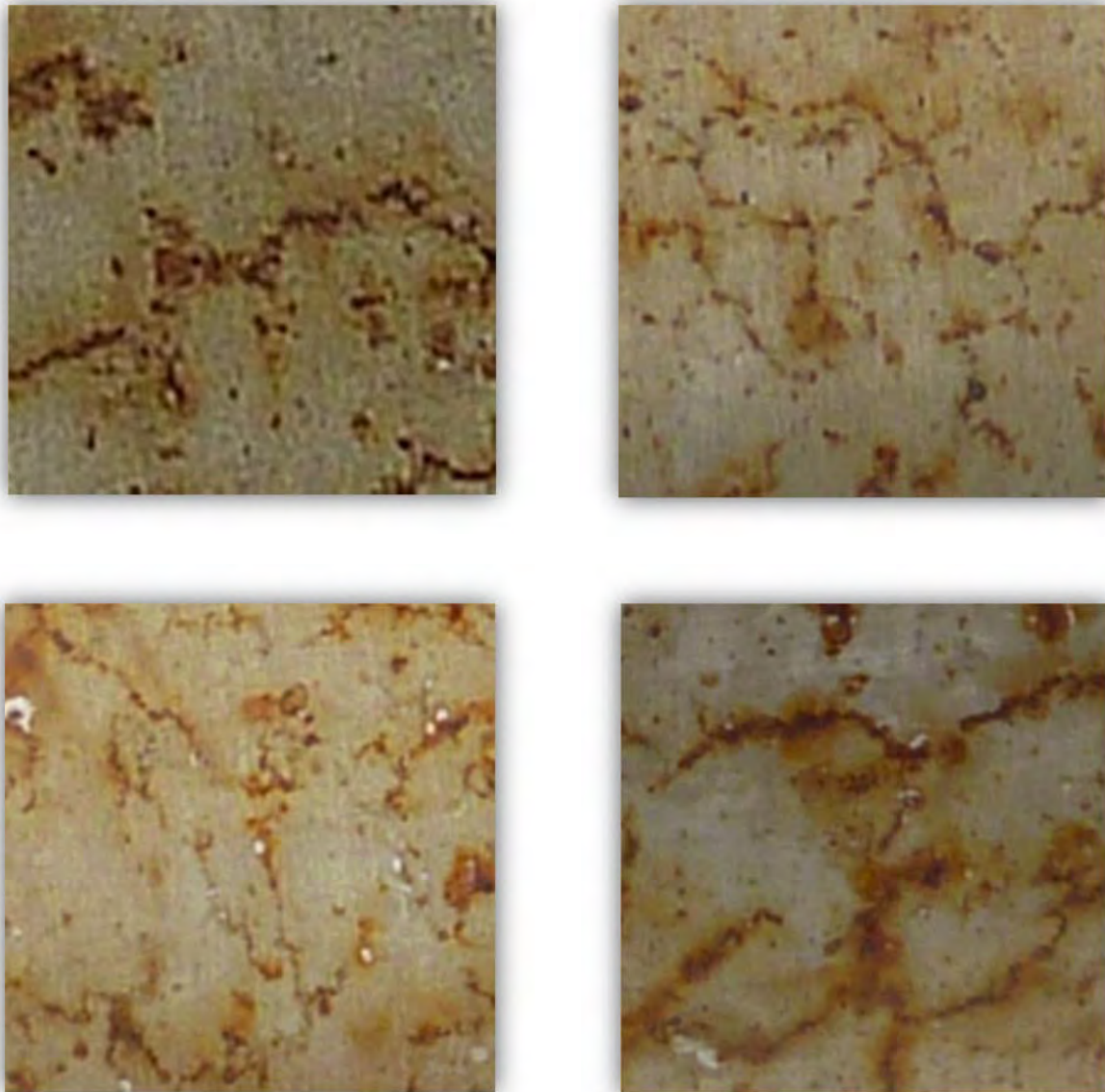


Figura 66. “Ejemplos de grietas de corrosión”

3.3.2.- Secuencia de trabajo

Para llevar un orden en el proceso de trabajo, e ir explicándolo paso a paso, nos apoyaremos en el siguiente organigrama secuencial de la figura 67.

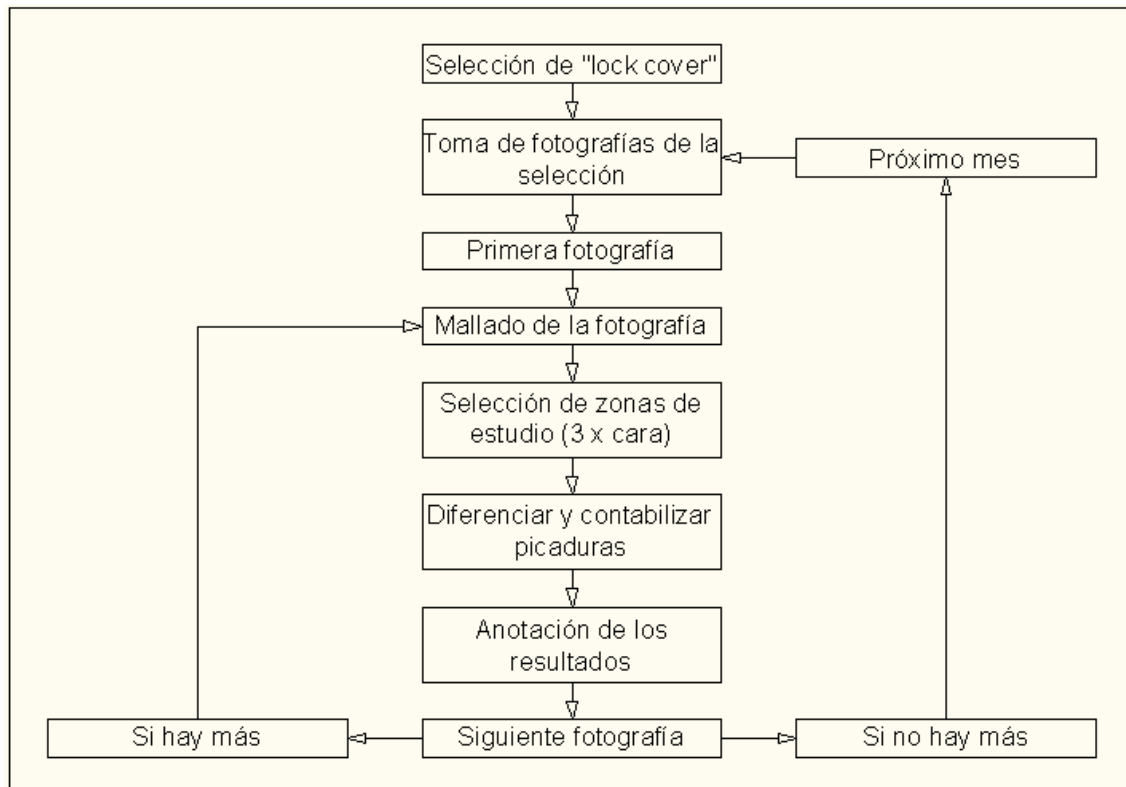


Figura 67. “Organigrama del proceso de trabajo”

En total hay ocho pasos que realizar cada mes, y cada uno de ellos requiere del paso anterior para poder llevarlo a cabo. Aparte trataremos sobre las facilidades y problemas que se han encontrado a la hora de hacerlos, y cómo hay que desarrollarlos para que no surjan problemas adicionales. Secuencialmente irán apareciendo remarcados en rojo los bloques de los que vamos a ir hablando, y los que ya hemos desarrollado, siendo el último cuadro en rojo el actual.

3.3.2.1.- Paso 1: Selección de “lock cover”.

La figura 68 es el organigrama correspondiente al paso 1: selección de casquillo.

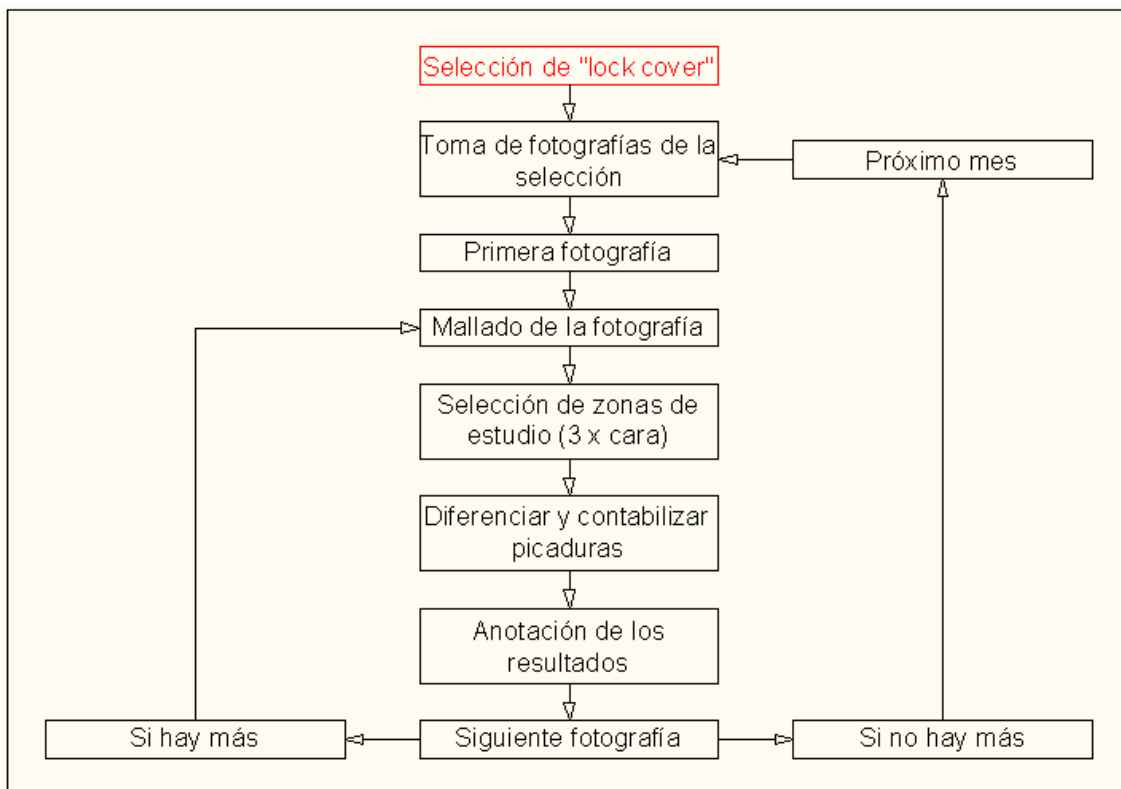


Figura 68. “Organigrama, paso 1”

El primer paso que tenemos que hacer, es decidir el número casquillos o soportes “*lock cover*” que vamos estudiar. El “Puente Juan José Arenas” consta de 72 piezas iguales a las que vamos a tratar, 36 de ellas colocadas en la parte inferior y 36 en la parte superior de los tirantes. Por lo tanto, ya la mitad de los casquillos están fuera del alcance de la medición debido a que no hay accesibilidad para llegar a ellas. De los 36 casquillos accesibles, vamos a realizar el estudio en 10 de ellos repartiendo 5 y 5 de cada ladera del puente, es decir, orientaciones Este y Oeste de forma aleatoria.

Para escoger un criterio de elección de los diez soportes, tomaremos el primero seleccionando el primer “*lock cover*” de la derecha suponiendo que accedemos a “Puente Juan José Arenas” desde la Avenida Constitución (llegando a él desde el norte). Una vez tenemos el primer casquillo escogido, iremos seleccionando el próximo dejando tres sin estudiar por medio (todos del mismo lado del puente). Para escoger los cinco restantes, haremos el mismo proceso, pero llegando desde la rotonda de Bajada Polio. De esta forma ya tenemos la selección aleatoria lista para comenzar el estudio y poder avanzar con los siguientes pasos. En la figura 69 veremos perfectamente los casquillos que quedan escogidos según este criterio.

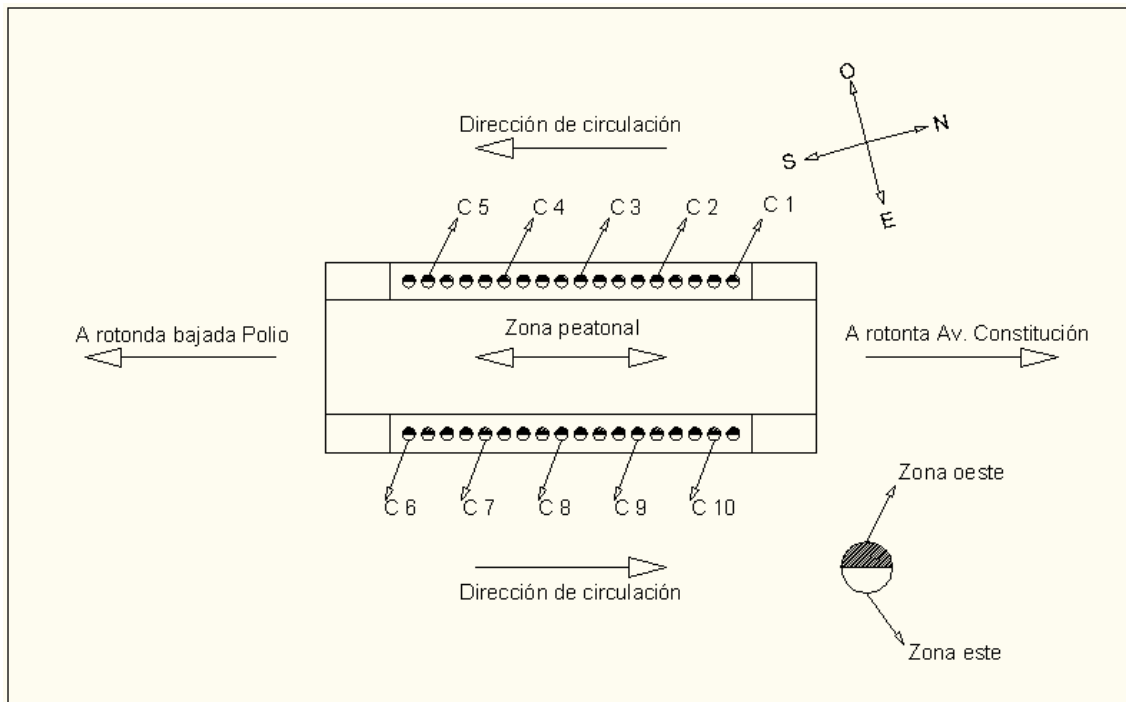


Figura 69. “Selección de casquillos”

Según muestra la figura, los casquillos seleccionados vienen marcados como C 1, siendo el primer casquillo seleccionado, C 2; el segundo soporte seleccionado y así hasta el C 10, nuestra última pieza de estudio. El criterio de selección está escogido de esta forma para dar aleatoriedad, y no escoger las muestras más afectadas, pudiendo dañar y falsear los resultados obtenidos.

La distinción que aparece de “Zona este” y “Zona oeste” es debido a que en el estudio analizaremos tanto la cara este como la oeste de los casquillos; independientemente si se encuentran en la zona este u oeste del puente, es decir, geográfica.

Algo que deberemos tener en cuenta durante este estudio, es que la zona oeste de los primeros cinco casquillos y zona este de los cinco últimos, están directamente expuestos al tráfico, mientras que las demás caras, dan a la zona peatonal, una zona con mayor riesgo de alteración por influencia humana.

Para dar una última pincelada a conocer la ubicación de estos casquillos, veamos en una fotografía real, figura 70, el posicionamiento de varios de los casquillos. Esta fotografía está tomada accediendo desde el norte (Av. Constitución). De esta forma, es lo que veremos cuando accedemos al Puente, cómo se describió para establecer el criterio de selección. Recordamos que se escoge el primero, y después 3 libres hasta la próxima elección.

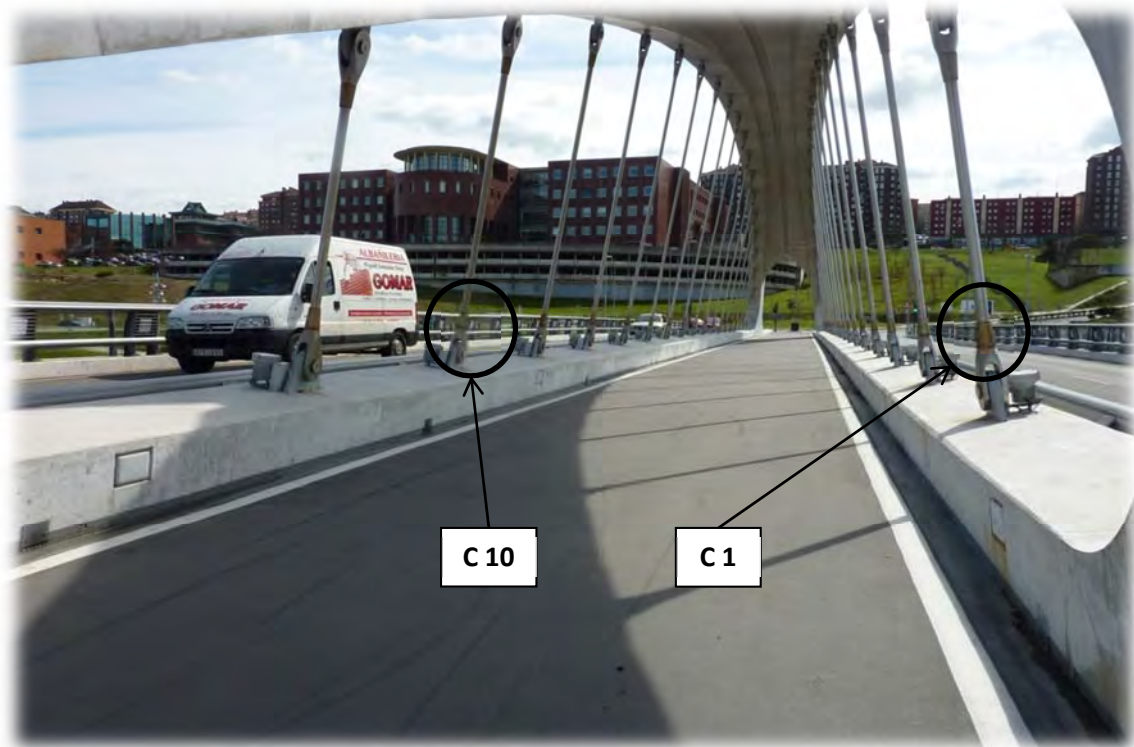


Figura 70. “Casquillos 1 y 10”

En la siguiente figura se ve el primer tirante (C 6) que es el primero que encontramos a mano derecha accediendo al puente desde Bajada Polio. El lado opuesto a la fotografía superior.



Figura 71. “Casquillo 6”

3.3.2.2.- Paso 2: Toma de fotografías de la selección.

La figura 72 es el organigrama correspondiente al paso 2: toma de fotografías de la selección.

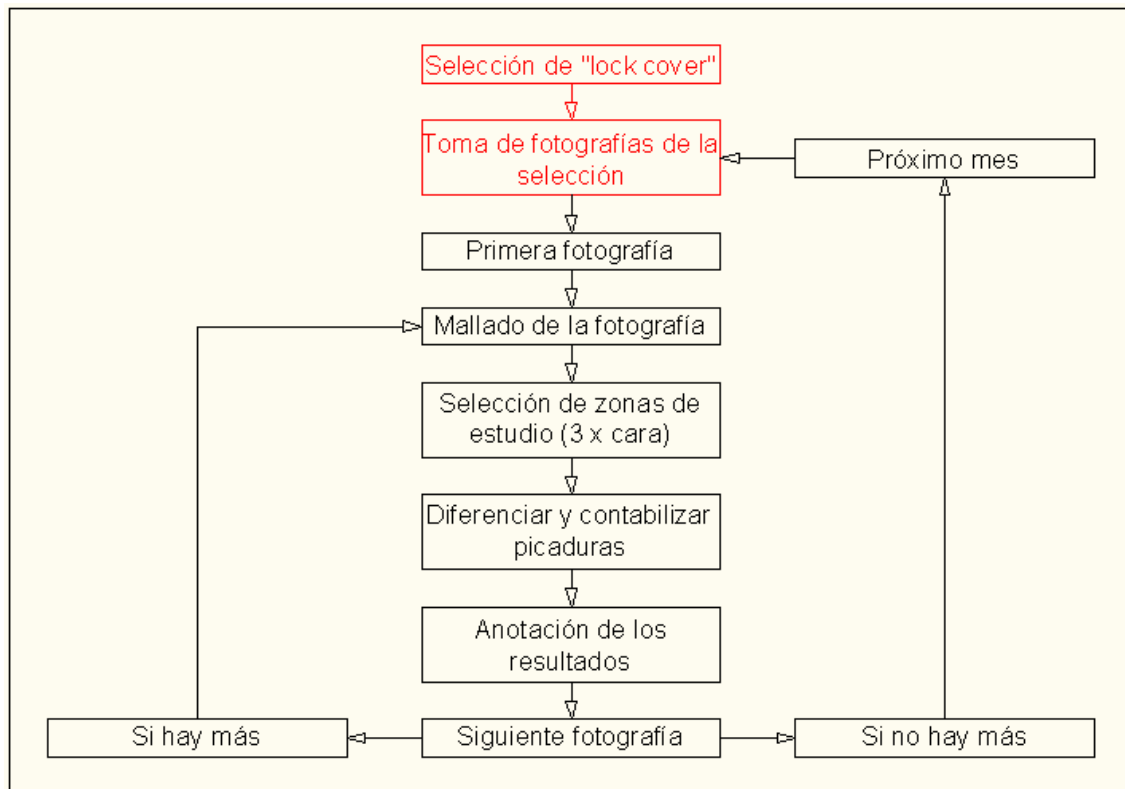


Figura 72. “Organigrama, paso 2”

Para la adquisición de fotografías requeriremos una cámara con una buena definición y con la opción de transmitir esa imagen al ordenador y realizar la inspección visual. En nuestro caso, emplearemos una cámara “Panasonic DMC-TZ7” réplica de la figura 73.



Figura 73. “Panasonic DMC-TZ7”

En cada casquillo seleccionado, se han tomado como mínimo cuatro fotografías; dos a su zona Este y dos a su zona Oeste. Intentaremos sacar en la imagen todo el soporte al completo, colocando la cámara entre 20 o 25 cm del soporte, y lo más perpendicular a la normal de la cara en su zona media, para obtener la imagen más recta posible para, así, después facilitar los siguientes pasos.

Además, las fotografías se han de tomar bajo las mismas condiciones climatológicas, para que no se altere mucho la muestra, evitando días lluviosos o recientes de lluvia para que el óxido superficial no tape las muestras (sobre todo las nuevas picaduras).

Hay que tener extremo cuidado en las fotografías que hemos de realizar expuestos a la circulación de tráfico. Hemos de asegurarnos que no hay tráfico circulante cuando vamos a realizarla, y bajo ningún motivo invadir el asfalto ya que, se puede realizar desde el propio puente.

Una vez obtenidas las fotografías, hemos de intentar que tengan la mayor resolución posible y, si es preciso, tomar de nuevo las fotografías para poder continuar el proceso de trabajo. Durante el proceso realizado, también se han fotografiado los soportes intermedios, el central de los tres que saltábamos con el criterio de selección, con vistas a posibles ampliaciones de estudio.

Finalmente tendremos 80 fotografías cada mes, de las cuales 20 serán empleadas para este estudio y 40 descartadas (de las dos que sacamos de cada zona, solo nos quedamos con una). De esta forma, tendremos imágenes iguales a las siguientes figuras de la 74 a la 77 detallando en cada caso el casquillo, zona y mes objeto de estudio.



Figura 74. “Ejemplo de toma de fotografía C 1, Zona Este; Agosto 2013”



Figura 75. “Ejemplo de toma de fotografía C 9, Zona Oeste; Agosto 2013”



Figura 76. “Ejemplo de toma de fotografía C 6, Zona Oeste; en Marzo 2013”



Figura 77. “Ejemplo de toma de fotografía C 7, Zona Oeste; en Marzo 2013”

3.3.2.3.- Paso 3: Primera fotografía.

La figura 78 es el organigrama correspondiente al paso 3: primera fotografía.

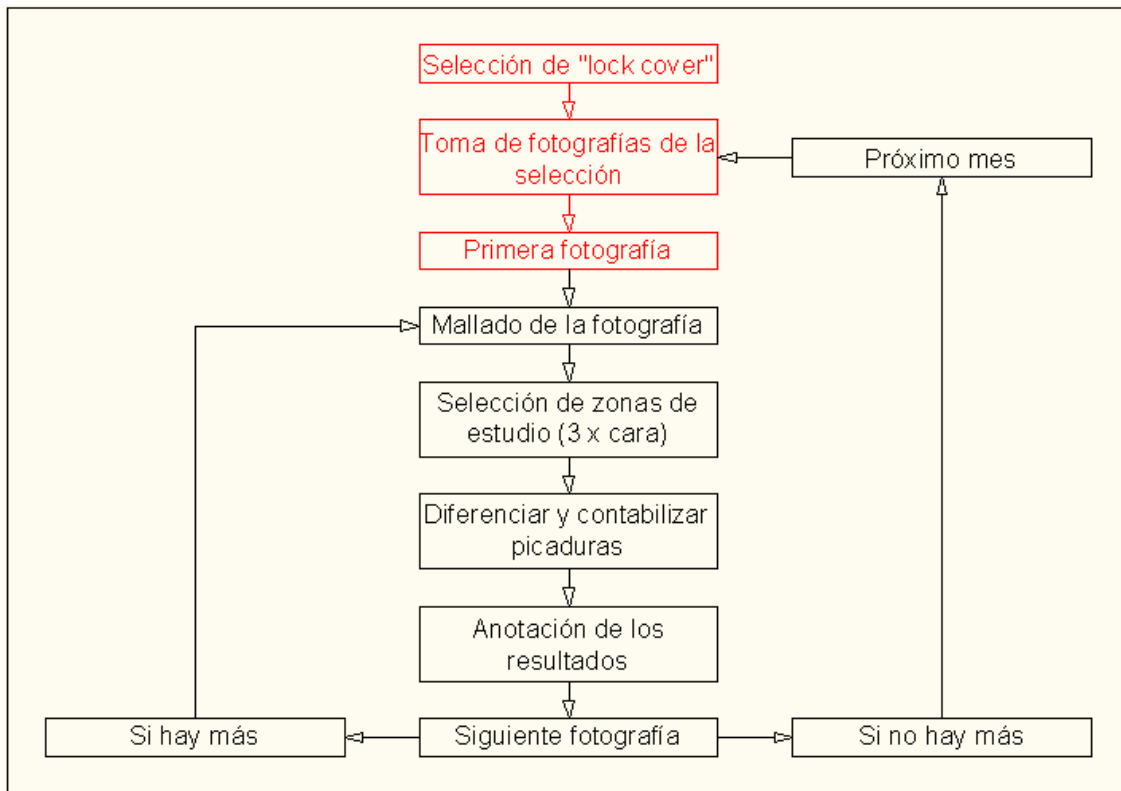


Figura 78. “Organigrama, paso 3”

Este paso sólo se repite una vez al mes, siendo el punto de partida para comenzar el trabajo con las fotografías obtenidas anteriormente. Para tener un orden, siempre comenzaremos por el casquillo “C 1”, por su Zona Este. Siempre hay que mantener un orden para no confundirse, sobre todo, cuando se tratan de muchos datos numéricos, cómo veremos más adelante en el “paso 6”, o con imágenes muy semejantes como son las obtenidas en muchos casos.

3.3.2.4.- Paso 4: Mallado de la fotografía.

La figura 79 es el organigrama correspondiente al paso 4: mallado de la fotografía.

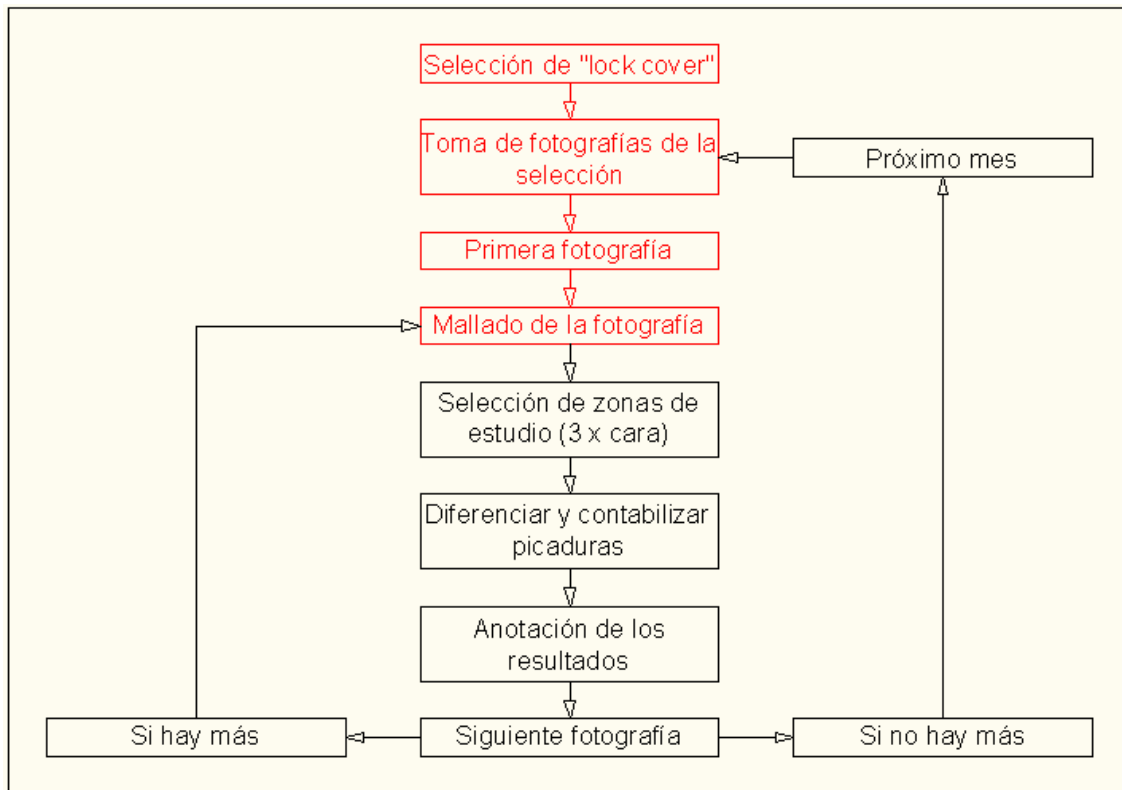


Figura 79. “Organigrama, paso 4”

El mallado de la fotografía es el punto de partida para poder contabilizar picaduras, densidad de las mismas y, conocer las medidas directamente desde nuestra imagen.

Para este paso, nos apoyamos en la técnica de la fotogrametría, la cual nos permitirá, conociendo las cotas reales de la pieza que fotografiamos, poder llevar las medidas que queramos a nuestra imagen. Las cotas principales de la superficie de las caras seleccionadas son:

- Altura de la cara: 145,2 mm
- Diámetro inferior: 85 mm
- Diámetro superior: 70 mm

Para comenzar a poder realizar el mallado, se abre la imagen desde un programa de dibujo, en este caso, se usó AutoCAD (24). Una vez la fotografía se halla en el programa, buscamos los puntos A, B, C, D, E y F; siendo los representativos de la altura de cara, del diámetro inferior y superior respectivamente. Con los puntos obtenidos, los unimos con líneas y tenemos una imagen muy similar a la figura 80.

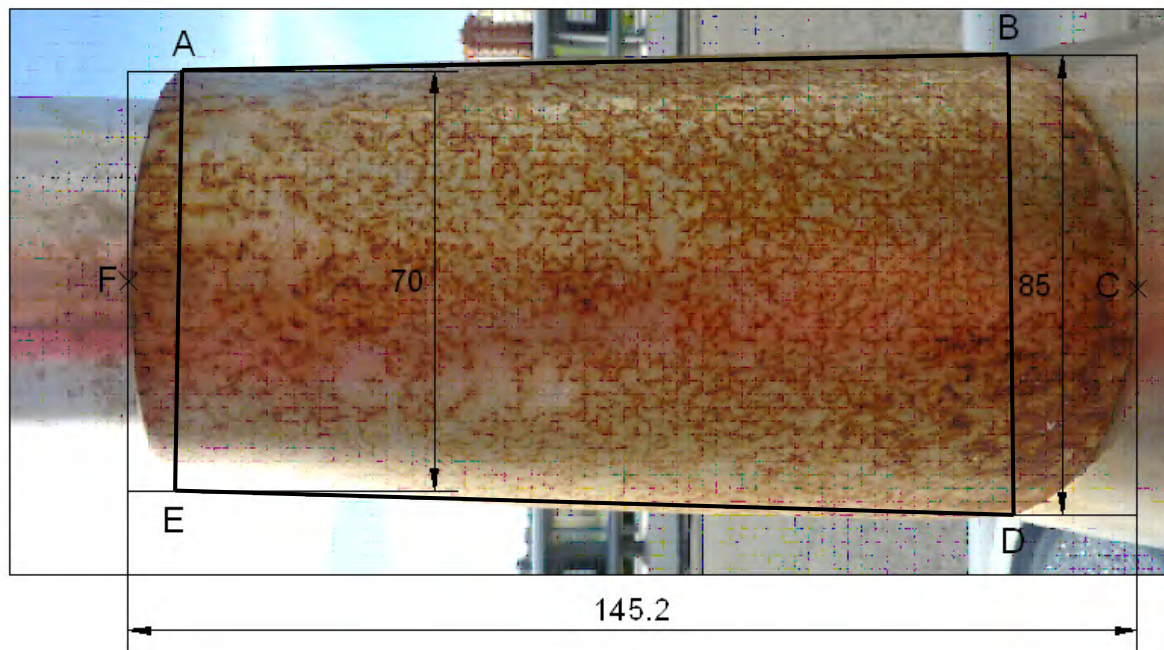


Figura 80. “Mallado de ejemplo del casquillo objeto de estudio”

Como conocemos lo que miden realmente esas líneas podemos, gracias a un cálculo simple y directo, calcular cualquier medida dentro de la imagen acotada. Gracias a este paso, podremos obtener nuestras futuras secciones de estudio, cómo veremos en el “paso 5”.

Cabe anotar que no todas las fotografías salen igual y en la misma posición, por lo tanto, la misma plantilla no sirve para todas las imágenes, sino que tendremos que acotarla según la disposición que tenga, pero siempre obteniendo esos seis puntos de referencia, ya que se convierte en un método sencillo y directo.

En el ejemplo mostrado, el programa no capta toda la imagen de forma nítida; pero si aplicamos un zoom, podremos ver perfectamente y contabilizar las picaduras. En este paso nos importa el aspecto global para realizar el mallado.

3.3.2.5.- Paso 5: Selección de zonas de estudio (3 x cara).

La figura 81 es el organigrama correspondiente al paso 5: selección de zonas de estudio de cada casquillo.

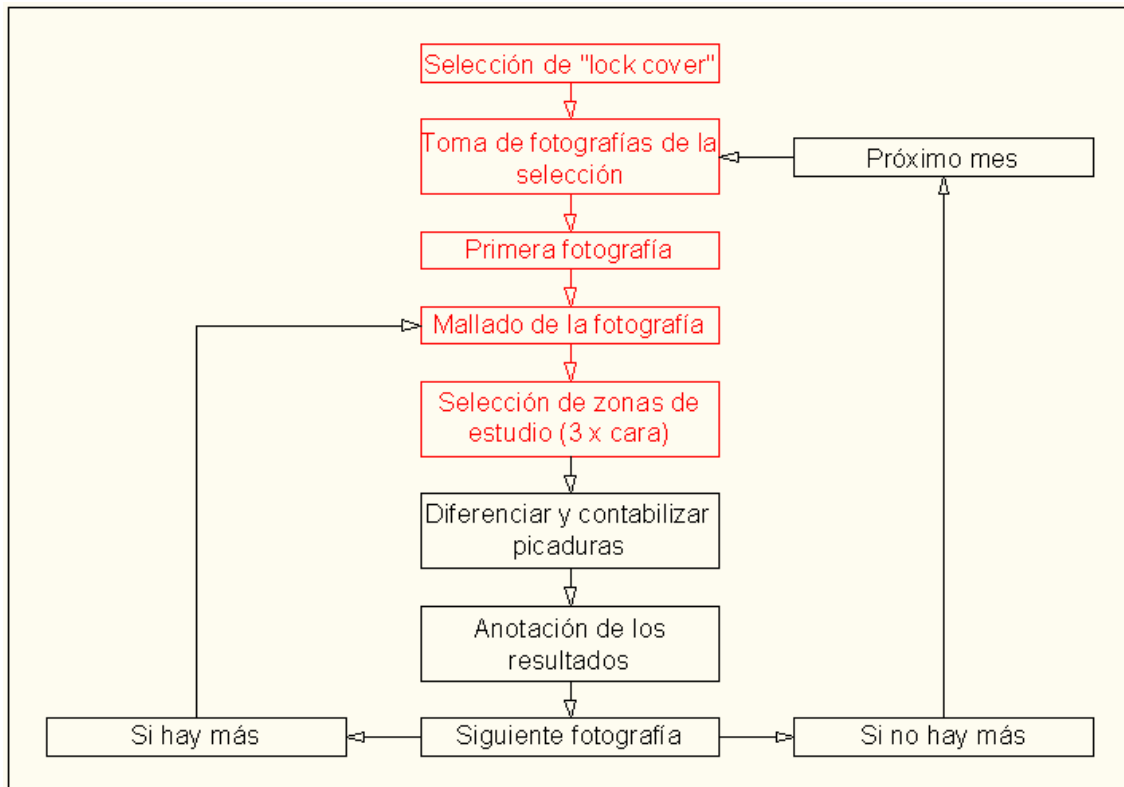


Figura 81. “Organigrama, paso 5”

La selección de zonas de estudio es un proceso que sólo se ha de realizar una vez por cada cara del soporte, manteniendo la selección elegida durante los próximos meses.

En este paso, seleccionaremos tres zonas de estudio de cada cara del casquillo de 1 cm². De esta forma conseguimos facilitar, en gran medida, los cálculos siguientes, ya que podremos hablar de porcentajes de la sección corroída de una forma directa. Las tres zonas de estudio las centraremos en la pieza de tal forma que, evitemos la parte superior e inferior del casquillo, en donde más tipos de corrosión se producen sinérgicamente, como se comentó en el Capítulo 1.

Evitamos también tomar mediciones de zonas demasiado extremas en consecuencia de la corrosión del soporte, esto es, no escoger una sección de 1 cm² de una pieza muy corroída, en donde puntualmente la corrosión no se ha desarrollado.

En la parte superior e inferior del casquillo aparecen varios tipos de corrosión, pero la predominante es “Corrosión en resquicios” por lo cual, evitaremos esas zonas para llevar a cabo nuestras mediciones ya que nuestro objetivo es conocer el desarrollo de la picadura y no de otros tipos o morfologías; evitaremos por lo tanto, las zonas marcadas de la figura 82.

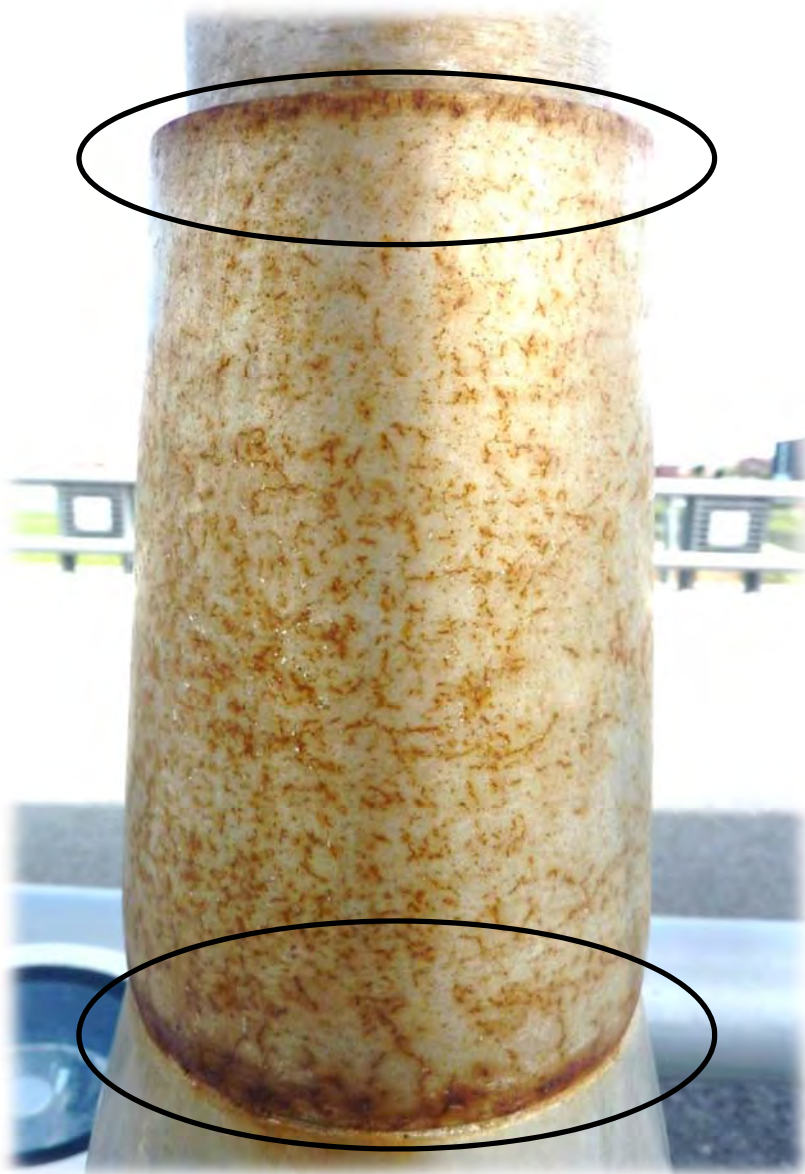


Figura 82. “Zonas no estudiadas del casquillo en C 10, Zona Oeste; en Marzo 2013”

En la selección escogida para este proyecto, se han tomado las zonas de estudio según el siguiente criterio:

- Las zonas de estudio irán referenciadas por la primera selección de fotografías (Enero).
- La zona de estudio central, se encontrará en el centro de la cara seleccionada.
- Las siguientes dos zonas de estudio se encontrarán a 2 cm superior e inferiormente de la zona de estudio central.
- Evitaremos, si es preciso, seleccionar una zona de estudio que nos falsee la medida.

Apoyándonos en la Figura 80. “Mallado de ejemplo del casquillo objeto de estudio” vamos a realizar el mallado de la fotografía, y determinaremos las zonas de estudio, obteniendo las zonas remarcadas en la figura 83.

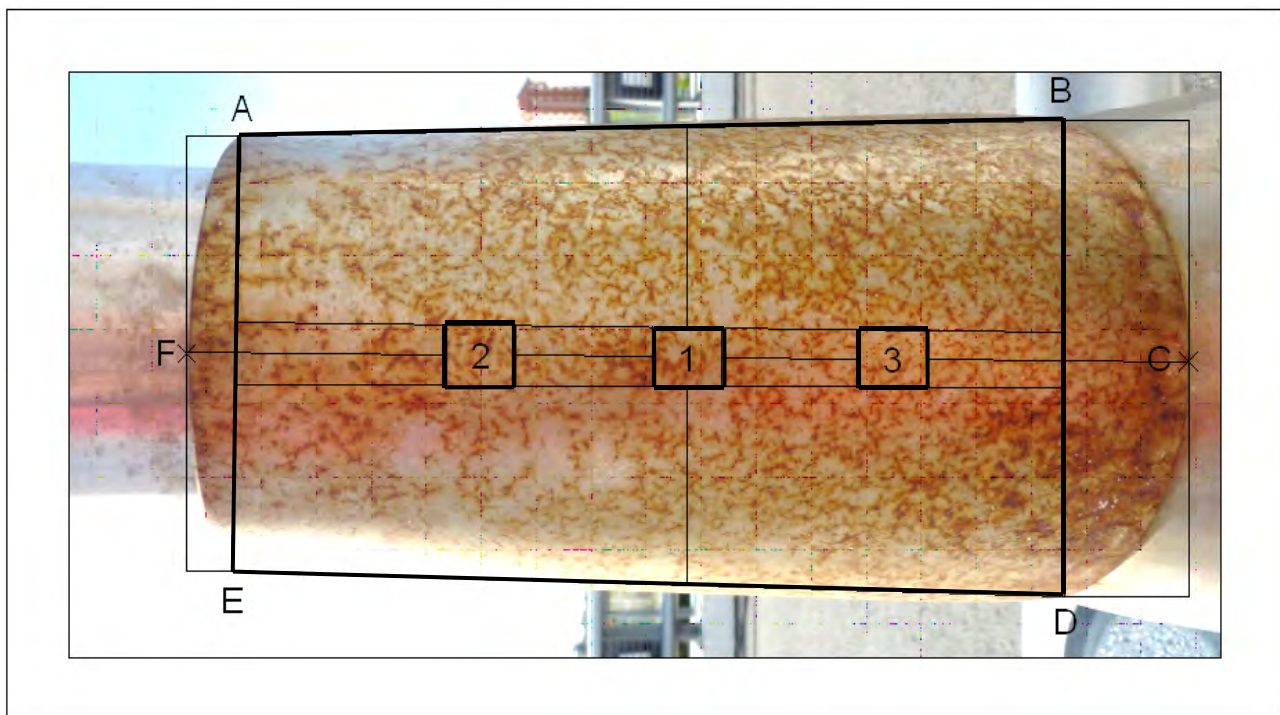


Figura 83. “Selección de zona de estudio en el casquillo de ejemplo”

Los cálculos desarrollados para la obtención de nuestro mallado de ejemplo son los siguientes:

Cotas reales:

Altura de la cara (Segmento FC) = 14,52 cm

Diámetro superior (segmento AE) = 7 cm

Diámetro inferior (segmento BD) = 8,5 cm

Medidas que nos proporciona el programa AutoCAD:

Altura de la cara (Segmento FC) = 8,2 cm

Diámetro superior (segmento AE) = 3,45 cm

Diámetro inferior (segmento BD) = 3,77 cm

La figura 84 muestra las cotas que tomamos para delimitar las zonas de estudio.

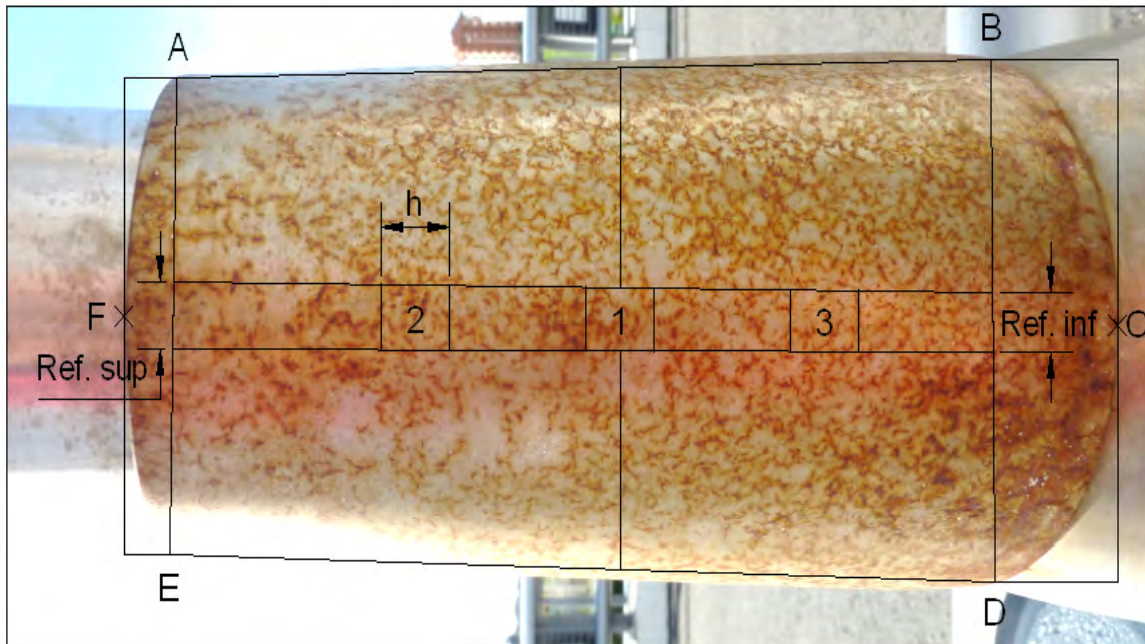


Figura 84. “Cotas en el casquillo para la selección de zona de estudio de ejemplo”

Cálculo de altura (h) de la zona de estudio para nuestra imagen (1cm):

$$h = \frac{8,2 \text{ cm dibujo} * 1 \text{ cm real}}{14,5 \text{ cm real}} = 0,5655 \text{ cm dibujo} \quad (12)$$

Cálculo de la referencia superior (Ref. sup) para la proyección de las zonas de estudio (1cm):

$$Ref. sup = \frac{3,45 \text{ cm dibujo} * 1 \text{ cm real}}{7 \text{ cm real}} = 0,493 \text{ cm dibujo} \quad (13)$$

Cálculo de la referencia inferior (Ref. inf) para la proyección de las zonas de estudio (1cm), tal y como aparece en la siguiente expresión.

$$Ref. inf = \frac{3,77 \text{ cm dibujo} * 1 \text{ cm real}}{8,5 \text{ cm real}} = 0,443 \text{ cm dibujo} \quad (14)$$

En nuestro caso, vamos a seleccionar como primera zona de estudio a la central, como segunda a la superior y la inferior será la tercera. Este criterio lo mantendremos de la misma forma para el resto de las selecciones de zonas de estudio. Para comprobar que los resultados de mediciones eran correctos, se acudió a tomar medidas directamente desde las referencias obtenidas y verificar que las muestras eran de 1 cm² y no se habían visto alteradas por la curvatura del soporte.

3.3.2.6.- Paso 6: Diferenciar y contabilizar picaduras.

La figura 85 es el organigrama correspondiente al paso 6, diferenciar y contabilizar picaduras.

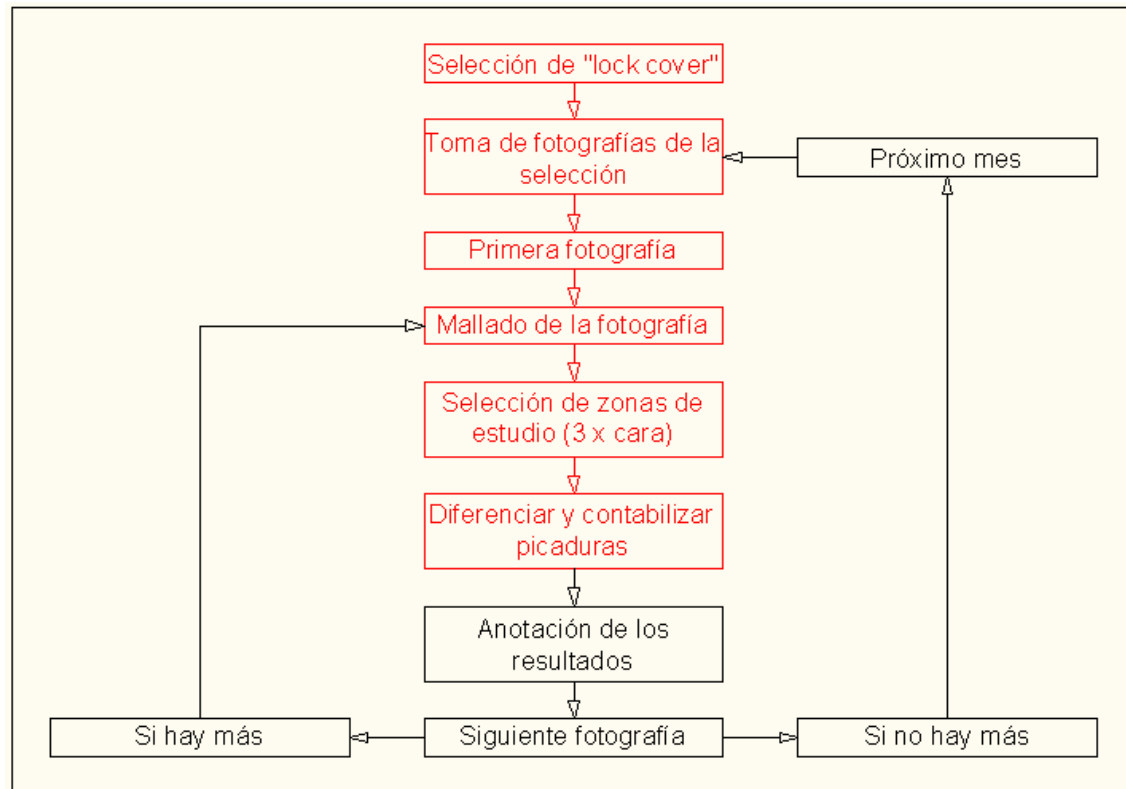


Figura 85. “Organigrama, paso 6”

Diferenciar picaduras y contabilizarlas es el proceso más exigente de nuestro estudio y, asimismo, el que más tiempo requiere.

Lo primero que hemos de hacer con las zonas de estudio es extraerlas y ampliarlas hasta que podamos reconocer, incluso las nuevas picaduras. Distinguimos tres tipos principales de picadura que se identificarán como:

- N: Nueva picadura
- P: Picadura avanzada
- C: Colapso de picadura

También anotaremos el número de grietas de corrosión para obtener una proporción con los colapsos, en cuanto a frecuencia de aparición se refiere.

Los siguientes ejemplos presentados en las figuras 86,87 y 88 son equivalentes a la distinción y contabilización de picaduras en el casquillo “C 1”, zona este en Febrero 2013, y zonas 1, 2 y 3 respectivamente.

Zona 1:



Nuevas picaduras: 47

Picaduras avanzadas: 17

Colapsos de picadura: 23

Hilos de corrosión: 15

Figura 86. “Zona de estudio 1 en el casquillo C1, zona este, Febrero 2013”

Zona 2:



Nuevas picaduras: 45

Picaduras avanzadas: 22

Colapsos de picadura: 21

Hilos de corrosión: 8

Figura 87. “Zona de estudio 2 en el casquillo C1, zona este, Febrero 2013”

Zona 3:



Nuevas picaduras: 40

Picaduras avanzadas: 33

Colapsos de picadura: 14

Hilos de corrosión: 20

Figura 88. “Zona de estudio 3 en el casquillo C1, zona este, Febrero 2013”

3.3.2.7.- Paso 7: Anotación de los resultados.

La figura 89 es el organigrama correspondiente al paso 7: anotación de resultados.

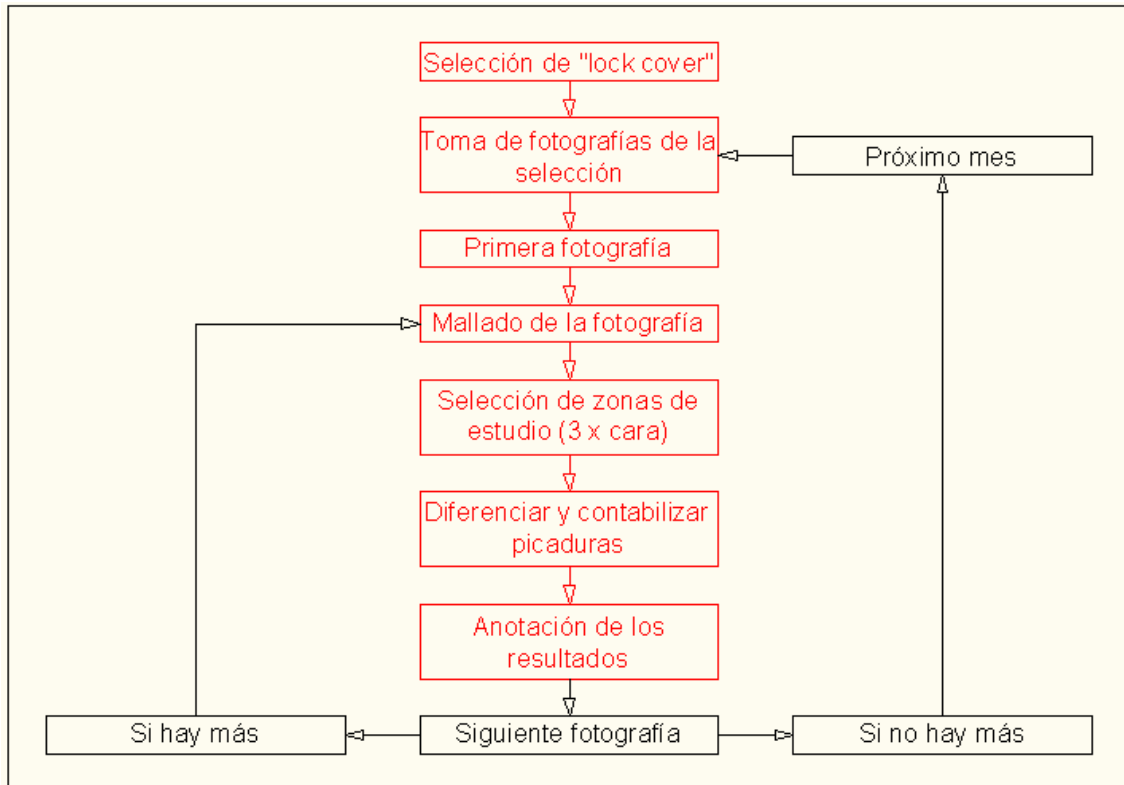


Figura 89. “Organigrama, paso 7”

En este paso lo que tenemos que hacer es recopilar la información obtenida de forma segura. Como vamos a trabajar con muchos datos al mes ($3 \times 2 \times 10 \times 3 = 180$ datos) se desarrolló una Tabla Excel para almacenarlos, y usarlos de forma más directa para la obtención de resultados. Además, como la elección de las zonas de estudio es de una forma aleatoria podemos, de esos tres datos obtenidos, calcular la media para suponer ese valor y el estado del casquillo. El margen de error puede ser mayor que si estudiásemos cinco o siete zonas por cara, pero la evolución que desarrolla es bastante acusada.

Las dos siguientes tablas indican la forma, a modo de ejemplo, en que se recoge la información obtenida. Las tablas 2 y 3 equivalen a todo el primer mes de estudio, Enero 2013. La letra M es la media aritmética de las 3 medidas obtenidas, “t” representa Tiempo, “E” y “O”, Este y Oeste respectivamente.

Tabla 3. “Datos de evolución de picadura nuevas, N, propagación de picaduras P y colapso, C, Enero 2013, casquillos (1 - 5)”

t	S		1				2				3				4				5			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T1 Ene	E	N	47	45	40	44	31	19	36	28,7	29	27	37	31	25	26	54	35	31	30	7	22,7
		P	17	22	33	24	33	43	44	40	17	18	11	15,3	25	14	33	24	33	42	22	32,3
		C	23	21	14	19,3	24	34	28	28,7	10	10	13	11	16	27	19	20,7	9	24	9	14
	O	N	37	37	15	29,7	16	28	18	20,7	17	31	20	22,7	24	21	18	21	11	14	13	12,7
		P	16	24	23	21	9	17	15	13,7	9	25	24	19,3	22	27	38	29	10	11	22	14,3
		C	17	17	26	20	13	10	12	11,7	4	9	13	8,7	17	18	11	15,3	1	4	13	6

Tabla 4. “Datos de evolución de picadura nuevas, N, propagación de picaduras P y colapso, C, Enero 2013, casquillos (6 - 10)”

t	S		6				7				8				9				10			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T1 Ene	E	N	30	50	36	38,7	43	15	34	30,7	30	30	40	33,3	50	47	48	48,3	41	51	88	60
		P	21	26	22	23	5	21	25	17	24	22	32	26	21	36	52	36,33	42	43	45	43,3
		C	21	12	14	15, 7	36	16	22	24,7	22	31	28	27	33	34	22	29,7	30	27	14	23,7
	O	N	23	26	28	25,7	42	26	20	29,3	27	29	54	36,7	48	47	34	43	56	51	43	50
		P	37	38	47	40,7	50	40	63	51	34	25	37	32	67	29	35	43,7	25	26	19	23,3
		C	21	17	20	19,3	30	25	28	27,7	26	7	12	15	17	27	20	21,3	7	12	15	11,3

3.3.2.8.- Paso 8: Siguiendo fotografía y final del proceso.

La figura 90 es el organigrama correspondiente al paso 8, adquisición de la siguiente fotografía y final del proceso.

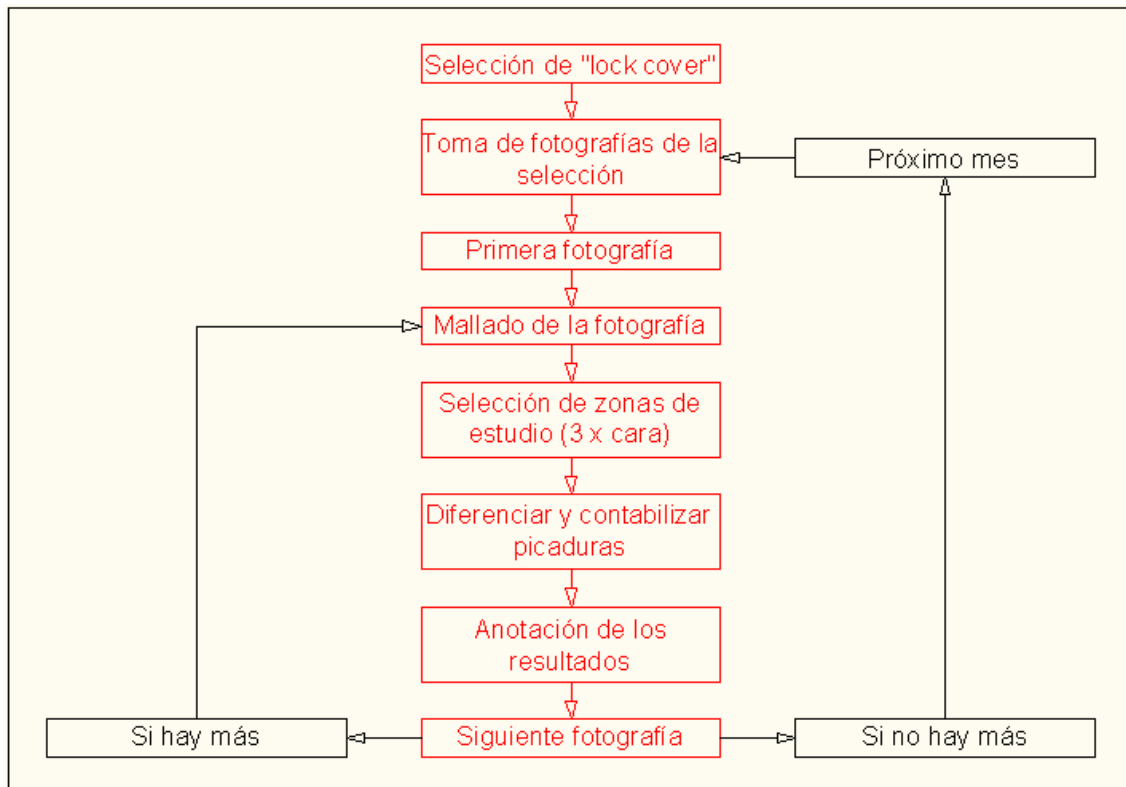


Figura 90. “Organigrama, paso 8”

En este paso tendremos que seleccionar la siguiente fotografía, siguiendo el siguiente orden que se ha establecido para el estudio. Pueden suceder dos situaciones; que no queden más imágenes relevantes de estudio, o que aún queden zonas por inspeccionar obteniendo las opciones que aparecen en la figura 90, derecha e izquierda respectivamente, del paso número 8.

Si hay más zonas por inspeccionar, iremos a la figura 91. “Organigrama, si hay más” descrito a continuación; en caso contrario, “Organigrama, si no hay más” en la figura 92.

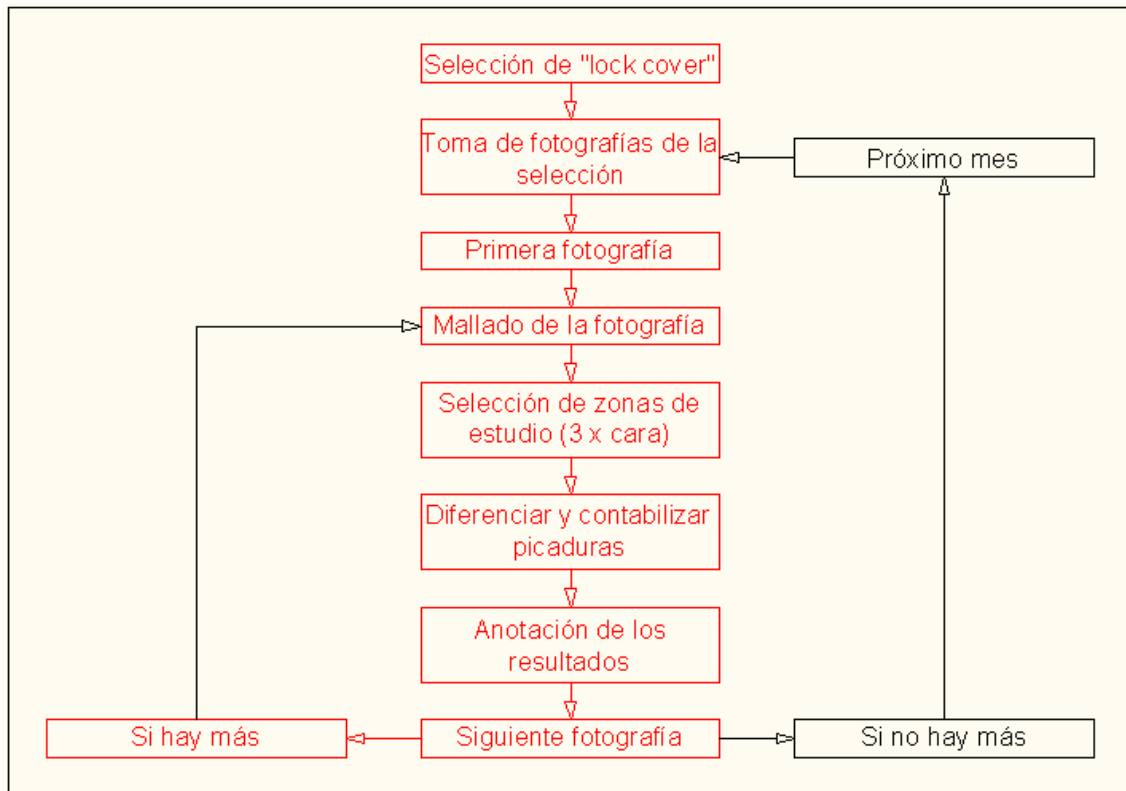


Figura 91. “Organigrama, si hay más”

La secuencia para seguir un orden en esta etapa del estudio es la siguiente:

- C 1, zona este
- C 1, zona oeste
- C 2, zona este
- C 2, zona oeste
- C 3, zona este
- ...
- C 10, zona oeste

Como siempre comenzamos analizando la parte este del casquillo; seguidamente analizaremos la oeste. Una vez estudiadas ambas, pasaremos a la siguiente imagen y repetiremos el proceso, siempre y cuando haya más objeto de inspección o estudio susceptible de obtener resultados significativos.

Si no quedan más fotografías para realizar el estudio, esperaremos un mes hasta volver a comenzar el proceso tomando, nuevas fotografías y continuando el protocolo establecido en la figura 67.

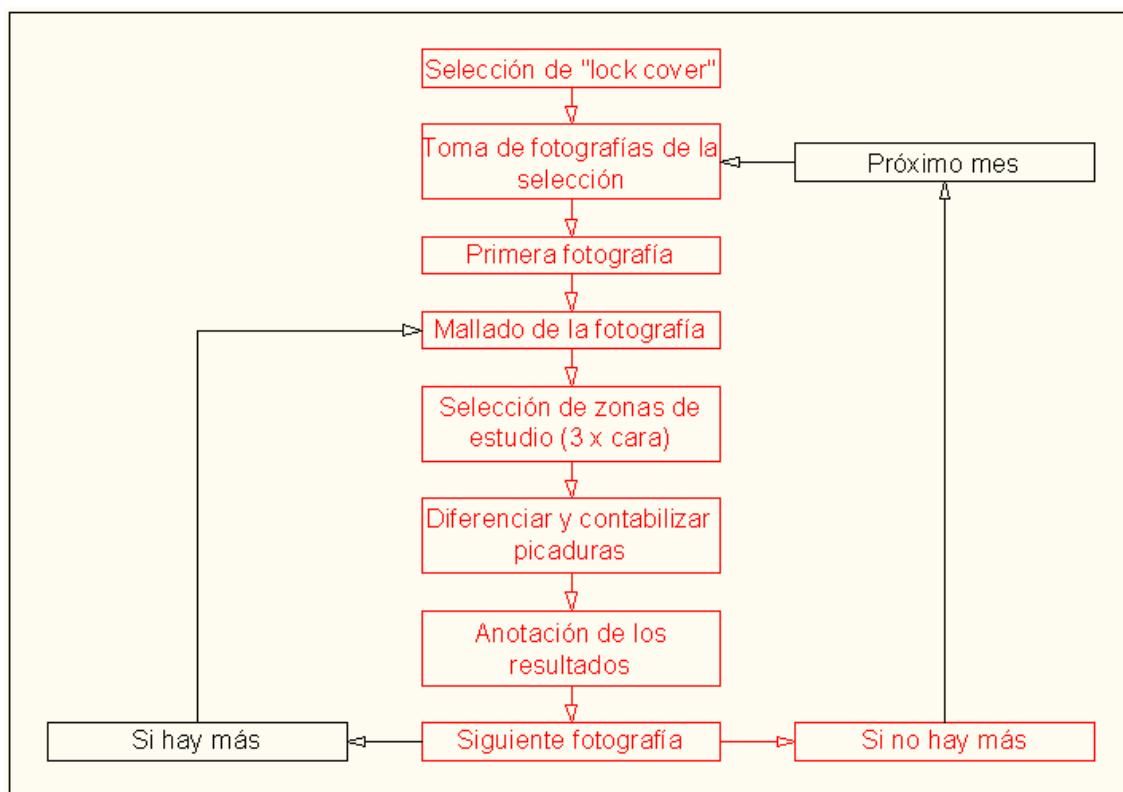


Figura 92. “Organigrama, si no hay más”

La primera vez que se realiza el proceso es bastante más complicado que el resto de las veces, ya que hay que elaborar los criterios, bases para comenzar y los mallados de las imágenes.

3.3.3.- Método de medición de tamaño medio de picadura

Para este proyecto resulta esencial y, es una de las partes más importantes, medir el tamaño de las picaduras. Para ello, empleamos un calibre, de apreciación 0,005 cm como el de la figura 93. Hay tres estados fundamentales de la picadura, como se ha explicado (considerando a la grieta de corrosión como colapso) y, por lo tanto, requerimos saber el diámetro y radio medio de estas picaduras. Contamos con la ventaja de tener una distinción por tipo, lo cual nos clasificará mejor los tamaños de las picaduras, y podremos conocerlas más de cerca.

Tomamos cinco medidas de cada tipo de picadura, con el fin de obtener una media de las mismas realizando un total de 15 mediciones. Suponemos que las picaduras tienen geometría esférica (anteriormente se han citado estudios que hablan sobre su forma ovalada; pero es en profundidad, no en superficie) y, por lo tanto, midiendo su diámetro, tendremos los datos que necesitamos.



Figura 93. “Calibre utilizado para el estudio”

Esta medición la tenemos que realizar con la mayor precisión posible, y para ello, vamos a usar una lupa de 30 aumentos para ajustar al máximo la medida. Además, escogeremos las picaduras más características de cada tipo, y con limpieza suficiente para realizar la medida en mejores condiciones. Los valores que obtengamos aquí serán los que gobiernan todas las ecuaciones y modelado de los resultados obtenidos de los valores de este Proyecto Fin de Carrera.

3.3.4.- Estudios adicionales

Para poder estudiar más factores que puedan afectar a los casquillos, haremos un pequeño estudio para estimar el tráfico que circula por el puente; asimismo, mediremos la deformación existente en todos los casquillos, con el fin de obtener una relación con otros posibles tipos de corrosión, como pudiera ser la corrosión bajo tensión.

3.3.4.1.- Método empleado de estimación del tráfico

Para contabilizar arbitrariamente una cantidad de circulación sobre el puente, se ha establecido el criterio de anotar en un intervalo de cinco minutos la cantidad de vehículos que han pasado por el “Puente Juan José Arenas” en un intervalo de cinco minutos, considerando cualquier vehículo que pase por las dos calzadas e, independientemente si es una moto, coche o camión.

Las medidas se realizaran en distintas horas del día, evitando los momentos punta de circulación o los horarios nocturnos. Afectaría a la media realmente no contar con el horario nocturno, pero sólo haremos la media de automóviles/hora en horario de día. Para establecer la media de automóviles que circulan cada hora sobre el puente (fuera del horario nocturno) se han usado las siguientes ecuaciones (15 y 16) respectivamente:

Nº Vehículos = Suma de todos los vehículos que han pasado por el puente en todas las mediciones

Nº Mediciones= Periodicidad de las mediciones realizadas

$$Media (5 minutos) = \frac{N^{\circ} Vehículos}{N^{\circ} Mediciones} = \frac{automóviles}{5 minutos} \quad (15)$$

$$Media (hora) = \frac{automóviles}{5 minutos} \frac{12 * 5 minutos}{hora} = \frac{automóviles}{hora} \quad (16)$$

3.3.4.2.- Método de medición de la deformación existente en los casquillos debido a su diseño

Se puede observar, a simple vista, una importante deformación existente en los casquillos. Se encuentra a 2,5 cm de su base (zona señalada de la figura 94) y que se extiende a lo largo de la corona cónica. Esta deformación tiene, a primera vista, un aspecto distinto al cilíndrico, ya que muestra una forma ovalada.



Figura 94. “Ejemplo de toma de fotografía C 1, Zona Oeste; en Marzo 2013”

Para hacer la medición se utilizará un calibre o pie de rey, con una apreciación de 0,005 cm. Obteniendo un radio de los casquillos a 2,5 cm del suelo, de 4,125 cm. Tomaremos medias de los 10 casquillos, con el fin de poder contrastar los resultados obtenidos, con la deformación individual y global media de todos los soportes.

Para poder verificar su forma ovalada, mediremos los dos diámetros principales del soporte a 2,5 cm del suelo, que corresponderán con los anclados en su base. La figura 95 indica la posición de los diámetros a medir, a y b, según la orientación dada.

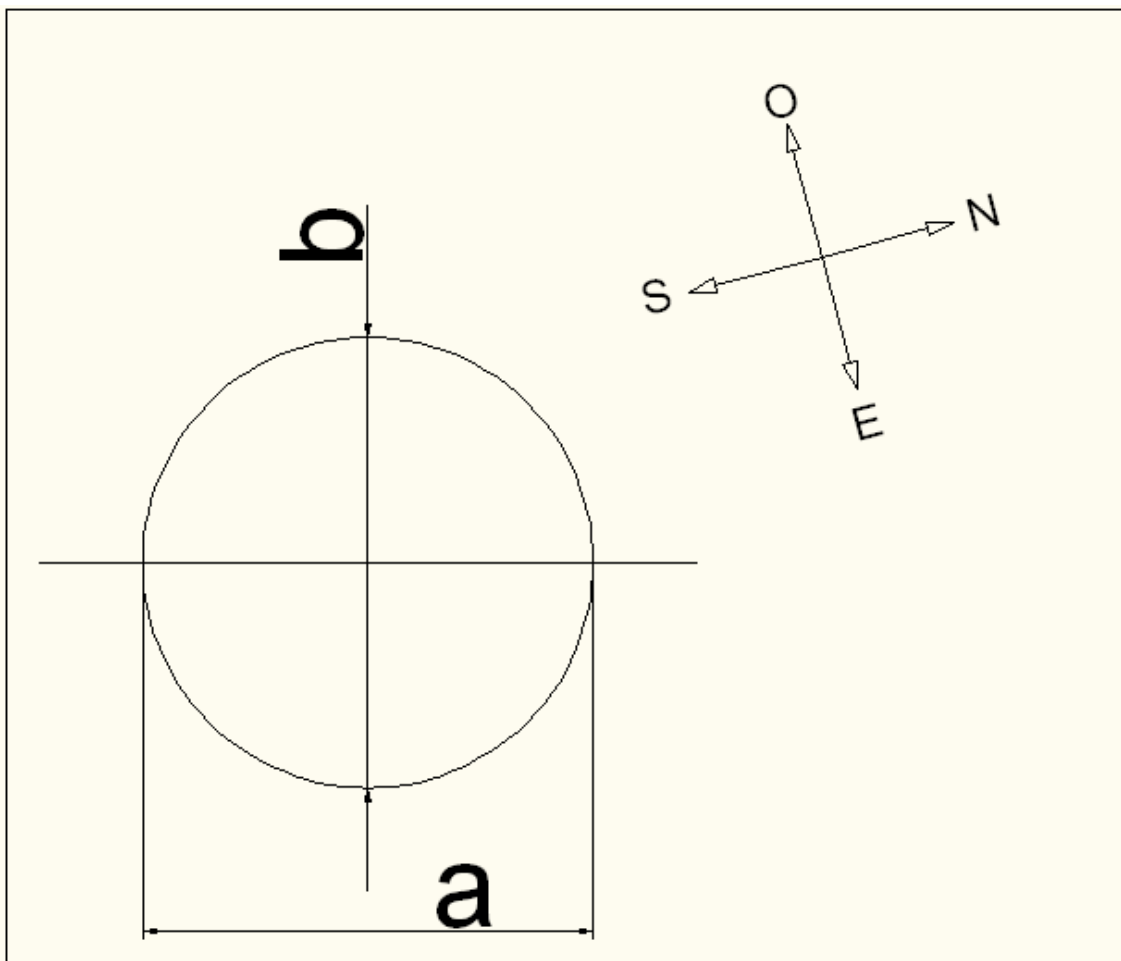


Figura 95. “Esquema de medición de diámetros de los casquillos”

Capítulo 4

Resultados y análisis

Los resultados se presentarán de forma secuencial atendiendo a las variables tomadas de referencia, haciendo un análisis particular de ellos, para finalizar con un análisis global de los mismos.

4.1.- Estimación de tránsito de tráfico sobre el puente

El tránsito de automóviles sobre el Puente Juan José Arenas se ha estimado atendiendo al método planteado en el subcapítulo “3.3.4.1.- Método de estimación del tráfico empleado”.

Se han hecho cuatro anotaciones del tiempo en cuatro días diferentes para estimar la circulación, a las 12:00, 14:00, 16:00 y 18:00 horas de tal forma que, las horas no solapen con salidas laborales o del campus universitario. La tabla 5 recoge los datos obtenidos.

Tabla 5. “Estimación del tráfico sobre el Puente”

Día / hora	12:00	14:00	16:00	18:00
1	-	71	-	-
2	-	-	64	-
3	-	-	-	53
4	83	-	-	-

Por medio de las ecuaciones 15 y 16 calcularemos la media de automóviles a la hora que circulan sobre “Puente Juan José Arenas”.

$$Media (5 minutos) = \frac{71+64+53+83}{4} \frac{automóviles}{5 minutos} = \frac{67,75 automóviles}{5 minutos} \quad (15)$$

$$Media (hora) = \frac{67,75 automóviles}{5 minutos} \frac{12 * 5 minutos}{hora} = \frac{813 automóviles}{hora} \quad (16)$$

Por lo tanto podemos suponer que pasan cada hora fuera de horarios punta o de poca circulación 813 automóviles.

4.2.- Tamaño medio de picadura

Se realizan las mediciones de tamaño de picadura de la forma descrita en “3.3.3.- Método de medición de tamaño medio de picadura” obteniendo los resultados expuestos en la tabla 6.

Tabla 6. “Tamaño de cada tipo de picadura”

Medición	1	2	3	4	5	Diámetro (cm)	Superficie (cm ²)	Radio (cm)
Picadura nueva	0,035	0,03	0,025	0,03	0,03	0,03	0,000706858	0,015
Picadura avanzada	0,075	0,07	0,06	0,06	0,08	0,069	0,003739281	0,0345
Colapso de picadura	0,115	0,105	0,115	0,11	0,11	0,111	0,009676891	0,0555

Para verificar unos buenos tamaños medios de picadura, se comparan con otros datos existentes y más comunes. Oscilan entre los valores de 0,0254 cm hasta 0,254 cm suele ser el diámetro medio de las picaduras normalmente un margen en el cual estamos. A modo de referencia cabe destacar que las picaduras son pequeñas y no tan voluminosas como en el Palacio de los Deportes de Santander, en donde hay picaduras que pueden llegar a medir más de 3 cm de diámetro, cómo se muestra en la figura 96.



Figura 96. “Corrosión por picadura en la entrada del Palacio de Deportes en Santander”

Para fijar las medidas que utilizaremos en el Proyecto Fin de Carrera, usaremos el diámetro medio obtenido:

Diámetro medio de picadura nueva: 0,03 cm

Diámetro medio de picadura avanzada: 0,069 cm

Diámetro medio de colapso de picadura: 0,111 cm

Con estas medidas, podemos hacer un pequeño margen de valores para ubicar una picadura cualquiera, en uno de estas tres categorías dependiendo del diámetro medio medido.

$0,005 \text{ cm} < \text{Diámetro medido} < 0,0495 \text{ cm} \rightarrow \text{Picadura nueva}$

$0,0495 \text{ cm} < \text{Diámetro medido} < 0,09 \text{ cm} \rightarrow \text{Picadura avanzada}$

$0,09 \text{ cm} < \text{Diámetro medido} \rightarrow \text{Colapso de picadura}$

Estos valores serán los que utilizaremos para evaluar todas las medidas y, por lo tanto, la referencia del tamaño de picadura de este proyecto. Estos resultados están mostrados gráficamente en el apartado “4.4.5.2.- Modelización de las grietas de corrosión” en comparación con el tamaño de las grietas de corrosión. En la figura 97 se ve al autor tomando mediciones del tamaño de la picadura.



Figura 97. “Tomando mediciones del tamaño de la picadura”

4.3.- Deformación existente en los casquillos

Ya tomadas las medidas correspondientes, como se enunció en el apartado “3.3.4.2.- Método de medición de la deformación existente en los casquillos debido a su diseño” siendo, “a”, la dirección de ubicación en fila de los tirantes y, “b”, el perpendicular al mismo, se ha elaborado la tabla 7; correspondiente a la toma realizada de mediciones de diámetros.

Tabla 7. “Medidas de deformación existente en los casquillos”

Casquillo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media (cm)
a	8,76	8,805	8,69	8,7	8,78	8,735	8,74	8,71	8,77	8,66	8,735
b	8,685	8,51	8,645	8,54	8,64	8,58	8,6	8,52	8,68	8,62	8,602

Estas medidas no se han visto alteradas en ocho meses, pero es llamativo ver la tabla 8, en donde apreciamos la deformación en cm que ha sufrido el casquillo en este plazo de tiempo. “a” es la dirección de ubicación en fila de los tirantes y, “b”, es el valor perpendicular al mismo; comprobamos que, $a > b$, por lo cual, las fuerzas que están actuando sobre las caras perpendiculares a nuestras zonas de estudio, son mayores y, por lo tanto, éstas están más deformadas. La deformación en el radio de la pieza es considerable, casi 2,5 mm. Por ello, se realizará un estudio para comprobar a qué tipo de fuerzas está sometido cada casquillo, datos que se presentarán más adelante.

Tabla 8. “Deformación existente en los casquillos”

Casquillo	Radio	Diferencia
a	4,3675	0,2425
b	4,301	0,176

Un pieza sometida a tracción se deforma, alargándose en este caso; los radios de los casquillos se han visto deformados, pero no de una forma homogénea, sino de forma muy diferenciada en relación a los diámetros perpendiculares. Este efecto puede ser un potenciador de la corrosión, sobre todo atendiendo al fenómeno de Corrosión Bajo Tensión; pero en el capítulo de conclusiones expondremos el daño que provoca esta tensión existente en los casquillos.

La forma que describe la nueva geometría, a 2,5 cm de la base del casquillo, ya no es circular, sino ovalada en forma de elipse. Podemos representar la nueva forma de esta pieza y, apreciar visualmente, la deformación existente. La figura 98 es un ejemplo de representación de los resultados obtenidos.

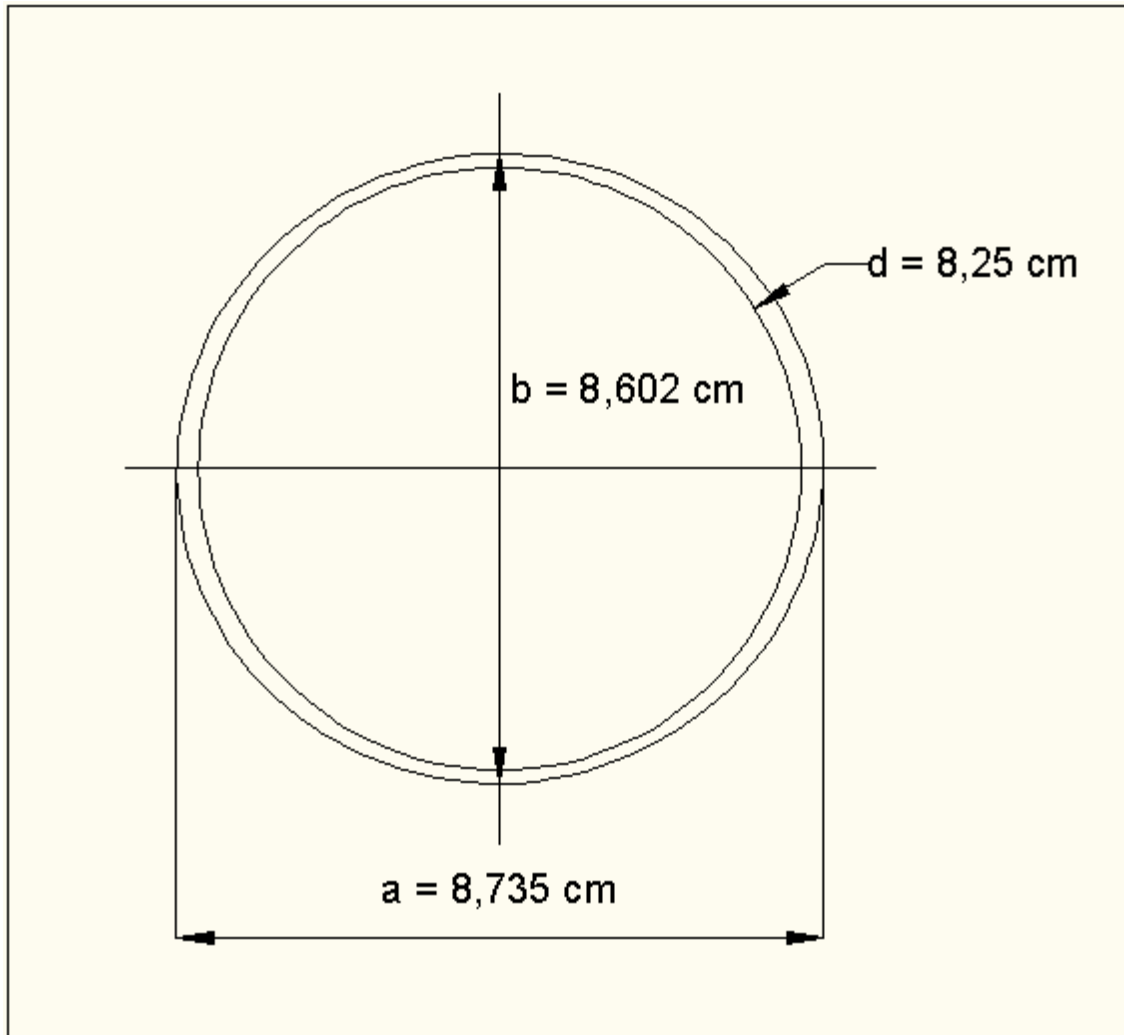


Figura 98. “Comparación de deformación del casquillo a 2,5 cm de la base”

El grado de deformación de los casquillos no es idéntico a los tomados de referencia, hecho que habrá que considerar para comparar la deformación existente con la cinética de evolución de las picaduras casquillo a casquillo.

La comparación se realiza desde la combinación de los radios, obteniendo la media entre los dos. Usando la tabla 9 obtenemos una lista ordenada con el grado de alargamiento de los casquillos y el conocimiento de su magnitud.

Tabla 9. “Tasa de deformación a 2,5 cm de la base casquillo a casquillo”

Casquillo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Deformación en "a"	0,255	0,278	0,22	0,225	0,265	0,243	0,245	0,23	0,26	0,205
Deformación en "b"	0,218	0,13	0,198	0,145	0,195	0,165	0,175	0,135	0,215	0,185
Total	0,236	0,204	0,209	0,185	0,23	0,204	0,21	0,183	0,238	0,195
% Deformado	5,727	4,939	5,061	4,485	5,576	4,939	5,091	4,424	5,758	4,727

Así los distintos casquillos experimentan diferente grado de deformación de la forma:

$$9 > 1 > 5 > 7 > 3 > 6 > 2 > 10 > 4 > 8.$$

En la figura 99 se representan y comparan los valores obtenidos de porcentaje deformado de cada casquillo, siendo la variación máxima entre ellos la que aparece entre los casquillos 9 y 8 que adquiere un valor de 1,334 %.

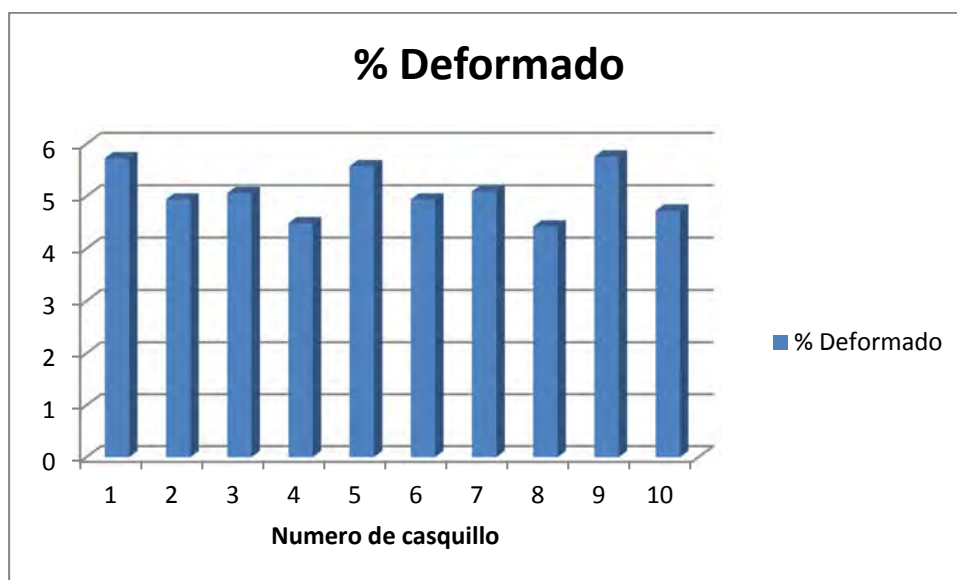


Figura 99. “Porcentaje deformado de cada casquillo”

Los casquillos 2 y 6 tienen la misma deformación y situamos al casquillo 9 como el más deformado, un 5,727% respecto de su radio original y al casquillo 8 como el menos deformado de igual forma.

Por último, comprobamos la diferencia existente entre la deformación de los radios equivalentes a la parte Oeste y Este del “Puente Juan José Arenas”. La tabla 10, recoge la media de los primeros cinco casquillos equivalentes a la zona Oeste del puente, y los cinco últimos equivalentes a la zona Este.

Comparando los resultados obtenidos podemos decir que la zona Oeste del puente está más deformada que la Este, aunque con muy pequeña diferencia en las dos direcciones analizadas.

Tabla 10. “Comparación de la deformación de los casquillos Oeste-Este”

Casquillo	Zona Oeste	Zona Este
Deformación en "a"	0,2485	0,2365
Deformación en "b"	0,177	0,175

A continuación se presentan los resultados globales obtenidos del estudio de las picaduras en los casquillos del “Puente Juan José Arenas”.

4.4.- Resultados globales obtenidos del estudio de las picaduras en los casquillos del “Puente Juan José Arenas”

Siguiendo el procedimiento de “3.3.2.7.- Paso 7: Anotación de los resultados” se exponen todos los datos tomados en campo de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura, según la nomenclatura empleada previamente. (N,P,C) respectivamente.

El estudio abarca ocho meses y se expondrán los datos mes a mes de forma secuencial, siendo un total de 1440 muestras para la realización del Proyecto Fin de Carrera. Los meses de Junio y Julio son interpolaciones entre el mes de Mayo y Agosto, para proporcionar linealidad en el estudio.

Las tablas 11 y 12 presentan los resultados equivalentes a Enero 2013; se expresarán agrupando las medidas obtenidas de los del casquillos 1 al 5 y del 6 al 10, respectivamente; equivalentes a la zona Oeste y Este del puente, respectivamente.

Tabla 11. “Resultados Enero 2013, casquillos (1 - 5)”

t	S		1				2				3				4				5			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T1 Ene	E	N	47	45	40	44	31	19	36	28,7	29	27	37	31	25	26	54	35	31	30	7	22,7
		P	17	22	33	24	33	43	44	40	17	18	11	15,3	25	14	33	24	33	42	22	32,3
		C	23	21	14	19,3	24	34	28	28,7	10	10	13	11	16	27	19	20,7	9	24	9	14
	O	N	37	37	15	29,7	16	28	18	20,7	17	31	20	22,7	24	21	18	21	11	14	13	12,7
		P	16	24	23	21	9	17	15	13,7	9	25	24	19,33	22	27	38	29	10	11	22	14,3
		C	17	17	26	20	13	10	12	11,7	4	9	13	8,7	17	18	11	15,3	1	4	13	6

Tabla 12. “Resultados Enero 2013, casquillos (6 - 10)”

t	S		6				7				8				9				10			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T1 Ene	E	N	30	50	36	38,7	43	15	34	30,7	30	30	40	33,3	50	47	48	48,3	41	51	88	60
		P	21	26	22	23	5	21	25	17	24	22	32	26	21	36	52	36,3	42	43	45	43,3
		C	21	12	14	15,7	36	16	22	24,7	22	31	28	27	33	34	22	29,7	30	27	14	23,7
	O	N	23	26	28	25,7	42	26	20	29,3	27	29	54	36,7	48	47	34	43	56	51	43	50
		P	37	38	47	40,7	50	40	63	51	34	25	37	32	67	29	35	43,7	25	26	19	23,3
		C	21	17	20	19,3	30	25	28	27,7	26	7	12	15	17	27	20	21,3	7	12	15	11,3

Las tablas 13 y 14 presentan los datos equivalentes a Febrero 2013; se expresarán agrupando las medidas obtenidas de los casquillos 1 al 5 y del 6 al 10 respectivamente; de igual forma a Enero.

Tabla 13. “Resultados Febrero 2013, casquillos (1 - 5)”

t	S	1				2				3				4				5				
		1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	
T2 Feb	E	N	33	37	54	41,3	22	19	44	28,3	17	23	16	18,7	19	26	42	29	25	32	14	23,7
		P	36	43	38	39	37	40	47	41,3	17	24	19	20	27	14	19	20	40	53	19	37,3
		C	33	25	23	27	30	37	30	32,3	12	14	14	13,3	21	27	23	23,7	11	25	11	15,7
	O	N	10	15	29	18	37	55	46	46	32	44	35	37	32	32	41	35	9	27	19	18,3
		P	14	24	19	19	21	21	33	25	18	28	37	27,7	27	28	45	33,3	11	13	23	15,7
		C	24	21	30	25	13	15	17	15	4	17	16	12,3	21	19	20	20	4	7	10	7

Tabla 14. “Resultados Febrero 2013, casquillos (6 -10)”

t	S		6				7				8				9				10			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T2 Feb	E	N	18	38	39	31,7	13	28	16	19	40	46	70	52	73	74	54	67	50	104	108	87,3
		P	19	23	24	22	14	18	20	17,3	28	25	36	29,7	27	30	55	37,3	47	49	56	50,7
		C	22	19	17	19,3	37	23	29	29,7	23	33	36	30,7	33	34	26	31	31	28	17	25,3
	O	N	22	36	19	25,7	48	52	47	49	63	86	44	64,3	43	40	37	40	70	67	75	70,7
		P	27	47	25	33	46	37	53	45,3	41	47	29	39	65	31	39	45	25	31	22	26
		C	21	23	24	22,7	26	28	29	27,7	19	19	15	17,7	18	20	20	19,3	8	14	15	12,3

Las tablas 15 y 16 presentan los datos equivalentes a Marzo 2013; se expresarán agrupando las medidas obtenidas de los casquillos 1 al 5 y del 6 al 10 respectivamente; de igual forma a anteriores.

Tabla 15. “Resultados Marzo 2013, casquillos (1 - 5)”

t	S		1				2				3				4				5			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T3 Mar	E	N	33	42	20	31,7	40	31	19	30	22	16	17	18,3	24	41	37	34	20	30	19	23
		P	32	54	34	40	28	30	39	32,3	27	30	22	26,3	27	16	23	22	43	47	21	37
		C	35	29	28	30,7	30	38	29	32,3	13	18	24	18,3	21	27	24	24	16	29	11	18,7
	O	N	7	16	20	14,3	40	31	19	30	25	38	24	29	27	29	39	31,7	11	29	31	23,7
		P	16	33	31	26,7	28	30	39	32,3	19	32	39	30	26	33	40	33	13	15	26	18
		C	24	22	30	25,3	13	21	22	18,7	6	17	16	13	22	20	25	22,3	4	6	11	7

Tabla 16. “Resultados Marzo 2013, casquillos (6 -10)”

t	S		6				7				8				9				10			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T3 Mar	E	N	14	15	20	16,3	48	37	49	44,7	50	31	40	40,3	69	72	56	65,7	54	86	91	77
		P	26	37	38	33,7	18	16	26	20	22	22	20	21,3	28	33	47	36	57	54	51	54
		C	18	19	18	18,3	35	30	25	30	25	38	29	30,7	33	35	29	32,3	33	31	19	27,7
	O	N	18	27	24	23	33	30	61	41,3	23	30	15	22,7	49	33	41	41	64	70	77	70,3
		P	36	36	19	30,3	39	42	54	45	35	62	41	46	60	34	36	43,3	25	33	23	27
		C	24	33	23	26,7	27	29	30	28,7	24	18	26	22,7	24	21	20	21,7	8	13	17	12,7

Las tablas 17 y 18 presentan los datos equivalentes a Abril 2013; se expresarán agrupando las medidas obtenidas de los casquillos 1 al 5 y del 6 al 10 respectivamente; de igual forma a anteriores.

Tabla 17. “Resultados Abril 2013, casquillos (1 - 5)”

t	S		1				2				3				4				5			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T4 Abr	E	N	43	49	21	37,7	42	34	17	31	27	23	18	22,7	31	44	34	36,3	47	33	36	38,7
		P	38	57	35	43,3	28	32	43	34,3	30	33	22	28,3	30	29	46	35	48	51	29	42,7
		C	36	32	28	32	30	38	29	32,3	13	19	25	19	21	19	20	20	6	8	12	8,7
	O	N	7	10	35	17,3	42	34	22	32,7	20	50	27	32,3	25	32	41	32,7	16	33	28	25,7
		P	17	35	24	25,3	30	33	35	32,7	23	45	40	36	29	35	45	36,3	14	17	27	19,3
		C	32	32	33	32,3	17	25	27	23	6	18	16	13,3	26	27	27	26,7	4	7	11	7,3

Tabla 18. “Resultados Abril 2013, casquillos (6 -10)”

t	S		6				7				8				9				10			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T4 Abr	E	N	20	22	25	22,3	50	38	52	46,7	53	38	37	42,7	70	72	59	67	55	93	93	80,3
		P	30	40	39	36,3	21	16	27	21,3	23	26	21	23,3	30	34	47	37	60	55	52	55,7
		C	23	21	25	23	35	30	25	30	27	41	33	33,7	33	37	29	33	34	33	19	28,7
	O	N	20	28	30	26	43	33	63	46,3	24	33	16	24,3	46	36	46	42,7	69	73	79	73,7
		P	37	39	21	32,3	46	43	55	48	35	62	43	46,7	61	37	39	45,7	25	33	25	27,7
		C	24	34	23	27	28	32	30	30	24	19	26	23	35	35	31	33,7	10	14	19	14,3

Las tablas 19 y 20 presentan los datos equivalentes a Mayo 2013; se expresarán agrupando las medidas obtenidas de los casquillos 1 al 5 y del 6 al 10 respectivamente; de igual forma a anteriores.

Tabla 19. “Resultados Mayo 2013, casquillos (1 - 5)”

t	S		1				2				3				4				5			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T5 May	E	N	39	51	21	37	42	35	20	32,3	28	23	19	23,3	31	46	29	35,3	55	34	35	41,3
		P	39	58	33	43,3	30	33	43	35,3	30	34	24	29,3	31	29	49	36,3	54	49	33	45,3
		C	37	32	28	32,3	31	37	29	32,3	13	19	25	19	21	19	21	20,3	6	11	13	10
	O	N	10	12	38	20	43	34	25	34	23	51	23	32,3	22	30	38	30	17	36	32	28,3
		P	15	36	26	25,7	27	34	35	32	25	46	43	38	27	35	47	36,3	17	21	27	21,7
		C	35	34	35	34,7	18	25	27	23,3	8	18	18	14,7	34	34	33	33,7	8	9	12	9,7

Tabla 20. “Resultados Mayo 2013, casquillos (6 -10)”

t	S		6				7				8				9				10			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T5 May	E	N	21	27	29	25,7	50	31	53	44,7	53	38	38	43	74	71	59	68	70	78	81	76,3
		P	28	41	40	36,3	23	20	30	24,3	23	27	24	24,7	38	36	48	40,7	61	57	46	54,7
		C	28	27	29	28	38	31	25	31,3	28	43	35	35,3	35	37	29	33,7	34	33	22	29,7
	O	N	22	29	33	28	43	33	64	46,7	28	33	13	24,7	46	43	49	46	72	74	79	75
		P	39	36	27	34	49	46	53	49,3	37	62	45	48	64	38	40	47,3	26	33	27	28,7
		C	27	40	25	30,7	32	33	31	32	24	20	26	23,3	35	36	32	34,3	10	14	19	14,3

Las tablas 21 y 22 presentan los datos equivalentes a Junio 2013; se expresarán agrupando las medidas obtenidas de los casquillos 1 al 5 y del 6 al 10 respectivamente; de igual forma a anteriores.

Tabla 21. “Resultados Junio 2013, casquillos (1 - 5)”

t	S		1				2				3				4				5			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T6 Jun	E	N	42	52	23	39	42	36	20	32,7	28	23	20	23,7	31	46	29	35,3	55	35	34	41,3
		P	42	60	34	45,3	31	33	44	36	31	35	24	30	32	30	49	37	54	51	34	46,3
		C	39	34	28	33,7	32	38	29	33	14	21	26	20,3	21	19	21	20,3	7	13	14	11,3
	O	N	11	13	38	20,7	45	34	27	35,3	25	51	26	34	25	30	39	31,3	18	36	34	29,3
		P	17	36	27	26,7	27	35	36	32,7	29	46	45	40	30	34	50	38	19	23	28	23,3
		C	36	35	36	35,7	18	26	27	23,7	11	18	19	16	30	35	33	32,7	8	9	13	10

Tabla 22. “Resultados Junio 2013, casquillos (6 -10)”

t	S		6				7				8				9				10			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T6 Jun	E	N	23	26	28	25,7	50	33	52	45	53	38	38	43	74	74	61	69,7	71	76	81	76
		P	29	42	42	37,7	26	23	34	27,7	23	28	24	25	39	38	52	43	63	59	47	56,3
		C	30	30	33	31	39	31	28	32,7	29	44	36	36,3	36	39	32	35,7	35	34	23	30,7
	O	N	27	30	34	30,3	42	36	64	47,3	30	34	13	25,7	48	43	53	48	77	74	80	77
		P	41	35	29	35	51	48	55	51,3	38	63	47	49,3	66	39	42	49	28	33	28	29,7
		C	28	43	25	32	33	33	32	32,7	24	20	27	23,7	35	36	32	34,3	10	14	19	14,3

Las tablas 23 y 24 presentan los datos equivalentes a Julio 2013; se expresarán agrupando las medidas obtenidas de los casquillos 1 al 5 y del 6 al 10 respectivamente; de igual forma a anteriores.

Tabla 23. “Resultados Julio 2013, casquillos (1 - 5)”

t	S	1				2				3				4				5				
		1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	
T7 Jul	E	N	44	54	26	41,3	42	36	20	32,7	29	24	22	25	32	46	29	35,7	55	37	34	42
		P	45	63	35	47,7	32	33	44	36,3	33	36	25	31,3	32	30	49	37	55	54	34	47,7
		C	41	35	29	35	34	40	30	34,7	15	22	26	21	21	19	21	20,3	7	14	15	12
	O	N	12	14	38	21,3	46	34	28	36	26	51	28	35	29	31	39	33	19	35	37	30,3
		P	19	37	29	28,3	27	36	36	33	32	46	46	41,3	33	34	53	40	21	26	28	25
		C	36	36	37	36,3	19	26	27	24	13	19	20	17,3	26	37	34	29	9	10	15	11,3

Tabla 24. “Resultados Julio 2013, casquillos (6 -10)”

t	S	6				7				8				9				10				
		1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	
T7 Jul	E	N	26	25	26	25,7	50	34	51	45	53	38	38	43	74	76	64	71,3	72	74	82	76
		P	31	44	45	40	28	27	39	31,3	23	28	24	25	39	40	56	45,	65	60	49	58
		C	32	32	36	33,3	40	32	30	34	31	45	36	37,3	37	41	36	38	36	35	23	31,3
	O	N	32	32	36	33,3	40	38	65	47,7	32	36	12	26,7	51	43	56	50	81	75	81	79
		P	44	35	31	36,7	54	51	58	54,3	40	64	48	50,7	69	41	44	51,3	29	33	30	30,7
		C	28	45	26	33	33	34	33	33,3	25	20	28	24,3	35	37	33	35	10	15	20	15

Las tablas 25 y 26 presentan los datos equivalentes a Agosto 2013; se expresarán agrupando las medidas obtenidas de los casquillos 1 al 5 y del 6 al 10 respectivamente; de igual forma a anteriores.

Tabla 25. “Resultados Agosto 2013, casquillos (1 - 5)”

t	S		1				2				3				4				5			
			1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
T8 Ago	E	N	47	55	28	43,3	42	37	20	33	29	24	23	25,3	32	46	29	35,7	55	38	33	42
		P	48	65	36	49,7	33	33	45	37	34	37	25	32	33	31	49	37,7	55	56	35	48,7
		C	43	37	29	36,3	35	41	30	35,3	16	24	27	22,3	21	19	21	20,3	8	16	16	13,3
	O	N	13	15	38	22	48	34	30	37,3	28	51	31	36,7	32	31	40	34,3	20	35	39	31,3
		P	21	37	30	29,3	27	37	37	33,7	36	46	48	43,3	36	33	56	41,7	23	28	29	26,7
		C	37	37	38	37,3	19	27	27	24,3	16	19	21	18,7	22	38	34	31,3	9	10	16	11,7

Tabla 26. “Resultados Agosto 2013, casquillos (6 -10)”

t	S	6				7				8				9				10				
		1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	
T8 Ago	E	N	28	24	25	25,7	50	36	50	45,3	53	38	38	43	74	79	66	73	73	72	82	75,7
		P	32	45	47	41,3	31	30	43	34,7	23	29	24	25,3	40	42	60	47,3	67	62	50	59,7
		C	34	35	40	36,3	41	32	33	35,3	32	46	37	38,3	38	43	39	40	37	36	24	32,3
	O	N	37	33	37	35,7	39	41	65	48,3	34	37	12	27,7	53	43	60	52	86	75	82	81
		P	46	34	33	37,7	56	53	60	56,3	41	65	50	52	71	42	46	53	31	33	31	31,7
		C	29	48	26	34,3	34	34	34	34	25	20	29	24,7	35	37	33	35	10	15	20	15

Con todos los datos ya expuestos, podemos comenzar a profundizar en el análisis para conocer la evolución de cada tipología de la picadura, de la superficie corroída, del daño global, del diámetro de picadura, modelizaciones... como veremos en los siguientes apartados.

4.4.1.- Evolución de la tipología de picaduras

Analizando los datos obtenidos, y atendiendo a la tipología de picaduras, podemos ver de forma más clara y distinguida la evolución de las picaduras y, con ello, ubicar todos los resultados en tablas que nos permitan hacer representaciones comparativas gráficas. Dichos datos permitirán encontrar las leyes aproximadas de la cinética de evolución de cada tipología de picadura.

Para la elaboración de las tablas y graficas utilizaremos los datos medios de cada tipología de picadura, atendiendo a su posicionamiento, (Oeste, Este y combinado), y las representaremos en conjunto y separadas, reuniendo cada tipología.

El primer paso es reunir los datos medios de cada tipología de cada casquillo, sumando cada media obtenida desde el casquillo 1 hasta el 10 y dividiéndolo entre 10. Con esto obtendremos tres tablas distintas; Oeste, Este y combinada, con tres columnas cada una. Estas tres columnas equivalen al número medio de picaduras de cada tipología; nueva picadura, picadura avanzada y colapso de picadura.

Las siguientes tablas (27-29) son las obtenidas en el primer paso descrito equivalentes a Oeste, Este y combinada respectivamente. La tabla 27, mostrada a continuación, es la evolución de los números medios de cada tipología de picadura atendiendo solamente a la zona Oeste de cada casquillo.

Tabla 27. “Evolución de cada tipología de picadura, Oeste”

Oeste			
Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	29	29	16
Febrero	40	31	18
Marzo	33	33	20
Abril	35	35	23
Mayo	37	36	25
Junio	38	38	26
Julio	39	39	26
Agosto	41	41	27

La tabla 28 es la evolución de los números medios de cada tipología de picadura, atendiendo solamente a la zona Este de cada casquillo.

Tabla 28. “Evolución de cada tipología de picadura, Este”

Este

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	37	28	21
Febrero	40	31	25
Marzo	38	32	26
Abril	43	36	25
Mayo	43	37	26
Junio	43	38	27
Julio	44	40	28
Agosto	44	41	30

La tabla 29 es la evolución de los números medios de cada tipología de picadura, sin tener en cuenta la orientación y, por lo tanto, siendo la media de todo el “Puente Juan José Arenas”.

Tabla 29. “Evolución de cada tipología de picadura, Combinado”

Combinado

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	33	28	19
Febrero	40	31	21
Marzo	35	33	23
Abril	39	35	24
Mayo	40	37	25
Junio	41	38	26
Julio	41	39	27
Agosto	42	41	28

Una vez obtenidas las tablas con todos los datos elaborados y trabajados a lo largo del desarrollo del Proyecto Fin de Carrera, se procede a mostrar las gráficas en función del tiempo de la forma:

- Número de las distintas picaduras en la zona Oeste en función del tiempo
- Número de las distintas picaduras en la zona Este en función del tiempo
- Número de las distintas picaduras combinadas en función del tiempo
- Número de nuevas picaduras en función del tiempo
- Número de picaduras avanzadas en función del tiempo
- Número de colapsos de picaduras en función del tiempo

Con los resultados de las tablas (27-29) se han elaborado las figuras (100-105). La figura 100 presenta el número de picaduras de cada tipo en función del tiempo seleccionando, solo la zona Oeste. Esta gráfica, al igual que las dos siguientes, muestra el avance completo en función del tiempo, pero como veremos, realizaremos una de cada tipología para así poder analizarla individualmente.

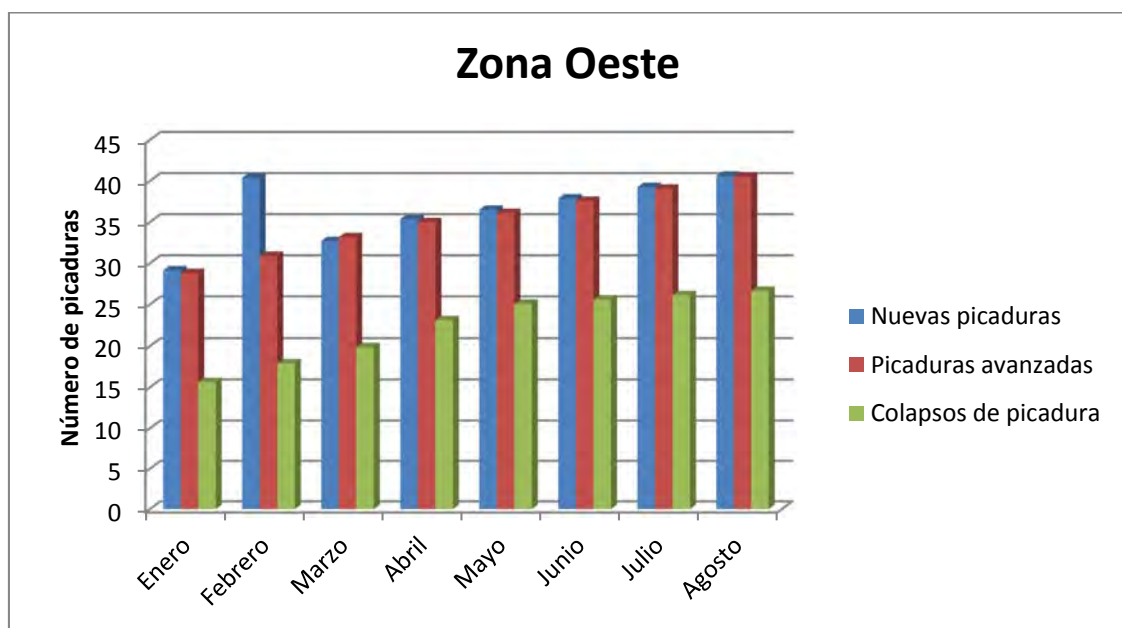


Figura 100. “Número de picaduras en la zona Oeste en función del tiempo”

En la figura 100 se muestra cómo el avance en la zona Oeste de los casquillos es constante en el tiempo en cada una de sus tipologías. Podemos observar de esta comparación, cómo el número de nuevas picaduras y de picaduras avanzadas es muy parecido, con la salvedad del mes de Febrero, en el cual las nuevas picaduras aumentaron muchísimo en comparación a otros meses. De la misma forma, los colapsos de picadura aproximadamente la mitad que las otras dos tipologías, pero entraremos más en detalle en las gráficas individualizadas para cada tipología que se presentan más adelante.

La figura 101 presenta el número de picaduras de cada tipo en función del tiempo seleccionando sólo la zona Este. Las nuevas picaduras son las más numerosas, los colapsos de picadura las menos numerosas, y por lo tanto, el número de picaduras avanzadas se encuentra entre ambos valores.

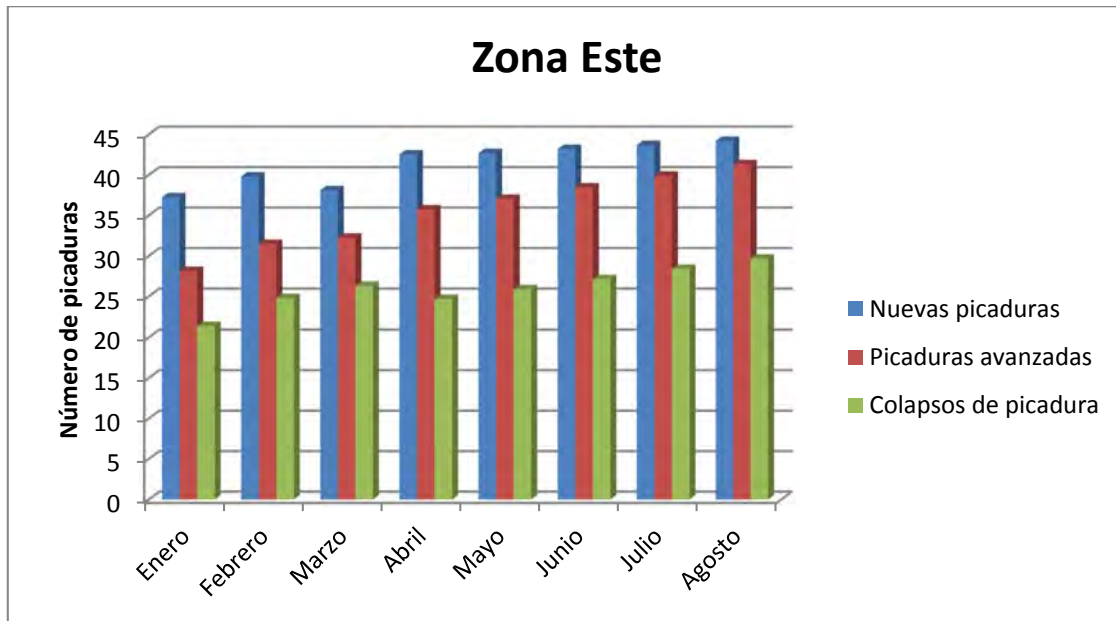


Figura 101. “Número de picaduras en la zona Este en función del tiempo”

Con esta grafica podemos comparar ciertos aspectos globales del ataque experimentado por los casquillos con la zona Oeste. El número de nuevas picaduras es bastante mayor al de picaduras avanzadas, asimismo, el número de picaduras en general, es mayor y por lo tanto, ya podemos observar que la zona Este, está más afectada que la Oeste.

La figura 102 presenta el número de picaduras combinadas en función del tiempo, la cual es el resultado de la media aritmética de todos los datos reunidos en la Zona Oeste y Este del “Puente Juan José Arenas”.

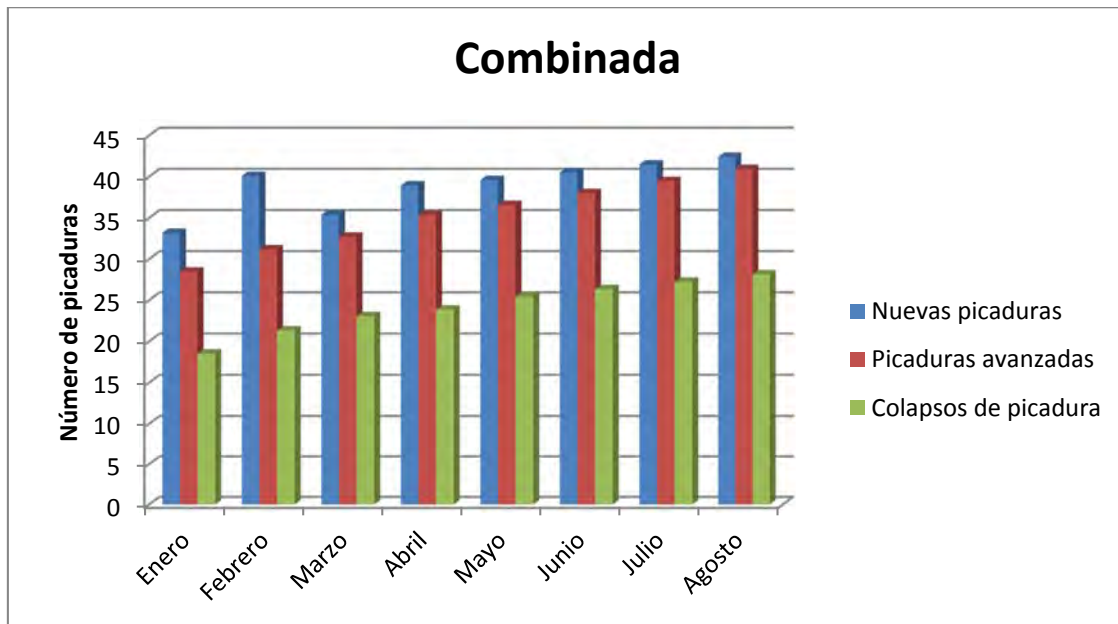


Figura 102. “Número de picaduras combinadas en función del tiempo”

Al obtener la figura 102, podemos observar cómo es la tendencia global de cada tipología de picadura, siendo, las nuevas picaduras mayores en número en todo momento, incluso con un destacado pico en Febrero. Las picaduras avanzadas, siempre están directamente relacionadas con las nuevas picaduras, de tal forma que, cuanto más vayan apareciendo, más picaduras avanzadas pueden coexistir después en la superficie, de tal forma que, un aumento continuo de nuevas picaduras, lo supone también de las picaduras avanzadas. De la misma forma, sucede con los colapsos de picadura: evolucionan a partir de las picaduras avanzadas y, al aumentar éstas, es más probable que colapsen. Aun así el número de colapsos es bastante inferior y, su cinética es la menor en estos ocho meses de estudio.

Una vez obtenida de forma global, cómo se propagan estas picaduras, se procede a realizar las gráficas individuales, para poder analizar la cinética de evolución, tipo a tipo. La figura 103 presenta el número de nuevas picaduras en función del tiempo comparando la zona Oeste, Este y la combinada.

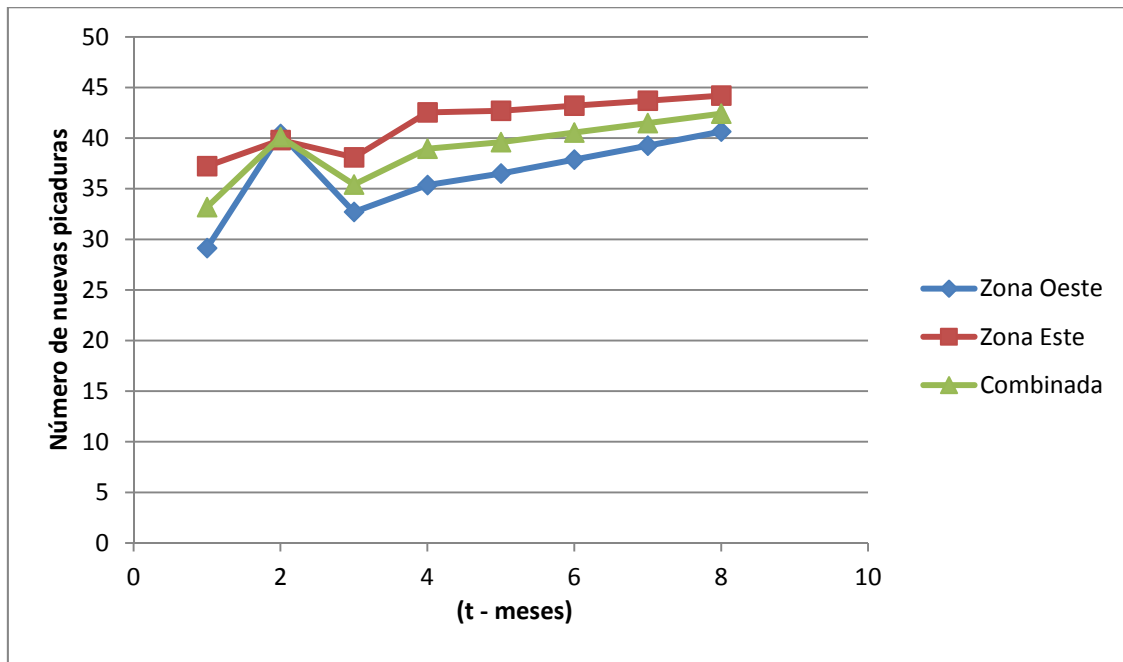


Figura 103. “Número de nuevas picaduras en función del tiempo”

En la figura 103 se observa una mayor afectación de la picadura en la zona Este, y una la subida importante de número de nuevas picaduras en Febrero y Abril, la cual, equivale a dos meses con muchas precipitaciones en Santander. Después de estas dos generaciones tan grandes de nuevas picaduras, éstas siguen surgiendo, pero con una cinética mucho más atenuada en el tiempo. En el mes de Marzo, hay una caída importante del número de picaduras, pero eso significa que, han pasado a ser picaduras avanzadas y no se ubican en el criterio que se está analizando. Por lo tanto, establecemos dos zonas significativas en la gráfica; una desde Enero a Abril y otra de Mayo a Agosto.

Estudiando la primera parte (Enero - Abril), se puede decir que la generación de nuevas picaduras no es estable ni constante, sino aleatoria. De forma muy distinta, en la segunda parte (Mayo- Agosto) se aprecia una estabilidad en la gráfica y una evolución muy constante de las picaduras. Por lo tanto, podemos definir, en la última parte del estudio una zona de cinética constante que, emplearemos para extrapolar número de nuevas picaduras a meses fuera del estudio.

La figura 104 presenta el número de picaduras avanzadas en función del tiempo comparando la zona Oeste, Este y la combinada.

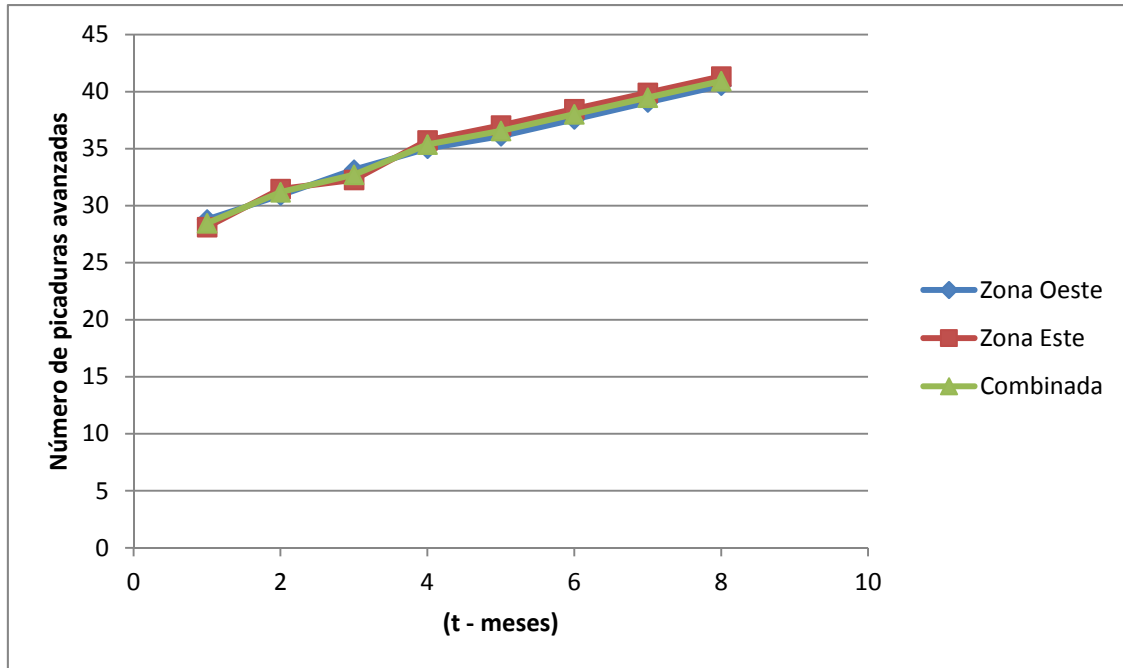


Figura 104. “Número de picaduras avanzadas en función del tiempo”

En esta ocasión, en la figura 104 se observa una evolución casi lineal de las picaduras avanzadas en ambas zonas de los casquillos. Al ser este tránsito tan constante, podemos suponer este estado, como el más estable dentro de las demás tipologías, ya que, a pesar de ser una zona intermedia entre los tipos de picaduras, posee una cinética muy constante y equilibrada. Esta cinética, será la que emplearemos para poder extrapolar los datos a otros meses fuera del estudio. La zona Este está un poco más afectada que la Oeste y, por lo tanto, podemos seguir con la premisa de las nuevas picaduras, en donde el Este, también estaba más afectado. Si aplicamos la distinción de zonas, usada en las nuevas picaduras; se pueden observar ciertos aspectos también relacionados con las picaduras avanzadas.

En el tramo Enero – Abril, se producen los mayores cambios, en cuanto a los números de picaduras, cómo se observa en la zona Este los dos saltos que se dan en Febrero y Abril así como la atenuación en Marzo. En el tramo de Mayo- Agosto, se recupera la linealidad en ambas zonas así como en la combinada, la cual, es más constante.

Finalmente, la figura 105 es el número de colapsos de picadura en función del tiempo de estudio comparando la zona Oeste, Este y la combinada.

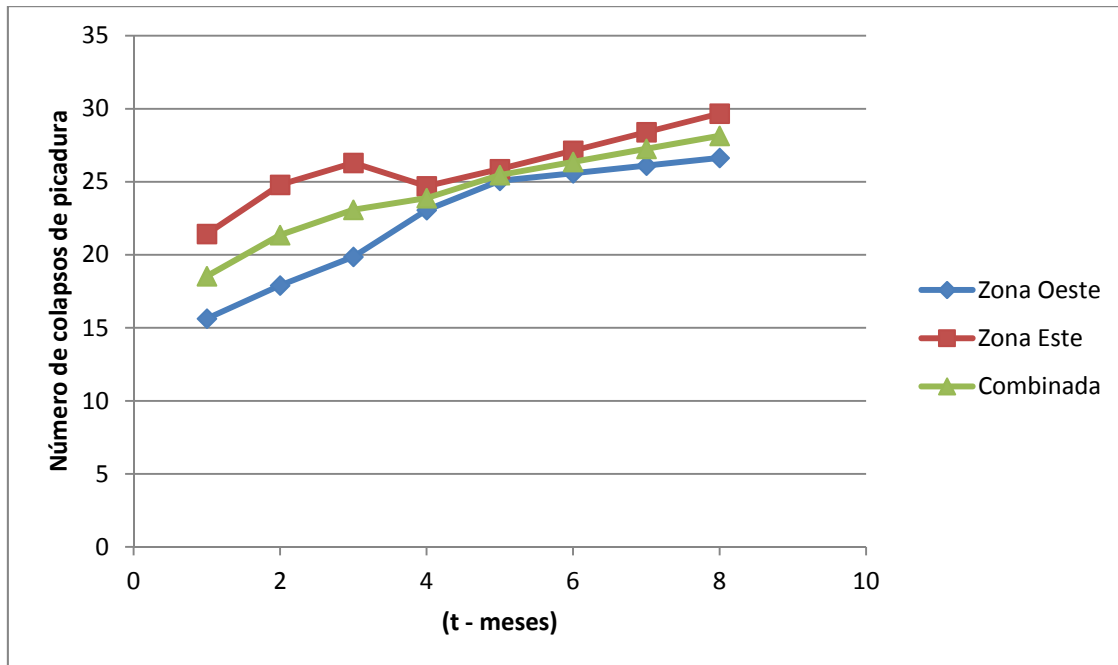


Figura 105. “Número de colapsos de picadura en función del tiempo”

Para analizar este último tipo, nos basaremos en las dos premisas previas; la zona más afectada y las dos zonas temporales que se han diferenciado en la gráfica.

Comenzando por la zona más afectada, vemos de nuevo cómo la zona Este está más afectada que la Oeste, y por lo tanto, al repetirse en las tres tipologías, podemos afirmar que, la zona Este sufre más deterioro por corrosión por picadura que la Oeste. La zona Este equivale a “la que mira al mar”. También podemos observar cómo en la zona Este la tangente es mayor y, por ello, la cinética de corrosión experimentada por los casquillos.

Observando las dos zonas temporales que hemos definido, en el periodo Enero – Abril, la evolución de los colapsos es menos constante. Diferenciando primero la zona Este, durante los tres primeros meses no ha frenado su crecimiento hasta su caída en Abril, en donde los colapsos comenzaron a agruparse y, por lo tanto, su número descendió. En cuanto a la zona Oeste, su crecimiento no frenó, pero también es debido a que el número inicial de colapsos era mucho más inferior, siendo solamente de 16 colapsos, frente a los 21 del Este.

La zona temporal Mayo – Agosto es más constante, pero ambas zonas, se rigen sobre cinéticas distintas, por ello, no podremos definir una como modelo a extrapolar y tendremos que emplear otros métodos para realizarlo: empleo de una ecuación aproximada relacionando las nuevas picaduras y picaduras avanzadas con la generación de colapsos de picadura.

4.4.2.- Evolución de la superficie corroída considerando cada tipología.

Una vez conocido el número de picaduras, cómo evolucionan en el tiempo, y su tamaño medio, podemos extrapolar estos datos a los casquillos, para analizar la superficie que ocupa cada tipo de picadura, la superficie libre que queda (no afectada por corrosión), cómo evoluciona el ataque mes a mes y los daños globales.

Para ello, se calcula el área que ocupa cada tipología de picadura en la zona de estudio de 1 cm², a partir de los datos medios de cada zona, seleccionando los parámetros que se detallan a continuación:

N = Número medio de nuevas picaduras

R_N = Radio medio de nueva picadura = 0,015 cm

P = Número medio de picaduras avanzadas

R_P = Radio medio de picadura avanzada = 0,0345 cm

C = Número medio de colapsos de picadura

R_C = Radio medio de colapso de picadura = 0,0555 cm

Tanto N, P como C dependen del mes de adquisición de datos.

Para el cálculo del total corroído por cada una de las tipologías, emplearemos las ecuaciones (17 - 19) las cuales nos darán el resultado de los cm² ocupados por cada tipología, que a su vez, es el porcentaje de tamaño respecto del área total de la zona de estudio.

$$N \cdot \pi \cdot R_N^2 = \text{Área de nuevas picaduras} \quad (17)$$

$$P \cdot \pi \cdot R_P^2 = \text{Área de picaduras avanzadas} \quad (18)$$

$$C \cdot \pi \cdot R_C^2 = \text{Área de colapsos de picadura} \quad (19)$$

Una vez obtenidos los resultados, se representan en una tabla de valores para poder trabajar con ellos y comparar su evolución. Si sumamos el área ocupada por cada tipología de un mes y lo restamos de 1 cm² obtendremos la superficie sin afectar o libre.

En las tablas (30 – 37) agruparemos los resultados obtenidos, anotando las áreas que ocupan cada tipo de picadura y el área total afectada para los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Junio, Julio y Agosto respectivamente,

Tabla 30. “Área afectada por cada tipología en Enero”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área ocupada (%)	Zona afectada	% Ocupado
T1 Enero	Este	N	37,2333	0,0263	0,3389	33,8925
		P	28,1333	0,1052		
		C	21,4333	0,2074		
	Oeste	N	29,1333	0,0206	0,2796	27,9566
		P	28,8000	0,1077		
		C	15,6333	0,1513		

Tabla 31. “Área afectada por cada tipología en Febrero”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área ocupada (%)	Zona afectada	% Ocupado
T2 Febrero	Este	N	39,8000	0,0281	0,3858	38,5783
		P	31,4667	0,1177		
		C	24,8000	0,2400		
	Oeste	N	40,4000	0,0286	0,3173	31,7317
		P	30,9000	0,1155		
		C	17,9000	0,1732		

Tabla 32. “Área afectada por cada tipología en Marzo”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área ocupada (%)	Zona afectada	% Ocupado
T3 Marzo	Este	N	38,1000	0,0269	0,4021	40,2088
		P	32,2667	0,1207		
		C	26,3000	0,2545		
	Oeste	N	32,7000	0,0231	0,3394	33,9381
		P	33,1667	0,1240		
		C	19,8667	0,1922		

Tabla 33. “Área afectada por cada tipología en Abril”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área ocupada (%)	Zona afectada	% Ocupado
T4 Abril	Este	N	42,5333	0,0301	0,4156	41,5604
		P	35,7333	0,1336		
		C	26,0333	0,2519		
	Oeste	N	35,3667	0,0250	0,3791	37,9088
		P	35,0000	0,1309		
		C	23,0667	0,2232		

Tabla 34. “Área afectada por cada tipología en Mayo”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área ocupada (%)	Zona afectada	% Ocupado
T5 Mayo	Este	N	42,7000	0,0302	0,4319	43,1872
		P	37,0333	0,1385		
		C	27,2000	0,2632		
	Oeste	N	36,5000	0,0258	0,4034	40,3356
		P	36,1000	0,1350		
		C	25,0667	0,2426		

Tabla 35. “Área afectada por cada tipología en Junio”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área ocupada (%)	Zona afectada	% Ocupado
T6 Junio	Este	N	43,2000	0,0305	0,4498	44,9843
		P	38,4667	0,1438		
		C	28,4667	0,2755		
	Oeste	N	37,8778	0,0268	0,4149	41,4909
		P	37,5778	0,1405		
		C	25,5889	0,2476		

Tabla 36. “Área afectada por cada tipología en Julio”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área ocupada (%)	Zona afectada	% Ocupado
T7 Julio	Este	N	43,7000	0,0309	0,4678	46,7813
		P	39,9000	0,1492		
		C	29,7333	0,2877		
	Oeste	N	39,2556	0,0277	0,4265	42,6462
		P	39,0556	0,1460		
		C	26,1111	0,2527		

Tabla 37. “Área afectada por cada tipología en Agosto”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área ocupada (%)	Zona afectada	% Ocupado
T8 Agosto	Este	N	44,2000	0,0312	0,4858	48,5784
		P	41,3333	0,1546		
		C	31,0000	0,3000		
	Oeste	N	40,6333	0,0287	0,4380	43,8015
		P	40,5333	0,1516		
		C	26,6333	0,2577		

Analizando los datos de las tablas presentadas, se han elaborado gráficos que representan la evolución, mes a mes, de la superficie que ocupa cada tipología, así como, la superficie no corroída en el casquillo. De esta forma se obtienen ocho gráficas para la zona Oeste y ocho para la Este. Para facilitar la toma de datos, reuniremos en la tabla 38 porcentaje del área ocupada sobre la zona de estudio o en cm² (ambos datos son iguales) de la zona Oeste.

Tabla 38. “Datos de superficie ocupada por cada tipología, Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02059	0,10769	0,15128	0,72043
Febrero	0,02856	0,11554	0,17322	0,68268
Marzo	0,02311	0,12402	0,19225	0,66062
Abril	0,02500	0,13087	0,22321	0,62091
Mayo	0,02580	0,13499	0,24257	0,59664
Junio	0,02677	0,14051	0,24762	0,58509
Julio	0,02775	0,14604	0,25268	0,57354
Agosto	0,02872	0,15156	0,25773	0,56199

El análisis de la tabla 38 permite, deducir como se reparten las áreas afectadas y su magnitud, obteniendo estas conclusiones preliminares:

- Nuevas picaduras: Ocupan del 2% a casi el 3% de la superficie del casquillo, a pesar de ser las más numerosas, como es intuitivo; son las que menos superficie deterioran. Su evolución es muy lenta llegando en ocho meses a ocupar un 0,8% más de la pieza; equivalente a un 0,1% de la superficie del casquillo al mes.
- Picaduras avanzadas: Ocupan del 11% al 15% de la superficie del casquillo. Esta superficie ya es relevante, ya que, visualmente se pueden apreciar a simple vista y dan el primer aspecto de deterioro al casquillo. Si su cinética de deterioro fuera constante, supondría la superficie ocupada por las picaduras avanzadas 0,55% al mes. La superficie ocupada por esta tipología es igual en Agosto a la superficie ocupada por los colapsos de picadura en Enero; lo cual marca una gran cinética de corrosión en el casquillo.
- Colapsos de picadura: Ocupan del 15% al 26% de la superficie del casquillo. Son las menos numerosas, pero, las más voluminosas. El avance en ocho meses ha sido de casi un 10% de la superficie del casquillo a más de 1,3% de la superficie al mes. Los colapsos por agrupación de picaduras y la forma de hilos de corrosión es la imagen más común en los casquillos.

La figura 106 es la representación del tamaño que tiene cada tipología y la superficie no corroída en la zona Oeste durante los ocho meses de estudio.

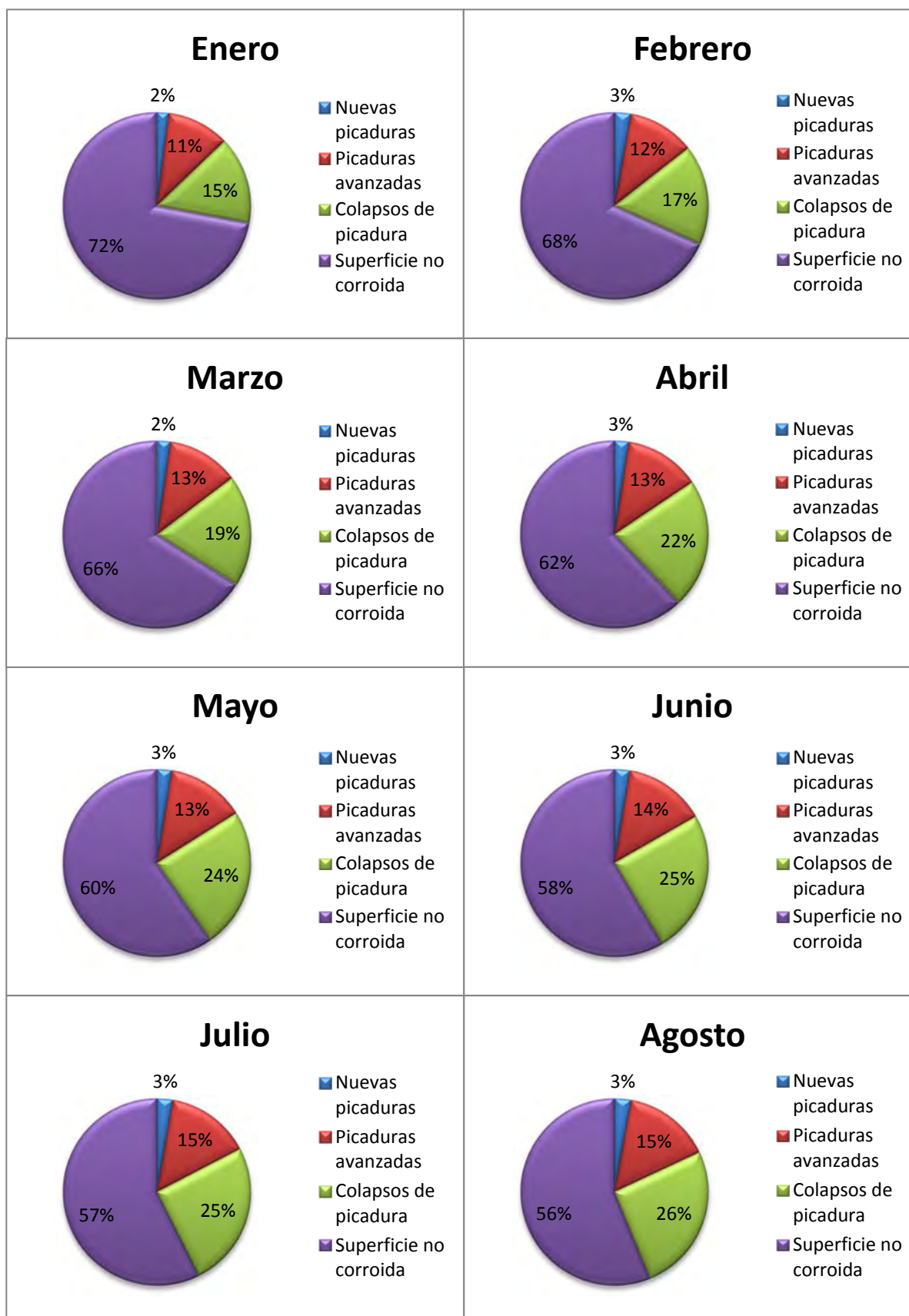


Figura 106. “Superficie ocupada por cada tipología en la zona Oeste”

La superficie libre en la zona Oeste se ha visto severamente reducida en el plazo de 8 meses; de un 72% a un 56%, lo cual implica un 16% corroído más en ocho meses casi un 2% al mes. Contando con que la superficie afectada era de un 28% inicialmente, al comenzar el estudio se concluye que; es alarmante que en ocho meses se haya corroído más de la mitad desde que la obra fuera finalizada.

Continuando el estudio, se recogen los datos concernientes a la zona Este en la tabla 39 de forma análoga a la efectuada en la zona Oeste.

Tabla 39. “Datos de superficie ocupada por cada tipología, Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02632	0,10520	0,20741	0,66107
Febrero	0,02813	0,11766	0,23999	0,61422
Marzo	0,02693	0,12065	0,25450	0,59791
Abril	0,03007	0,13362	0,23902	0,59730
Mayo	0,03018	0,13848	0,25031	0,58103
Junio	0,03054	0,14384	0,26257	0,56306
Julio	0,03089	0,14920	0,27482	0,54509
Agosto	0,03124	0,15456	0,28708	0,52712

Analizaremos los siguientes datos para así después, contrastarlos con los resultados de la zona Oeste. Cabe destacar que la zona Este, inicialmente estaba más afectada por la corrosión por picadura, la superficie no corroída, era menor.

- Nuevas picaduras: Ocupan del 2,5% al 3% de la superficie del casquillo, de igual forma a la zona Oeste; son las más numerosas pero las que menos superficie ocupan. Su evolución es la más lenta, llegando en 8 meses a ocupar un 0,5% más de la pieza, equivalente a un 0,06% de la superficie del casquillo al mes.
- Picaduras avanzadas: Ocupan del 10% al 15% de la superficie del casquillo. La superficie afectada y el estado de las picaduras avanzadas coinciden en Este y Oeste, a pesar de un estado inicial más avanzado en el Este, con un avance de 0,6% mensual.
- Colapsos de picadura: Ocupan del 20% al 28% de la superficie del casquillo. El avance en 8 meses ha sido de un 8% de la superficie del casquillo, siendo 1% de la superficie ocupada más al mes. La cinética, por lo tanto, es menor que en el Oeste, pudiendo corroborar que la cinética de corrosión se va atenuando con el paso del tiempo sufriendo una cinética mayor de corrosión en los primeros meses desde el ataque.

La figura 107 recoge el porcentaje de la ocupación de cada tipología y la superficie no corroída en la zona Este durante los ocho meses de estudio.

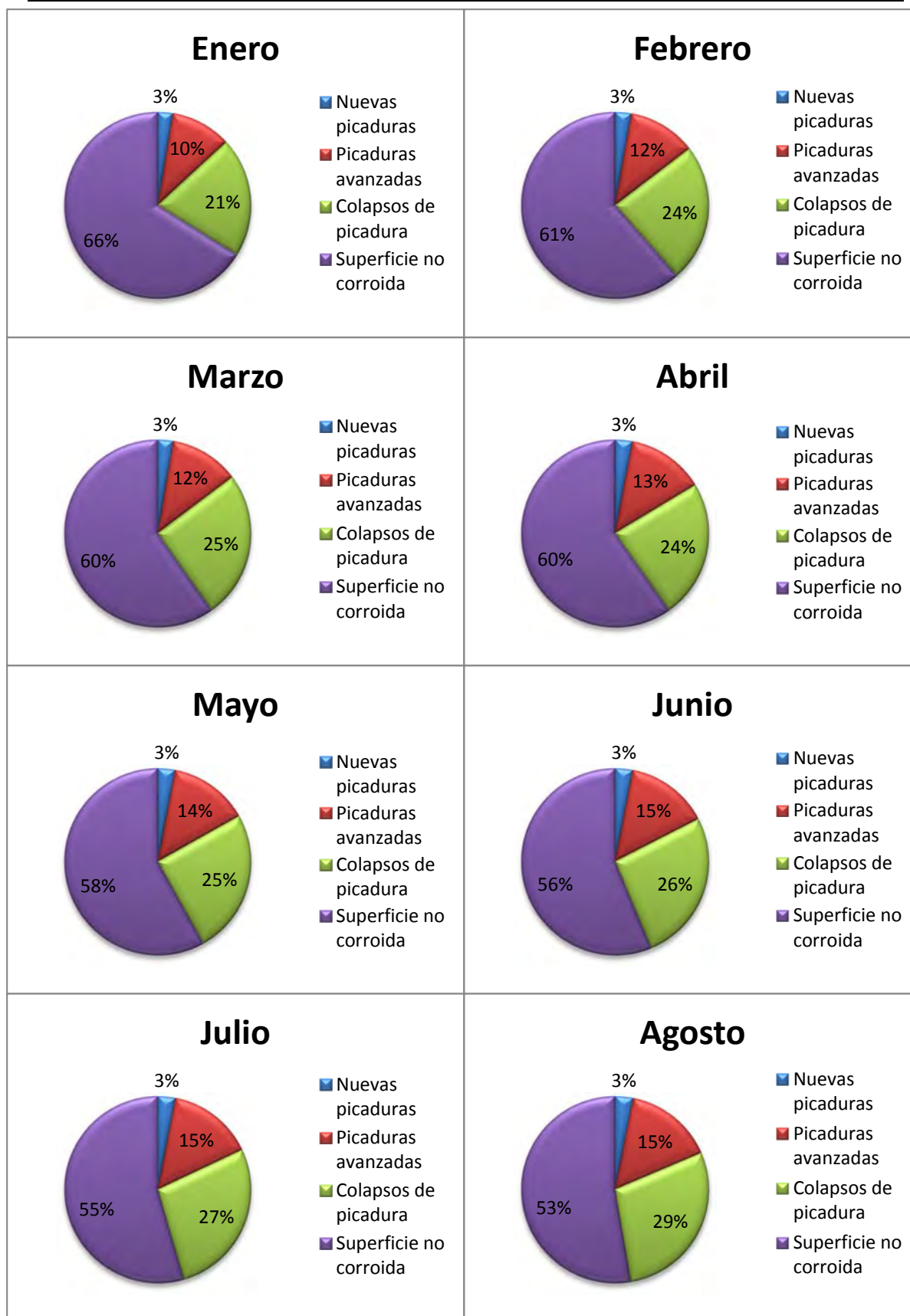


Figura 107. “Superficie ocupada por cada tipología en la zona Este”

4.4.3.- Evolución de daños globales

En este apartado se tratará el aspecto global del casquillo, de forma que, ya no contabilizaremos la superficie que las picaduras ocupan, sino el área que dañan a su alrededor y dejan en la pieza el aspecto típico de la corrosión, productos de corrosión de óxidos e hidróxidos de hierro al haberse eliminado la capa pasiva del acero inoxidable.

Para el cálculo de esta superficie afectada, cambiaremos los radios empleados por unos nuevos con 0,005 cm más de radio. De esta forma se utilizarán los siguientes datos:

RG_N = Radio medio de afectación de nueva picadura = 0,02 cm

RG_P = Radio medio de afectación de picadura avanzada = 0,04 cm

RG_C = Radio medio de afectación de colapso de picadura = 0,06 cm

Utilizando estos radios en las ecuaciones (17 -19) obtenemos las tablas (40 - 47), análogas a las tablas (30 -37), y trabajaremos los resultados de igual forma, para obtener la visualización del estado de la superficie. Estos cálculos son iguales a los anteriores, pero un poco superiores con el fin de ampliar el rango de resultados y lograr un contraste mayor, lo más parecido a lo que podemos apreciar a simple vista.

Las tablas 40 a 47 muestran las superficies afectadas por cada tipología desde Enero hasta Agosto respectivamente.

Tabla 40. “Superficie afectada por cada tipología en Enero”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área afectada (%)	Superficie dañada	% Afectado
T1 Enero	Este	N	44,2000	0,0468	0,4306	43,0608
		P	41,3333	0,1414		
		C	31,0000	0,2424		
	Oeste	N	40,6333	0,0366	0,3582	35,8183
		P	40,5333	0,1448		
		C	26,6333	0,1768		

Tabla 41. “Superficie afectada por cada tipología en Febrero”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área afectada (%)	Superficie dañada	% Afectado
T2 Febrero	Este	N	44,2000	0,0500	0,4887	48,8664
		P	41,3333	0,1582		
		C	31,0000	0,2805		
	Oeste	N	40,6333	0,0508	0,4085	40,8533
		P	40,5333	0,1553		
		C	26,6333	0,2024		

Tabla 42. “Superficie afectada por cada tipología en Marzo”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área afectada (%)	Superficie dañada	% Afectado
T3 Marzo	Este	N	44,2000	0,0479	0,5075	50,7514
		P	41,3333	0,1622		
		C	31,0000	0,2974		
	Oeste	N	40,6333	0,0411	0,4325	43,2493
		P	40,5333	0,1667		
		C	26,6333	0,2247		

Tabla 43. “Superficie afectada por cada tipología en Abril”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área afectada (%)	Superficie dañada	% Afectado
T4 Abril	Este	N	44,2000	0,0534	0,5275	52,7494
		P	41,3333	0,1796		
		C	31,0000	0,2944		
	Oeste	N	40,6333	0,0444	0,4813	48,1250
		P	40,5333	0,1759		
		C	26,6333	0,2609		

Tabla 44. “Superficie afectada por cada tipología en Mayo”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área afectada (%)	Superficie dañada	% Afectado
T5 Mayo	Este	N	44,2000	0,0537	0,5474	54,7433
		P	41,3333	0,1861		
		C	31,0000	0,3076		
	Oeste	N	40,6333	0,0459	0,5108	51,0823
		P	40,5333	0,1815		
		C	26,6333	0,2835		

Tabla 45. “Superficie afectada por cada tipología en Junio”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área afectada (%)	Superficie dañada	% Afectado
T6 Junio	Este	N	44,2000	0,0543	0,5696	56,9592
		P	41,3333	0,1934		
		C	31,0000	0,3220		
	Oeste	N	40,6333	0,0476	0,5259	52,5889
		P	40,5333	0,1889		
		C	26,6333	0,2894		

Tabla 46. “Superficie afectada por cada tipología en Julio”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área afectada (%)	Superficie dañada	% Afectado
T7 Julio	Este	N	44,2000	0,0549	0,5918	59,1750
		P	41,3333	0,2006		
		C	31,0000	0,3363		
	Oeste	N	40,6333	0,0493	0,5410	54,0954
		P	40,5333	0,1963		
		C	26,6333	0,2953		

Tabla 47. “Superficie afectada por cada tipología en Agosto”

Tiempo	Soporte		Datos extraídos			
			Media de picadura	Área afectada (%)	Superficie dañada	% Afectado
T8 Agosto	Este	N	44,2000	0,0555	0,6139	61,3909
		P	41,3333	0,2078		
		C	31,0000	0,3506		
	Oeste	N	40,6333	0,0511	0,5560	55,6020
		P	40,5333	0,2037		
		C	26,6333	0,3012		

La tabla 48 recoge los datos equivalentes a la zona Oeste y la tabla 49 los del Este, con ellas se obtienen dos representaciones como las de las figuras 106 y 107. Los datos a considerar serán las áreas afectadas por nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura.

Tabla 48. “Datos de superficie afectada por cada tipología, Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,036610026	0,144764589	0,176808835	0,64182
Febrero	0,050768137	0,155320341	0,202444231	0,59147
Marzo	0,041092032	0,16671385	0,224686707	0,56751
Abril	0,044443064	0,175929189	0,260877854	0,51875
Mayo	0,045867253	0,181458392	0,283497321	0,48918
Junio	0,047598619	0,188886513	0,289403515	0,47411
Julio	0,049329986	0,196314634	0,295309709	0,45905
Agosto	0,051061353	0,203742756	0,301215904	0,44398

Con los datos de la tabla 48 se obtiene la figura 108, que representa de forma visual el porcentaje ocupado por cada tipología de picadura en el lado Oeste que se ha establecido en los 8 meses de estudio.

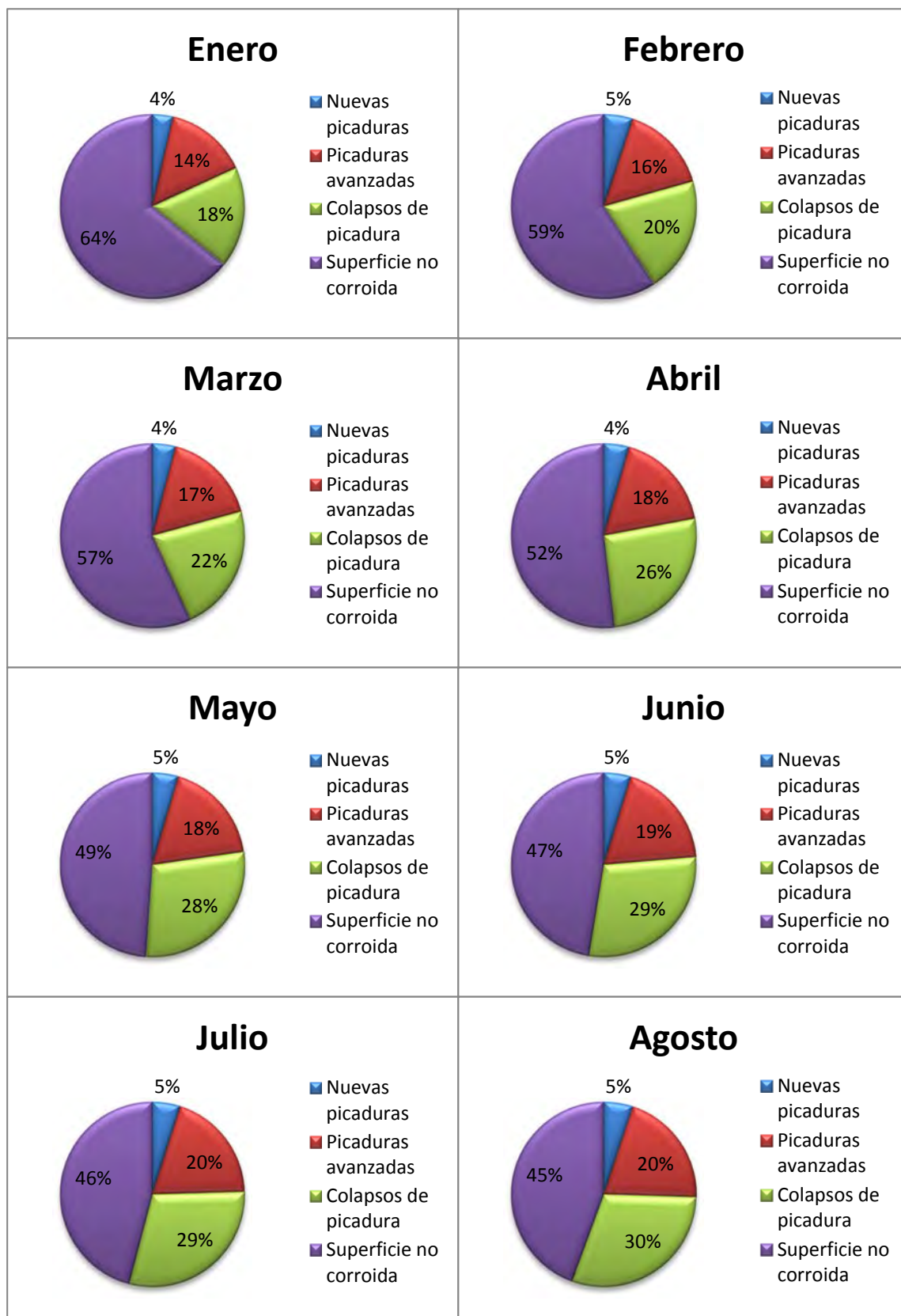


Figura 108. “Superficie afectada por cada tipología en la zona Oeste”

Como se muestra en la figura 108, los márgenes que se muestran son superiores a los de la figura 105. El grado de afectación es superior al de ocupación, ya que los radios con los que lo calculamos son ligeramente mayores.

El dato más representativo en estos graficos es la variación de superficie libre; ya que es el aspecto visual que representa. Un acero inoxidable, por lo general, no muestra corrosión por picadura a la intemperie y por lo tanto, todo sería superficie libre y tendría el aspecto más común de un acero de este tipo. En el Oeste, la superficie libre no afectada inicial era de un 64%, el cual ha ido empobreciéndose hasta un 45%, más de la mitad de la superficie de cada casquillo.

La tabla 49 reúne los datos de la zona Este, la cual obtenemos de forma análoga a la tabla 48.

Tabla 49. “Datos de superficie afectada por cada tipología, Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,046788787	0,141413557	0,242405289	0,56939
Febrero	0,050014155	0,158168718	0,280481392	0,51134
Marzo	0,047877872	0,162189957	0,297445992	0,49249
Abril	0,053448963	0,179615324	0,294430063	0,47251
Mayo	0,053658403	0,186149837	0,307624753	0,45257
Junio	0,054286721	0,193354556	0,321950415	0,43041
Julio	0,05491504	0,200559275	0,336276078	0,40825
Agosto	0,055543358	0,207763994	0,35060174	0,38609

En esta ocasión se observa que la superficie libre es mucho menor, tanto al principio como al final del estudio, partiendo desde un 57% hasta un 38%, lo cual representa un tercio de la superficie afectada por el ataque. Esta evolución representa un 2,4% de superficie no afectada menor al mes, lo cual es una pérdida considerable, ya que una pieza afectada con esa cinética en 44 meses partiendo, del 100% de superficie libre quedaría completamente cubierta y mostrando corrosión generalizada. Normalmente una pieza sometida a este ataque sufre una cinética mucho menor a medida que va pasando el tiempo, hasta que se atenúa ralentizando el proceso.

Con los datos de esta tabla se obtiene la figura 109, que representa de forma visual el % ocupado por cada tipología de picadura en el Este que se ha establecido en los 8 meses de estudio.

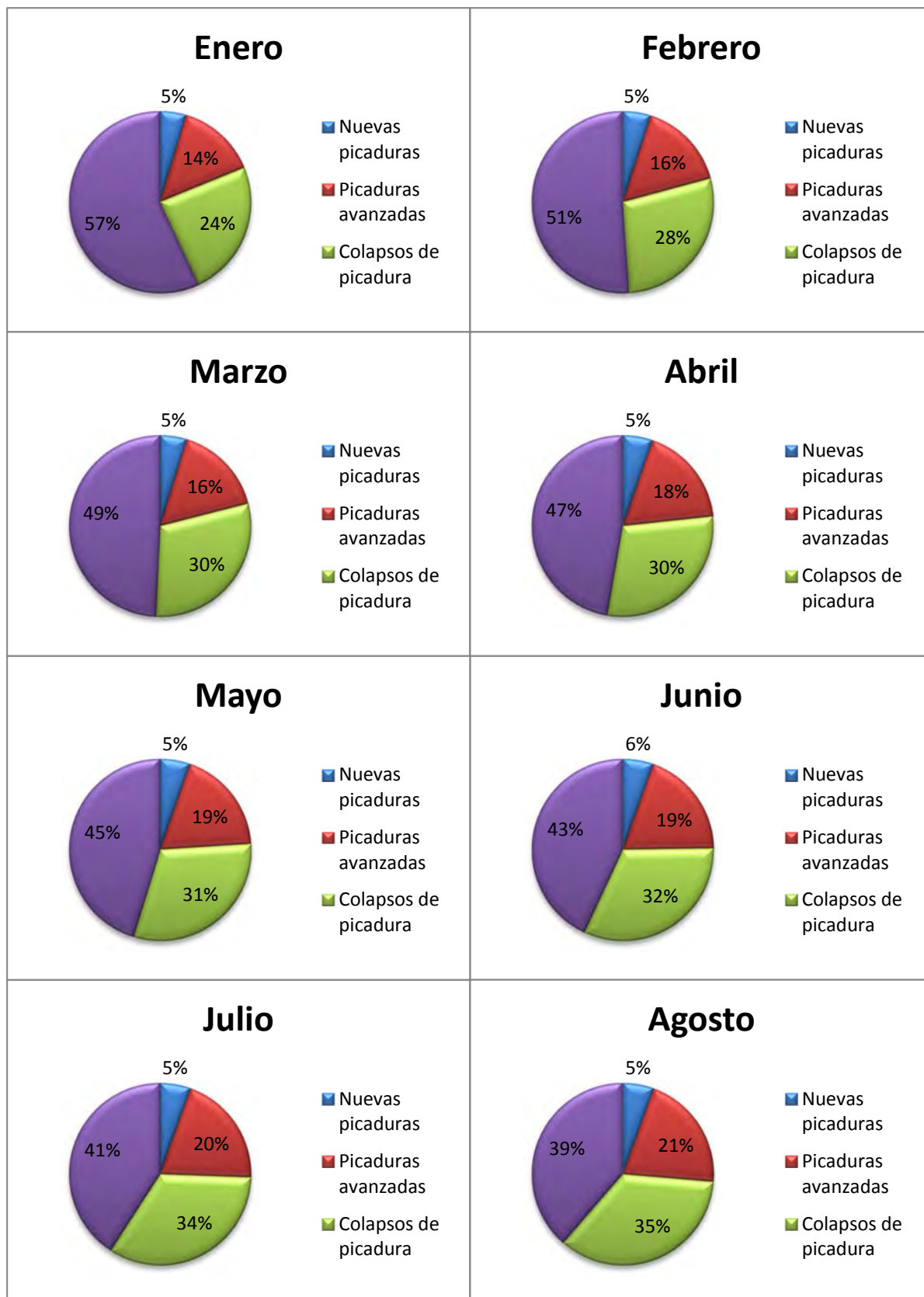


Figura 109. “Superficie afectada por cada tipología en la zona Este”

4.4.4.- Evolución del diámetro medio de picadura

La evolución del diámetro medio de picadura es un parámetro característico de la corrosión por picadura, ya que, normalmente cuanto mayor sean las picaduras en diámetro, más afectada estará la pieza por la corrosión. En este caso, el diámetro medio de la picadura en los casquillos nos servirá para conocer otro aspecto más de cómo ésta afecta este proceso a los casquillos.

Para el cálculo del diámetro medio nos apoyaremos en los resultados obtenidos en las tablas (30 - 37) referentes a la media de picaduras de cada tipo. Asimismo, por medio de la siguiente ecuación (20), y conociendo los radios empleados, obtendremos el radio medio en cada mes; de forma directa, multiplicando por dos, obtendremos el diámetro medio.

$$\varnothing_{medio} = 2 \cdot \frac{N \cdot R_N + P \cdot R_P + C \cdot R_C}{N + P + C} \quad (20)$$

Siendo:

N = Número medio de nuevas picaduras

R_N = Radio medio de nueva picadura = 0,015 cm

P = Número medio de picaduras avanzadas

R_P = Radio medio de picadura avanzada = 0,0345 cm

C = Número medio de colapsos de picadura

R_C = Radio medio de colapso de picadura = 0,0555 cm

Tanto N, P como C dependen del mes de adquisición de datos.

De esta forma, obtenemos el diámetro medio y el radio medio en los casquillos mes a mes, distinguiendo entre zona Oeste, Este y combinada. La combinada sólo es el resultado medio de sumar el diámetro Este y el Oeste y dividirlo entre dos.

La tabla 50 recoge los resultados obtenidos de los diámetros medios obtenidos mes a mes durante los ocho meses de estudio. Los resultados están expresados en cm.

Tabla 50. “Diámetros medios en cm”

Tiempo	Oeste	Este
Enero	0,06248	0,06264
Febrero	0,05976	0,06368
Marzo	0,06386	0,06506
Abril	0,06461	0,06297
Mayo	0,06520	0,06352
Junio	0,06503	0,06396
Julio	0,06485	0,06441
Agosto	0,06468	0,06485

Una vez obtenida la tabla 50, se presenta la figura 110, que relaciona la evolución del diámetro medio de picadura con el tiempo.

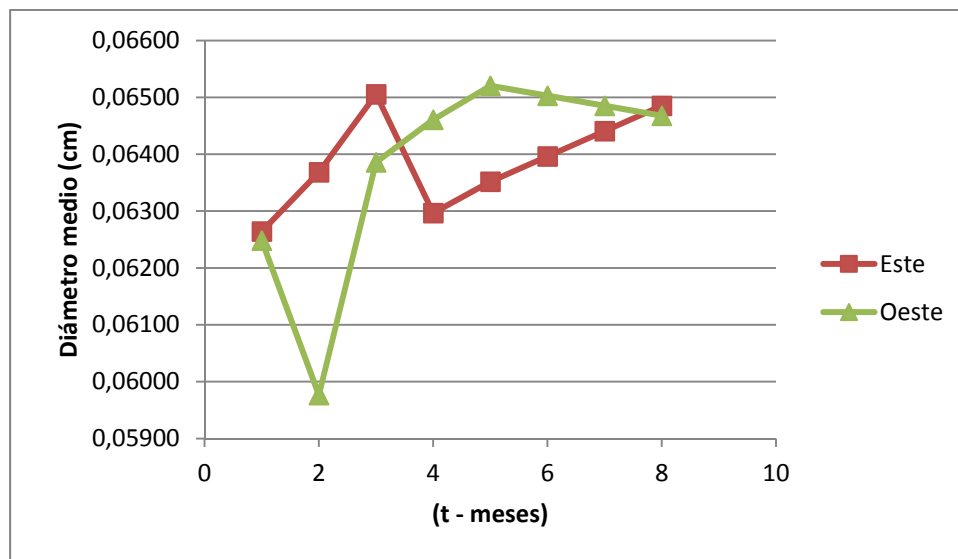


Figura 110. “Gráfica de diámetro medio”

De esta gráfica, podemos obtener aparte de los valores, la diferencia de forma de afectar a ambas zonas el mes de Febrero en el cual se produjo un importante aumento del número de nuevas picaduras. En el Este, el radio medio descendió drásticamente a 0,06 cm, equivalente a 0,03 cm de radio, menor que el radio de una picadura avanzada, y muy próximo al diámetro máximo reflejado en ambas gráficas, establecido en 0,065 cm. El margen de radio que tenemos es de 0,00544 cm, lo cual ofrece un diámetro medio para nuestro estudio; **0,064 ± 0,002 cm**.

4.4.5.- Grietas de corrosión

Para analizar las grietas de corrosión o hilos de corrosión, se parte de la base de conocer los colapsos que hay en cada zona de estudio y de igual forma; se contabilizarán los números de grietas de corrosión, con el fin de conseguir hacer un modelo característico de una grieta de corrosión.

4.4.5.1.- Cuantificación de las grietas de corrosión

Apoyándonos en los datos obtenidos siguiendo “3.3.2.6.- Paso 6: Diferenciar y contabilizar picaduras”, obtenemos los resultados expresados en la tabla 51.

Tabla 51. “Toma de datos de grietas de corrosión”

Soporte		1				2				3				4				5			
		1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
Este	H	15	8	20	14,3	4	15	26	15	11	11	11	11	17	14	8	13	13	8	7	9,3
Oeste	H	19	13	14	15,3	9	23	14	15,3	10	14	12	12	13	15	11	13	6	6	7	6,3
Soporte		6				7				8				9				10			
		1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M	1	2	3	M
Este	H	7	16	2	8,3	13	20	14	15,7	8	12	7	9	15	26	9	16,7	18	9	12	13
Oeste	H	11	6	6	7,7	19	13	16	16	8	13	16	12,3	17	18	4	13	12	15	10	12,3

Con estos datos obtenemos una media de grietas o hilos de corrosión de 12,53 en el Este, y 12,33 en el Oeste. Los resultados son muy análogos aunque ligeramente superiores en el Este, la zona más afectada por la corrosión.

Asimismo tenemos una media de colapsos de 26,87 en el Este y 22,84 en el Oeste y podemos calcular, por lo tanto, el % de colapsos por grietas de corrosión sobre el número total de colapsos de picadura. De esta forma, al conocer la superficie que ocupan los colapsos de picadura, podremos directamente saber la superficie que ocupan las grietas de corrosión y, por lo tanto, poder modelar una grieta de corrosión para este caso particular de “Puente Juan José Arenas”.

4.4.5.2.- Modelización de las grietas de corrosión

Para comenzar la modelización comenzaremos calculando los % descritos en el apartado anterior según la siguiente ecuación 21.

$$\% \text{ de grietas sobre colapsos de picadura} = \frac{100 \cdot \text{Número de grietas de corrosión}}{\text{Número de colapsos de picadura}} \quad (21)$$

Como resultado de esta ecuación, se ha obtenido un 46,643 % en el Este y 54,856 % en el Oeste. Pese a ser la zona Este más afectada, muestra menor % de grietas sobre colapsos de picadura, lo cual indica que el daño de la grieta de corrosión es menor que el causado por los colapsos por picaduras adyacentes.

Una vez se conoce la proporción existente, se procede a calcular la superficie media que ocupan los colapsos de picadura y, directamente la superficie ocupada por las grietas de corrosión. En la tabla 52 se representa el cálculo de la superficie media ocupada por los colapsos de picadura, en cm²

Tabla 52. “Superficie ocupada por las grietas de corrosión”

Tiempo	Este	Oeste
Enero	0,20741	0,15128
Febrero	0,23999	0,17322
Marzo	0,25450	0,19225
Abril	0,23902	0,22321
Mayo	0,25031	0,24257
Junio	0,26257	0,24762
Julio	0,27482	0,25268
Agosto	0,28708	0,25773
Media	0,25196177	0,217569296
Grietas	0,112483293	0,119349813

Ya conocida la superficie que ocupan las grietas de corrosión, se procede a calcular la superficie que ocupa una grieta, y la modelizamos en forma de rectángulo, con una proporción de longitudes de 1:5 para conseguir la forma más semeja a la real.

Al dividir la superficie que ocupan las grietas entre el número de grietas que hay en la zona de estudio, tenemos lo que ocupa una grieta; y los valores varían según la zona Este y Oeste obteniendo:

Zona Este: $0,009 \text{ cm}^2$ cada grieta

Zona Oeste: $0,0097 \text{ cm}^2$ cada grieta

Media: $0,00935 \text{ cm}^2$ cada grieta

Si estos resultados los comparamos con las superficies que ocupan cada una de las tipologías individualmente, podemos comprobar la magnitud de tamaño de las grietas.

Nueva picadura: $0,0007 \text{ cm}^2$ cada nueva picadura (factor reductor de 13)

Picadura avanzada: $0,0037 \text{ cm}^2$ cada picadura avanzada (factor reductor de 2,5)

Colapso de picadura: $0,0097 \text{ cm}^2$ cada colapso de picadura (ligeramente mayor)

Finalmente, y para la modelización de la grieta de corrosión, calculamos la longitud de los lados del rectángulo equivalente a la grieta, de la forma:

Superficie ocupada por la grieta = $0,00935 \text{ cm}^2$

Superficie del rectángulo = lado ancho (b) * lado largo (a)

Condiciones $\rightarrow a = 5 b$; Superficie ocupada por la grieta = superficie del rectángulo

$$0,00935 = 5 \cdot b^2$$

$$b = 0,04324 \text{ cm el lado ancho}$$

$$a = 0,21 \text{ cm el lado largo}$$

Ahora podemos decir que las grietas son más finas que las picaduras avanzadas, pero el doble de largas que el diámetro de un colapso por picadura.

Para comparar visualmente las distintas superficies que ocupan cada tipología, además de las grietas de corrosión, la figura 111 reúne los cuatro tipos estudiados.

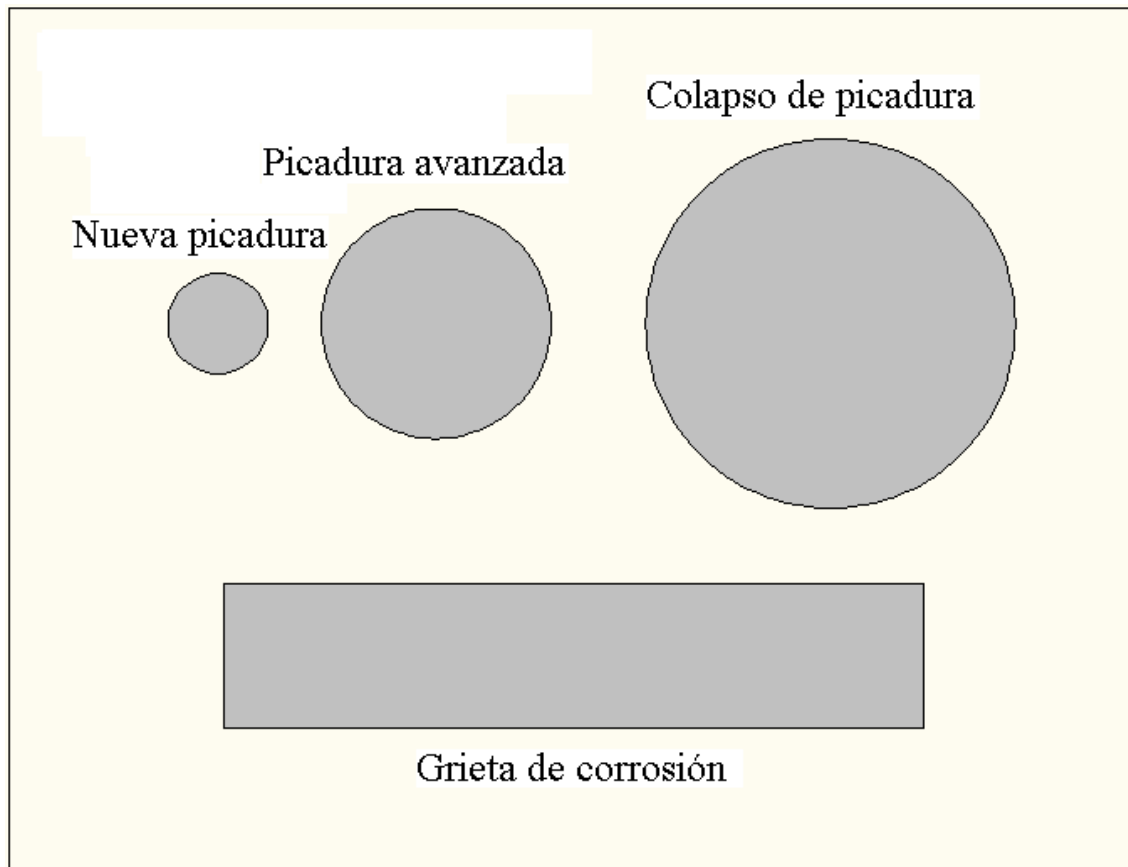


Figura 111. “Comparación de los tipos de picadura”

4.4.6.- Estudio detallado de cada soporte

Una vez se ha estudiado el carácter general y medio que presentan los casquillos, se procederá a realizar un estudio técnico de cada casquillo, el cual contendrá las mediciones obtenidas en cada uno de los casquillos, así como los resultados de forma individual de los valores más característicos estudiados durante este Proyecto Fin de Carrera.

El estudio contendrá la evolución de los diez casquillos, así como una comparación de todos ellos, con el fin de poder obtener las conclusiones más determinantes posibles sobre este proceso aleatorio de corrosión por picadura.

4.4.6.1.- Etudio técnico de Casquillo 1

La ubicación del casquillo número 1 en “Puente Juan José Arenas”, representado por la figura 112.

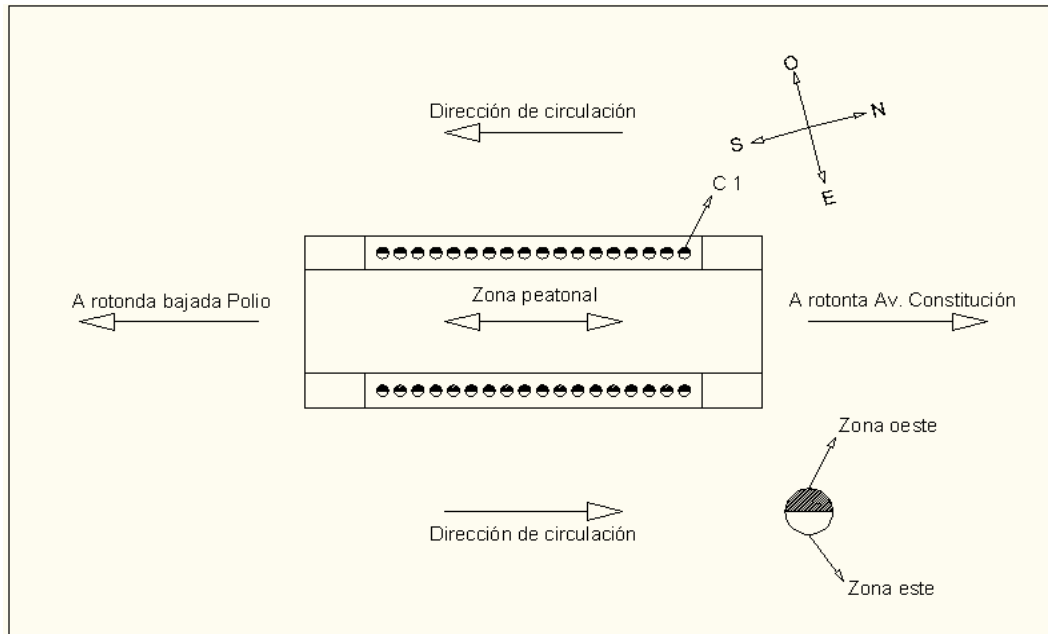


Figura 112. “Ubicación del casquillo número 1 en Puente Juan José Arenas”

Imágenes generales del casquillo 1 zona Oeste y Este de “Puente Juan José Arenas” mostrados en la figura combinada 113 respectivamente.



Figura 113. “Casquillo 1 de Puente Juan José Arenas”

Las picaduras contabilizadas en las zonas de estudio, se presentan en la tabla 53 y tabla 54 distinguiendo cada tipología en la zona Oeste y zona Este. Respectivamente.

Tabla 53. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 1, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	29,7	21,0	20,0
Febrero	18,0	19,0	25,0
Marzo	14,3	26,7	25,3
Abril	17,3	25,3	32,3
Mayo	20,0	25,7	34,7
Junio	20,7	26,9	35,6
Julio	21,3	28,1	36,4
Agosto	22,0	29,3	37,3

Tabla 54. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 1, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	44,0	24,0	19,3
Febrero	41,3	39,0	27,0
Marzo	31,7	40,0	30,7
Abril	37,7	43,3	32,0
Mayo	37,0	43,3	32,3
Junio*	39,1	45,4	33,7
Julio*	41,2	47,6	35,0
Agosto	43,3	49,7	36,3

Para mostrar el resultado de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, necesitamos apoyarnos en las ecuaciones (17 -19), usadas anteriormente para el mismo propósito. Con los datos obtenidos, se tiene información suficiente para representar la tabla de valores de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, así como los gráficos de reparto de superficie que nos ofrecerán una visión rápida de ambas zonas del mismo casquillo.

Las tablas 55 y 56 presentan las superficies corroídas que han inducido cada tipo de picadura así como la no corroída, para las zonas Oeste y Este respectivamente.

Tabla 55. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 1, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02097	0,07852	0,19354	0,70697
Febrero	0,01272	0,07105	0,24192	0,67431
Marzo	0,01013	0,09971	0,24515	0,64501
Abril	0,01225	0,09473	0,31289	0,58013
Mayo	0,01414	0,09597	0,33547	0,55442
Junio	0,01461	0,10055	0,34407	0,54078
Julio	0,01508	0,10512	0,35267	0,52714
Agosto	0,01555	0,10969	0,36127	0,51349

Tabla 56. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 1, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,03110	0,08974	0,18709	0,69207
Febrero	0,02922	0,14583	0,26128	0,56368
Marzo	0,02238	0,14957	0,29676	0,53129
Abril	0,02662	0,16204	0,30966	0,50168
Mayo	0,02615	0,16204	0,31289	0,49892
Junio	0,02765	0,16993	0,32579	0,47664
Julio	0,02914	0,17782	0,33869	0,45435
Agosto	0,03063	0,18572	0,35159	0,43206

La figura 114 es un gráfico combinado que contiene la evolución del número de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en el casquillo 1, siendo la zona izquierda la equivalente a la zona Oeste y a la derecha la zona Este.

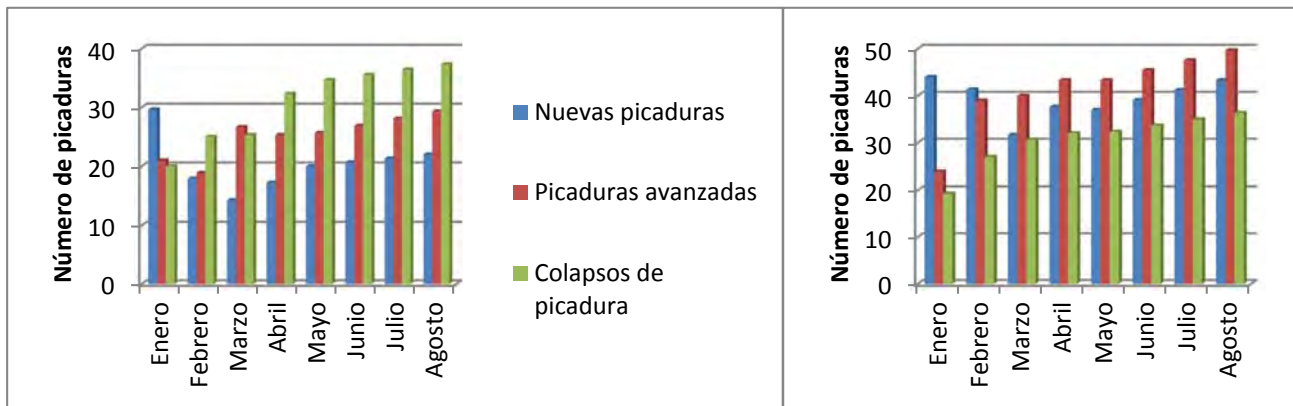


Figura 114. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 1”

La figura 115 es la repartición de la superficie entre las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y superficie no corroída mostrando Oeste y Este respectivamente.

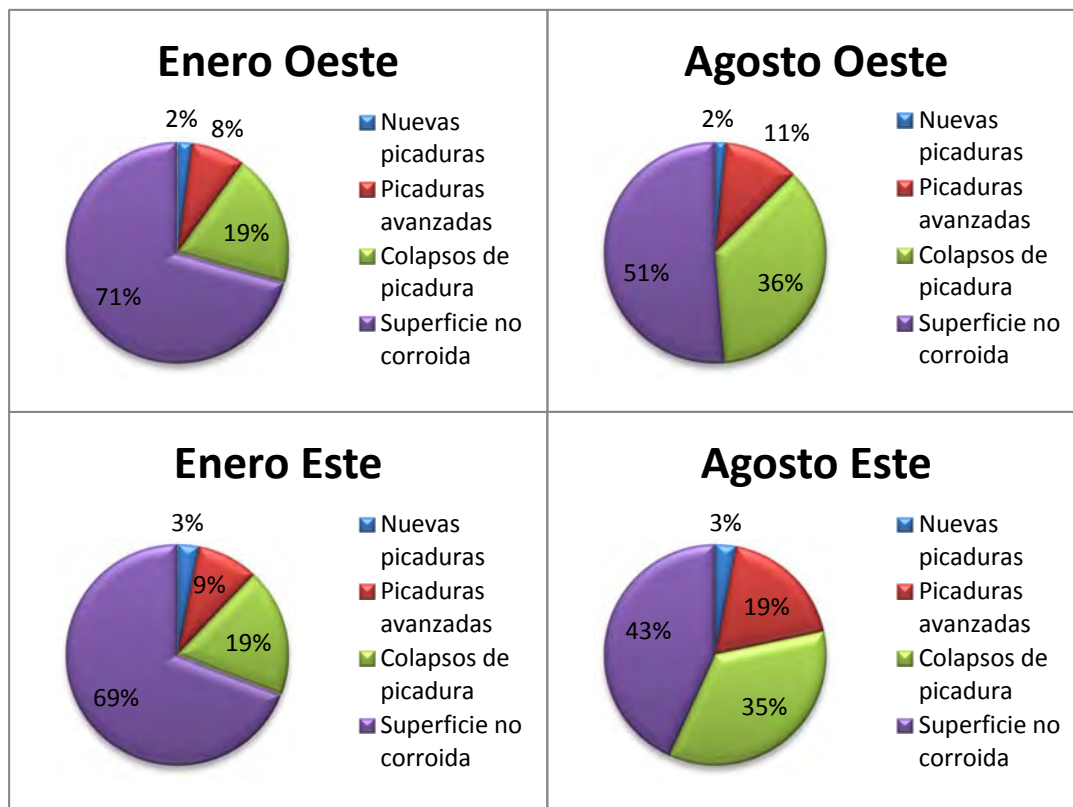


Figura 115. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 1”

4.4.6.2.- Estudio técnico de Casquillo 2

La ubicación del casquillo número 2 en “Puente Juan José Arenas”, representado por la figura 116.

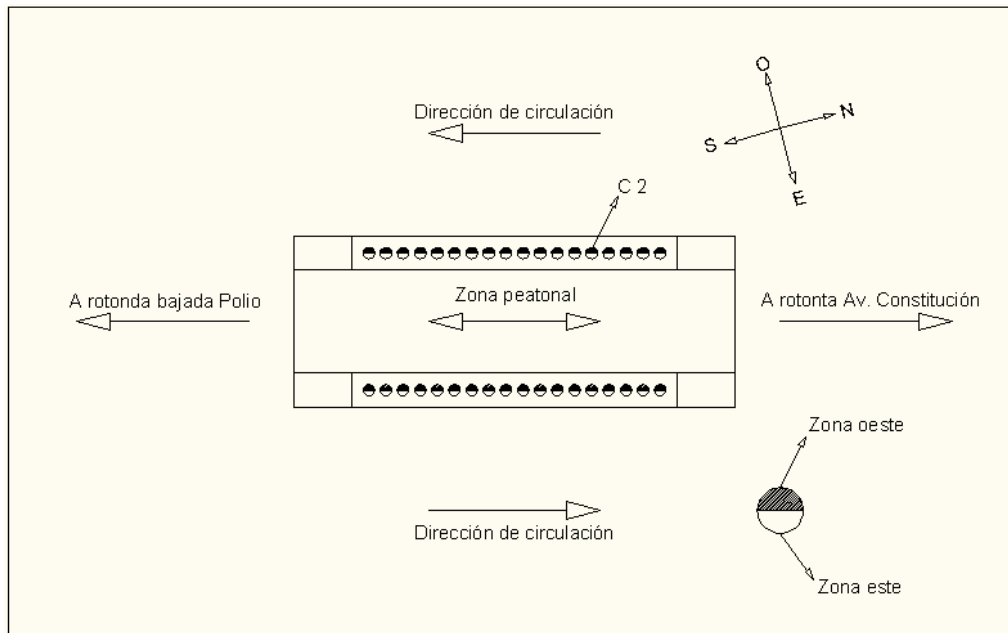


Figura 116. “Ubicación del casquillo número 2 en Puente Juan José Arenas”

Imágenes generales del casquillo 2 zona Oeste y Este de “Puente Juan José Arenas” mostrados en la figura combinada 117 respectivamente.



Figura 117. “Casquillo 2 de Puente Juan José Arenas”

Las picaduras contabilizadas en las zonas de estudio, se presentan en la tabla 57 y tabla 58 distinguiendo cada tipología en la zona Oeste y en la zona Este respectivamente.

Tabla 57. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 2, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	20,7	13,7	11,7
Febrero	46,0	25,0	15,0
Marzo	30,0	32,3	18,7
Abril	32,7	32,7	23,0
Mayo	34,0	32,0	23,3
Junio	35,1	32,6	23,7
Julio	36,2	33,1	24,0
Agosto	37,3	33,7	24,3

Tabla 58. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 2, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	28,7	40,0	28,7
Febrero	28,3	41,3	32,3
Marzo	30,0	32,3	32,3
Abril	31,0	34,3	19,0
Mayo	32,3	35,3	19,0
Junio	32,6	35,9	20,0
Julio	32,8	36,4	21,0
Agosto	33,0	37,0	22,0

Para mostrar el resultado de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, necesitamos apoyarnos en las ecuaciones (17 -19), usadas anteriormente para el mismo propósito. Con los datos obtenidos, se tiene información suficiente para representar la tabla de valores de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, así como los gráficos de reparto de superficie que nos ofrecerán una visión rápida de ambas zonas del mismo casquillo.

Las tablas 59 y 60 presentan las superficies corroídas que han inducido cada tipo de picadura así como la no corroída, para las zonas Oeste y Este respectivamente.

Tabla 59. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 2, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,01461	0,05110	0,11290	0,82139
Febrero	0,03252	0,09348	0,14515	0,72885
Marzo	0,02121	0,12090	0,18064	0,67726
Abril	0,02309	0,12215	0,22257	0,63219
Mayo	0,02403	0,11966	0,22579	0,63052
Junio	0,02482	0,12173	0,22902	0,62443
Julio	0,02560	0,12381	0,23225	0,61834
Agosto	0,02639	0,12589	0,23547	0,61225

Tabla 60. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 2, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02026	0,14957	0,27740	0,55276
Febrero	0,02003	0,15456	0,31289	0,51253
Marzo	0,02121	0,12090	0,31289	0,54500
Abril	0,02191	0,12838	0,18386	0,66584
Mayo	0,02286	0,13212	0,18386	0,66116
Junio	0,02301	0,13420	0,19354	0,64925
Julio	0,02317	0,13628	0,20321	0,63734
Agosto	0,02333	0,13835	0,21289	0,62543

La figura 118 es un gráfico combinado que contiene la evolución del número de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en el casquillo 2, siendo la zona izquierda la equivalente a la zona Oeste y a la derecha la zona Este.

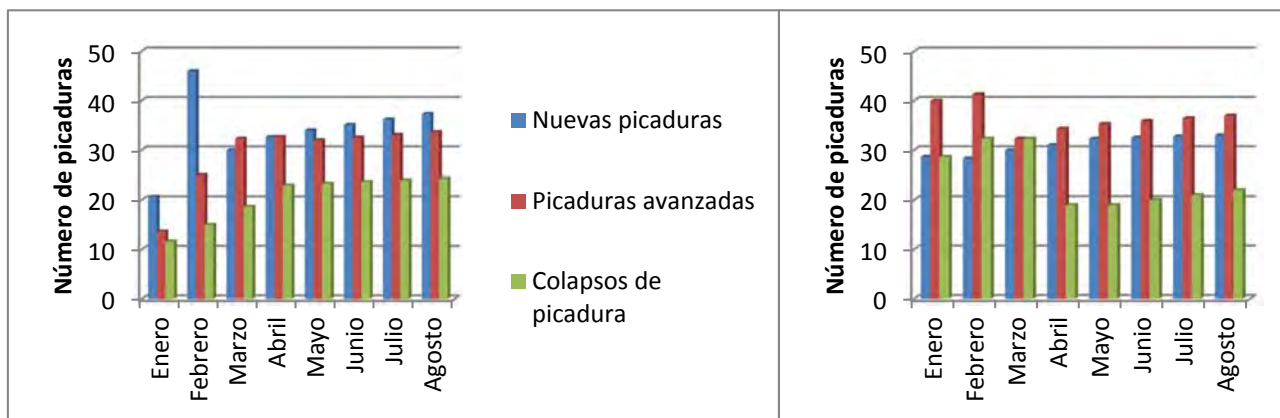


Figura 118. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 2”

La figura 119 es la repartición de la superficie entre las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y superficie no corroída mostrando Oeste y Este respectivamente.

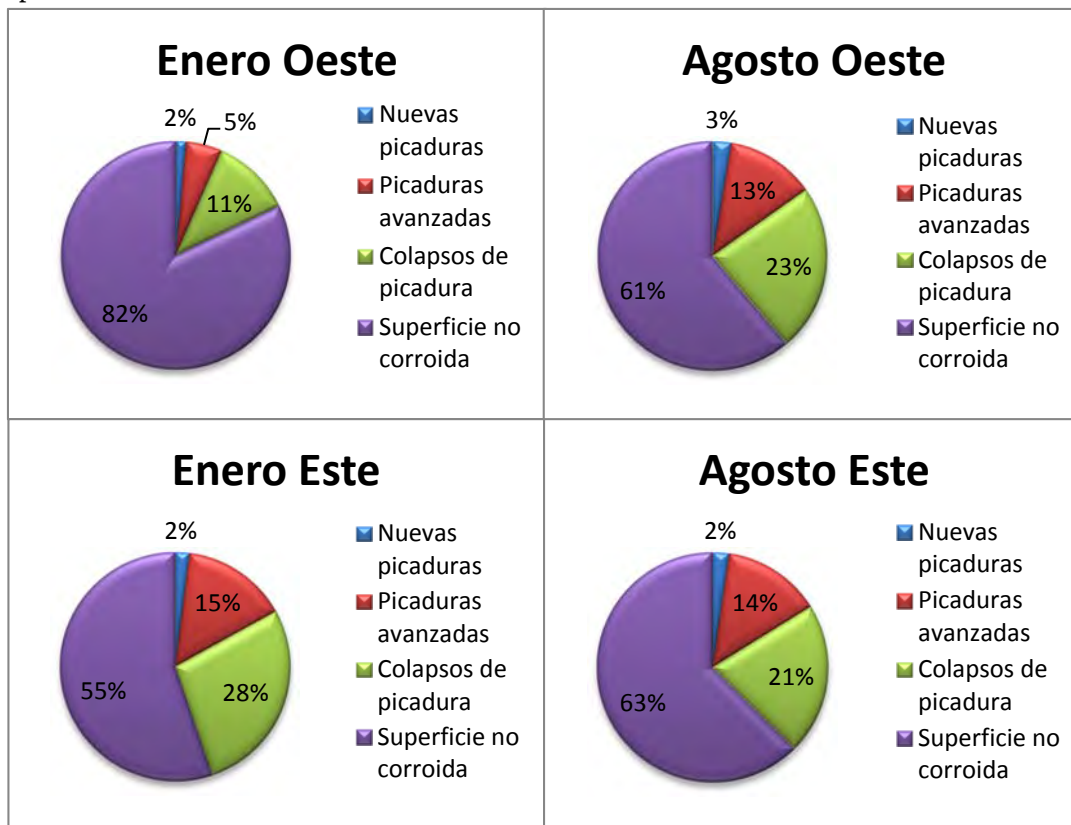


Figura 119. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 2”

4.4.6.3.- Estudio técnico de Casquillo 3

La ubicación del casquillo número 3 en “Puente Juan José Arenas”, representado por la figura 120.

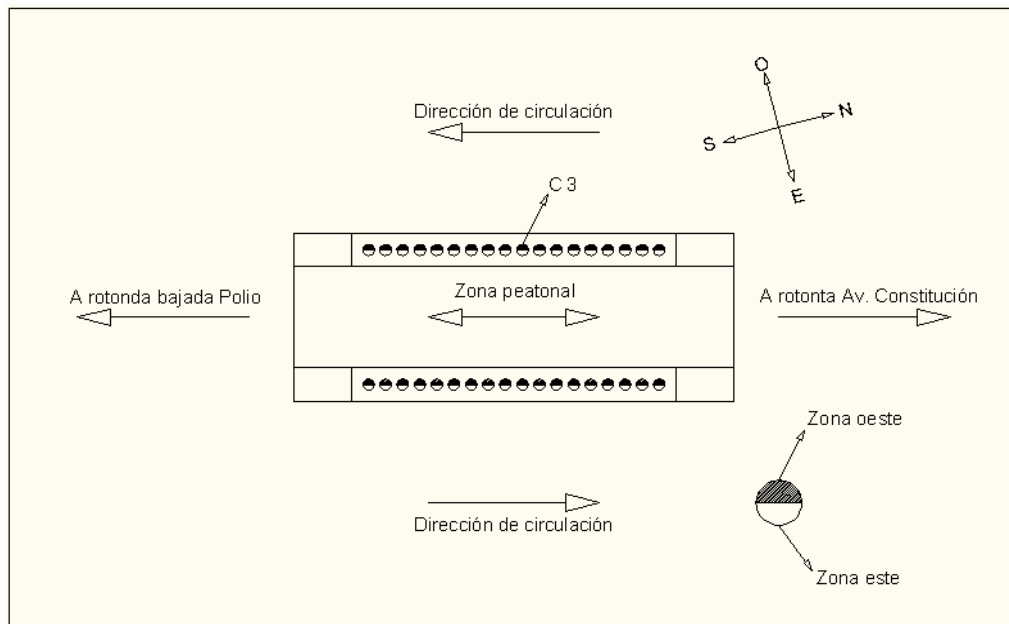


Figura 120. “Ubicación del casquillo número 3 en Puente Juan José Arenas”

Imágenes generales del casquillo 3 zona Oeste y Este de “Puente Juan José Arenas” mostrados en la figura combinada 121 respectivamente.

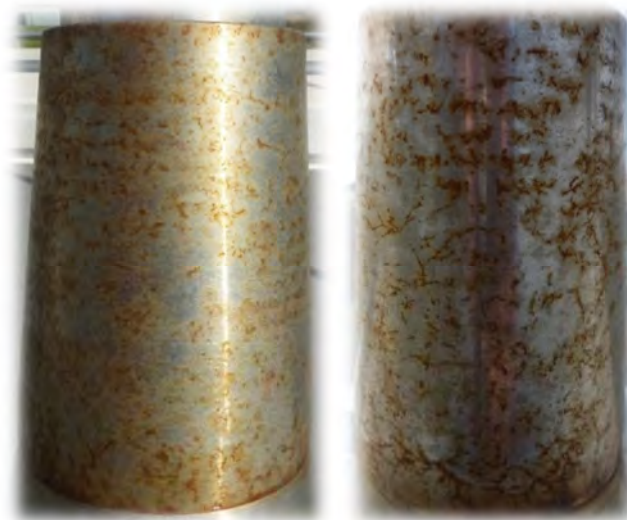


Figura 121. “Casquillo 3 de Puente Juan José Arenas”

Las picaduras contabilizadas en las zonas de estudio, se presentan en la tabla 61 y tabla 62 distinguiendo cada tipología en la zona Oeste y en la zona Este respectivamente.

Tabla 61. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 3, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	22,7	19,3	8,7
Febrero	37,0	27,7	12,3
Marzo	29,0	30,0	13,0
Abril	32,3	36,0	13,3
Mayo	32,3	38,0	14,7
Junio	33,8	39,8	16,0
Julio	35,2	41,6	17,3
Agosto	36,7	43,3	18,7

Tabla 62. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 3, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	31,0	15,3	11,0
Febrero	18,7	20,0	13,3
Marzo	18,3	26,3	18,3
Abril	22,7	28,3	19,0
Mayo	23,3	29,3	19,0
Junio	24,0	30,2	20,1
Julio	24,7	31,1	21,2
Agosto	25,3	32,0	22,3

Para mostrar el resultado de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, necesitamos apoyarnos en las ecuaciones (17 -19), usadas anteriormente para el mismo propósito. Con los datos obtenidos, se tiene información suficiente para representar la tabla de valores de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, así como los gráficos de reparto de superficie que nos ofrecerán una visión rápida de ambas zonas del mismo casquillo.

Las tablas 63 y 64 presentan las superficies corroídas que han inducido cada tipo de picadura así como la no corroída, para las zonas Oeste y Este respectivamente.

Tabla 63. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 3, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,01602	0,07229	0,08387	0,82782
Febrero	0,02615	0,10345	0,11935	0,75104
Marzo	0,02050	0,11218	0,12580	0,74152
Abril	0,02286	0,13461	0,12903	0,71351
Mayo	0,02286	0,14209	0,14193	0,69312
Junio	0,02388	0,14874	0,15483	0,67255
Julio	0,02490	0,15539	0,16773	0,65198
Agosto	0,02592	0,16204	0,18064	0,63141

Tabla 64. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 3, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02191	0,05734	0,10645	0,81431
Febrero	0,01319	0,07479	0,12903	0,78299
Marzo	0,01296	0,09847	0,17741	0,71116
Abril	0,01602	0,10595	0,18386	0,69417
Mayo	0,01649	0,10969	0,18386	0,68996
Junio	0,01696	0,11301	0,19461	0,67541
Julio	0,01744	0,11633	0,20537	0,66087
Agosto	0,01791	0,11966	0,21612	0,64632

La figura 122 es un gráfico combinado que contiene la evolución del número de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en el casquillo 2, siendo la zona izquierda la equivalente a la zona Oeste y a la derecha la zona Este.

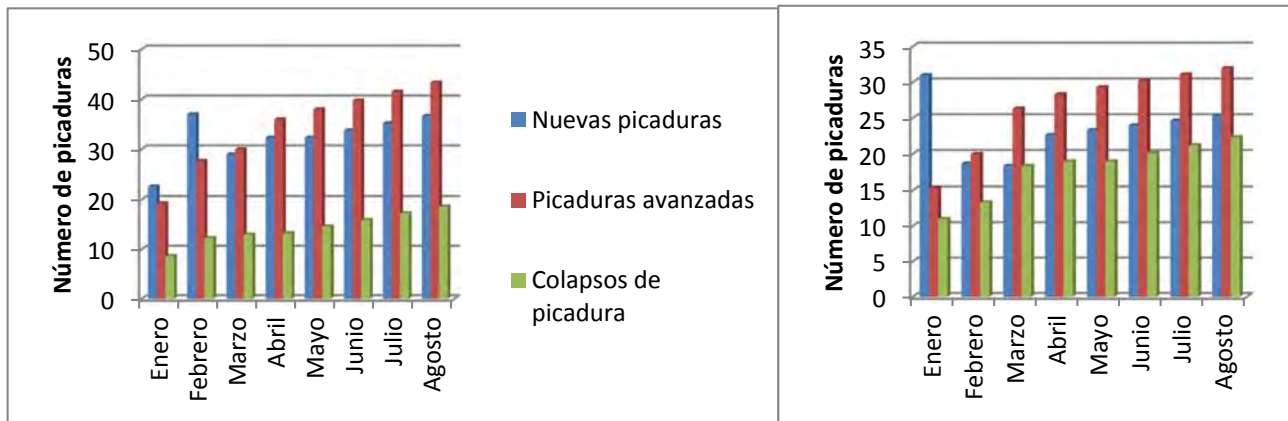


Figura 122. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 3”

La figura 123 es la repartición de la superficie entre las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y superficie no corroída mostrando Oeste y Este respectivamente.

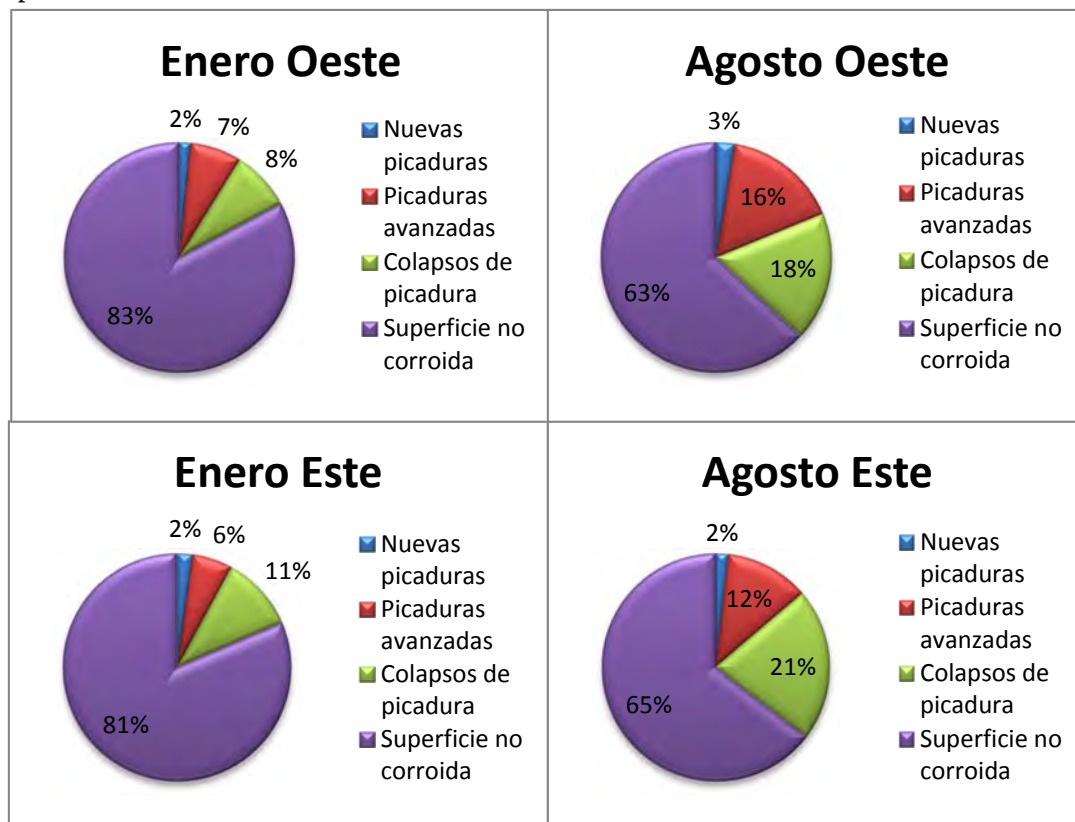


Figura 123. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 3”

4.4.6.4.- Estudio técnico de Casquillo 4

La ubicación del casquillo número 4 en “Puente Juan José Arenas”, representado por la figura 124.

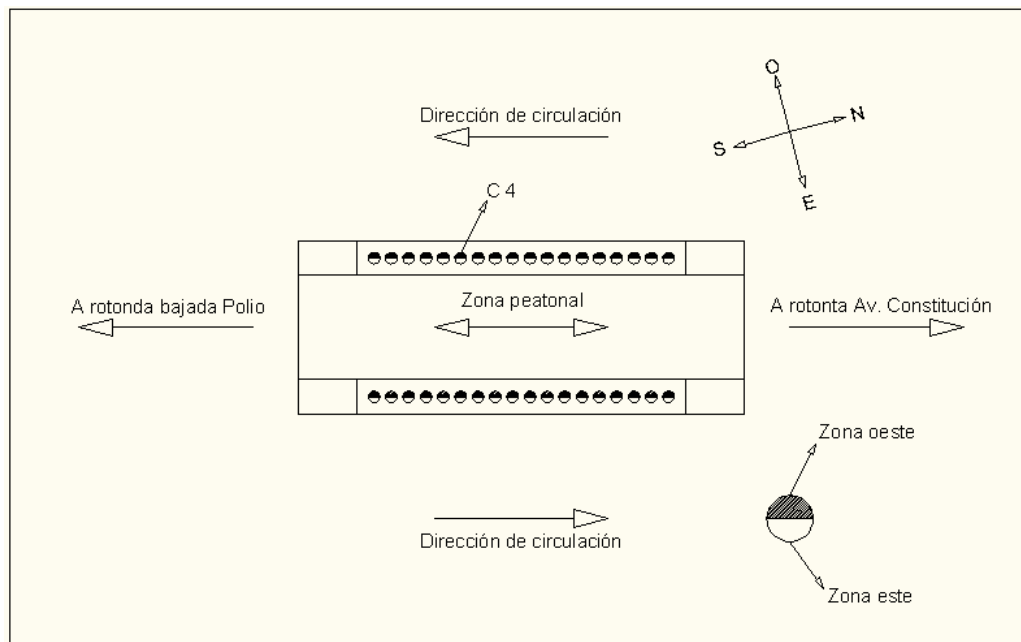


Figura 124. “Ubicación del casquillo número 4 en Puente Juan José Arenas”

Imágenes generales del casquillo 4 zona Oeste y Este de “Puente Juan José Arenas” mostrados en la figura combinada 125 respectivamente.



Figura 125. “Casquillo 4 de Puente Juan José Arenas”

Las picaduras contabilizadas en las zonas de estudio, se presentan en la tabla 65 y tabla 66 distinguiendo cada tipología en la zona Oeste y en la zona Este respectivamente.

Tabla 65. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 4, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	21,0	29,0	15,3
Febrero	35,0	33,3	20,0
Marzo	31,7	33,0	22,3
Abril	32,7	36,3	26,7
Mayo	30,0	36,3	33,7
Junio	31,4	38,1	32,9
Julio	32,9	39,9	32,1
Agosto	34,3	41,7	31,3

Tabla 66. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 4, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	35,0	24,0	20,7
Febrero	29,0	20,0	23,7
Marzo	34,0	22,0	24,0
Abril	36,3	35,0	20,0
Mayo	35,3	36,3	20,3
Junio	35,4	36,8	20,3
Julio	35,6	37,2	20,3
Agosto	35,7	37,7	20,3

Para mostrar el resultado de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, necesitamos apoyarnos en las ecuaciones (17 -19), usadas anteriormente para el mismo propósito. Con los datos obtenidos, se tiene información suficiente para representar la tabla de valores de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, así como los gráficos de reparto de superficie que nos ofrecerán una visión rápida de ambas zonas del mismo casquillo.

Las tablas 67 y 68 presentan las superficies corroídas que han inducido cada tipo de picadura así como la no corroída, para las zonas Oeste y Este respectivamente.

Tabla 67. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 4, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,01484	0,10844	0,14838	0,72834
Febrero	0,02474	0,12464	0,19354	0,65708
Marzo	0,02238	0,12340	0,21612	0,63810
Abril	0,02309	0,13586	0,25805	0,58300
Mayo	0,02121	0,13586	0,32579	0,51715
Junio	0,02223	0,14251	0,31826	0,51700
Julio	0,02325	0,14916	0,31074	0,51686
Agosto	0,02427	0,15580	0,30321	0,51672

Tabla 68. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 4, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02474	0,08974	0,19999	0,68553
Febrero	0,02050	0,07479	0,22902	0,67570
Marzo	0,02403	0,08226	0,23225	0,66146
Abril	0,02568	0,13087	0,19354	0,64990
Mayo	0,02498	0,13586	0,19676	0,64240
Junio	0,02505	0,13752	0,19676	0,64066
Julio	0,02513	0,13918	0,19676	0,63892
Agosto	0,02521	0,14085	0,19676	0,63718

La figura 126 es un gráfico combinado que contiene la evolución del número de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en el casquillo 4, siendo la zona izquierda la equivalente a la zona Oeste y a la derecha la zona Este.

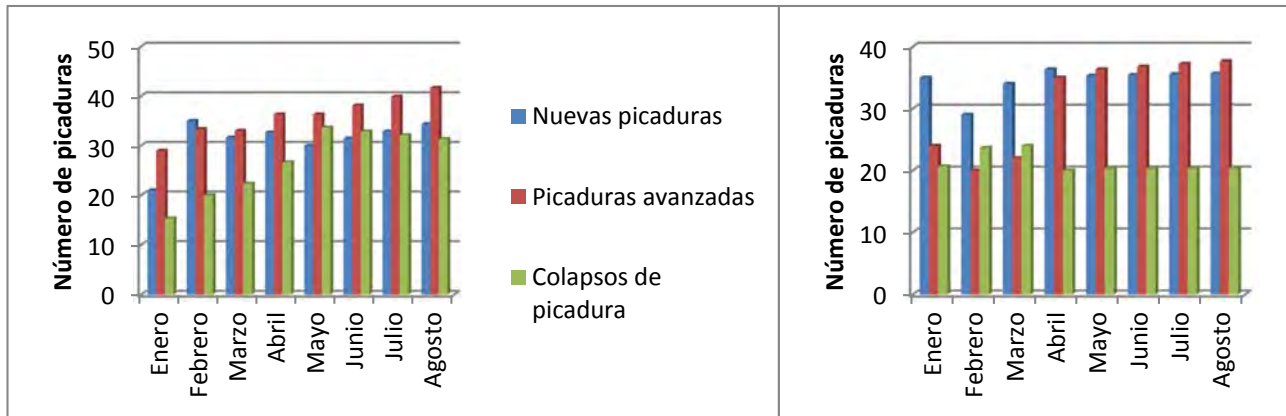


Figura 126. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 4”

La figura 127 es la repartición de la superficie entre las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y superficie no corroída mostrando Oeste y Este respectivamente.

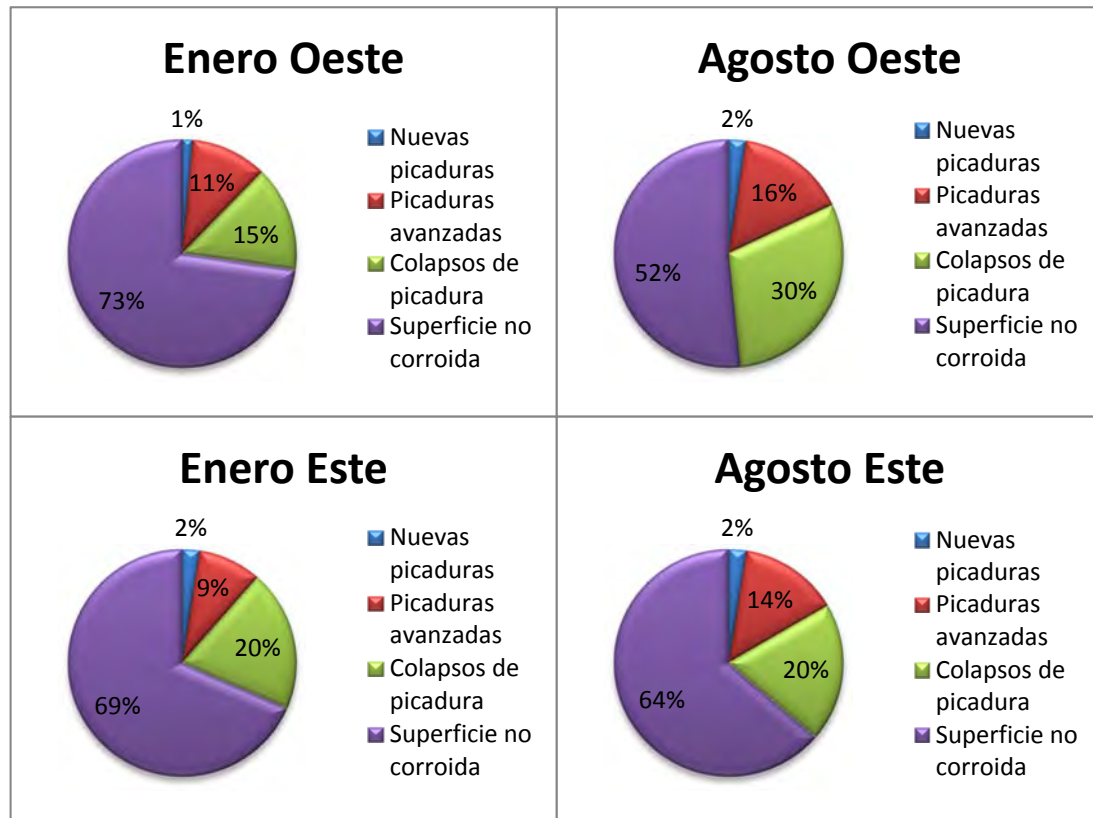


Figura 127. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 4”

4.4.6.5.- Estudio técnico de Casquillo 5

La ubicación del casquillo número 5 en “Puente Juan José Arenas”, representado por la figura 128.

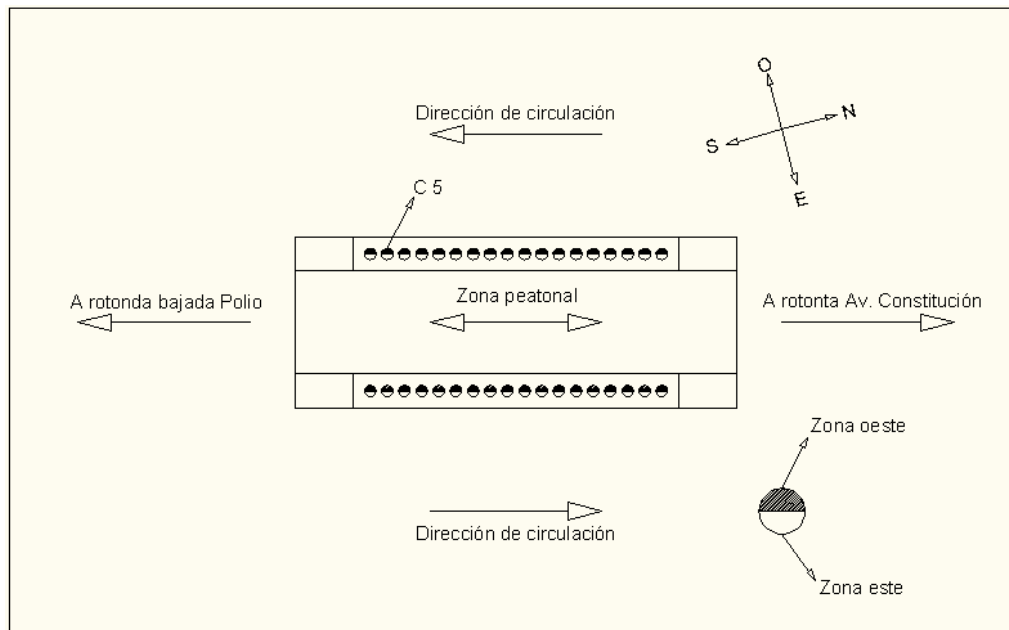


Figura 128. “Ubicación del casquillo número 5 en Puente Juan José Arenas”

Imágenes generales del casquillo 5 zona Oeste y Este de “Puente Juan José Arenas” mostrados en la figura combinada 129 respectivamente.



Figura 129. “Casquillo 5 de Puente Juan José Arenas”

Las picaduras contabilizadas en las zonas de estudio, se presentan en la tabla 69 y tabla 70 distinguiendo cada tipología en la zona Oeste y en la zona Este respectivamente.

Tabla 69. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 5, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	12,7	14,3	6,0
Febrero	18,3	15,7	7,0
Marzo	23,7	18,0	7,0
Abril	25,7	19,3	7,3
Mayo	28,3	21,7	9,7
Junio	29,3	23,3	10,3
Julio	30,3	25,0	11,0
Agosto	31,3	26,7	11,7

Tabla 70. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 5, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	22,7	32,3	14,0
Febrero	23,7	37,3	15,7
Marzo	23,0	37,0	18,7
Abril	38,7	42,7	8,7
Mayo	41,3	45,3	10,0
Junio	41,6	46,4	11,1
Julio	41,8	47,6	12,2
Agosto	42,0	48,7	13,3

Para mostrar el resultado de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, necesitamos apoyarnos en las ecuaciones (17 -19), usadas anteriormente para el mismo propósito. Con los datos obtenidos, se tiene información suficiente para representar la tabla de valores de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, así como los gráficos de reparto de superficie que nos ofrecerán una visión rápida de ambas zonas del mismo casquillo.

Las tablas 71 y 72 presentan las superficies corroídas que han inducido cada tipo de picadura así como la no corroída, para las zonas Oeste y Este respectivamente.

Tabla 71. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 5, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,00895	0,05360	0,05806	0,87939
Febrero	0,01296	0,05858	0,06774	0,86072
Marzo	0,01673	0,06731	0,06774	0,84823
Abril	0,01814	0,07229	0,07096	0,83860
Mayo	0,02003	0,08102	0,09354	0,80541
Junio	0,02073	0,08725	0,09999	0,79202
Julio	0,02144	0,09348	0,10645	0,77863
Agosto	0,02215	0,09971	0,11290	0,76524

Tabla 72. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 5, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,01602	0,12090	0,13548	0,72760
Febrero	0,01673	0,13960	0,15160	0,69207
Marzo	0,01626	0,13835	0,18064	0,66475
Abril	0,02733	0,15954	0,08387	0,72926
Mayo	0,02922	0,16951	0,09677	0,70450
Junio	0,02937	0,17367	0,10752	0,68944
Julio	0,02953	0,17782	0,11827	0,67437
Agosto	0,02969	0,18198	0,12903	0,65931

La figura 130 es un gráfico combinado que contiene la evolución del número de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en el casquillo 5, siendo la zona izquierda la equivalente a la zona Oeste y a la derecha la zona Este.

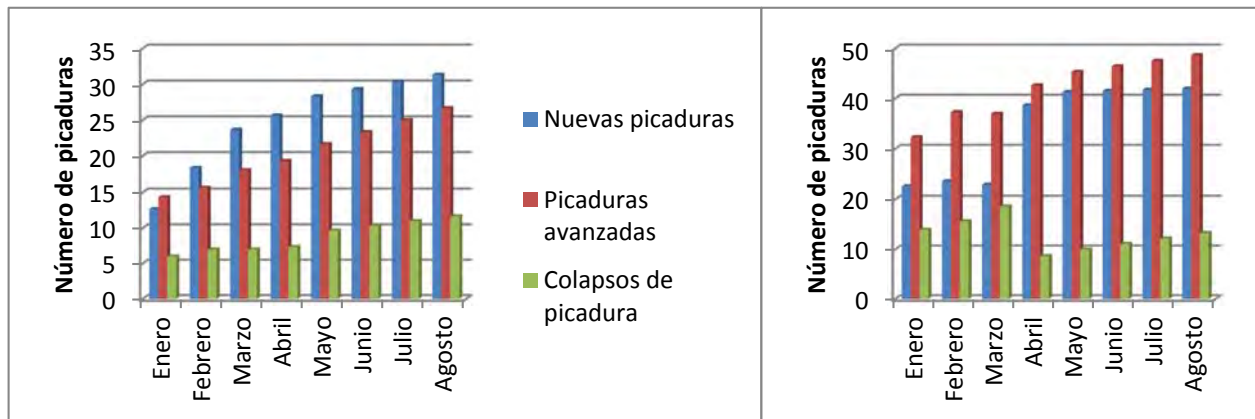


Figura 130. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 5”

La figura 131 es la repartición de la superficie entre las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y superficie no corroída mostrando Oeste y Este respectivamente.

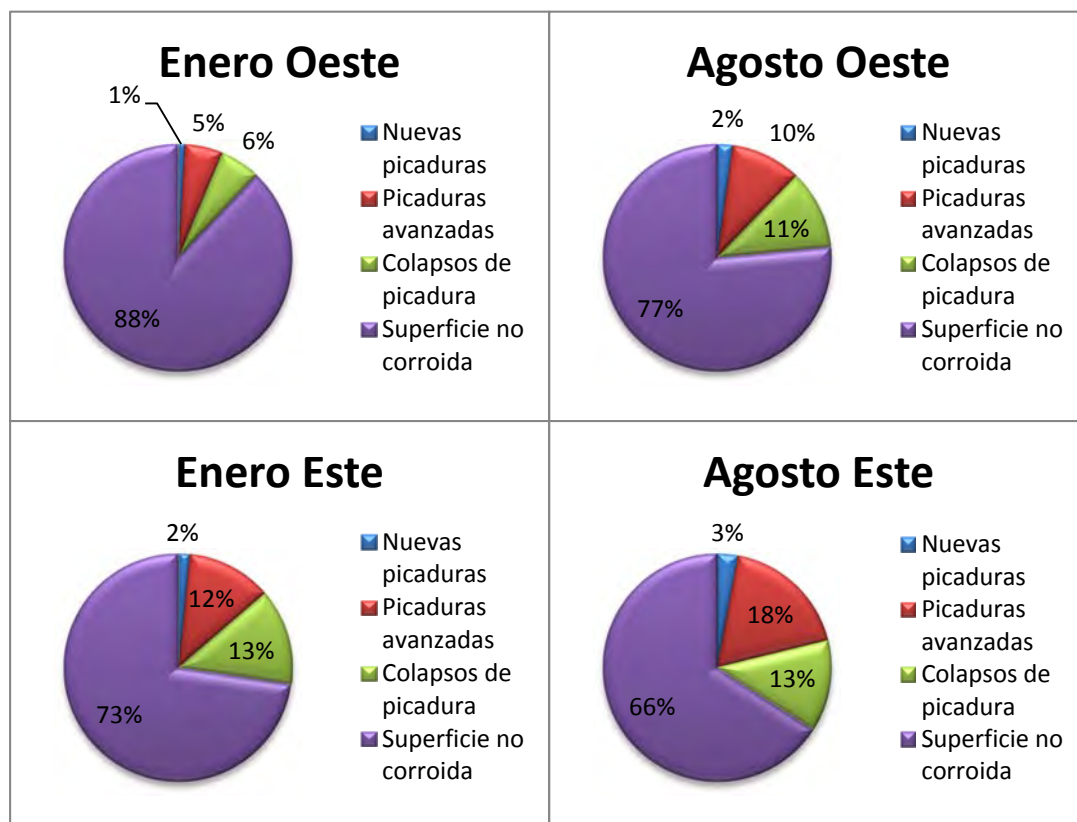


Figura 131. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 5”

4.4.6.6.- Estudio técnico de Casquillo 6

La ubicación del casquillo número 6 en “Puente Juan José Arenas”, representado por la figura 132.

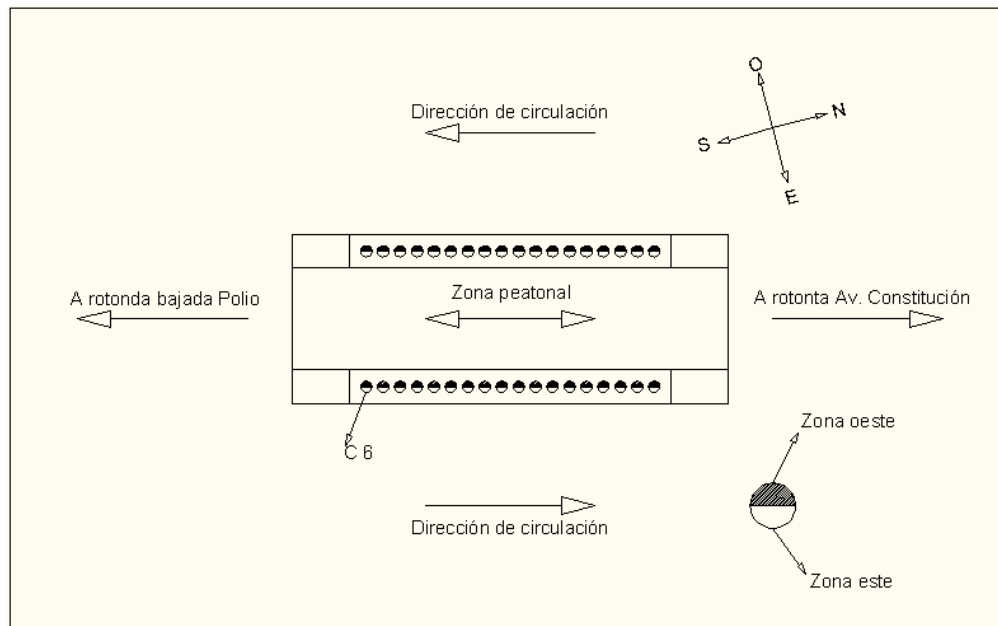


Figura 132. “Ubicación del casquillo número 6 en Puente Juan José Arenas”

Imágenes generales del casquillo 6 zona Oeste y Este de “Puente Juan José Arenas” mostrados en la figura combinada 133 respectivamente.



Figura 133. “Casquillo 6 de Puente Juan José Arenas”

Las picaduras contabilizadas en las zonas de estudio, se presentan en la tabla 73 y tabla 74 distinguiendo cada tipología en la zona Oeste y en la zona Este respectivamente.

Tabla 73. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 6, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	25,7	40,7	19,3
Febrero	25,7	33,0	22,7
Marzo	23,0	30,3	26,7
Abril	26,0	32,3	27,0
Mayo	28,0	34,0	30,7
Junio	30,6	35,2	31,9
Julio	33,1	36,4	33,1
Agosto	35,7	37,7	34,3

Tabla 74. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 6, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	38,7	23,0	15,7
Febrero	31,7	22,0	19,3
Marzo	16,3	33,7	18,3
Abril	22,3	36,3	23,0
Mayo	25,7	36,3	28,0
Junio	25,7	38,0	30,8
Julio	25,7	39,7	33,6
Agosto	25,7	41,3	36,3

Para mostrar el resultado de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, necesitamos apoyarnos en las ecuaciones (17 -19), usadas anteriormente para el mismo propósito. Con los datos obtenidos, se tiene información suficiente para representar la tabla de valores de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, así como los gráficos de reparto de superficie que nos ofrecerán una visión rápida de ambas zonas del mismo casquillo.

Las tablas 75 y 76 presentan las superficies corroídas que han inducido cada tipo de picadura así como la no corroída, para las zonas Oeste y Este respectivamente.

Tabla 75. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 6, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,01814	0,15206	0,18709	0,64271
Febrero	0,01814	0,12340	0,21934	0,63912
Marzo	0,01626	0,11342	0,25805	0,61227
Abril	0,01838	0,12090	0,26128	0,59944
Mayo	0,01979	0,12714	0,29676	0,55631
Junio	0,02160	0,13171	0,30859	0,53811
Julio	0,02340	0,13628	0,32041	0,51991
Agosto	0,02521	0,14085	0,33224	0,50170

Tabla 76. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 6, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02733	0,08600	0,15160	0,73506
Febrero	0,02238	0,08226	0,18709	0,70827
Marzo	0,01155	0,12589	0,17741	0,68516
Abril	0,01579	0,13586	0,22257	0,62578
Mayo	0,01814	0,13586	0,27095	0,57504
Junio	0,01814	0,14209	0,29783	0,54193
Julio	0,01814	0,14832	0,32471	0,50882
Agosto	0,01814	0,15456	0,35159	0,47571

La figura 134 es un gráfico combinado que contiene la evolución del número de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en el casquillo 6, siendo la zona izquierda la equivalente a la zona Oeste y a la derecha la zona Este.

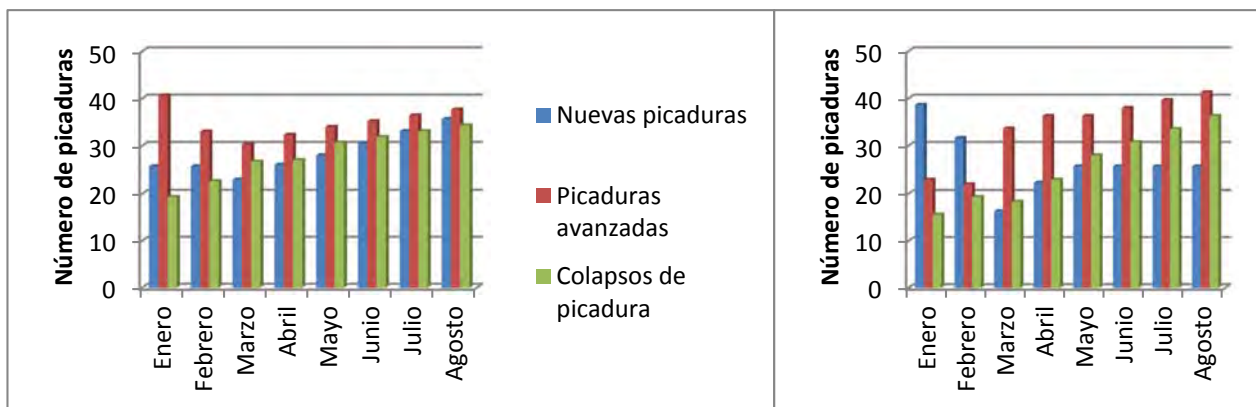


Figura 134. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 6”

La figura 135 es la repartición de la superficie entre las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y superficie no corroída mostrando Oeste y Este respectivamente.

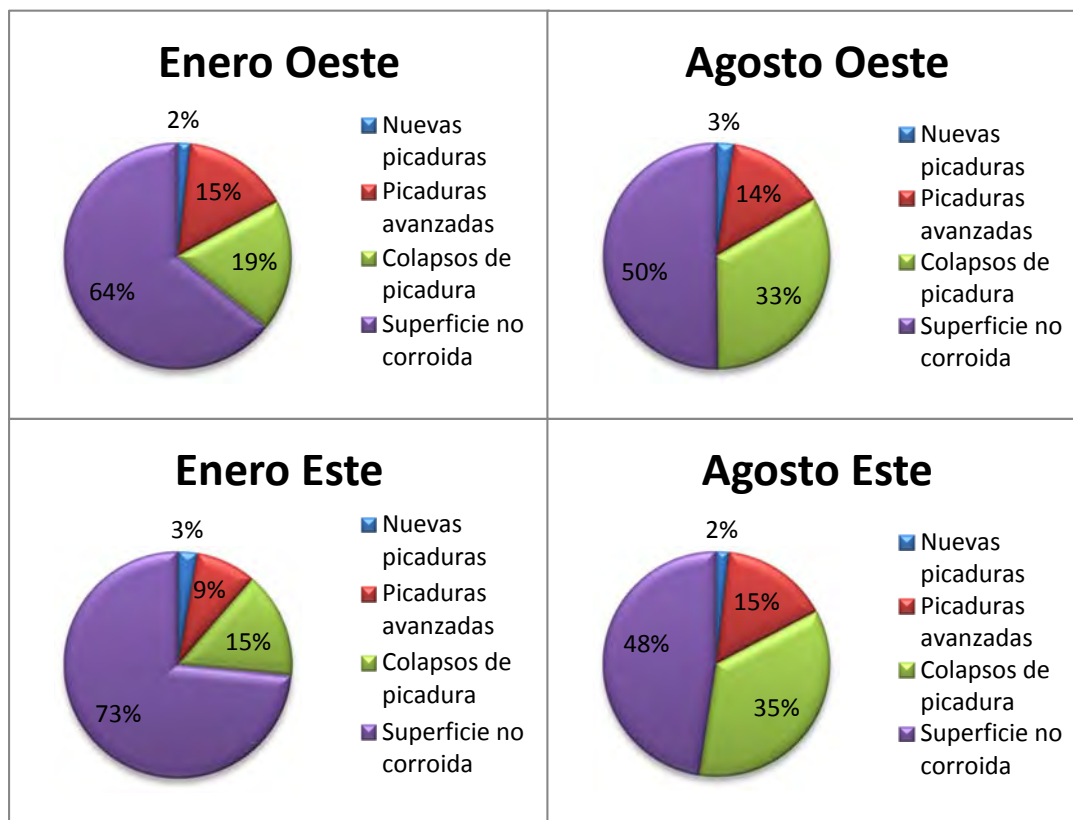


Figura 135. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 6”

4.4.6.7.- Estudio técnico de Casquillo 7

La ubicación del casquillo número 7 en “Puente Juan José Arenas”, representado por la figura 136.

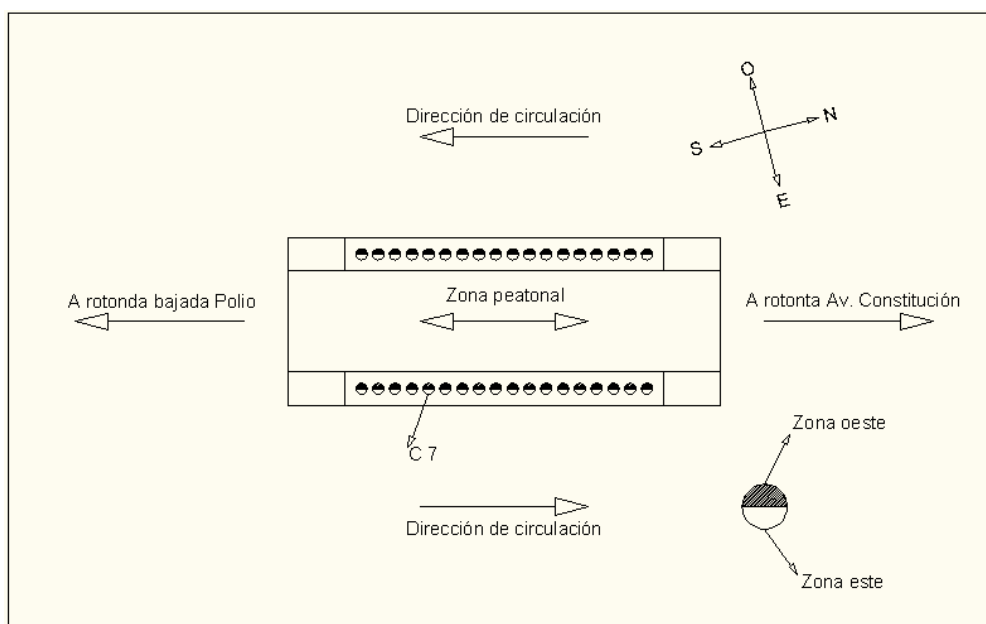


Figura 136. “Ubicación del casquillo número 7 en Puente Juan José Arenas”

Imágenes generales del casquillo 7 zona Oeste y Este de “Puente Juan José Arenas” mostrados en la figura combinada 137 respectivamente.



Figura 137. “Casquillo 7 de Puente Juan José Arenas”

Las picaduras contabilizadas en las zonas de estudio, se presentan en la tabla 77 y tabla 78 distinguiendo cada tipología en la zona Oeste y en la zona Este respectivamente.

Tabla 77. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 7, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	29,3	51,0	27,7
Febrero	49,0	45,3	27,7
Marzo	41,3	45,0	28,7
Abril	46,3	48,0	30,0
Mayo	46,7	49,3	32,0
Junio	47,2	51,7	32,7
Julio	47,8	54,0	33,3
Agosto	48,3	56,3	34,0

Tabla 78. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 7, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	30,7	17,0	24,7
Febrero	19,0	17,3	29,7
Marzo	44,7	20,0	30,0
Abril	46,7	21,3	30,0
Mayo	44,7	24,3	31,3
Junio	44,9	27,8	32,7
Julio	45,1	31,2	34,0
Agosto	45,3	34,7	35,3

Para mostrar el resultado de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, necesitamos apoyarnos en las ecuaciones (17 -19), usadas anteriormente para el mismo propósito. Con los datos obtenidos, se tiene información suficiente para representar la tabla de valores de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, así como los gráficos de reparto de superficie que nos ofrecerán una visión rápida de ambas zonas del mismo casquillo.

Las tablas 79 y 80 presentan las superficies corroídas que han inducido cada tipo de picadura así como la no corroída, para las zonas Oeste y Este respectivamente.

Tabla 79. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 7, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02073	0,19070	0,26773	0,52083
Febrero	0,03464	0,16951	0,26773	0,52812
Marzo	0,02922	0,16827	0,27740	0,52511
Abril	0,03275	0,17949	0,29031	0,49746
Mayo	0,03299	0,18447	0,30966	0,47288
Junio	0,03338	0,19320	0,31611	0,45731
Julio	0,03377	0,20192	0,32256	0,44174
Agosto	0,03416	0,21065	0,32901	0,42617

Tabla 80. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 7, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02168	0,06357	0,23870	0,67606
Febrero	0,01343	0,06481	0,28708	0,63467
Marzo	0,03157	0,07479	0,29031	0,60333
Abril	0,03299	0,07977	0,29031	0,59694
Mayo	0,03157	0,09099	0,30321	0,57423
Junio	0,03173	0,10387	0,31611	0,54829
Julio	0,03189	0,11675	0,32901	0,52235
Agosto	0,03204	0,12963	0,34192	0,49641

La figura 138 es un gráfico combinado que contiene la evolución del número de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en el casquillo 7, siendo la zona izquierda la equivalente a la zona Oeste y a la derecha la zona Este.

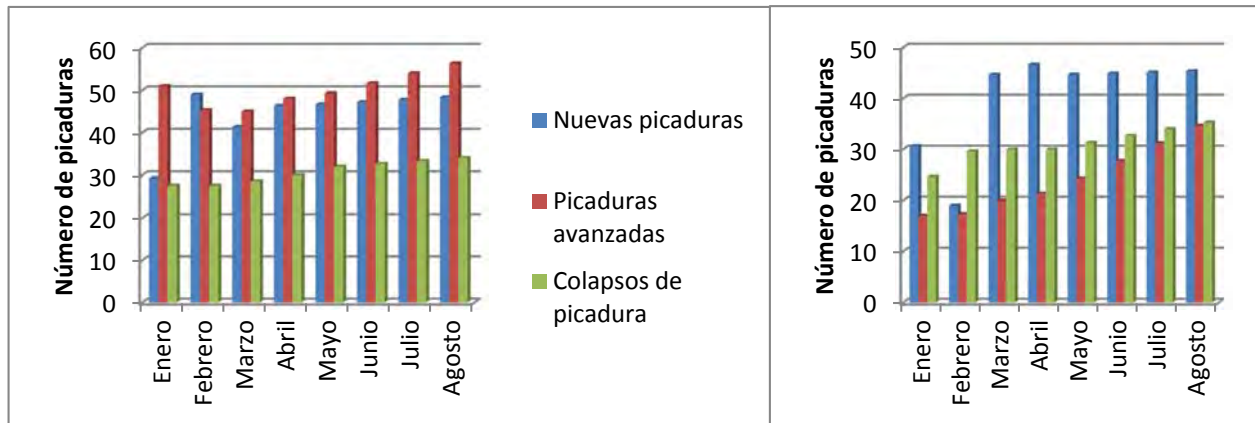


Figura 138. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 7”

La figura 139 es la repartición de la superficie entre las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y superficie no corroída mostrando Oeste y Este respectivamente.

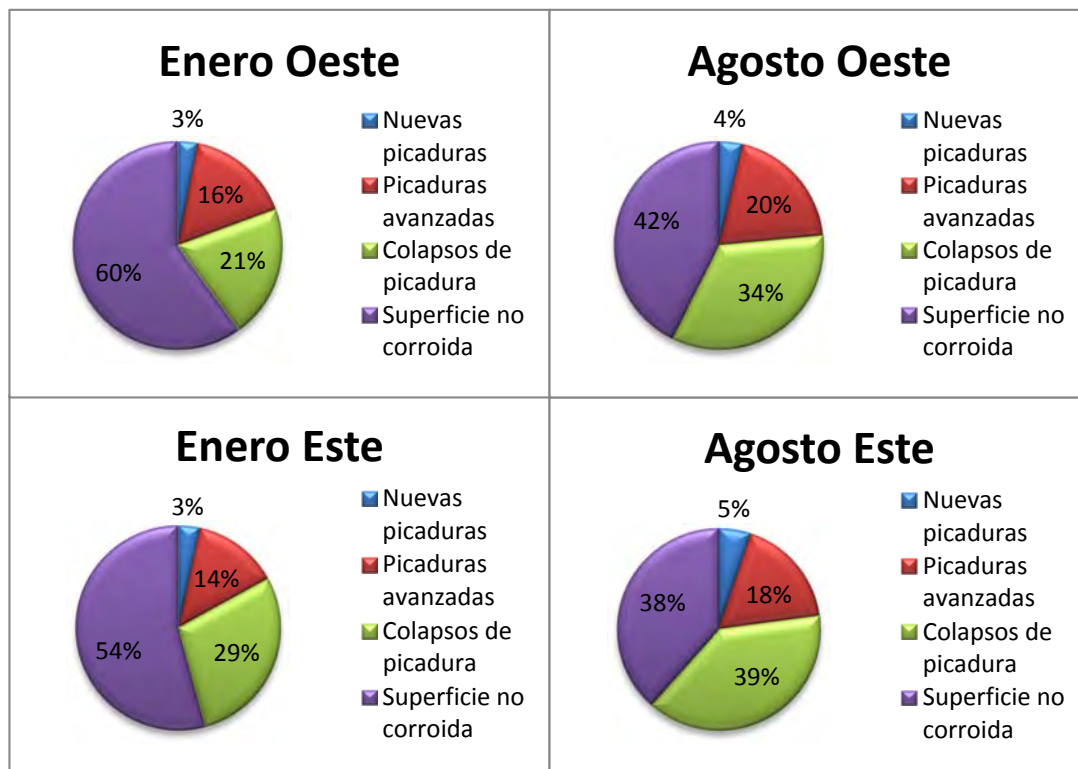


Figura 139. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 7”

4.4.6.8.- Estudio técnico de Casquillo 8

La ubicación del casquillo número 8 en “Puente Juan José Arenas”, representado por la figura 140.

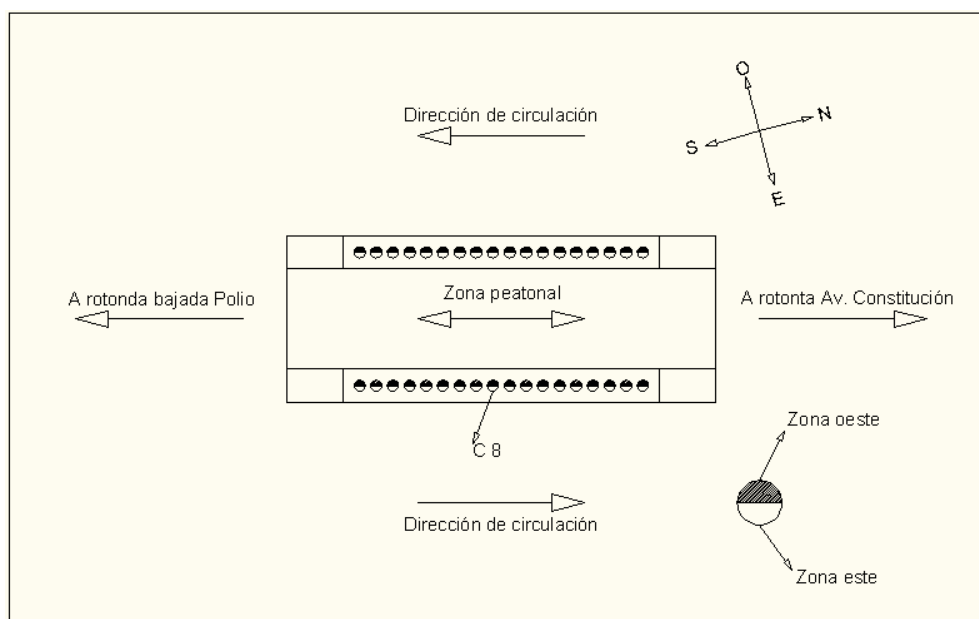


Figura 140. “Ubicación del casquillo número 8 en Puente Juan José Arenas”

Imágenes generales del casquillo 8 zona Oeste y Este de “Puente Juan José Arenas” mostrados en la figura combinada 141 respectivamente.



Figura 141. “Casquillo 8 de Puente Juan José Arenas”

Las picaduras contabilizadas en las zonas de estudio, se presentan en la tabla 81 y tabla 82 distinguiendo cada tipología en la zona Oeste y en la zona Este respectivamente.

Tabla 81. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 8, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	36,7	32,0	15,0
Febrero	64,3	39,0	17,7
Marzo	22,7	46,0	22,7
Abril	24,3	46,7	23,0
Mayo	24,7	48,0	23,3
Junio	25,7	49,3	23,8
Julio	26,7	50,7	24,2
Agosto	27,7	52,0	24,7

Tabla 82. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 8, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	33,3	26,0	27,0
Febrero	52,0	29,7	30,7
Marzo	40,3	21,3	30,7
Abril	42,7	23,3	33,7
Mayo	43,0	24,7	35,3
Junio	43,0	24,9	36,3
Julio	43,0	25,1	37,3
Agosto	43,0	25,3	38,3

Para mostrar el resultado de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, necesitamos apoyarnos en las ecuaciones (17 -19), usadas anteriormente para el mismo propósito. Con los datos obtenidos, se tiene información suficiente para representar la tabla de valores de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, así como los gráficos de reparto de superficie que nos ofrecerán una visión rápida de ambas zonas del mismo casquillo.

Las tablas 83 y 84 presentan las superficies corroídas que han inducido cada tipo de picadura así como la no corroída, para las zonas Oeste y Este respectivamente.

Tabla 83. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 8, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02592	0,11966	0,14515	0,70927
Febrero	0,04547	0,14583	0,17096	0,63774
Marzo	0,01602	0,17201	0,21934	0,59263
Abril	0,01720	0,17450	0,22257	0,58573
Mayo	0,01744	0,17949	0,22579	0,57728
Junio	0,01814	0,18447	0,23009	0,56729
Julio	0,01885	0,18946	0,23440	0,55730
Agosto	0,01956	0,19444	0,23870	0,54730

Tabla 84. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 8, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,02356	0,09722	0,26128	0,61794
Febrero	0,03676	0,11093	0,29676	0,55555
Marzo	0,02851	0,07977	0,29676	0,59496
Abril	0,03016	0,08725	0,32579	0,55680
Mayo	0,03039	0,09224	0,34192	0,53545
Junio	0,03039	0,09307	0,35159	0,52494
Julio	0,03039	0,09390	0,36127	0,51444
Agosto	0,03039	0,09473	0,37095	0,50393

La figura 142 es un gráfico combinado que contiene la evolución del número de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en el casquillo 8, siendo la zona izquierda la equivalente a la zona Oeste y a la derecha la zona Este.

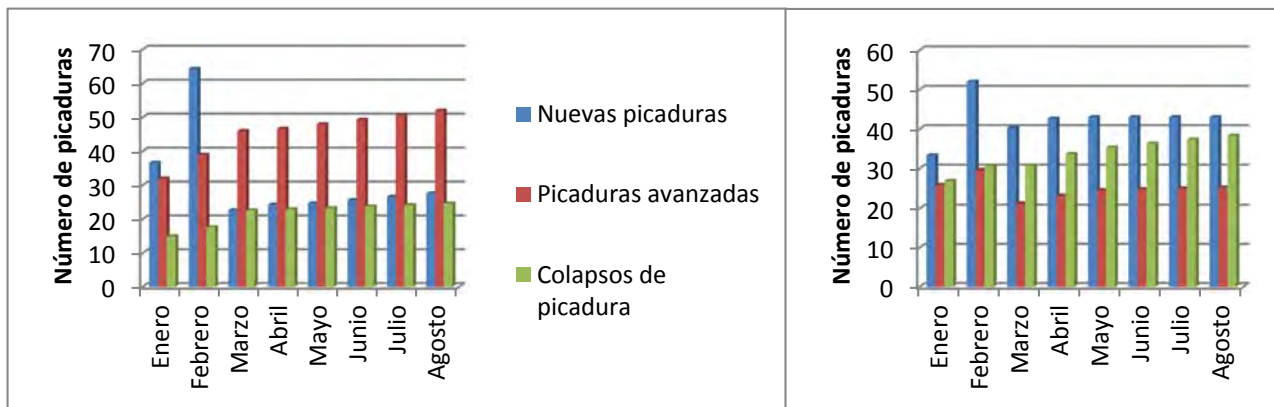


Figura 142. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 8”

La figura 143 es la repartición de la superficie entre las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y superficie no corroída mostrando Oeste y Este respectivamente.

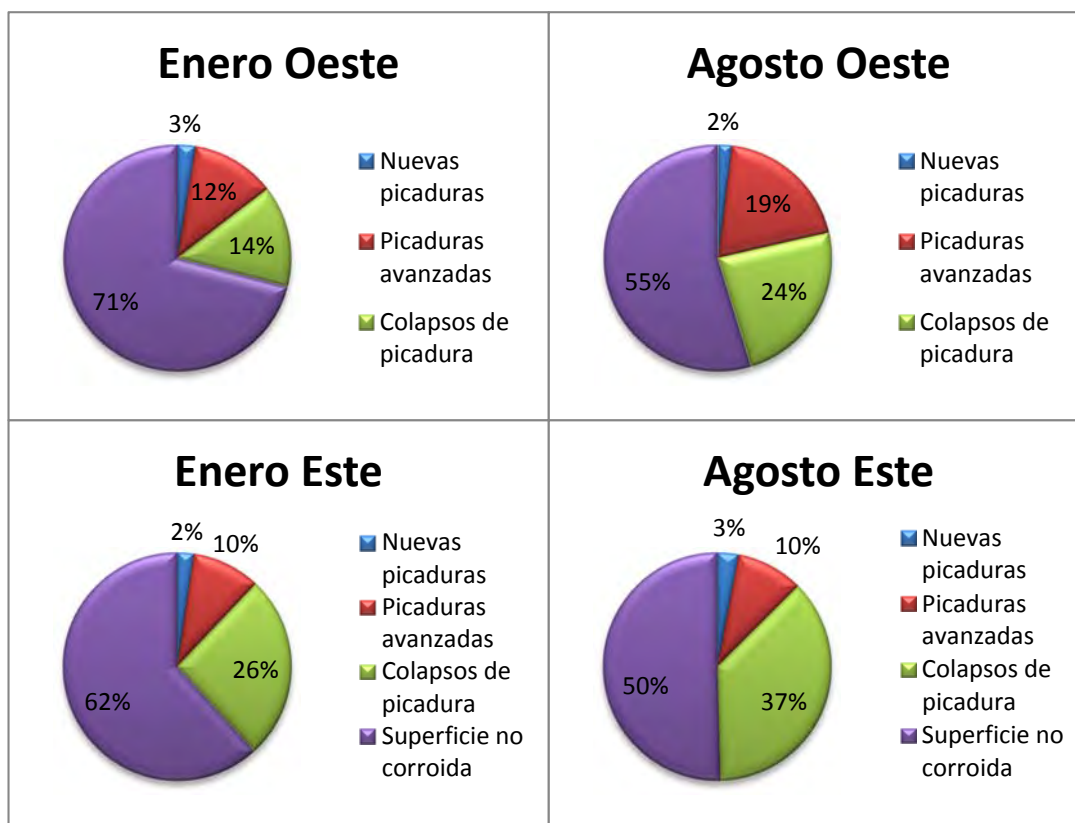


Figura 143. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 8”

4.4.6.9.- Estudio técnico de Casquillo 9

La ubicación del casquillo número 9 en “Puente Juan José Arenas”, representado por la figura 144.

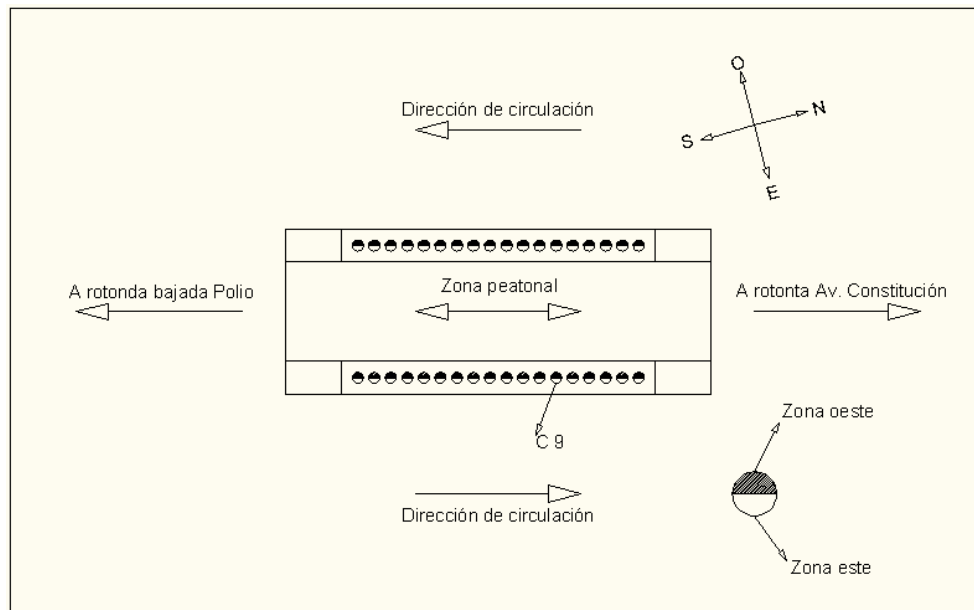


Figura 144. “Ubicación del casquillo número 9 en Puente Juan José Arenas”

Imágenes generales del casquillo 9 zona Oeste y Este de “Puente Juan José Arenas” mostrados en la figura combinada 145 respectivamente.



Figura 145. “Casquillo 9 de Puente Juan José Arenas”

Las picaduras contabilizadas en las zonas de estudio, se presentan en la tabla 85 y tabla 86 distinguiendo cada tipología en la zona Oeste y en la zona Este respectivamente.

Tabla 85. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 9, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	43,0	43,7	21,3
Febrero	40,0	45,0	19,3
Marzo	41,0	43,3	21,7
Abril	42,7	45,7	33,7
Mayo	46,0	47,3	34,3
Junio	48,0	49,2	34,6
Julio	50,0	51,1	34,8
Agosto	52,0	53,0	35,0

Tabla 86. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 9, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	48,3	36,3	29,7
Febrero	67,0	37,3	31,0
Marzo	65,7	36,0	32,3
Abril	67,0	37,0	33,0
Mayo	68,0	40,7	33,7
Junio	69,7	42,9	35,8
Julio	71,3	45,1	37,9
Agosto	73,0	47,3	40,0

Para mostrar el resultado de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, necesitamos apoyarnos en las ecuaciones (17 -19), usadas anteriormente para el mismo propósito. Con los datos obtenidos, se tiene información suficiente para representar la tabla de valores de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, así como los gráficos de reparto de superficie que nos ofrecerán una visión rápida de ambas zonas del mismo casquillo.

Las tablas 87 y 88 presentan las superficies corroídas que han inducido cada tipo de picadura así como la no corroída, para las zonas Oeste y Este respectivamente.

Tabla 87. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 9, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,03039	0,16328	0,20644	0,59988
Febrero	0,02827	0,16827	0,18709	0,61637
Marzo	0,02898	0,16204	0,20967	0,59932
Abril	0,03016	0,17076	0,32579	0,47329
Mayo	0,03252	0,17699	0,33224	0,45825
Junio	0,03393	0,18406	0,33439	0,44762
Julio	0,03534	0,19112	0,33654	0,43700
Agosto	0,03676	0,19818	0,33869	0,42637

Tabla 88. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 9, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,03416	0,13586	0,28708	0,54289
Febrero	0,04736	0,13960	0,29998	0,51306
Marzo	0,04642	0,13461	0,31289	0,50608
Abril	0,04736	0,13835	0,31934	0,49495
Mayo	0,04807	0,15206	0,32579	0,47408
Junio	0,04924	0,16037	0,34622	0,44416
Julio	0,05042	0,16868	0,36665	0,41425
Agosto	0,05160	0,17699	0,38708	0,38433

La figura 146 es un gráfico combinado que contiene la evolución del número de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en el casquillo 9, siendo la zona izquierda la equivalente a la zona Oeste y a la derecha la zona Este.

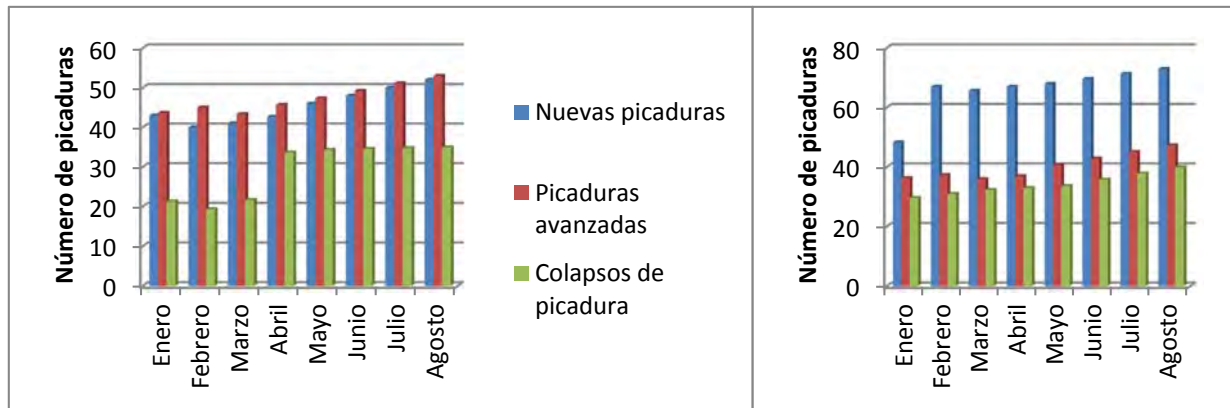


Figura 146. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 9”

La figura 147 es la repartición de la superficie entre las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y superficie no corroída mostrando Oeste y Este respectivamente.

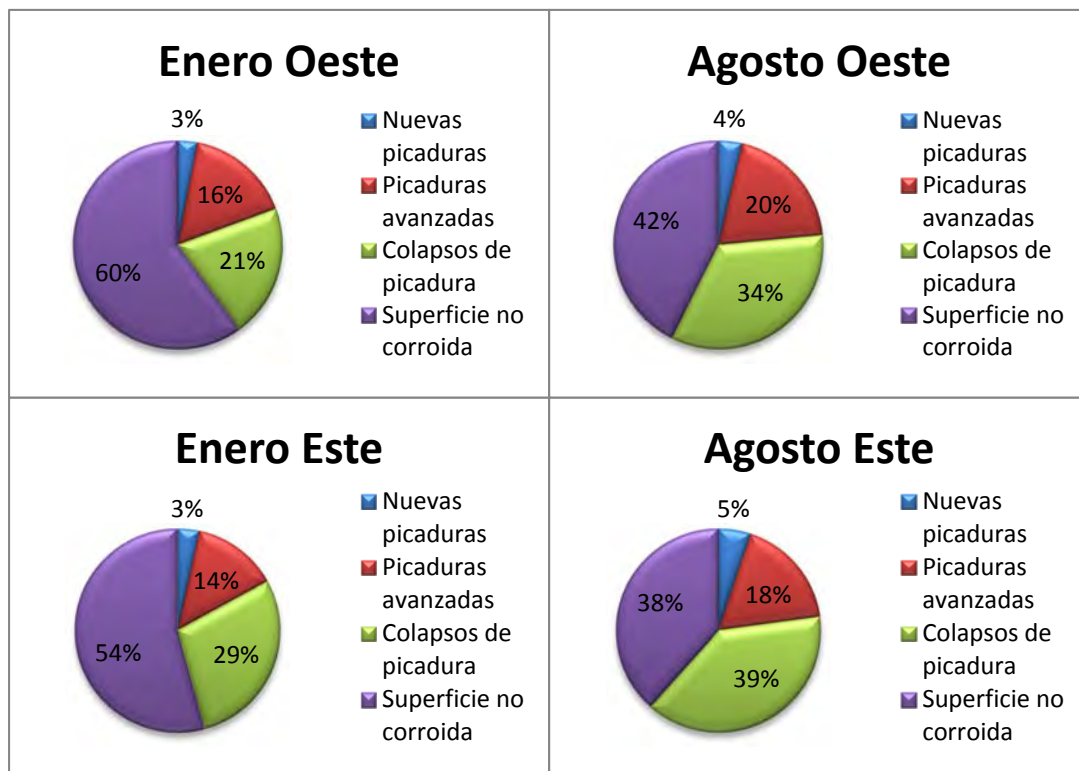


Figura 147. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 9”

4.4.6.10.- Estudio técnico de Casquillo 10

La ubicación del casquillo número 4 en “Puente Juan José Arenas”, representado por la figura 148.

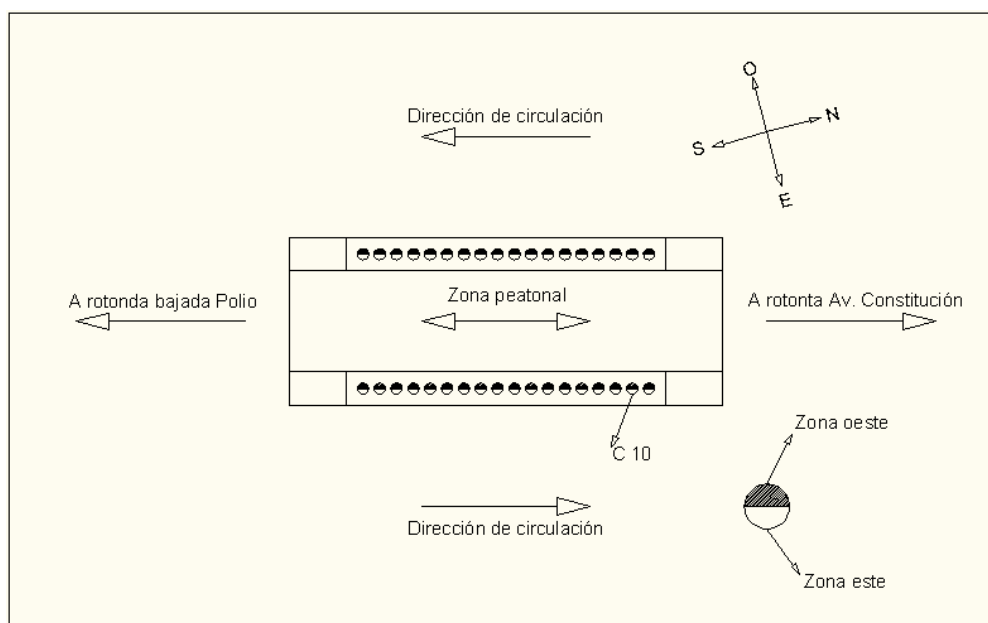


Figura 148. “Ubicación del casquillo número 10 en Puente Juan José Arenas”

Imágenes generales del casquillo 10 zona Oeste y Este de “Puente Juan José Arenas” mostrados en la figura combinada 149 respectivamente.



Figura 149. “Casquillo 10 de Puente Juan José Arenas”

Las picaduras contabilizadas en las zonas de estudio, se presentan en la tabla 89 y tabla 90 distinguiendo cada tipología en la zona Oeste y en la zona Este respectivamente.

Tabla 89. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 10, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	50,0	23,3	11,3
Febrero	70,7	26,0	12,3
Marzo	70,3	27,0	12,7
Abril	73,7	27,7	14,3
Mayo	75,0	28,7	14,3
Junio	77,0	29,7	14,6
Julio	79,0	30,7	14,8
Agosto	81,0	31,7	15,0

Tabla 90. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 10, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura
Enero	60,0	43,3	23,7
Febrero	87,3	50,7	25,3
Marzo	77,0	54,0	27,7
Abril	80,3	55,7	28,7
Mayo	76,3	54,7	29,7
Junio	76,1	56,3	30,6
Julio	75,9	58,0	31,4
Agosto	75,7	59,7	32,3

Para mostrar el resultado de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, necesitamos apoyarnos en las ecuaciones (17 -19), usadas anteriormente para el mismo propósito. Con los datos obtenidos, se tiene información suficiente para representar la tabla de valores de la superficie ocupada por cada tipo de picadura, así como los gráficos de reparto de superficie que nos ofrecerán una visión rápida de ambas zonas del mismo casquillo.

Las tablas 91 y 92 presentan las superficies corroídas que han inducido cada tipo de picadura así como la no corroída, para las zonas Oeste y Este respectivamente.

Tabla 91. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 10, zona Oeste”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,03534	0,08725	0,10967	0,76774
Febrero	0,04995	0,09722	0,11935	0,73348
Marzo	0,04972	0,10096	0,12257	0,72675
Abril	0,05207	0,10345	0,13870	0,70577
Mayo	0,05301	0,10719	0,13870	0,70109
Junio	0,05443	0,11093	0,14085	0,69379
Julio	0,05584	0,11467	0,14300	0,68648
Agosto	0,05726	0,11841	0,14515	0,67918

Tabla 92. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 10, zona Este”

Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
Enero	0,04241	0,16204	0,22902	0,56653
Febrero	0,06173	0,18946	0,24515	0,50366
Marzo	0,05443	0,20192	0,26773	0,47592
Abril	0,05678	0,20815	0,27740	0,45766
Mayo	0,05396	0,20441	0,28708	0,45455
Junio	0,05380	0,21065	0,29568	0,43987
Julio	0,05364	0,21688	0,30428	0,42519
Agosto	0,05349	0,22311	0,31289	0,41052

La figura 150 es un gráfico combinado que contiene la evolución del número de nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en el casquillo 10, siendo la zona izquierda la equivalente a la zona Oeste y a la derecha la zona Este.

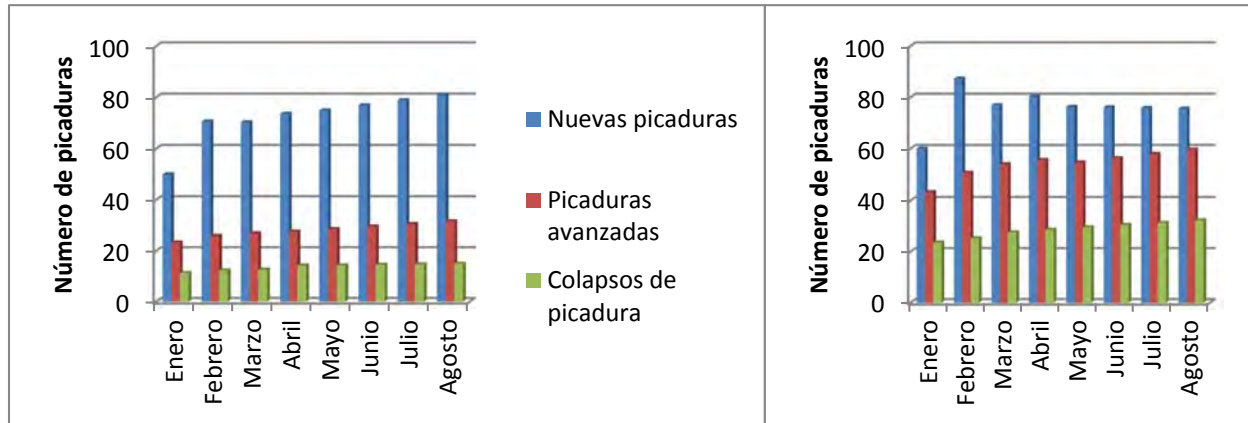


Figura 150. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 10”

La figura 151 es la repartición de la superficie entre las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y superficie no corroída mostrando Oeste y Este respectivamente.

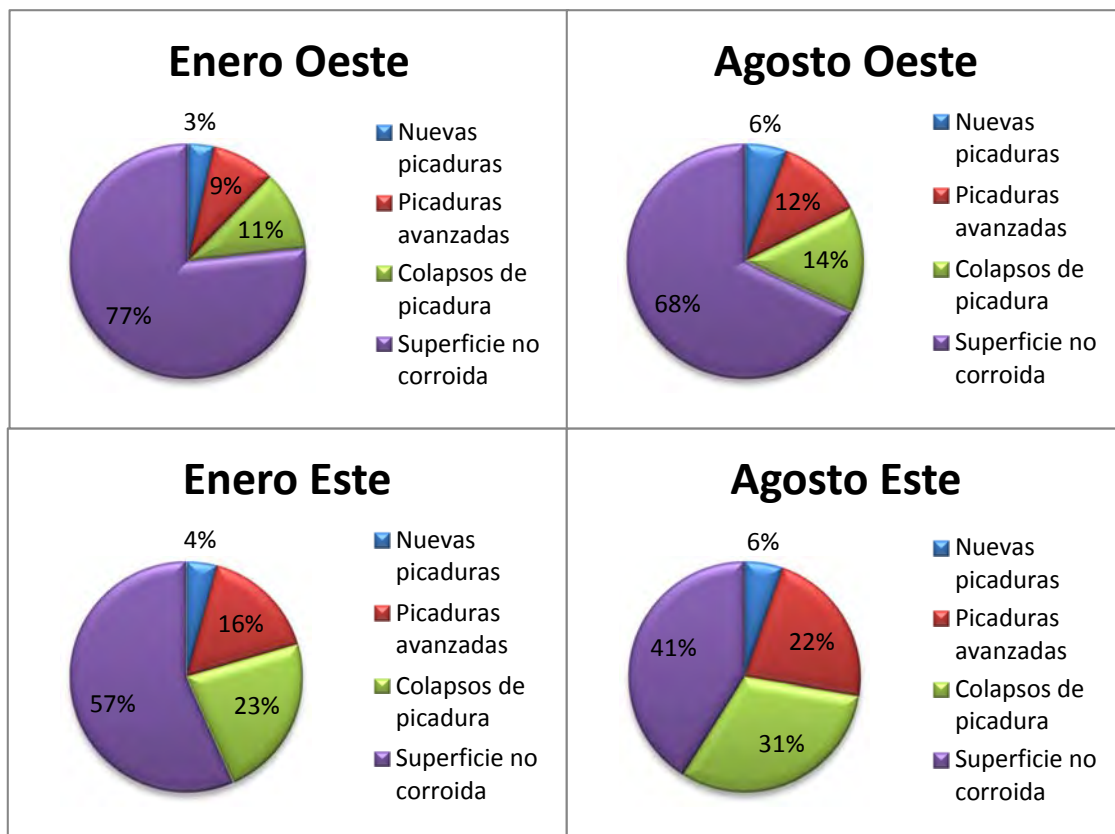


Figura 151. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 10”

4.4.6.11.- Comparación de los estudios realizados en los casquillos

En la comparación de los estudios realizados a los casquillos, se distinguirán los valores más destacados, los casquillos más y menos corroídos, y también, una distinción en función de la agrupación de la picadura en el casquillo.

En primer lugar se tratarán cuatro formas diferenciadas en las cuales se presenta la picadura en los casquillos, las cuales son:

- Acumulación de picaduras
- Acumulación de grietas de corrosión
- Superficie poco dañada
- Anillos concéntricos, Manufactura

La acumulación de picaduras se presenta de forma llamativa en los casquillos 1, 2 y 10 además de en otros no estudiados y detallados en este Proyecto Fin de Carrera. Cabe resaltar que estos casquillos son los situados más al Norte del “Puente Juan José Arenas”. En la figura 152 se muestra el casquillo 10 en su zona Este, en donde predominan todas las picaduras repartidas por la superficie.



Figura 152. “Casquillo 10, Zona Este; Agosto 2013”

La acumulación de grietas de corrosión es la forma en que más se presenta la corrosión en los casquillos, siendo afectados los casquillos 4, 7, 8 y 9. Estos casquillos están situados en la zona central del “Puente Juan José Arenas” y, en su mayoría, en la parte Este del puente. Las grietas predominan en algunas zonas del casquillo, pero no se reparten de forma homogénea, ni muestran un aspecto parecido entre ellas. De esta forma tenemos grietas a lo largo de la superficie de forma aleatoria. La figura 153 es un ejemplo de esta repartición de picaduras en los casquillos.



Figura 153. “Casquillo 8, Zona Este; Agosto 2013”

Sólo en el caso del casquillo 3, situado en la zona central del puente, presenta una superficie poco afectada por la corrosión, salvo en las zonas de estudio analizadas. Se podría englobar a este casquillo con los dañados por acumulación de grietas de corrosión en un estado inicial, ya que la superficie libre es mucho mayor en comparación a los demás casquillos. (En las zonas de estudio se seleccionaron zonas con corrosión para así poder determinar una cinética). La figura 154 muestra el estado del casquillo 3 en Agosto de 2013.



Figura 154. “Casquillo 3, Zona Este; Agosto 2013”

Se ha considerado, y tras el análisis de todos los resultados previos, distinguir este tipo de agrupación como “Anillos concéntricos”, el cual, se basa en una repartición de las picaduras de forma continua en forma de anillos que rodean al casquillo, identificándose zonas en donde se aprecian restos de desbaste. Estos anillos se sitúan cada 1 cm aproximadamente y cubren completamente la superficie del casquillo. Los dos casquillos situados más al Sur del puente, sufren esta repartición de la picadura, casquillos 5 y 6. Este daño, puede ser causado por un posible efecto de manufactura, provocado por la forma en que la pieza se fabricó, almacenó o se



ancló al soporte. El aspecto que presenta se muestra en la figura 155 equivalente al casquillo 5.

Figura 155. “Casquillo 5, Zona Este; Agosto 2013”

Aprovechando la toma de fotografías durante el proceso de la metodología de este Proyecto Fin de Carrera, podemos agrupar ocho casquillos más en esta selección. Los casquillos intermedios entre los estudiados, también están fotografiados a pesar de no pertenecer al estudio y agrupándolos obtenemos la tabla 93.

Tabla 93. “Agrupaciones de picadura en los casquillos del Puente Juan José Arenas”

Agrupación	1	1.2	2	2.3	3	3.4	4	4.5	5	6	6.7	7	7.8	8	8.9	9	9.10	10	Total (18)
Picadura	X	X	X	X														X	5
Grietas							X	X				X		X		X	X		6
Poco afectada					X										X				2
Manufactura						X			X	X	X		X						5

La figura 156 representa el esquema para visualizar la ubicación en el puente de cada uno de los casquillos. Estás aparecerán coloreadas en función de la leyenda que contiene.

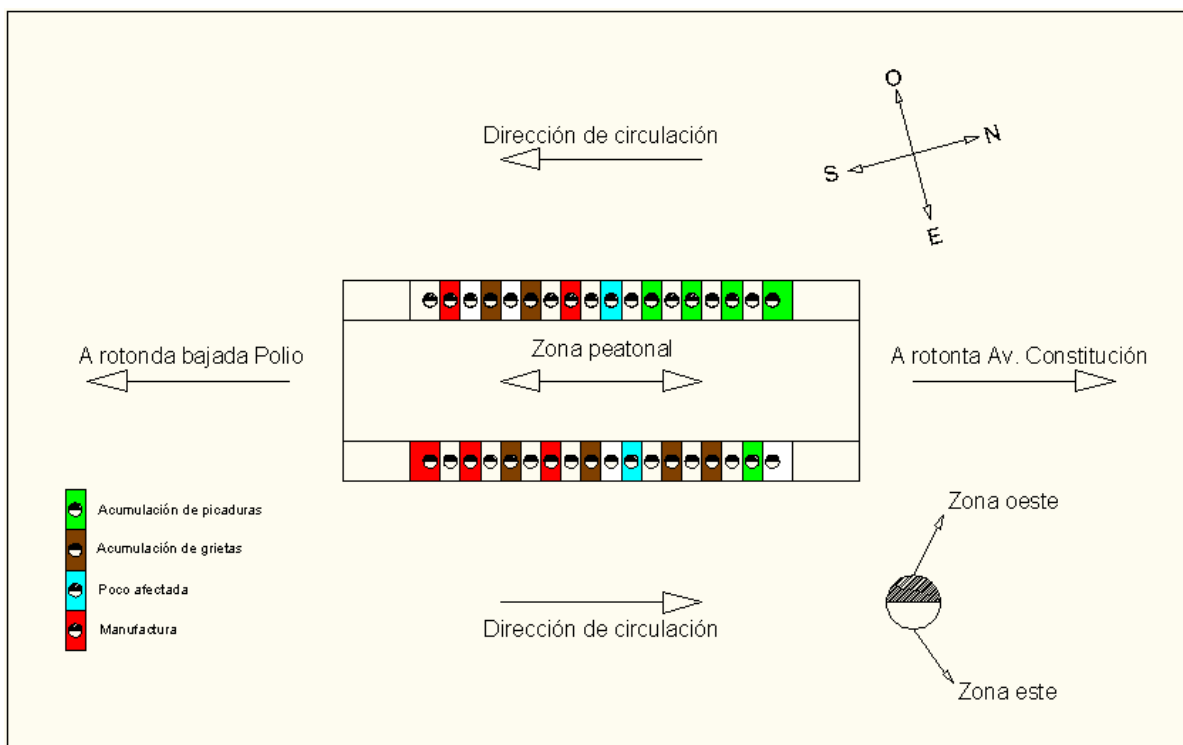


Figura 156. “Agrupaciones de picadura en el Puente Juan José Arenas”

Se distinguen varias zonas, distribuidas a lo largo del puente: La zona norte del puente, se encuentra afectada en su mayoría por acumulaciones de picaduras, la zona Sur, por daños ocasionador por manufactura, la zona central se sitúa una pequeña línea de casquillos poco afectados y los principales daños por acumulaciones de grietas.

Con estas agrupaciones definidas, se continúan las comparaciones para localizar los casquillos más, y menos afectados por corrosión. Para ello comenzaremos analizando las caras o zonas más afectadas de los casquillos, distinguiendo zona Este y Oeste. De igual forma, haremos la comparación aplicando la media de porcentaje corroído entre las dos caras estudiadas de los casquillos. Estos resultados, a su vez, se compararán con la deformación existente en la pieza para buscar las relaciones entre corrosión y deformación. Para ello, se utilizarán las tablas y gráficas desarrolladas en los estudios individuales de los casquillos.

En primer lugar seleccionaremos las caras más corroídas de los estudios individuales, haciendo uso de los datos equivalentes al mes de Agosto 2013. Sumando el porcentaje de la superficie corroída podemos obtener el porcentaje corroído en general en una cara del casquillo. Agrupando los datos obtenemos la tabla 94, donde se muestra el % de superficie corroída cara a cara da cada casquillo, así como la media del casquillo.

Tabla 94. “Porcentaje Corroído de cada casquillo”

Casquillo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% Corroído Oeste	49	39	37	48	23	50	57	45	58	32
% Corroído Este	57	37	35	36	34	52	50	50	62	59
% Corroído medio	53	38	36	42	29	51	54	48	60	46

Se sitúa por lo tanto, el casquillo 9 como el más corroído, y el 5 como el menos corroído. También se distingue una afectación mucho mayor en los casquillos situados en la zona Este del puente (casquillos del 6 al 10). De igual forma, la zona este de los casquillos, también está más corroída, con lo que obtenemos que la zona Este tanto de los casquillos como del puente ha sido más deteriorada. Aplicando un orden de mayor a menor porcentaje corroído medio de los casquillos obtenemos la siguiente lista:

$$9 > 7 > 1 > 6 > 8 > 10 > 4 > 2 > 3 > 5.$$

Comparando esta lista con la calculada de deformación existente, podemos buscar similitudes que ayuden a entender el proceso de corrosión y sus variantes. La lista obtenida de deformación existente es:

$$9 > 1 > 5 > 7 > 3 > 6 > 2 > 10 > 4 > 8.$$

Obtendríamos equivalencias en varios casquillos, los casquillos 8,1 y 7 son los más corroídos, y a su vez, de los más deformados. Por otro lado, los casquillos 2, 4 y 10 son de los menos corroídos, y a su vez, de los menos deformados.

Para buscar una relación entre la forma de agrupación, y el porcentaje corroído en los casquillos, calcularemos la media aritmética entre los casquillos de cada agrupación obteniendo, de esta forma, la tabla 95.

Tabla 95. “Porcentaje Corroído en cada agrupación”

Agrupación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M
Picaduras	53	38								46	45,7
Grietas				42			54	48	60		51
Poco afectada			36								36
Manufactura					29	51					40

Con los resultados de la tabla 95, obtenemos: La agrupación de “Grietas” es la más agresiva en el casquillo y la “Poco afectada” la menos agresiva, obteniendo los márgenes de 51 y 36 % respectivamente. “Manufactura” y “Picaduras” tienen valores intermedios, 45,7 y 40 % respectivamente, de esta forma, se sitúan las acumulaciones de picaduras y grietas como las agrupaciones más agresivas con los casquillos.

Como última comparación en los casquillos, se han elaborado las tablas 96 y 97, las cuales recogen de forma porcentual el porcentaje corroído en los casquillos por cada tipología, en su evolución de Enero hasta Agosto, con el fin de obtener una comparativa más visual. La tabla 96, corresponde a los datos de la zona Oeste y contiene el porcentaje corroído por cada tipología en una comparativa de Enero - Agosto.

Tabla 96. “Porcentaje corroído por cada tipología en la zona Oeste (Enero – Agosto)”

Casquillo	Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
1	Enero	2,10	7,85	19,35	70,70
	Agosto	1,56	10,97	36,13	51,35
2	Enero	1,46	5,11	11,29	82,14
	Agosto	2,64	12,59	23,55	61,23
3	Enero	1,60	7,23	8,39	82,78
	Agosto	2,59	16,20	18,06	63,14
4	Enero	1,48	10,84	14,84	72,83
	Agosto	2,43	15,58	30,32	51,67
5	Enero	0,90	5,36	5,81	87,94
	Agosto	2,21	9,97	11,29	76,52
6	Enero	1,81	15,21	18,71	64,27
	Agosto	2,52	14,08	33,22	50,17
7	Enero	2,07	19,07	26,77	52,08
	Agosto	3,42	21,06	32,90	42,62
8	Enero	2,59	11,97	14,52	70,93
	Agosto	1,96	19,44	23,87	54,73
9	Enero	3,04	16,33	20,64	59,99
	Agosto	3,68	19,82	33,87	42,64
10	Enero	3,53	8,72	10,97	76,77
	Agosto	5,73	11,84	14,52	67,92

Con la tabla 96 elaborada, se representan las cuatro gráficas diferentes, las cuales, contienen la evolución de cada tipología casquillo a casquillo. La figura 157 muestra la evolución de las nuevas picaduras de cada casquillo, distinguiendo su estado en Enero y Agosto.

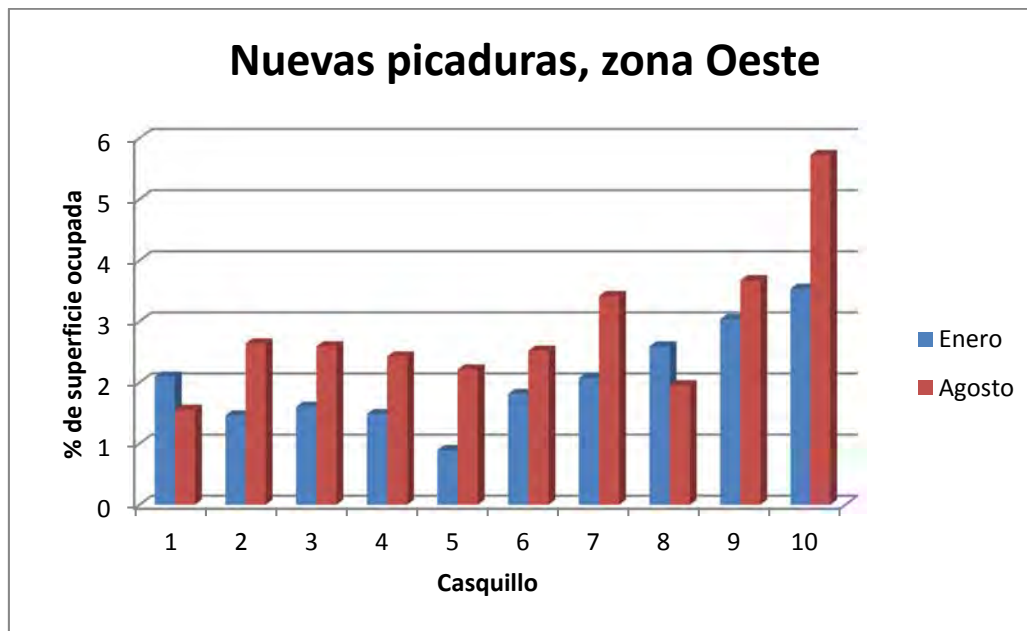


Figura 157. “Porcentaje corroído por las nuevas picaduras en la zona Oeste entre los meses Enero y Agosto”

Analizando la figura 157, se observa la tendencia de las nuevas picaduras a aumentar su número en función del tiempo. Solo en los casos de los casquillos 1 y 8, se produce una regresión del número de nuevas picaduras. También destaca el casquillo 10 ya que alcanza el 5,73%, siendo el casquillo más afectado de forma porcentual por las nuevas picaduras.

De igual forma que se ha elaborado la figura 157, se presenta la figura 158, la cual contiene el porcentaje corroído por las picaduras avanzadas en la zona Oeste entre los meses de Enero y Agosto.

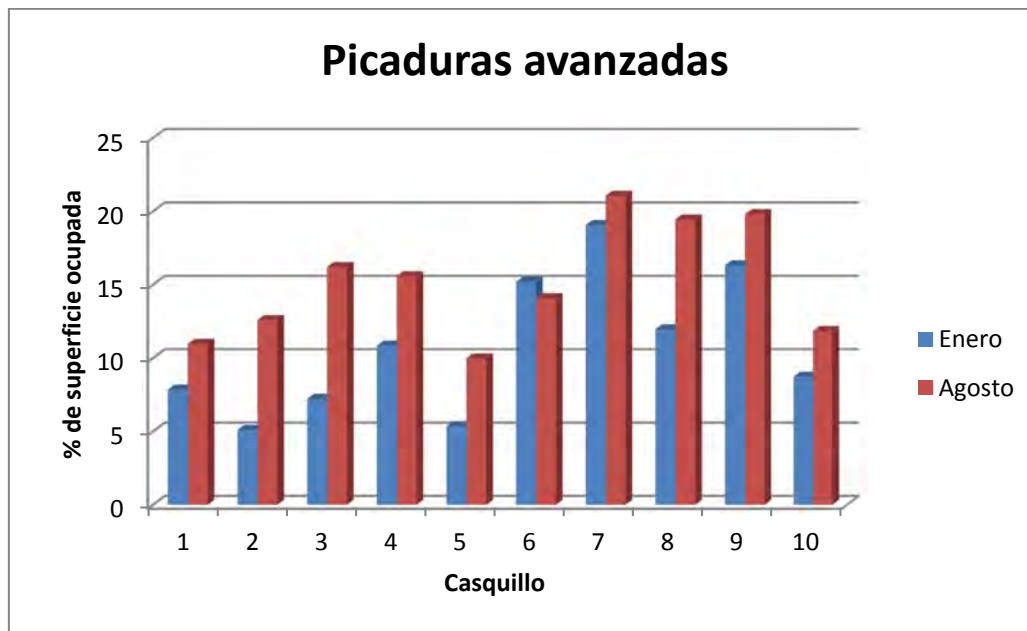


Figura 158. “Porcentaje corroído por las picaduras avanzadas en la zona Oeste entre los meses Enero y Agosto”

Comparando los resultados obtenidos, solo en el caso del casquillo 6, las picaduras avanzadas han disminuido su número. En los demás casos, las picaduras avanzadas han aumentado su valor, siendo aún más notable en los casquillos 2, 3 y 8 donde ronda el 8% más de superficie afectada por esta tipología. En el caso del casquillo 7, su evolución ha sido muy leve, solo un 2% más corroído en 8 meses. Al ser el casquillo 7 el más afectado también inicialmente, se observa que la evolución de las picaduras avanzadas con el tiempo van atenuándose.

Por medio de la tabla 96, se presenta la figura 159, la cual representa en porcentaje corroído por los colapsos de picadura en la zona Oeste entre los meses Enero y Agosto.

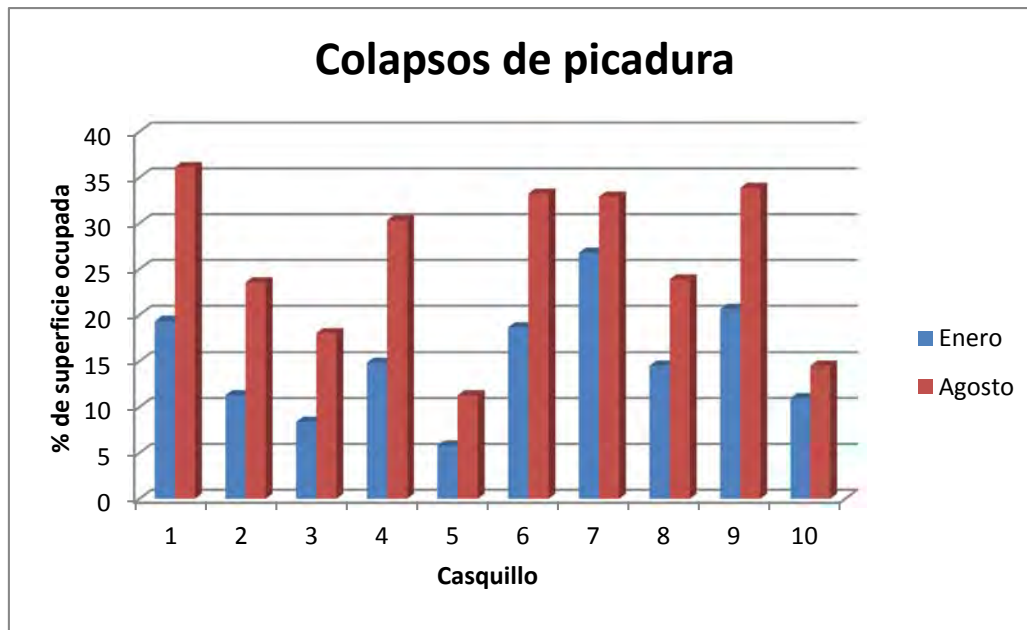


Figura 159. “Porcentaje corroído por los colapsos de picadura en la zona Oeste entre los meses Enero y Agosto”

La figura 159 muestra como todos los casquillos en la zona Oeste han aumentado al menos un 4% de superficie corroída por esta tipología, situando se el casquillo 5 y 10 como los menos afectados por este daño. El aumento de la zona corroída, tiene la mayor parte de su peso en esta tipología, la cual supone en Agosto, más de un 30% en la mitad de los casquillos.

La superficie no corroída supone también una fuente de información buena para conocer cómo ha evolucionado la picadura en este intervalo de tiempo y así observar, que casquillos han sufrido una menor cinética de corrosión. Para ello, se elabora la figura 160, la cual representa el porcentaje de superficie libre que quedaba en Enero y queda en Agosto.

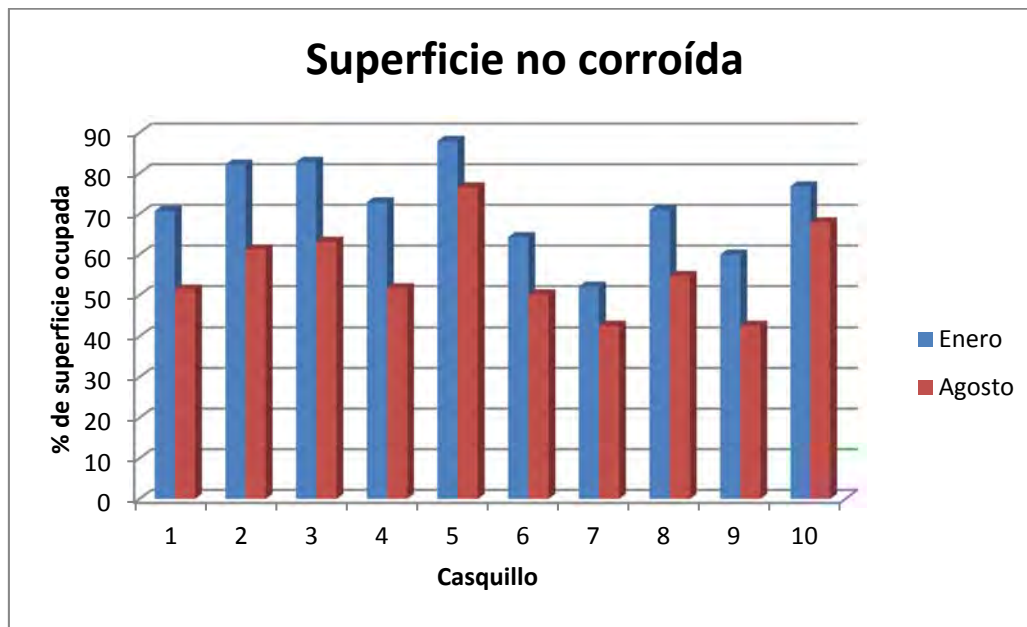


Figura 160. “Porcentaje no corroído en la zona Oeste entre los meses Enero y Agosto”

La figura 160 muestra que, cada casquillo sufre una evolución de daños diferente y progresiva en el tiempo. Los casquillos 7 y 9 resultaron ser los más afectados por la corrosión, y el casquillo 5 y 10, los menos afectados. Cabe señalar que los colapsos de picadura han tenido la razón de este resultado, ya que tanto el casquillo 5, como el 10, eran los menos afectados por los colapsos de picadura. Con este resultado en el Oeste, podemos decir que los casquillos más resistentes a ser afectados por los colapsos de picadura, lo son también a la corrosión por picadura.

Para poder contrastar los datos obtenidos, se realiza la tabla 97, la cual recoge de forma porcentual, el porcentaje corroído por cada tipología en su evolución, de Enero hasta Agosto. La tabla 97, corresponde a los datos de la zona Este y contiene el porcentaje corroído por cada tipología en una comparativa de Enero - Agosto.

Tabla 97. “Porcentaje corroído por cada tipología en la zona Este (Enero – Agosto)”

Casquillo	Tiempo	Nuevas picaduras	Picaduras avanzadas	Colapsos de picadura	Superficie no corroída
1	Enero	3,11	8,97	18,71	69,21
	Agosto	3,06	18,57	35,16	43,21
2	Enero	2,03	14,96	27,74	55,28
	Agosto	2,33	13,84	21,29	62,54
3	Enero	2,19	5,73	10,64	81,43
	Agosto	1,79	11,97	21,61	64,63
4	Enero	2,47	8,97	20,00	68,55
	Agosto	2,52	14,08	19,68	63,72
5	Enero	1,60	12,09	13,55	72,76
	Agosto	2,97	18,20	12,90	65,93
6	Enero	2,73	8,60	15,16	73,51
	Agosto	1,81	15,46	35,16	47,57
7	Enero	2,17	6,36	23,87	67,61
	Agosto	3,20	12,96	34,19	49,64
8	Enero	2,36	9,72	26,13	61,79
	Agosto	3,04	9,47	37,09	50,39
9	Enero	3,42	13,59	28,71	54,29
	Agosto	5,16	17,70	38,71	38,43
10	Enero	4,24	16,20	22,90	56,65
	Agosto	5,35	22,31	31,29	41,05

Con la tabla 97 elaborada, se representan las cuatro gráficas diferentes, las cuales contienen la evolución de cada tipología casquillo a casquillo de la zona Este. La figura 161 muestra la evolución de las nuevas picaduras de cada casquillo, distinguiendo su estado en Enero y Agosto.

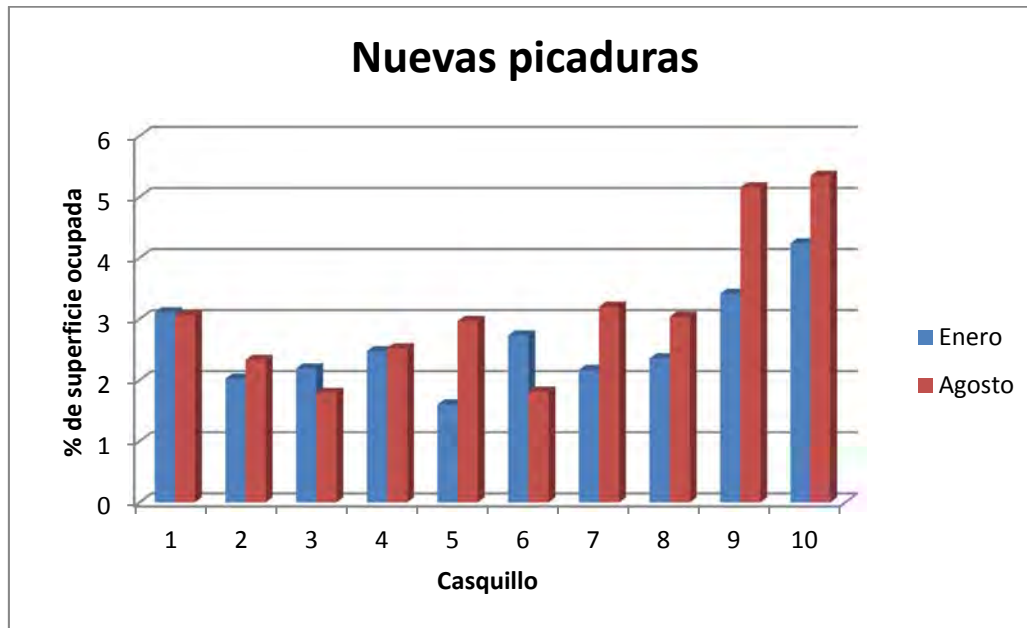


Figura 161. “Porcentaje corroído por las nuevas picaduras en la zona Este entre los meses Enero y Agosto”

Analizando la figura 161, se observa la misma tendencia que en la zona Oeste, de las nuevas picaduras a aumentar su número en función del tiempo. En tres de los casquillos, se ha producido una regresión del número de nuevas picaduras, en el 1 y 3 de forma muy leve, y en el 6 de una forma notable, casi un 1% de superficie corroída menos por esta tipología, lo que supone una reducción del 33% del volumen inicial ocupado. En los casquillos 9 y 10 el volumen ocupado por las nuevas picaduras asciende del 5%, casi el doble que la media obtenida en el estudio.

La figura 162 se ha construido utilizando la tabla 97, contiene el porcentaje corroído por las picaduras avanzadas en la zona Este entre los meses de Enero y Agosto.

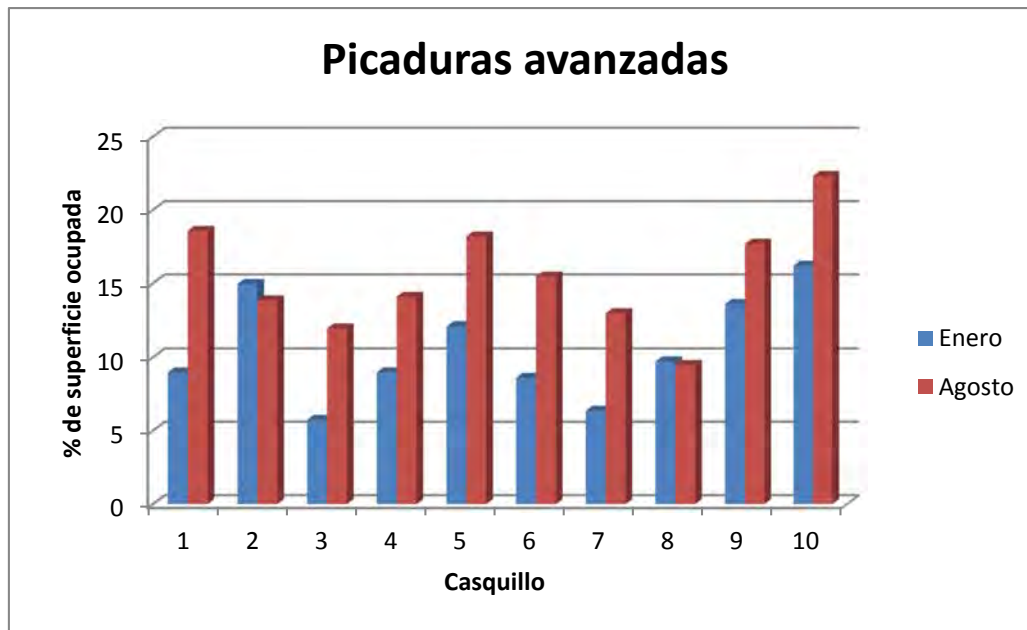


Figura 162. “Porcentaje corroído por las picaduras avanzadas en la zona Este entre los meses Enero y Agosto”

El cambio sufrido en las picaduras avanzadas es más grande que en la zona Oeste, ya que, en varios de los casquillos, la superficie que ocupan las picaduras avanzadas, es el doble que hace ocho meses, esto sucede en los casquillos 1, 3, 6 y 7. Este importante crecimiento, muestra la tendencia de los casquillos a sufrir corrosión, a pesar de que no muestren un estado inicial tan severo. En los casquillos 2 y 8, se ha producido una disminución del número de picaduras avanzadas, lo cual connota que la corrosión por picadura de esta tipología mantiene unos valores en el mismo rango durante todo el proceso.

En la figura 163 se muestra en porcentaje corroído por los colapsos de picadura en la zona Este entre los meses Enero y Agosto.

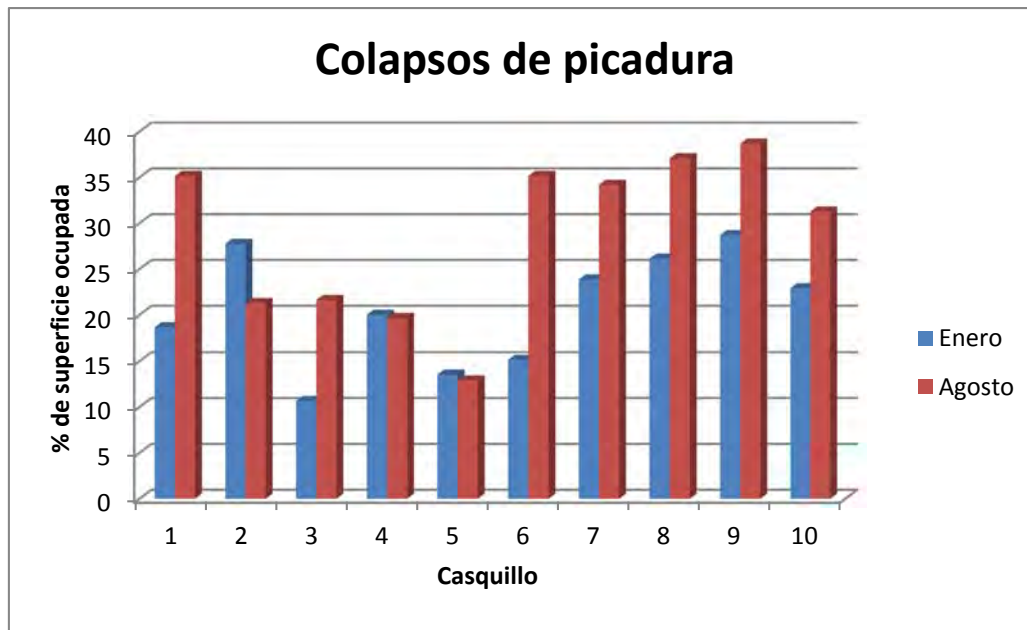


Figura 163. “Porcentaje corroído por los colapsos de picadura en la zona Este entre los meses Enero y Agosto”

De nuevo, como en todos los casos anteriores, hay casquillos en los cuales la superficie afectada por cada tipología ha disminuido, en este caso es los casquillos 2 y 5. En el caso del casquillo 2, se ha disminuido un 6%, lo cual se explica por la acumulación de colapsos de picadura en una misma zona. Como antes ya se ha estudiado, la zona Este está más corroída que la zona Oeste, en la figura 162 se ve la gran evolución que han sufrido los colapsos en los casquillos 1, 3 y 6, los cuales, también habían sufrido un gran aumento del número de picaduras avanzadas. Además, varios de los casquillos han superado o se aproximan al 35% de superficie corroída por los colapsos de picadura, cifra que supone un daño importante en la superficie de la pieza. Esta zona, la Este es la que recibe directamente la influencia marina y el viento incidente predominante. Al estar ambas zonas sometidas a las mismas condiciones con la salvedad del viento, muestra que si es un elemento que ha participado en potenciar la corrosión sufrida en los casquillos.

En la figura 164, se muestra la comparativa global del daño sufrido en Enero y Agosto en las zonas Este de los casquillos atendiendo a la superficie no corroída.

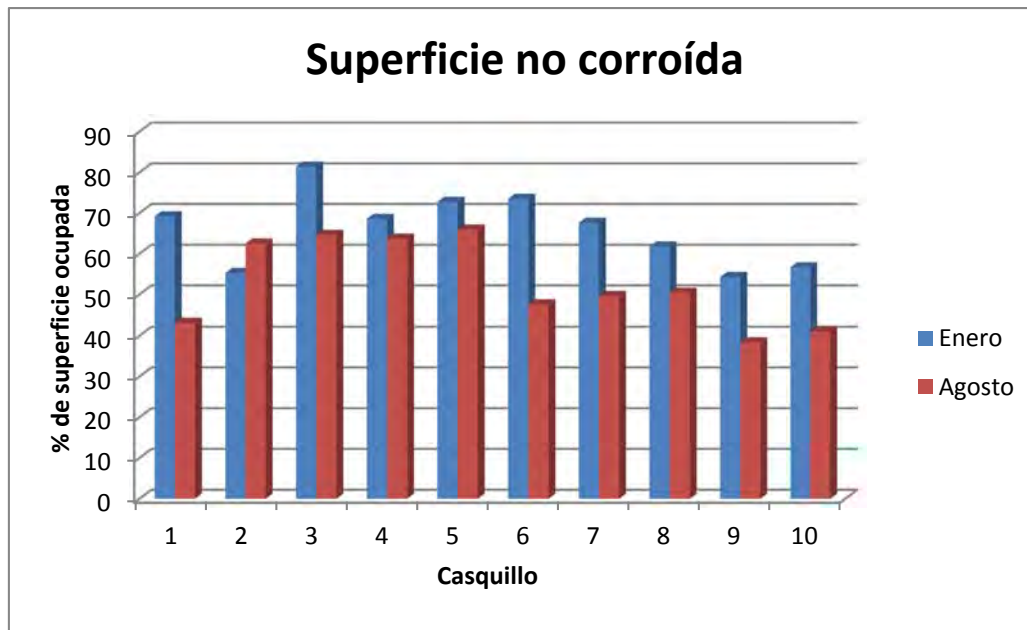


Figura 164. “Porcentaje no corroído en la zona Este entre los meses Enero y Agosto”

El valor medio de la superficie no corroída es menor que en la zona Oeste. Todos los casquillos, con la salvedad del 2, han reducido la superficie no corroída, suceso que ocurre por la agrupación de los colapsos principalmente que hacen que las mediciones varíen en contra del proceso que ocurre, motivo por el cual, se han empleado medias de diversos casquillos escogidos según un criterio aleatorio. Los casquillos 1 y 6, son los más afectados por la corrosión en estos ocho meses de estudio, reduciendo más de un 20% la superficie no corroída del casquillo.

Una vez elaborada la comparación de los casquillos, se procede a mostrar las evoluciones de picadura de forma visual.

4.4.6.12.- Evolución visual de la picadura en los casquillos

Para mostrar la evolución de la picadura de forma visual, se han seleccionado varias partes de los casquillos a lo largo de los meses de estudio. Para esta muestra de imágenes, se han recortado aproximadamente zonas de 1,5 cm x 1,5 cm., aumentado el brillo al 60 %, bajado la temperatura del color al 25% y se ha enfocado un 15%. Con ello, se muestran las figuras (165- 170) equivalentes a los meses y casquillos que describe su título en la parte inferior de la figura.

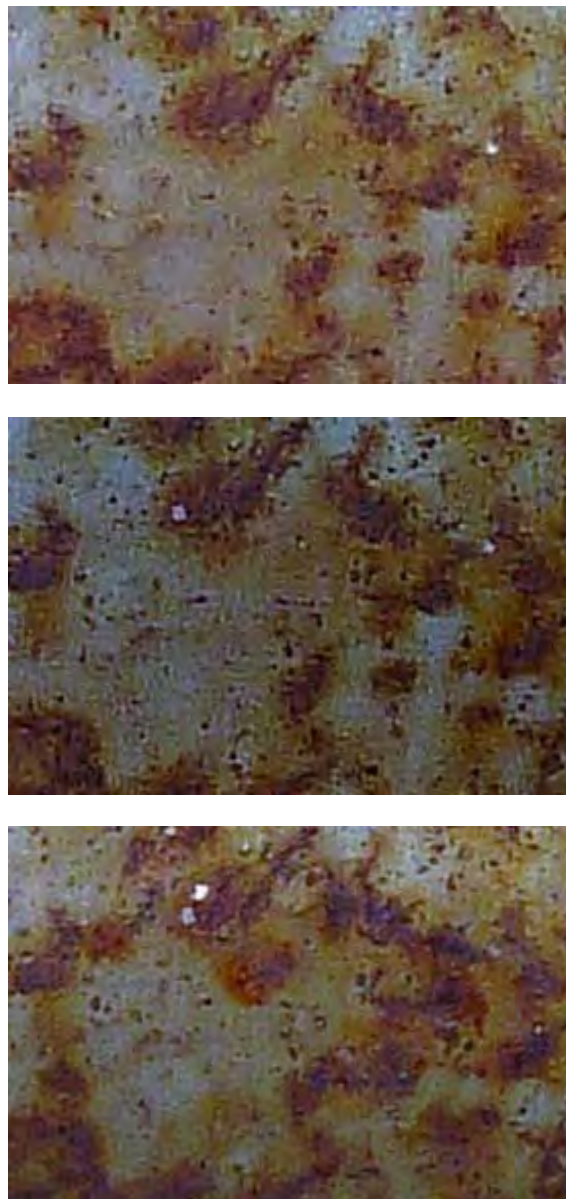


Figura 165. “Evolución de picadura, casquillo 1, Zona Este, Enero, Marzo, Agosto”

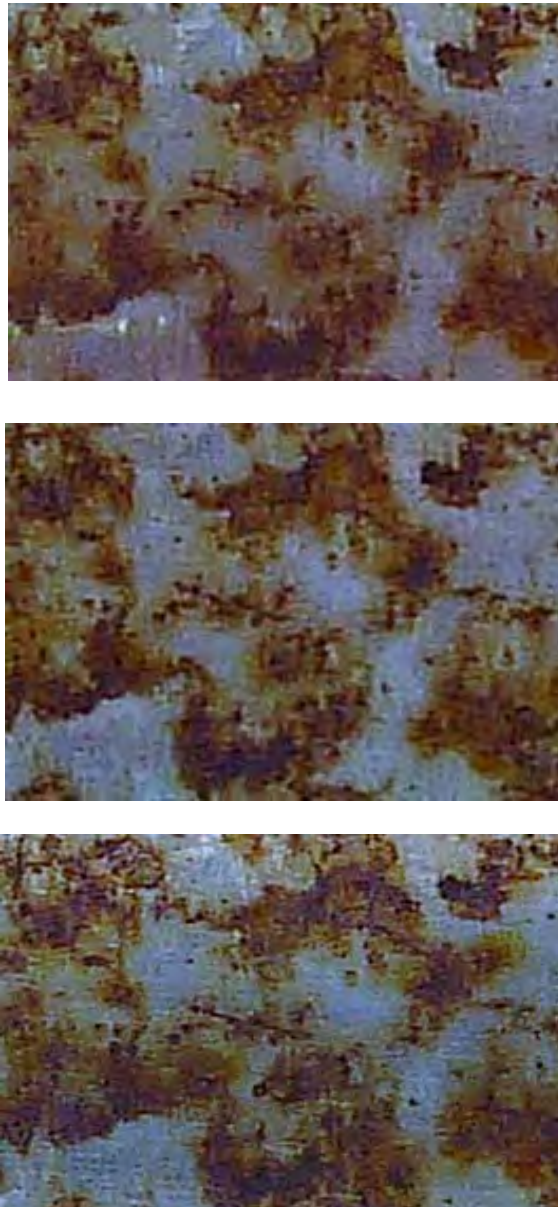


Figura 166. “Evolución de picadura, casquillo 2, Zona Este, Enero, Marzo, Agosto”

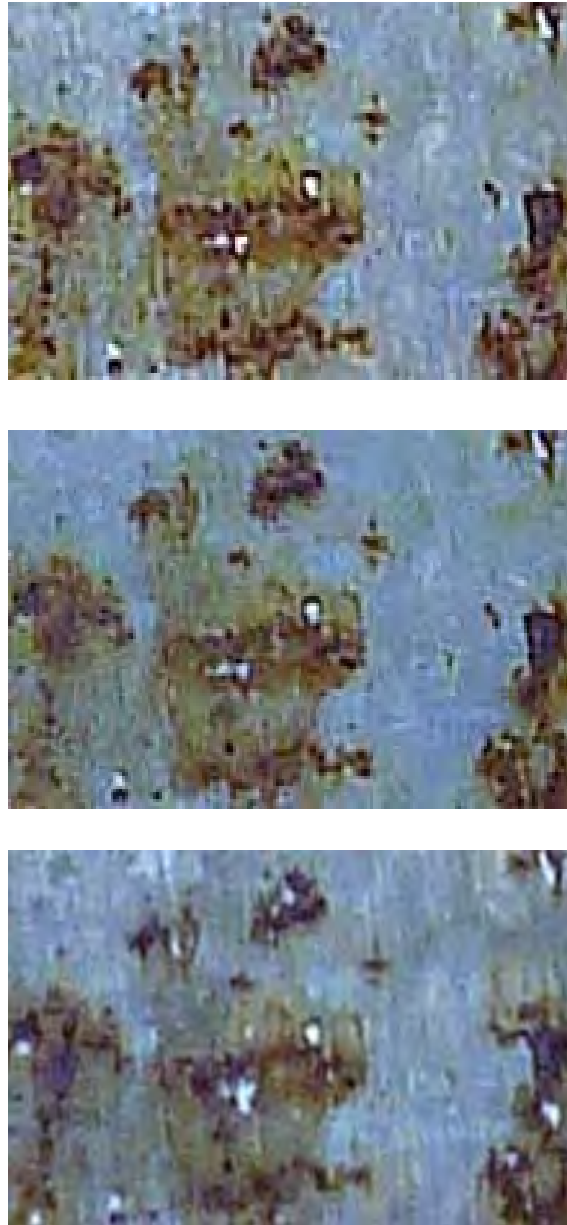


Figura 167. “Evolución de picadura, casquillo 4, Zona Este, Enero, Marzo, Agosto”

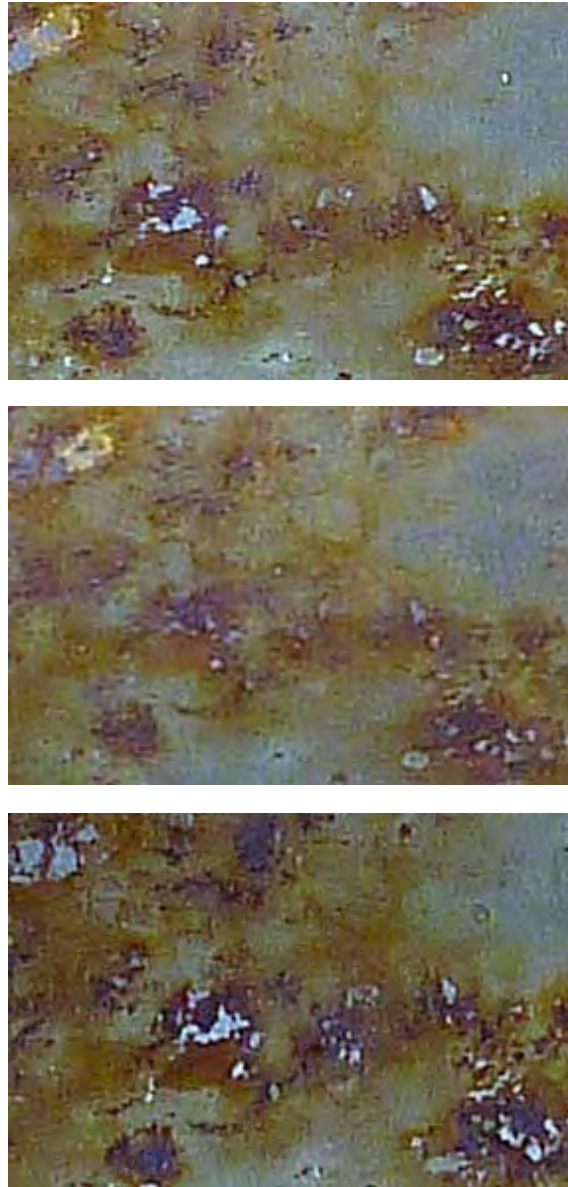


Figura 168. “Evolución de picadura, casquillo 6, Zona Oeste, Enero, Marzo, Agosto”

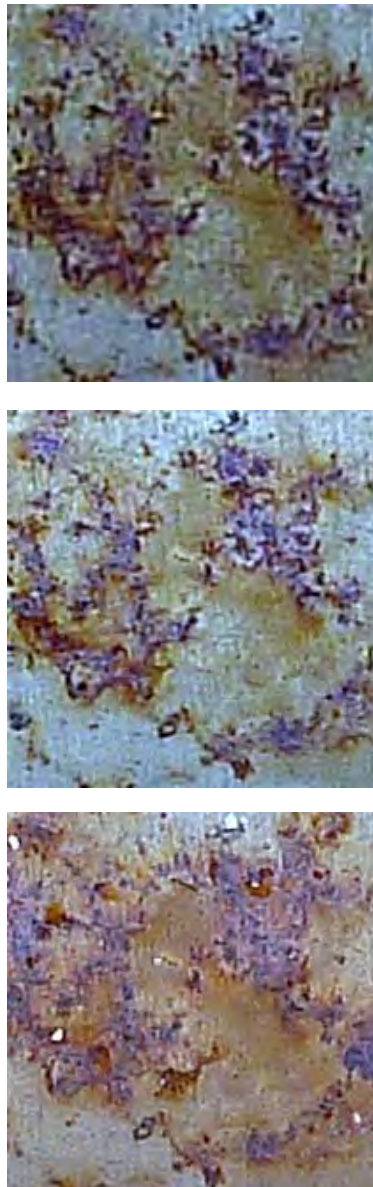


Figura 169. “Evolución de picadura, casquillo 7, Zona Este, Enero, Marzo, Agosto”

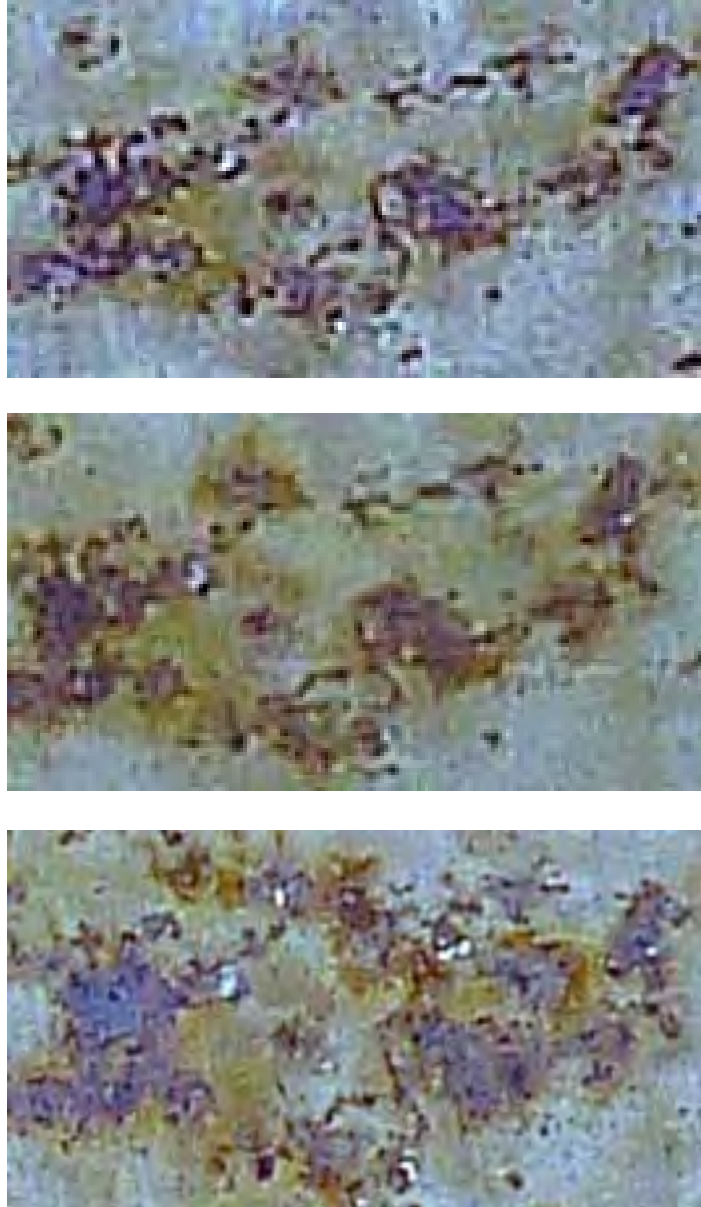


Figura 170. “Evolución de picadura, casquillo 9, Zona Este, Enero, Abril, Agosto”

Vistas varias evoluciones de picaduras, se procede a mostrar la modelización elaborada a partir de los resultados obtenidos.

4.4.7.- Modelización de la corrosión por picadura

Para la representación por ordenador del aspecto visual que muestran los casquillos, se han modelado las nuevas picaduras, picaduras avanzadas, colapsos de picadura y grietas de corrosión, otorgando una forma y tamaño para cada tipo.

Las nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura, se modelan con formas circulares de diferentes diámetros cada una, siendo los valores obtenidos en la tabla 6:

Diámetro medio de picadura nueva: 0,03 cm

Diámetro medio de picadura avanzada: 0,069 cm

Diámetro medio de colapso de picadura: 0,111 cm

Las grietas de corrosión no se han representado en este Proyecto Fin de Carrera, pero si se han modelado. Se representan mediante pequeños rectángulos con las siguientes magnitudes: lado ancho: 0,04324 cm, lado largo: 0,21 cm.

Utilizando el programa COMSOL, se han representado las nuevas picaduras, picaduras avanzadas y colapsos de picadura en 1 cm² con la repartición obtenida de los datos medios de Oeste y Este. No se han modelado las grietas de corrosión ya que no ha sido un objetivo del presente Proyecto Fin de carrera. Cabe destacar que, para realizar la representación en un programa de elementos finitos, se deberían sustituir los colapsos de picadura según el porcentaje de grietas sobre colapsos de picadura atendiendo a su orientación, siendo: 54,856 % en el Oeste y 46,643 % en el Este.

De esta forma, tendríamos que sustituir alrededor de la mitad de los colapsos por grietas de corrosión.

Utilizando la distribución media obtenida en Oeste y Este de los casquillos, se procede a mostrar las representaciones obtenidas en las figuras (171- 167).

La figura 171 es la representación de un cm^2 de un casquillo virtual sometido al número medio de picaduras obtenidas en la zona Oeste. La media de picaduras corresponde al mes de Enero.

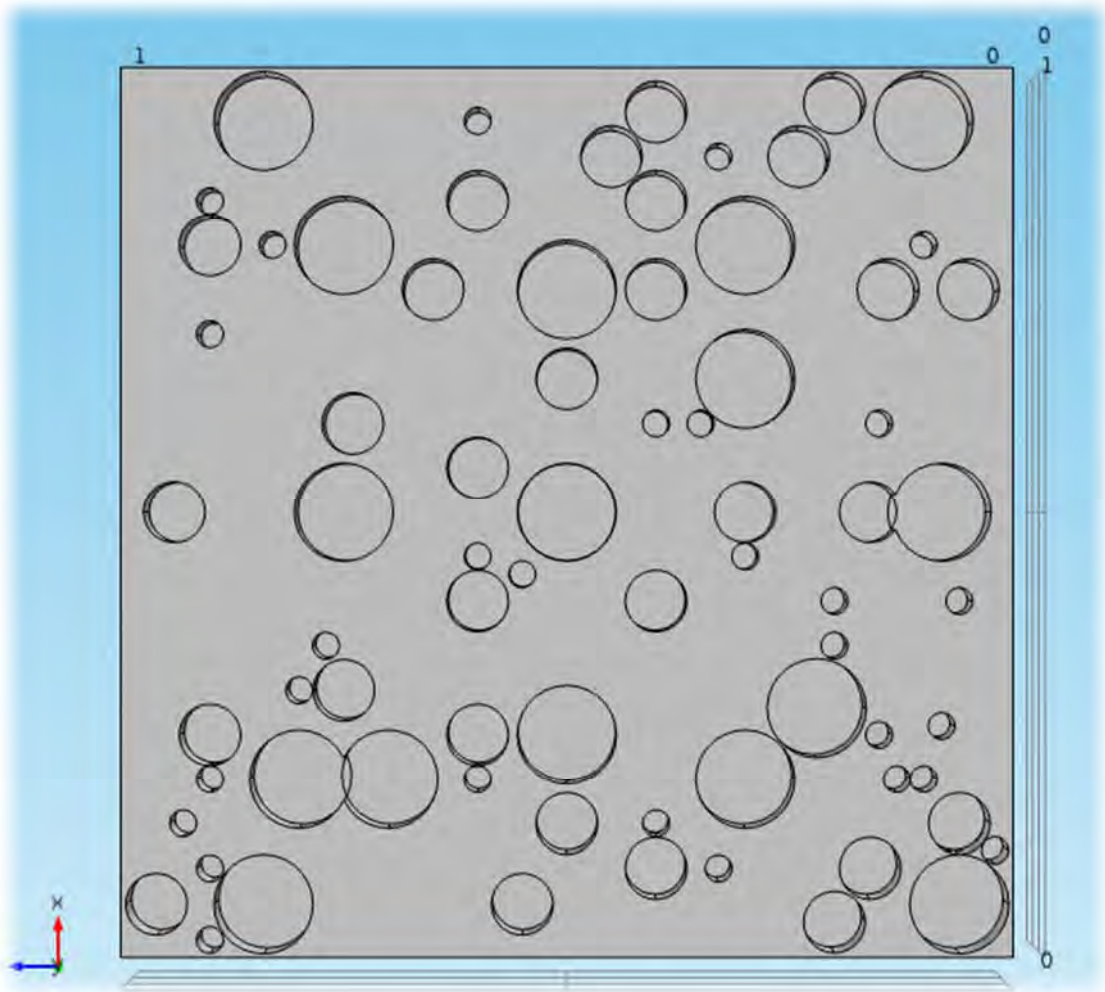


Figura 171. “Casquillo virtual representado zona Oeste, Enero”

Para realizar la evolución de la picadura, se muestra el mes de Abril en la figura 172. En el plazo de tres meses, han colapsado siete picaduras avanzadas, seis nuevas picaduras se han desarrollado y seis se han generado. Con ello, tenemos en la pieza 7 nuevos colapsos, 13 nuevas picaduras avanzadas y un total de 19 nuevas picaduras generadas.

La figura 172 es la representación de un cm^2 de un casquillo virtual sometido al número medio de picaduras obtenidas en la zona Oeste en el mes de Abril.

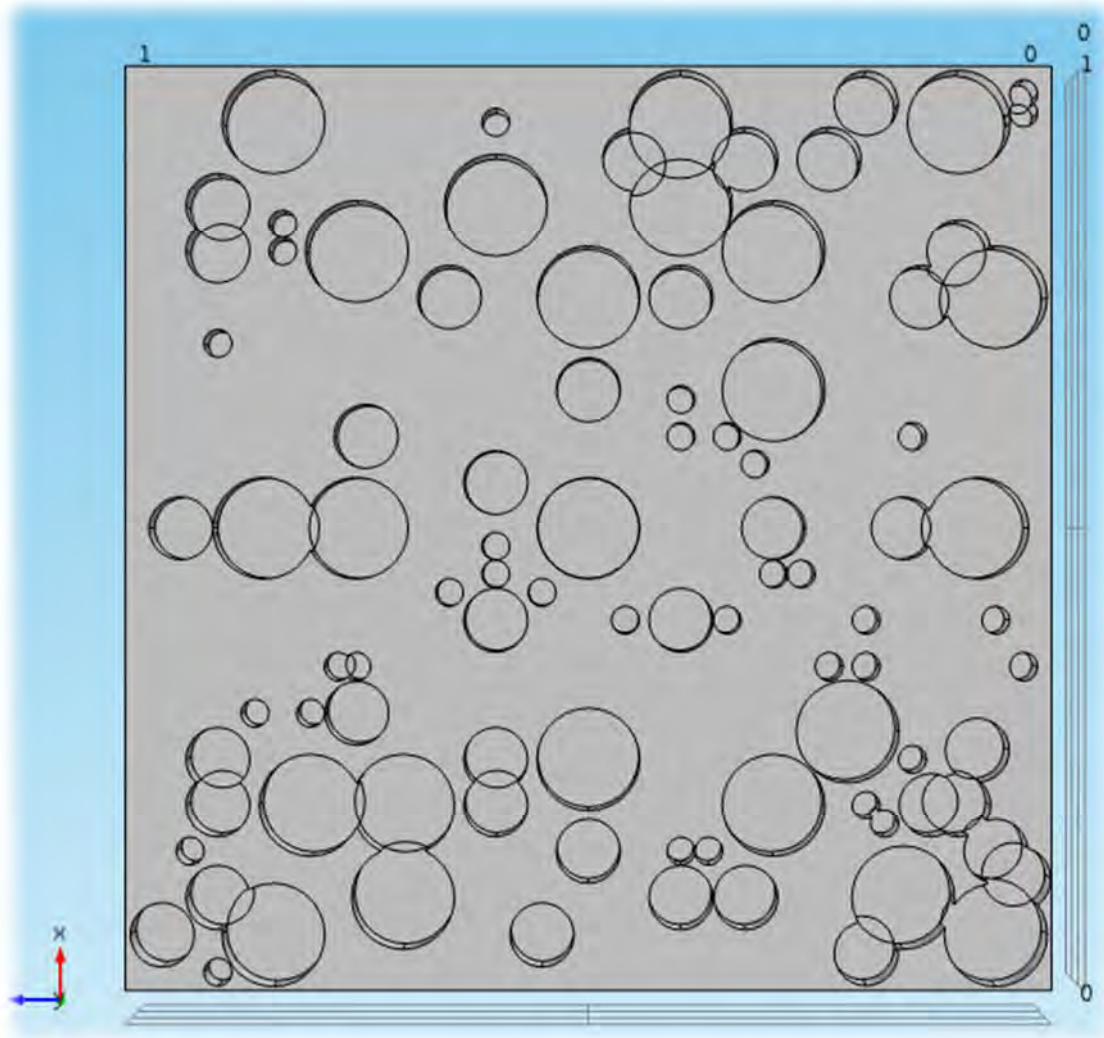


Figura 172. “Casquillo virtual representado zona Oeste, Abril”

Para realizar la representación del mes de Agosto en el casquillo virtual, de la zona Oeste, se agregarán a la representación de la figura 172, cuatro nuevos colapsos, seis nuevas picaduras y seis nuevas picaduras avanzadas. Esto es, cuatro picaduras avanzadas han colapsado, diez nuevas picaduras han evolucionado y 16 nuevas picaduras se han generado.

La figura 173 es la representación de un cm^2 de un casquillo virtual sometido al número medio de picaduras obtenidas en la zona Oeste en el mes de Agosto.

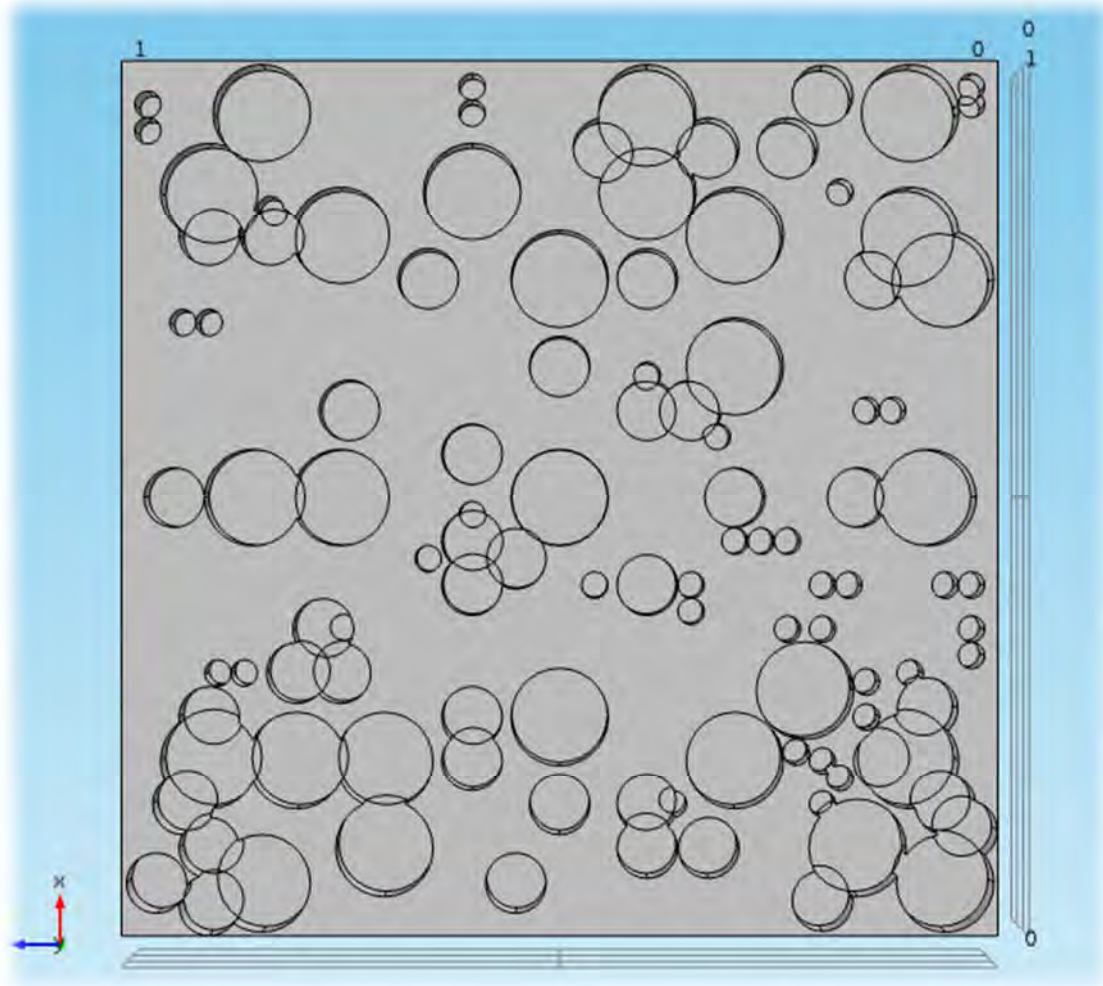


Figura 173. “Casquillo virtual representado zona Oeste, Agosto”

En esta última representación, aparecen todas las picaduras según la repartición obtenida por zona. La zona Oeste está un poco menos corroída que la Este, y se procede a representar la media de picaduras en un casquillo virtual en la zona Este, de la misma forma que se han realizado las tres figuras anteriores.

La figura 174 es la representación de un cm^2 de un casquillo virtual sometido al número medio de picaduras obtenidas en la zona Este en el mes de Enero.

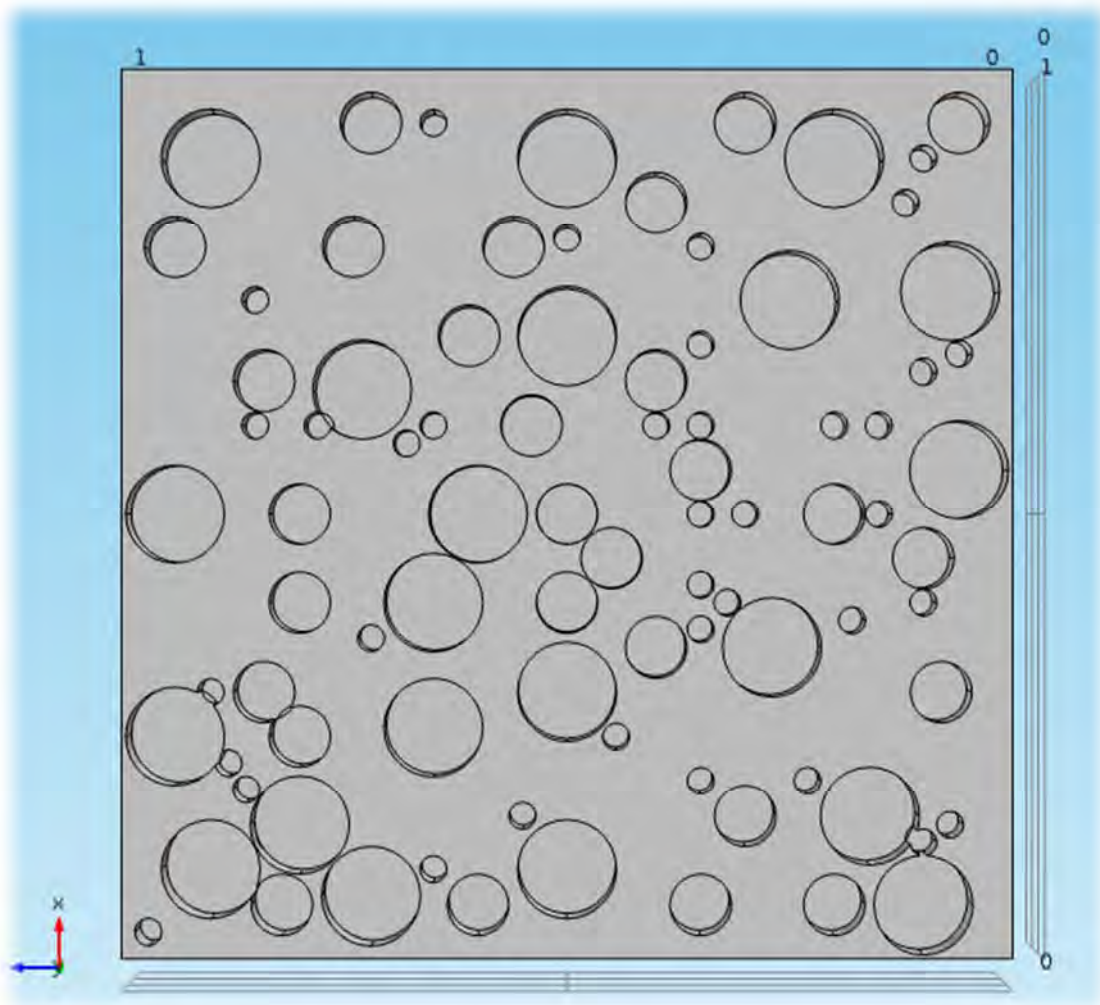


Figura 174. “Casquillo virtual representado zona Este, Enero”

El aspecto que muestra la figura 174, es el aspecto inicial con el que se comenzó este estudio. Para poder representar la evolución sucedida en la zona Este, nos apoyamos en los resultados obtenidos y requerimos dibujar: cuatro nuevos colapsos, ocho picaduras avanzadas nuevas y seis nuevas picaduras. Esto supone que cuatro picaduras avanzadas han colapsado, 12 nuevas picaduras han evolucionado y 18 nuevas picaduras de han generado.

La figura 175 es la representación de un cm^2 de un casquillo virtual sometido al número medio de picaduras obtenidas en la zona Este en el mes de Abril.

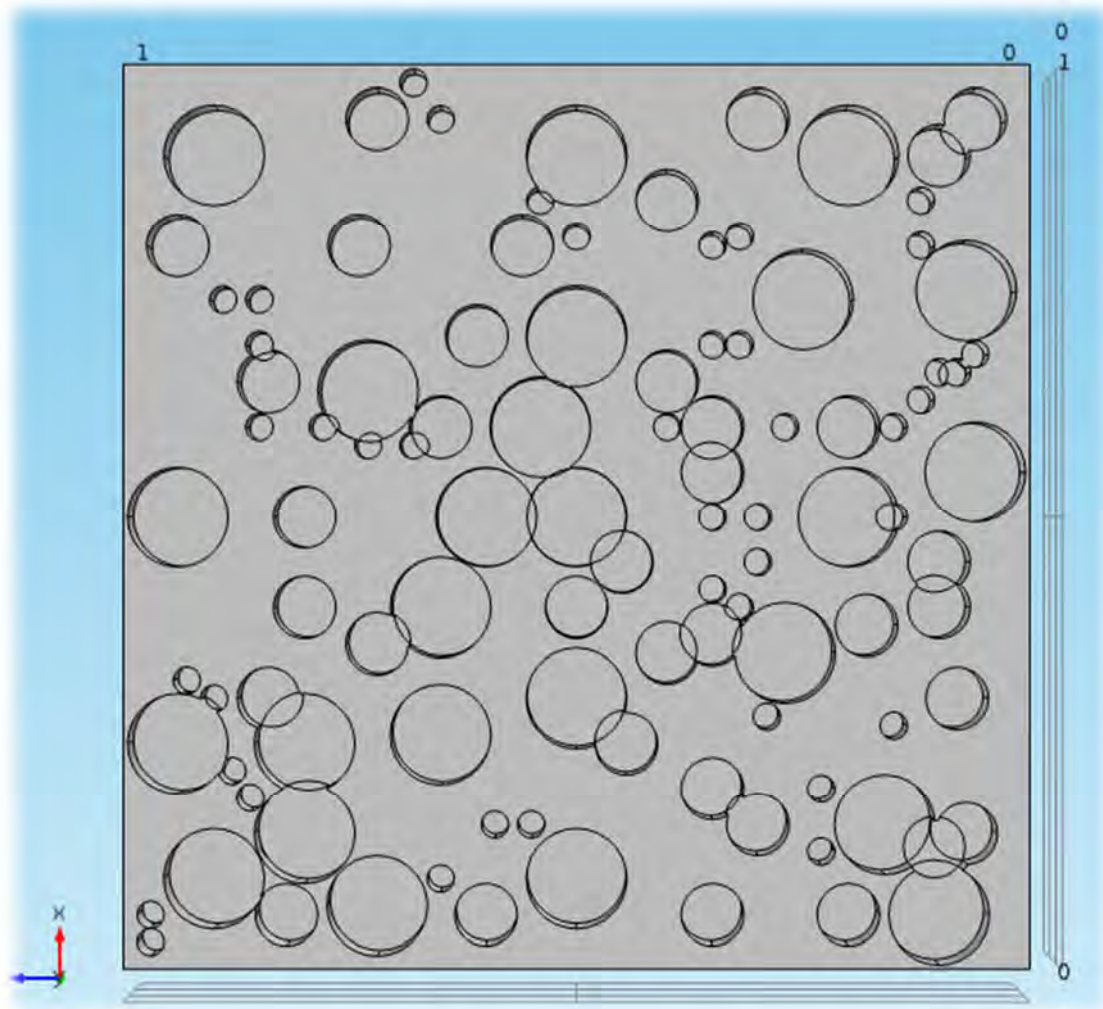


Figura 175. “Casquillo virtual representado zona Este, Abril”

Para realizar la representación del mes de Agosto en el casquillo virtual, de la zona Este, se agregarán a la representación de la figura 175, cinco nuevos colapsos, una nueva picadura y cinco nuevas picaduras avanzadas. Esto es, cinco picaduras avanzadas han colapsado, diez nuevas picaduras han evolucionado y 11 nuevas picaduras se han generado.

La figura 176 es la representación de un cm^2 de un casquillo virtual sometido al número medio de picaduras obtenidas en la zona Este en el mes de Agosto.

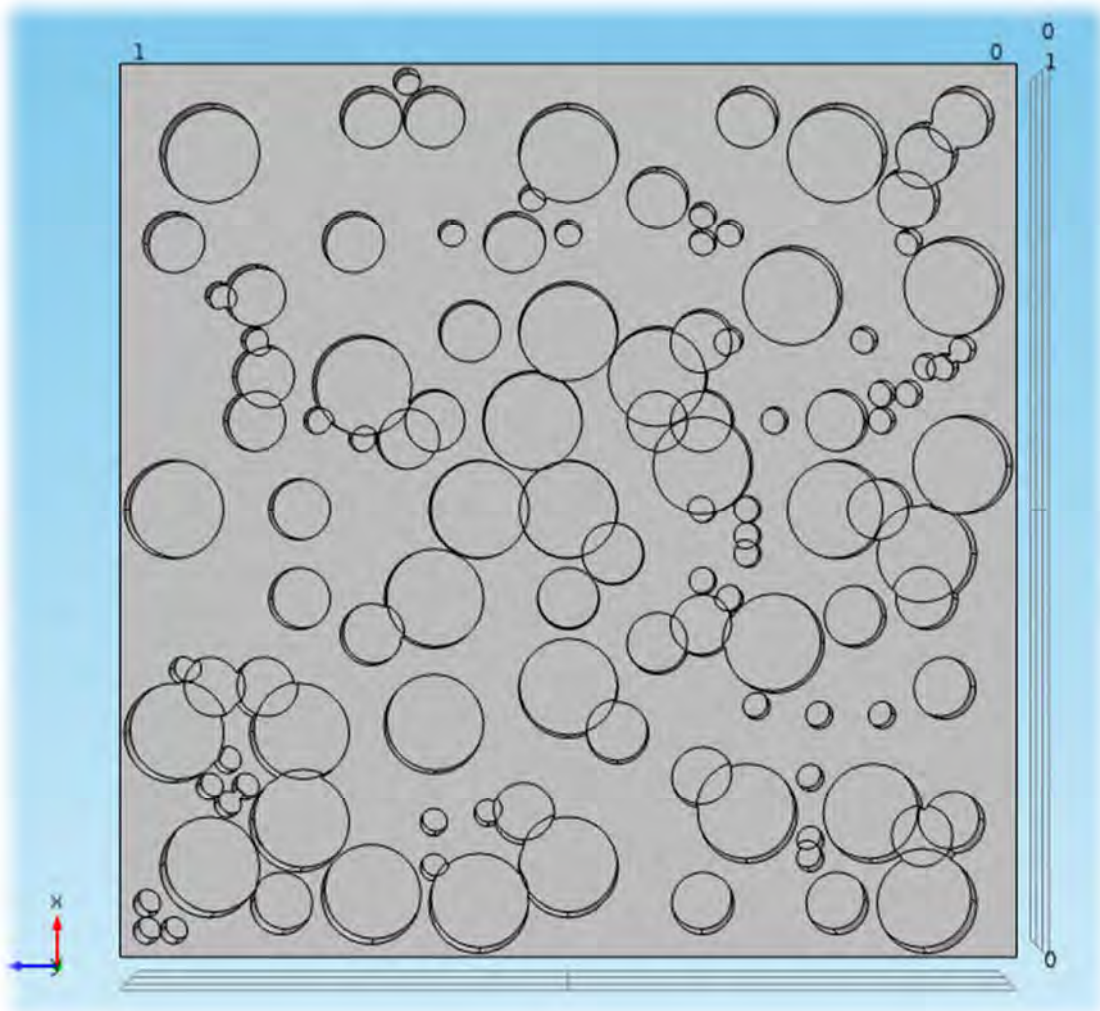


Figura 176. “Casquillo virtual representado zona Este, Agosto”

Con estas seis representaciones mostradas se pretende reforzar al aspecto y la forma en que las picaduras se generan. Alguna picadura está completamente recubierta por otras más grandes y exactamente eso sucede en la realidad, siendo la causa de que el porcentaje corroído mes a mes, pueda llegar a ser menor.

En el próximo apartado se presentan las leyes que rigen la cinética de evolución de las picaduras.

4.4.7.1.- Leyes aproximadas que rigen la cinética de corrosión

Para poder simular el proceso real de corrosión que están experimentando los casquillos, se han elaborado las leyes aproximadas que rigen la cinética de corrosión. Para ello, se utilizaron los datos extraídos de la tabla 29 y se calculó la ecuación que se acomodaba a la gráfica obtenida, por medio del uso de ecuaciones cuadráticas.

El “Puente Juan José Arenas” fue inaugurado el 19 de Mayo de 2011, por ello, tomaremos como primer mes de referencia para los cálculos, “Enero” con un valor de 20 meses. En las ecuaciones obtenidas, se utilizara una ecuación de la recta que pasa por tres puntos, siéndolos meses de referencia: Enero, Abril y Agosto. Se usa una ecuación cuadrática porque se ajusta sin mucho a la real sin un elevado porcentaje de error.

Los datos mostrados en la tabla 98, nos permite deducir la ecuación (22), que relaciona la densidad de nuevas picaduras con al tiempo, siendo de la forma:

$$N = a + b * t + c * t^2$$

Tabla 98. “Nuevas picaduras - Tiempo”

Tiempo	t	N
Enero	20	33
Abril	23	39
Agosto	27	42

Con estos datos, planteamos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$33 = a + b * 20 + c * 20^2$$

$$39 = a + b * 23 + c * 23^2$$

$$42 = a + b * 27 + c * 27^2$$

El cual nos permite obtener la ecuación (22), que representa la densidad de nuevas picaduras frente al tiempo, de forma general:

$$N = - 89,142 + 9.678 * t - 0,1785 * t^2 \quad (22)$$

Obtenida la ecuación, se representa la tabla 99, con los valores de cada mes estudiado aplicando la ecuación (22), obtenida previamente. También se añade el porcentaje de error que supone esta aproximación. El cálculo de este error, así como el los demás casos, se calculará por medio de la diferencia de picaduras, reales menos la aproximación, multiplicado por 100 y dividido entre el número de picaduras reales.

Tabla 99. “Valores aproximados de Nuevas picaduras”

Tiempo	Nuevas picaduras	Aproximación	Error (%)
Enero	33	33,018	0,05
Febrero	40	35,3775	11,56
Marzo	35	37,38	6,80
Abril	39	39,0255	0,07
Mayo	40	40,314	0,79
Junio	41	41,2455	0,60
Julio	41	41,82	2,00
Agosto	42	42,0375	0,09

El porcentaje de error en el caso de las nuevas picaduras, es el mayor de todos los casos, debido a la disparidad de datos y cambios tan rápidos que ocurren mes a mes. Estos valores se representan en la figura 177 donde aparecen las nuevas picaduras y la aproximación realizada, obteniendo muy poca desviación.

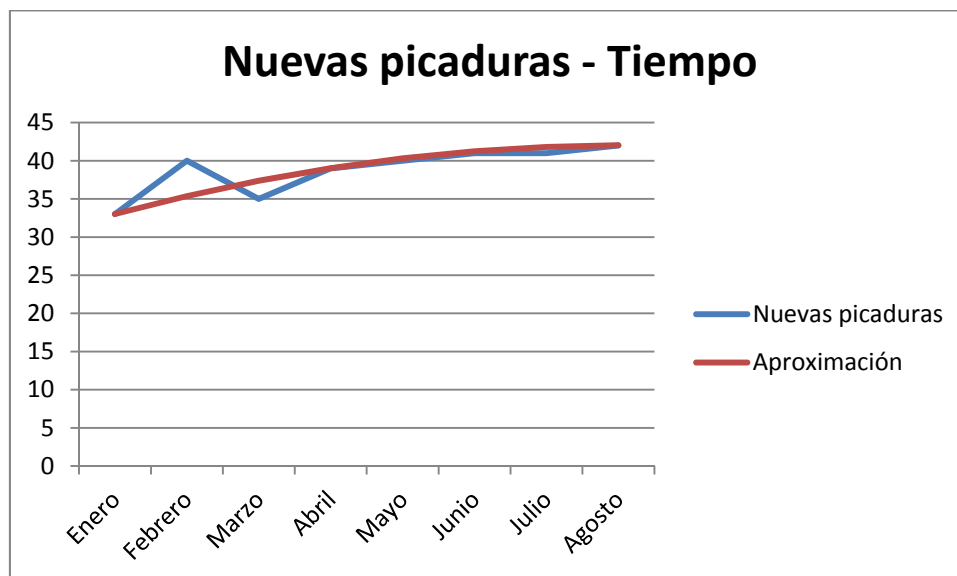


Figura 177. “Densidad de nuevas picaduras - Tiempo”

Apoyándonos en los datos mostrados en la tabla 100, donde se muestran las picaduras avanzadas medias en los tres meses de referencia, se obtiene la ecuación (23), la ley que relaciona la densidad de picaduras avanzadas frente al tiempo, siendo de la forma:

$$P = a + b * t + c * t^2$$

Tabla 100. “Picaduras avanzadas - Tiempo”

Tiempo	t	P
Enero	20	28
Abril	23	35
Agosto	27	41

Con estos datos, planteamos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$28 = a + b * 20 + c * 20^2$$

$$35 = a + b * 23 + c * 23^2$$

$$41 = a + b * 27 + c * 27^2$$

El cual nos permite obtener la ecuación (23), que representa la densidad de picaduras avanzadas frente al tiempo.

$$P = - 73,42 + 7,4523 * t - 0,119 * t^2 \quad (23)$$

Obtenida la ecuación (23), se utiliza para representar la tabla 101, que contiene los valores de cada mes estudiado, de la aproximación realizada y el error cometido con esta aproximación.

Tabla 101. “Valores aproximados de Picaduras avanzadas”

Tiempo	Picaduras avanzadas	Aproximación	Error (%)
Enero	28	28,026	0,09
Febrero	31	30,5993	1,29
Marzo	33	32,9346	0,20
Abril	35	35,0319	0,09
Mayo	37	36,8912	0,29
Junio	38	38,5125	1,35
Julio	39	39,8958	2,30
Agosto	41	41,0411	0,10

El porcentaje de error en el caso de las picaduras avanzadas es mucho menor que en el caso de las nuevas picaduras, superando el 2% solo una vez. Estos valores se representan en la figura 178 donde aparecen las picaduras avanzadas y la aproximación realizada frente al tiempo, obteniendo una gran coincidencia.

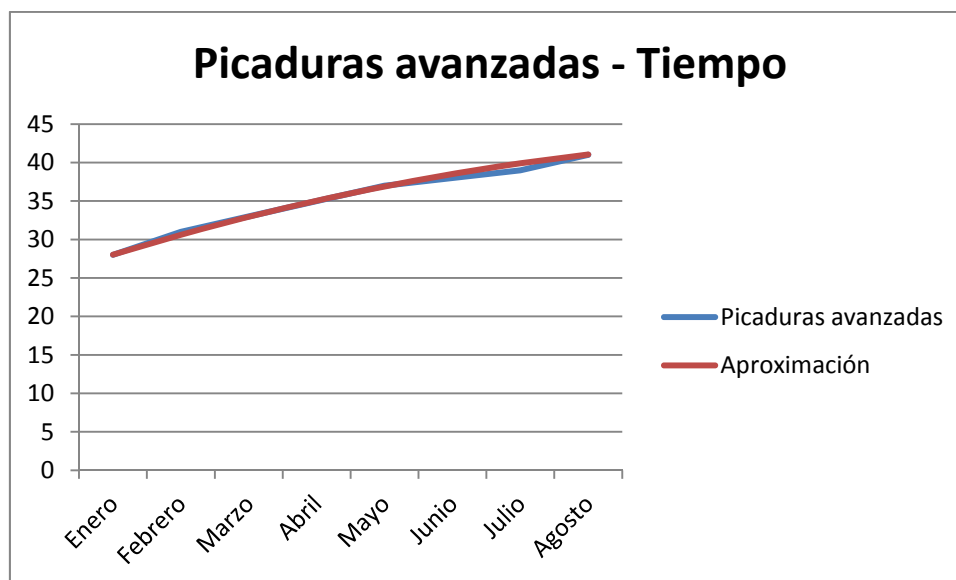


Figura 178. “Densidad de picaduras avanzadas - Tiempo”

Apoyándonos en los datos mostrados en la tabla 102, se obtiene la ecuación (24), la ecuación que relaciona la densidad de colapsos de picadura frente al tiempo, siendo de la forma:

$$C = a + b * t + c * t^2$$

Tabla 102. “Colapsos de picadura - Tiempo”

Tiempo	t	C
Enero	20	19
Abril	23	24
Agosto	27	28

Con estos datos, planteamos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$19 = a + b * 20 + c * 20^2$$

$$24 = a + b * 23 + c * 23^2$$

$$28 = a + b * 27 + c * 27^2$$

El cual nos permite obtener la ecuación (24), que representa la densidad de colapsos de picadura frente al tiempo.

$$C = - 58,14 + 5,7619 * t - 0,095 * t^2 \quad (24)$$

Obtenida la ecuación, se representa la tabla 103, con los valores de cada mes estudiado aplicando la ecuación (24) y el error cometido en la aproximación.

Tabla 103. “Valores aproximados de Colapsos de picadura”

Tiempo	Colapsos de picadura	Aproximación	Error (%)
Enero	19	19,098	0,52
Febrero	21	20,9649	0,17
Marzo	23	22,6418	1,56
Abril	24	24,1287	0,54
Mayo	25	25,4256	1,70
Junio	26	26,5325	2,05
Julio	27	27,4494	1,66
Agosto	28	28,1763	0,63

El error es más estable que en los anteriores casos, manteniéndose en torno a 1%. Al ser un error porcentual de medidas unitarias, las cuales oscilan el número 30, no llegan a suponer una diferencia importante y representan una buena ley de cinética de corrosión en los tres casos estudiados. Estos valores se representan en la figura 179 donde aparecen los colapsos de picadura y la aproximación realizada frente al tiempo.

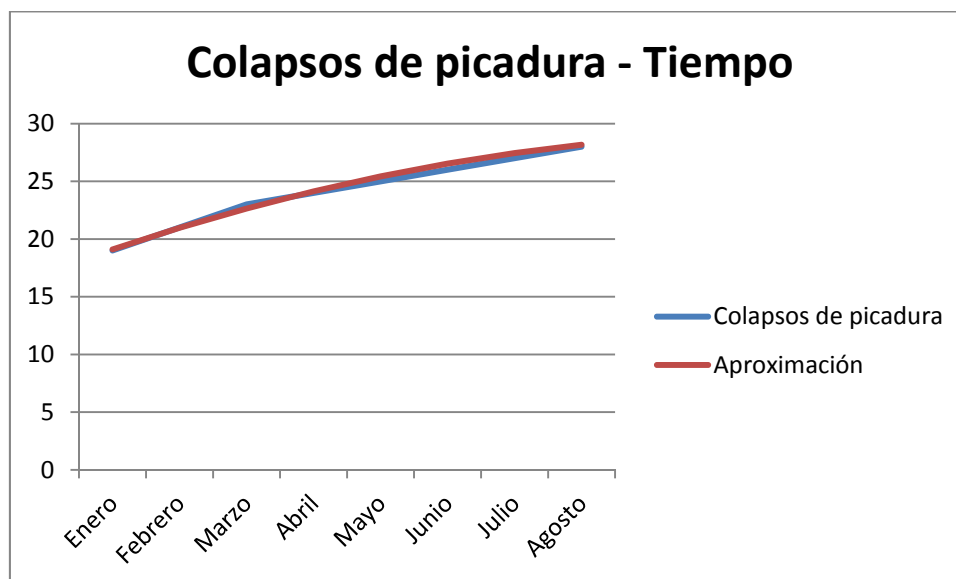


Figura 179. “Densidad de Colapsos de picadura - Tiempo”

Una vez obtenidas las leyes que rigen la cinética de corrosión de estos casquillos, situados en el Puente Juan José Arenas, se procede a obtener la ecuación que relaciona las nuevas picaduras, las picaduras avanzadas y colapsos de picadura en función del tiempo. La ecuación resultante relacionará los colapsos en función de las picaduras y nuevas picaduras que coexistan en la zona de estudio; por lo tanto, obtendremos diferentes gráficas si la aplicamos en la zona Oeste, Este o en la combinada.

Para comenzar el estudio, partiremos de una base para la ecuación con la siguiente estructura:

$$C = ((N \cdot R_N^2 + P \cdot R_P^2) / (R_C^2)) \cdot f \quad (25)$$

Siendo:

Radio medio de picadura nueva: 0,015 cm

Radio medio de picadura avanzada: 0,035 cm

Radio medio de colapso de picadura: 0,055 cm

N = número de nuevas picaduras

P = número de picaduras avanzadas

C = número de colapsos de picadura

Para poder realizar la aproximación, necesitamos relacionar en el tiempo la evolución de la picadura, y por lo tanto, la superficie corroída. El primer paso es calcular el valor que necesitamos para poder relacionar las tres tipologías de picadura; ese valor, recibe el nombre de $f(t)$, ya que es variable en el tiempo. La tabla 104 recoge los datos obtenidos en la resolución de la ecuación (25).

Tabla 104. “Cálculo de $f(t)$ ”

Tiempo	k	f (t)	Aproximación media
Enero	1,37747	1,3756	18,97418512
Febrero	1,35232	1,38655	21,53163182
Marzo	1,44048	1,3958	22,28665785
Abril	1,40561	1,40335	23,9613314
Mayo	1,39208	1,4092	25,3073686
Junio	1,41013	1,41335	26,05937066
Julio	1,43289	1,4158	26,6778843
Agosto	1,41935	1,41655	27,94466818

La columna “K” representa el valor puntual que se necesita para equilibrar la ecuación, pero no varía con el tiempo, por ello; obligamos a una ecuación del tipo $a+bx+cx^2=0$ a pasar por los puntos de Enero, Abril y Agosto. De esta forma, se plantea el siguiente sistema:

$$1,37747 = a + b \cdot 20 + c \cdot 20^2$$

$$1,40561 = a + b \cdot 23 + c \cdot 23^2$$

$$1,41935 = a + b \cdot 27 + c \cdot 27^2$$

El resultado de este sistema es la ecuación (26), el valor que toma la función $f(t)$ en cada mes de estudio y, por lo tanto, al unir las ecuaciones (25) y (26) obtendremos la ecuación buscada de evolución de colapsos en función de las demás picaduras y el tiempo, la ecuación (27).

$$C = ((N \cdot R_N^2 + P \cdot R_P^2) / (R_C^2)) \cdot f(t) \quad (25)$$

$$f(t) = 0,7996 + 0,0458 \cdot t - 0,00085 \cdot t^2 \quad (26)$$

$$C = ((N \cdot R_N^2 + P \cdot R_P^2) / (R_C^2)) \cdot (0,7996 + 0,0458 \cdot t - 0,00085 \cdot t^2) \quad (27)$$

Los valores medios resultantes de la ecuación (27), están recogidos en la tabla 104, en la columna aproximación media. Como se planteó anteriormente, dependiendo de los datos de entrada, obtendremos diferentes cinéticas de corrosión; se estudiarán en este Proyecto Fin de Carrera los valores equivalentes a la zona Este y Oeste, así como la media ya calculada. En la tabla 103, se recogen los datos obtenidos de aplicar la ecuación (27) con los datos de entrada de la zona Este y Oeste.

Tabla 105. “Aproximaciones a la cinética de corrosión”

Tiempo	Aproximación media	Aproximación Oeste	Aproximación Este
Enero	18,97418512	19,02420694	19,48160342
Febrero	21,53163182	21,516735	21,77303667
Marzo	22,28665785	22,14207912	22,19398904
Abril	23,9613314	23,58207897	24,74689813
Mayo	25,3073686	24,42690975	25,60939548
Junio	26,05937066	25,48948757	26,55773565
Julio	26,6778843	26,52603227	27,47820809
Agosto	27,94466818	27,5329692	28,36766289

Estos valores se representan gráficamente en las figuras 180 (media), 181 (Oeste) y 182 (Este). La figura 180, es la más aproximada ya que es la base del cálculo, por lo tanto, será la que emplearemos en forma de conclusión del estudio.

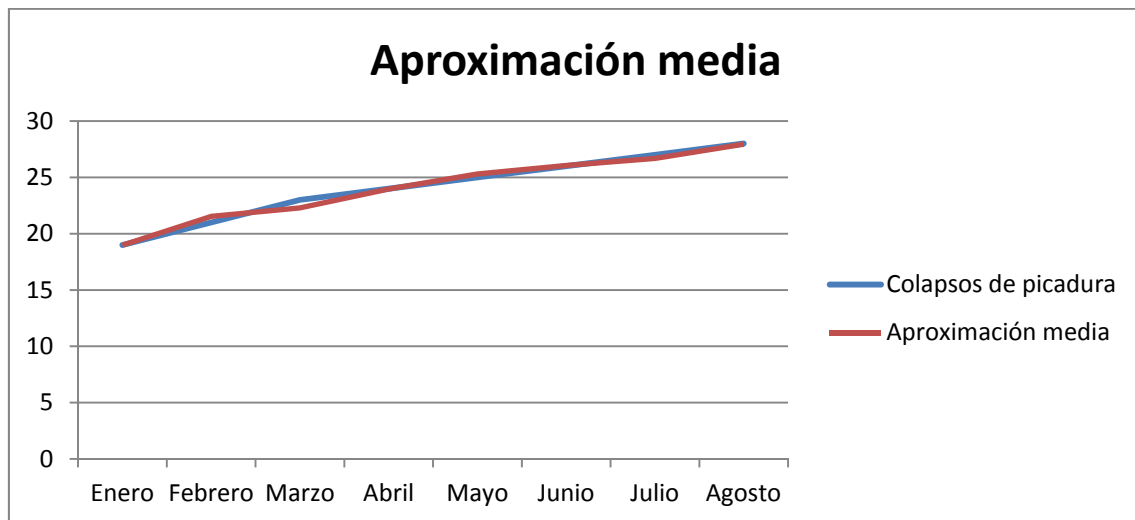


Figura 180. “Aproximación media”

La ecuación obtenida resulta muy semejo a el valor real, lo cual es lo esperado para la media. En las aproximaciones Oeste y Este, la gráfica no se acomodará de forma tan precisa, pero seguirá su patrón de evolución. La figura 181, se encuentra en una posición más inferior, con lo que obtendríamos resultados más pequeños, pero el margen es pequeño dentro de la escala de datos empleados.

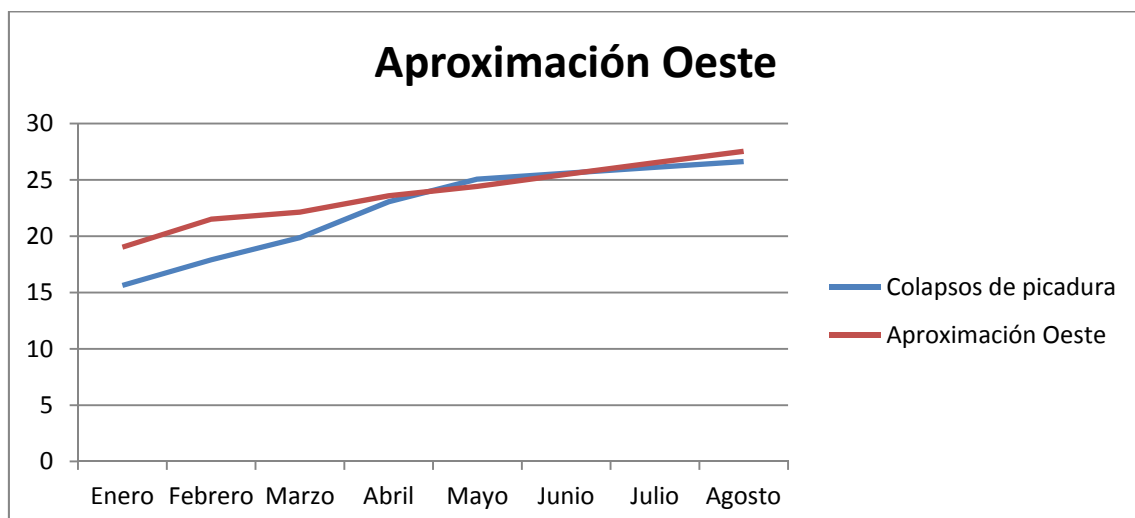


Figura 181. “Aproximación Oeste”

El valor que toma la gráfica es superior a los valores reales, aun así, rige una cinética semeja dentro de los valores trabajados. Al ser las picaduras avanzadas y nuevas picaduras, factores que intervienen directamente en la ecuación, pueden alterarla drásticamente, como se muestra en los primeros meses de estudio, conforme pasa el tiempo, la gráfica se acomoda a la realidad. La figura 182 es la representación de la aproximación Este, la aproximación es más conservadora, pero al igual que sucede en la zona Oeste, las diferencias no son grandes dentro del margen de datos trabajados.

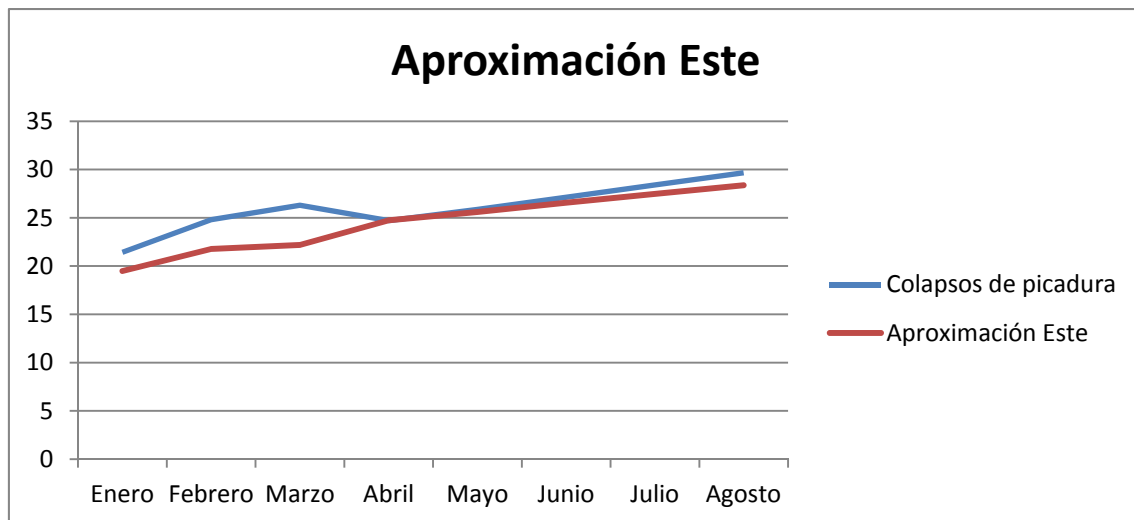


Figura 182. “Aproximación Este”

Una vez conocida la ecuación para poder realizar un modelo de cinética de corrosión por picadura, se buscarán los últimos resultados para comprobar qué tensión están soportando los casquillos, gracias a la deformación existente calculada en los mismos.

4.4.7.2.- Estado tensional de los casquillos

Los casquillos instalados en el “Puente Juan José Arenas” presentan indicios de que están sometidos a tensiones por la deformación existente. Para poder valorar las fuerzas a las que están sometidos, se realizarán una serie de cálculos de resistencia de materiales y, en vista de los resultados obtenidos, valorar qué daño puede haber causado.

Para la resolución del problema, sólo se utilizará la zona roscada del casquillo, ya que es la única que hace contacto con el puente. La longitud del roscado es de 4,75 cm. Para más simplificaciones, se suprimen las zonas roscadas por superficies lisas y se definen los datos que intervienen en el problema, siendo: “E” Módulo de Elasticidad del acero; “R_c” el radio exterior del casquillo; “r_c” el radio interior del casquillo; “L” longitud de roscado

$$E = 2 \cdot 10^6 \text{ Kg/cm}^2$$

$$R_c = 4,125 \text{ cm}$$

$$r_c = 2,75 \text{ cm}$$

$$L = 4,75 \text{ cm}$$

Con estos datos, se plantea la figura 183, que es la zona roscada del casquillo y tiene una forma cilíndrica. Para el desarrollo del cálculo, se plantean dos posibles soluciones:

- Cortando el casquillo y analizarlo como si fuera un empotramiento sometido a cargas uniformemente repartidas.
- Como un anillo de pared delgada sometido a cargas radiales uniformemente repartidas.

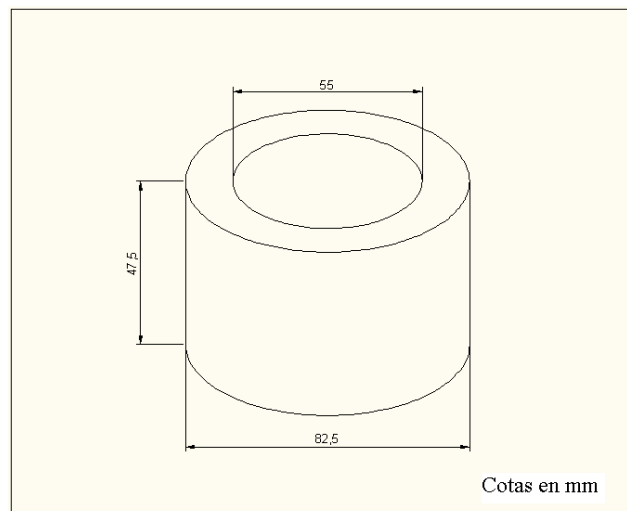


Figura 183. “Zona roscada del casquillo”

La fatiga es el mayor participante en la deformación del casquillo, ya que, las fuerzas oscilantes a lo largo de los años, han ido provocando estas deformaciones que no se producirían en el caso de ser fuerzas puntuales. Por ello, la fuerza y los cálculos que vamos a realizar son solo aproximados y orientativos a la hora de justificar la deformación existente.

Se plantea la primera resolución, la cual consiste en abrir la superficie mostrada en la figura 174, y aplicar una carga uniformemente repartida para que logre deformarla hasta la deformación existente, tabla 8. $(0,2425 + 0,176) / 2 = 0,20925$ cm. La figura 184 es la representación de la ley de esfuerzos obtenida y la deformación.

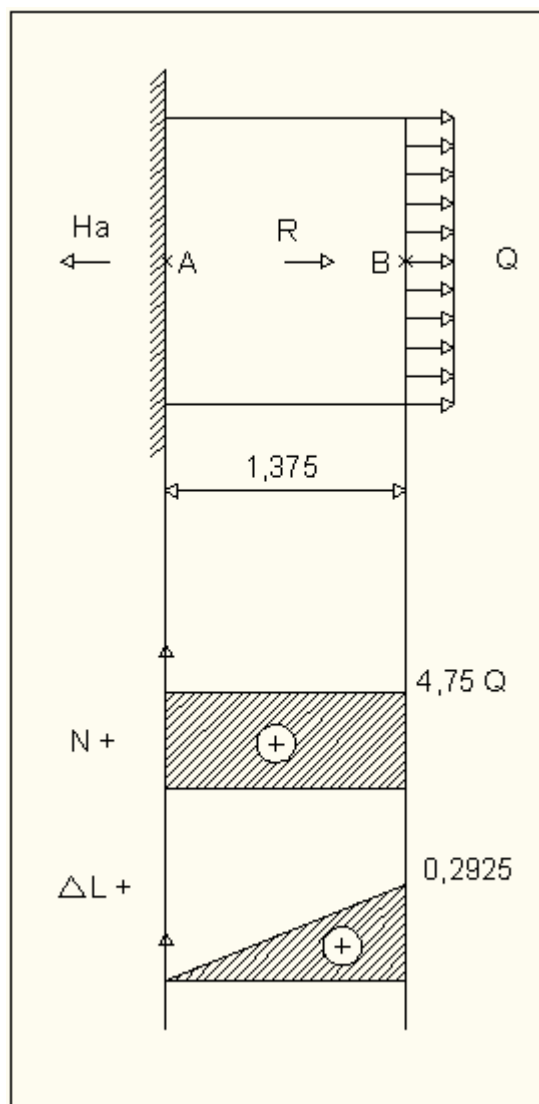


Figura 184. “Ley de esfuerzos”

En primer lugar se calcula el valor de la resultante “R” obtenida y el valor de H_A por medio de las ecuaciones de la estática, obteniendo:

$$R = Q * L = 4,75 Q \quad (28)$$

$$\sum F_X = 0 \rightarrow H_A = R = 4,75 Q \quad (29)$$

Obtenida la reacción en el empotramiento, se procede a obtener la ley de esfuerzos de axiles.

$$\leftarrow + \rightarrow N_1 = H_A = 4,75 Q \quad (30)$$

Obtenido el esfuerzo axil, podemos calcular la fuerza Q gracias a las deformaciones conocidas, como es $\Delta L_A = 0$ y $\Delta L_B = 0,20925 \text{ cm}$

$$\Delta L_B = \Delta L_A + \int_0^x \frac{4,75 Q}{E * A} dx \rightarrow 0,2095 = (4,75 * 1,375 * Q) / 2 * 2 * 4,75 * \pi * 4,125 * 10^6 \quad (31)$$

$$Q = 7888539 \text{ Kg} / \text{cm}$$

$$Q = 7888 \text{ Ton} / \text{cm}$$

Los resultados son muy elevados y distan de la realidad, pero sí serían los valores de fuerza uniformemente repartida que provocaría una deformación en una placa recta como la estudiada. Con esto, se puede intuir que las cargas estáticas y oscilantes son las que están provocando parte de la deformación existente. Por otro lado, se procede a estudiar la deformación como causa de un apriete entre el tirante y el casquillo; suponiendo que solamente causa deformación en el casquillo.

Para este cálculo, suponemos nuestra superficie a estudiar como un anillo circular de pequeño espesor sometido a cargas radiales uniformemente repartidas, de la forma “ $p \text{ Kg} / \text{cm}^2 = q$ ”. Esta pieza, debido al efecto de la carga radial uniformemente repartida, experimentará un aumento de diámetro, en nuestro caso un aumento de radio de $0,20925 \text{ cm}$.

Partimos de la premisa que el tirante no se deformará. Con esto, podremos calcular la fuerza de presión existente en los casquillos y el supuesto apriete al que estarían sometidos y, por lo tanto, la medida equivalente del tirante. En la figura 185 se muestra un esquema del planteamiento del problema en su segundo caso.

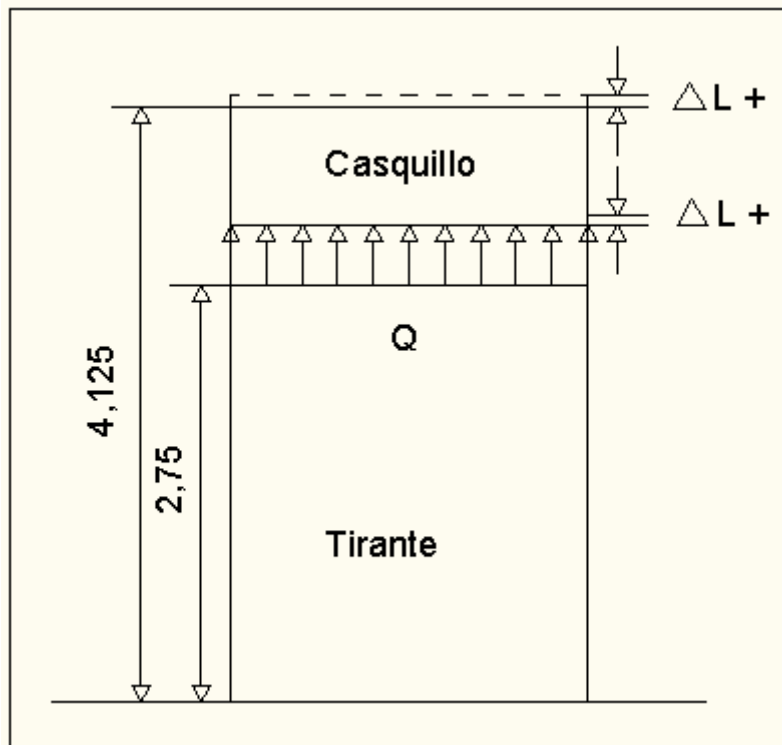


Figura 185. “Esquema del anillo de pared delgada”

Por medio de la ecuación (32) podemos obtener el valor de “q”, gracias a conocer la deformación que se ha producido en el casquillo.

$$\Delta L = \frac{q * \text{radio interior}}{E * \text{espesor}} \quad (32)$$

$$q = \text{espesor} * E * \Delta L / \text{radio interior} = 1,375 * 2 * 10^6 * 0,20925 / 2,75$$

$$q = 209250 \text{ Kg} / \text{cm}^2$$

Para realizar el cálculo de la medida del tirante, nos apoyamos en la ecuación (33).

$$R_{\text{Casquillo interior}} + \frac{q * R_{\text{casquillo interior}}^2}{E * \text{espesor}} = R_{\text{tirante}} + \frac{q * R_{\text{tirante}}^2}{E * \text{espesor tirante}} \quad (33)$$

El espesor del tirante, es igual a su radio, ya que no es un anillo, sino una barra, por lo tanto, lo sustituimos por "R tirante", obteniendo:

$$2,75 + \frac{209250 * 2,75^2}{2 * 10^6 * 1,375} = R_{\text{tirante}} + \frac{209250 * R_{\text{tirante}}^2}{2 * 10^6 * R_{\text{tirante}}}$$

$$R_{\text{tirante}} = 3,714 \text{ cm}$$

Este resultado supone casi un 1 cm más del radio real, por lo tanto, existen fuerzas de presión que han provocado esta deformación. Con estos resultados obtenidos, la tensión a la que están sometidos los casquillos, ha influido en la corrosión del “Puente Juan José Arenas” y potenciado la aparición de las grietas típicas de la Corrosión Bajo Tensión.

4.5.- Estudio económico

A la hora de realizar una valoración estimada del estudio económico del impacto causado por la corrosión por picadura en los casquillos del “Puente Juan José Arenas”, se tendrán en cuenta dos factores: los Costes Directos y los Costes Indirectos.

Los Costes Directos suponen, al menos, el 30% de los Costes Totales, otorgándose en esta valoración, un 70% a los Costes Indirectos. La figura 186 es una representación radial de la primera distinción de la valoración de este estudio económico.

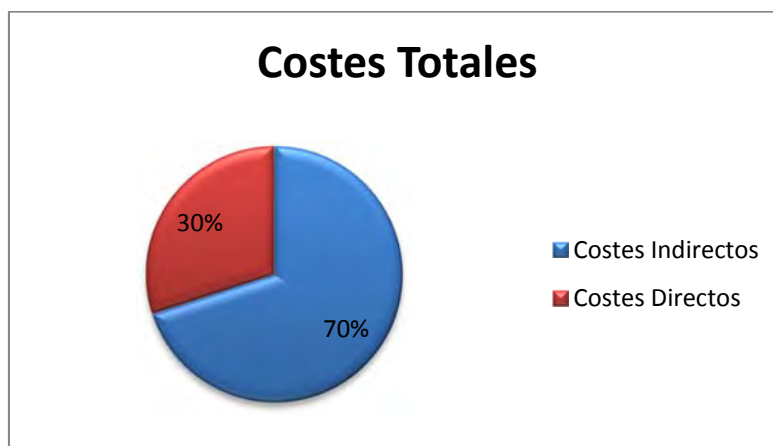


Figura 186. Costes Totales

Inciendiando el motivo de esta repartición, se desglosaran los Costes Directos, diferenciando el coste del Material y, el de Inspección y Mantenimiento.

El precio del material, acero inoxidable AISI 316, es elevado, si lo comparamos a un acero al carbono con recubrimiento de pintura, ya que contiene un nivel elevado en Ni, por lo tanto, se otorga un 60% del precio de los costes directos. La manufactura, dentro del margen de los costes directos, supondrá un 40%, albergando el almacenaje, transporte y montaje de los casquillos. El 20% restante de los costes directos, reside en el mecanizado de las piezas, el cual incluye un mínimo de 72 casquillos, fabricados por medio de laminado y torneado. El 40% restante de los costes directos, reside en Inspección y Mantenimiento, distinguiendo, 35% en el mantenimiento que podría o no, implicar el cambio del material, y un 5% restante en la inspección periódica del “Puente Juan José Arenas”. La figura 187 recoge en un gráfico radial la valoración estimada de los Costes Directos.

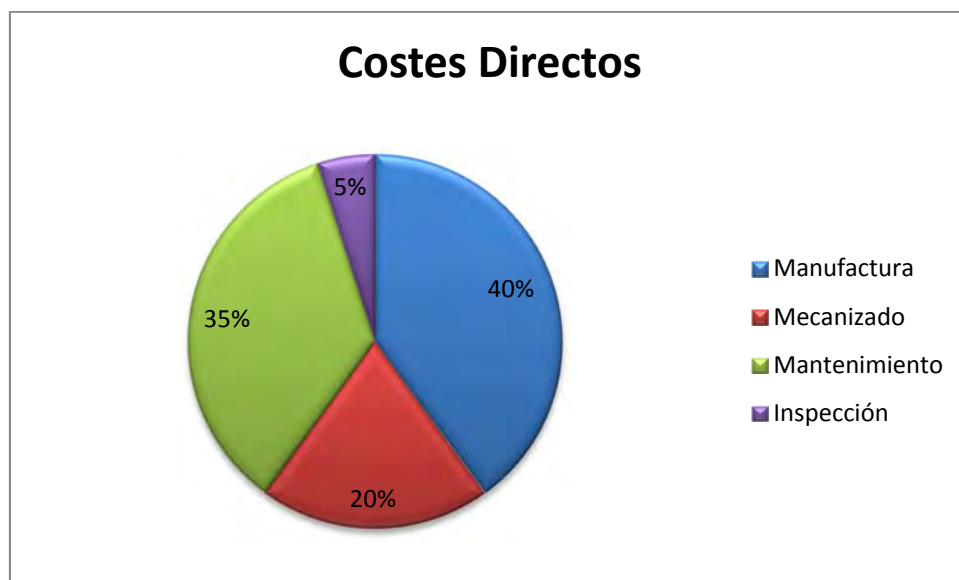


Figura 187. Costes Directos

Costes directos:

60% material

- Manufactura 40%
- Mecanizado 20 %

40 % Inspección y mantenimiento

- 35% mantenimiento que implica el cambio de material
- 5% inspección

Los Costes Indirectos, son muy difíciles de valorar en este estudio, ya que aparecerían ante una necesidad de cambio de material. Bajo esta condición, estos costes, suponen un 70% de los Costes Totales, pudiéndose distinguir entre otras variables no reflejadas en este estudio, el cierre temporal del “Puente Juan José Arenas”, durante el tiempo de obra. Esto implicaría:

- Gasto de combustible de los vehículos, los cuales motivo del cierre del puente, tendrán que desplazarse al menos un kilómetro más para llegar a su destino.
- Precio de aceptación de obra, implicando tener que pagar unas tasas para la realización de la obra.
- Precio de obra, el salario a pagar a los trabajadores por llevar a cabo el trabajo de recambio de los casquillos necesarios.
- Precio del recambio, suponiendo el valor de fabricación de nuevas piezas y su transporte.
- Otras variables no reflejadas

De esta forma, los Costes indirectos, suponen una gran dificultad de cálculo y al no ser motivo de este presente Proyecto Fin de Carrera, se ha elaborado una estimación del 70% de los Costes Totales.

Capítulo 5

Conclusiones

En este apartado se mostrarán las conclusiones principales obtenidas con todos los estudios realizados a los casquillos en el margen temporal de 8 meses.

5.- Conclusiones

Las conclusiones más relevantes del estudio “Corrosión por picadura: Caso particular de estudio del “Puente Juan José Arenas” de Santander” son las que se exponen a continuación:

1. Se puede afirmar que los casquillos están sufriendo deterioro ocasionado por corrosión por picadura. Estas picaduras, se agrupan en cuatro tipos principales, cada una con sus características propias. Los distintos tipos, según la terminología creada por el autor, son “nueva picadura”, N, “picadura avanzada”, P, “colapso de picadura”, C y “grieta de corrosión”, G.

2. Las nuevas picaduras, N, es el tipo más pequeño de picadura localizado en los casquillos con forma circular y tan sólo 0,015 cm de radio promedio como muestra la tabla 6. Estas, siguen una cinética de nucleación que se ajusta a la ley:

$$N = - 89,142 + 9,678 * t - 0,1785 * t^2 \text{ (t en meses).}$$

Al ser el primer paso y el inicio de la picadura, las nuevas picaduras suponen el origen de los demás tipos, y definen la posición que tomarán en la superficie. Son las más numerosas, pero las que menos superficie ocupan; entre 2% y 3% de la superficie de los casquillos, e implica un 0,1% de superficie corroída más cada mes.

3. Las picaduras avanzadas, P, tienen su origen en las nuevas picaduras y crecen de forma aleatoria en diámetro, hasta tener radios de alrededor de 0,0345 cm. El aumento del tamaño del diámetro de estas picaduras puede solapar con el crecimiento de otras próximas, y dar lugar a formas más agresivas de picadura, colapsos de picadura, C, y grietas de corrosión, G. Las picaduras avanzadas, creciendo desde su forma de nueva picadura, están ligadas en el periodo de estudio a una cinética de evolución de la forma:

$$P = - 73,42 + 7,4523 * t - 0,119 * t^2 \text{ (t en meses).}$$

Las picaduras avanzadas, suponen entre el 10% y 15% de la superficie de los casquillos. La evolución que han tomado en el plazo de estudio, oscila el 0,6% más de superficie corroída al mes. Son el segundo tipo más abundante en densidad de picaduras por cm², por detrás de las nuevas picaduras, N, y su evolución no está estancada, sino que continua expandiéndose con el tiempo.

4. Los colapsos de picadura, C, tienen dos morfologías, como se ha explicado en este Proyecto Fin de Carrera: colapso por proximidad de picaduras y grietas de corrosión. Ambos tipos son los que mayor daño causan por deterioro.

Los colapsos de picadura por proximidad de picaduras, surgen por la nucleación y desarrollo de los anteriores tipos de picadura, por lo cual, en un estado inicial de corrosión, no deberían de aparecer. En el caso de este estudio, la picadura estaba propagada por casi toda la superficie y estos colapsos ya habían tenido lugar. El número de estos, es el menor junto con las grietas de corrosión, pero son la tipología que más superficie ocupa, alrededor de 17% en su fase inicial de estudio y 26% después de 8 meses, lo que supone aproximadamente un 1,2% de superficie más corroída al mes. La cinética de evolución de este tipo ajusta a la ley.

$$C = - 58,14 + 5,7619 * t - 0,095 * t^2 \text{ (t en meses).}$$

La tipología de grietas de corrosión, G, supone la más complicada de tratar por su forma: son hilos de corrosión que parten de una picadura o colapso a otro de forma aleatoria. Estas grietas no son comunes en la corrosión por picadura, pero sí de la corrosión bajo tensión; por lo cual, gracias a los cálculos aproximados realizados y la deformación existente, se puede decir que, las tensiones que están soportando los casquillos, es un potenciador de la corrosión en los casquillos.

5. En cuanto a la orientación, se ha detectado que, los casquillos situados más al Este, han sufrido mayor deterioro que los demás, siendo su cara Este, la más afectada que la Oeste. De esta forma, la influencia marina es una variable que está afectando en la corrosión por picadura sufrida en los casquillos del “Puente Juan José Arenas”, fomentada por los vientos provenientes del Este.

6. También hay que resaltar que debido a que el ataque está distribuido de múltiples formas a lo largo de los casquillos y puede deberse a: incorrecta manufactura, inapropiado almacenamiento, elementos externos que han influido (contacto humano), o fallos en el recubrimiento. La figura 155 muestra los distintos tipos de agrupación y su ubicación.

7. Se ha calculado que anualmente, al menos, un 20% más de la superficie libre del casquillo, sufrirá corrosión por picadura.

Capítulo 6

Líneas de trabajo futuras

Una vez los objetivos de este Proyecto Fin de Carrera han sido obtenidos, se plantean varias líneas de trabajo futuras para poder realizar como complemento y aumento del estudio realizado.

6.- Líneas de trabajo futuras

Durante este Proyecto Fin de Carrera, se han analizado aleatoriamente 10 de los 72 casquillos del “Puente Juan José Arenas”, tanto en su zona Este, como Oeste. Además, han sido estudiados los casquillos de la zona inferior de los tirantes, de esta forma, se puede analizar la evolución de otros casquillos de la zona inferior para determinar una media más segura y los casquillos de la parte superior, con el fin de saber si el daño sufrido es análogo.

También sería interesante, aumentar el tiempo estudio de los casquillos, ya que, ayudará a completar un modelo para este puente.

En vista de las distinciones de las zonas de estudio situadas al Este y al Oeste, se puede analizar lo que ocurre en la zona Norte y Sur, siendo interesante conocer el efecto que ha podido causar adicionalmente la deformación de diámetro a 2,5 cm de la base del casquillo. La deformación sufrida en la cara Norte y Sur, es mayor que la sufrida en la Este y Oeste según la figura 97. (“a” corresponde a Norte-Sur y “b” a Este-Oeste).

Un análisis de otras variables como la influencia del mecanizado final de las piezas, ayudaría a consolidar la forma y tendencia que han tomado las picaduras en los casquillos.zx0

Capítulo 7

Referencias Bibliográficas

En este último apartado se muestran las referencias bibliográficas empleadas para la elaboración de este presente Proyecto Fin de Carrera.

7.- Referencias Bibliográficas

- (1) EUROCORR, Congreso Europeo de Corrosión, <http://www.eurocorr2013.org>
- (2) M.V. Biezma, “Study of the pitting corrosion evolution of stainless steel structures in marine environments by finite element modeling”, European Corrosion Congress, 2013, Estoril, Portugal
- (3) Real Academia Española. Diccionario de la lengua española, 2001, Madrid, España.
<http://www.rae.es/>
- (4) O. Otero “Corrosión y degradación de los materiales”, Ed. Síntesis, 1997, Madrid, España
- (5) Informe Hoar, 1971, www.nervion.com.mx/web/conocimientos/tipos_corrosion.htm
- (6) J. Genescá y J. Ávila, "Aspectos socioeconómicos de la corrosión", Información Científica y Tecnológica, 1988, (CONACYT). 10 (137) 97-49
- (7) Instituto Guido Donegani, Gavelli, Base de datos, 2010, Italia
- (8) Biblioteca digital, Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa,
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_6.htm
- (9) Margarita Ocampo, "Inversión térmica y contaminación", Información Científica y Tecnológica, 1986, 8 (115) 19-21.
- (10) UPV, Universidad Pública de Valencia, Fotografía tomada de
www.upv.es/materiales/fcm/fcm12/pfcm12_4_10.html
- (11) Allbiz. “Fundición de colada y hierro gris” www.ua.all.biz/es-7colada-y-fundicin-de-hierro-fundido-gris-g1459150
- (12) Coltters, “Análisis de fracturas” www.analisisdefractura.com/fallas-por-desgaste/cavitacion-al-comunicar
- (13) M. V. Biezma “Estudio de la resistencia a corrosión localizada del acero inoxidable superaustenítico 24,1Cr22Ni7,1Mo en mezclas que contienen iones cloruro y cloruro-fluoruro”, 2014, Santander, España
- (14) ASMT G 61-78, 2014, ASMT internacional, <http://www.astm.org/>
- (15) C. Berlanga, F. Moreira, J. Leal, H. Santos, M. V. Biezma, "Degradación de propiedades de un acero inoxidable dúplex debido a la precipitación de fase sigma", 2010. Libro de Ponencias del Congreso Nacional de Materiales, SOCIEMAT, Zaragoza, pp.214 216

- (16) Método API 579, ASME, Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels in Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 3. 2007, American Society of Mechanical Engineers,
<http://www.slideshare.net/guest7276278/api-579-parte-6-nivel-1-pitting>
- (17) 2.- C. Rodríguez, M. V. Biezma, Detección de la corrosión por picadura en aceros inoxidables empleando ultrasonidos, Revista de Metalurgia, 2014, Santander, España
- (18) Muhammet Cerit, “Numerical investigation on torsional stress concentration factor at the semi-elliptical corrosión pit”, 2013, CORROSION SCIENCE, Vol 67
- (19) F. Caleyó, A. Valor, “Stochastic approach to pitting corrosion-extreme modelling in low-carbon steel”, 2010, 52(3), CORROSION SCIENCE
- (20) G. Fernández, J. I. Verdeja, J. A. Perosanz , “Corrosión por picaduras en una tubería de acero al carbono”, RDM, Revista de Minas, Oviedo, España
- (21) L. S. Conde, “Medida de susceptibilidad a la corrosión por picaduras en aceros inoxidables austeníticos”, 1988, Sevilla, España
- (21) Google maps, <https://maps.google.es/>
- (22) Google earth, <http://www.google.es/intl/es/earth/index.html>
- (23) Macalloy, Caxton Way, Dinnington, Sheffield, S25 3QE, <http://www.macalloy.com/>
- (24) Autocad, AUTODESK, 2012, San Rafael, EE .UU. <http://www.autodesk.es>

Anexo 1

Índice de Figuras

Este documento contiene el listado de todas las figuras que se han presentado en este Proyecto Fin de Carrera y su numeración.

Figuras

Página

Figura 1. “Logotipo de EUROCORR 2013”	2
Figura 2. “Puente Juan José Arenas”, Santander	3
Figura 3. Tirantes del “Puente Juan José Arenas”, Santander	4
Figura 4. “Comparación de casquillos”	5
Figura 5. “Ejemplo de corrosión en señal de tráfico, Loredó (Cantabria)”	7
Figura 6. “Ejemplo de celda electroquímica”	9
Figura 7. “Tipo de corrosión en porcentaje en plantas químicas”	11
Figura 8. “Corrosión marina”	13
Figura 9. “Influencia del espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión”	14
Figura 10. “Fabrica contaminante”	15
Figura 11. “Esquema de tipología de corrosión”	16
Figura 12. “Pieza de hierro con corrosión generalizada”	17
Figura 13. “Pieza de acero inoxidable pasivada”	18
Figura 14. “Pieza de aluminio pasivada”	18
Figura 15. “Serie electroquímica, parte 1/2”	20
Figura 16. “Serie electroquímica, parte 2/2”	21
Figura 17. “Ejemplos de corrosión galvánica”	22
Figura 18. “Abrazadera isofónica para tuberías de cobre”	23
Figura 19. “Ejemplo de un termopar”	23
Figura 20. “Corrosión en resquicios que se aprecia en la parte inferior de los casquillos”	24
Figura 21. “Zonas propensas a corrosión en resquicios”	24

Figura 22. “Ejemplos de zonas propensas a corrosión en resquicios”	25
Figura 23. “Ejemplos de zonas propensas a corrosión en resquicios”	25
Figura 24. “Corrosión selectiva del latón”	26
Figura 25. “Pieza de fundición gris corroída”	27
Figura 26. “Tornillos sometidos a fatiga”	28
Figura 27. “Ejemplos de curva de Wöhler”	29
Figura 28. “Corrosión por fatiga y fisuración asociada”	29
Figura 29. “Engranaje fuera de servicio con defecto de fatiga”	29
Figura 30. “Efecto de la corrosión erosión”	30
Figura 31. “Relación entre pérdida de masa y velocidad de flujo cuando el fluido no transporta sólidos en suspensión”	31
Figura 32. ” Relación entre pérdida de masa y velocidad de flujo cuando el fluido transporta sólidos en suspensión”	31
Figura 33. “Barandilla de acero al carbono sin mantenimiento con corrosión por erosión. Segunda playa del Sardinero Santander”	32
Figura 34. “Ejemplo de corrosión por fricción”	33
Figura 35. “Corrosión por fricción experimentada en un eje”	34
Figura 36. “Ejemplo de corrosión por cavitación”	35
Figura 37. “Corrosión por cavitación experimentado por una hélice”	36
Figura 38. “Corrosión microbiológica”	37
Figura 39. “Micrografía de un ejemplo de corrosión intergranular experimentado por acero inoxidable AISI 304”	39
Figura 40. “Ejemplo de evolución en acero inoxidable 304”	40
Figura 41. “Radiografía de corrosión bajo tensión”	41
Figura 42. “Barras de acero corrugado bajo tensión en hormigón carbonatado”	42
Figura 43. “Grietas de oxidación en Puente Juan José Arenas”	42

Figura 44. “Aparecen las picaduras”	43
Figura 45. “Picadura extendida”	43
Figura 46. “Pieza corroída a más del 80%”	44
Figura 47. “Recubrimiento del Palacio de Deportes, Santander”	44
Figura 48. “Grafico API 579”	45
Figura 49. “Evaluación de daño API 579, grafico 1”	46
Figura 50. “Evaluación de daño API 579, grafico 8”	47
Figura 51. “Ubicación del Puente con referencia a España”	50
Figura 52. “Ubicación del Puente con referencia a Santander”	51
Figura 53. “Puente Juan José Arenas”	51
Figura 54. “Imagen de Santander, resaltando la ubicación del Puente”	52
Figura 55. “Imagen de Puente Juan José Arenas”	52
Figura 56. “Ubicación de casquillos y tirantes”	53
Figura 57. “Casquillos superiores e inferiores”	54
Figura 58. “Distinción de orientación de Puente Juan José Arenas”	54
Figura 59. “Casquillo, Alzado”	56
Figura 60. “Casquillo representado por COMSOL 4.3 a”	57
Figura 61. “Roscado del casquillo representado por COMSOL 4.3 a”	57
Figura 62. “Tipos de picadura en C 4, Zona Este; en Marzo 2013”	58
Figura 63. “Ejemplos de nuevas picaduras”	60
Figura 64. “Ejemplos de picaduras avanzadas”	61
Figura 65. “Ejemplos de colapsos de picadura”	62
Figura 66. “Ejemplos de grietas de corrosión”	63
Figura 67. “Organigrama del proceso de trabajo”	64
Figura 68. “Organigrama, paso 1”	65
Figura 69. “Selección de casquillos”	66

Figura 70. “Casquillos 1 y 10”	67
Figura 71. “Casquillo 6”	67
Figura 72. “Organigrama, paso 2”	68
Figura 73. “Panasonic DMC-TZ7”	68
Figura 74. “Ejemplo de toma de fotografía C 1, Zona Este; Agosto 2013”	69
Figura 75. “Ejemplo de toma de fotografía C 9, Zona Oeste; Agosto 2013”	70
Figura 76. “Ejemplo de toma de fotografía C 6, Zona Oeste; en Marzo 2013”	71
Figura 77. “Ejemplo de toma de fotografía C 7, Zona Oeste; en Marzo 2013”	71
Figura 78. “Organigrama, paso 3”	72
Figura 79. “Organigrama, paso 4”	73
Figura 80. “Mallado de ejemplo del casquillo objeto de estudio”	74
Figura 81. “Organigrama, paso 5”	75
Figura 82. “Zonas no estudiadas del casquillo en C 10, Zona Oeste; en Marzo 2013”	76
Figura 83. “Selección de zona de estudio en el casquillo de ejemplo”	77
Figura 84. “Cotas en el casquillo para la selección de zona de estudio de ejemplo”	78
Figura 85. “Organigrama, paso 6”	80
Figura 86. “Zona de estudio 1 en el casquillo C1, zona este, Febrero 3013”	81
Figura 87. “Zona de estudio 2 en el casquillo C1, zona este, Febrero 3013”	81
Figura 88. “Zona de estudio 3 en el casquillo C1, zona este, Febrero 3013”	81
Figura 89. “Organigrama, paso 7”	82
Figura 90. “Organigrama, paso 8”	84
Figura 91. “Organigrama, si hay más”	85
Figura 92. “Organigrama, si no hay más”%	86
Figura 93. “Calibre utilizado para el estudio”	87
Figura 94. “Ejemplo de toma de fotografía C 1, Zona Oeste; en Marzo 2013”	89
Figura 95. “Esquema de medición de diámetros de los casquillos”	90

Figura 96. “Corrosión por picadura en la entrada del Palacio de Deportes en Santander”	93
Figura 97. “Tomando mediciones del tamaño de la picadura”	94
Figura 98. “Comparación de deformación del casquillo a 2,5 cm de la base”	96
Figura 99. “Porcentaje deformado de cada casquillo”	97
Figura 100. “Número de picaduras en la zona Oeste en función del tiempo”	109
Figura 101. “Número de picaduras en la zona Este en función del tiempo”	110
Figura 102. “Número de picaduras combinadas en función del tiempo”	111
Figura 103. “Número de nuevas picaduras en función del tiempo”	112
Figura 104. “Número de picaduras avanzadas en función del tiempo”	113
Figura 105. “Número de colapsos de picadura en función del tiempo”	114
Figura 106. “Superficie ocupada por cada tipología en la zona Oeste”	120
Figura 107. “Superficie ocupada por cada tipología en la zona Este”	122
Figura 108. “Superficie afectada por cada tipología en la zona Oeste”	127
Figura 109. “Superficie afectada por cada tipología en la zona Este”	129
Figura 110. “Gráfica de diámetro medio”	131
Figura 111. “Comparación de los tipos de picadura”	135
Figura 112. “Ubicación del casquillo número 1 en Puente Juan José Arenas”	136
Figura 113. “Casquillo 1 de Puente Juan José Arenas”	136
Figura 114. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 1”	139
Figura 115. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 1”	139
Figura 116. “Ubicación del casquillo número 2 en Puente Juan José Arenas”	140
Figura 117. “Casquillo 2 de Puente Juan José Arenas”	140
Figura 118. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 2”	143
Figura 119. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 2”	143
Figura 120. “Ubicación del casquillo número 3 en Puente Juan José Arenas”	144
Figura 121. “Casquillo 3 de Puente Juan José Arenas”	144

Figura 122. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 3”	147
Figura 123. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 3”	147
Figura 124. “Ubicación del casquillo número 4 en Puente Juan José Arenas”	148
Figura 125. “Casquillo 4 de Puente Juan José Arenas”	148
Figura 126. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 4”	151
Figura 127. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 4”	151
Figura 128. “Ubicación del casquillo número 5 en Puente Juan José Arenas”	152
Figura 129. “Casquillo 5 de Puente Juan José Arenas”	152
Figura 130. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 5”	155
Figura 131. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 5”	155
Figura 132. “Ubicación del casquillo número 6 en Puente Juan José Arenas”	156
Figura 133. “Casquillo 6 de Puente Juan José Arenas”	156
Figura 134. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 6”	159
Figura 135. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 6”	159
Figura 136. “Ubicación del casquillo número 7 en Puente Juan José Arenas”	160
Figura 137. “Casquillo 7 de Puente Juan José Arenas”	160
Figura 138. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 7”	163
Figura 139. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 7”	163
Figura 140. “Ubicación del casquillo número 8 en Puente Juan José Arenas”	164
Figura 141. “Casquillo 8 de Puente Juan José Arenas”	164
Figura 142. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 8”	167
Figura 143. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 8”	167
Figura 144. “Ubicación del casquillo número 9 en Puente Juan José Arenas”	168
Figura 145. “Casquillo 9 de Puente Juan José Arenas”	168
Figura 146. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 9”	171
Figura 147. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 9”	171

Figura 148. “Ubicación del casquillo número 10 en Puente Juan José Arenas”	172
Figura 149. “Casquillo 10 de Puente Juan José Arenas”	172
Figura 150. “Evolución de cada tipo de picadura en el casquillo 10”	175
Figura 151. “Superficie ocupada por cada tipología en el casquillo 10”	175
Figura 152. “Casquillo 10, Zona Este; Agosto 2013”	176
Figura 153. “Casquillo 8, Zona Este; Agosto 2013”	177
Figura 154. “Casquillo 3, Zona Este; Agosto 2013”	177
Figura 155. “Casquillo 5, Zona Este; Agosto 2013”	178
Figura 156. “Agrupaciones de picadura en el Puente Juan José Arenas”	179
Figura 157. “Porcentaje corroído por las nuevas picaduras en la zona Oeste entre los meses Enero y Agosto”	183
Figura 158. “Porcentaje corroído por las picaduras avanzadas en la zona Oeste entre los meses Enero y Agosto”	184
Figura 159. “Porcentaje corroído por los colapsos de picadura en la zona Oeste entre los meses Enero y Agosto”	185
Figura 160. “Porcentaje no corroído en la zona Oeste entre los meses Enero y Agosto”	186
Figura 161. “Porcentaje corroído por las nuevas picaduras en la zona Este entre los meses Enero y Agosto”	188
Figura 162. “Porcentaje corroído por las picaduras avanzadas en la zona Este entre los meses Enero y Agosto”	189
Figura 163. “Porcentaje corroído por los colapsos de picadura en la zona Este entre los meses Enero y Agosto”	190
Figura 164. “Porcentaje no corroído en la zona Este entre los meses Enero y Agosto”	191
Figura 165. “Evolución de picadura, casquillo 1, Zona Este, Enero, Marzo, Agosto”	192
Figura 166. “Evolución de picadura, casquillo 2, Zona Este, Enero, Marzo, Agosto”	193
Figura 167. “Evolución de picadura, casquillo 4, Zona Este, Enero, Marzo, Agosto”	194

Figura 168. “Evolución de picadura, casquillo 6, Zona Oeste, Enero, Marzo, Agosto”	195
Figura 169. “Evolución de picadura, casquillo 7, Zona Este, Enero, Marzo, Agosto”	196
Figura 170. “Evolución de picadura, casquillo 9, Zona Este, Enero, Abril, Agosto”	197
Figura 171. “Casquillo virtual representado zona Oeste, Enero”	199
Figura 172. “Casquillo virtual representado zona Oeste, Abril”	200
Figura 173. “Casquillo virtual representado zona Oeste, Agosto”	201
Figura 174. “Casquillo virtual representado zona Este, Enero”	202
Figura 175. “Casquillo virtual representado zona Este, Abril”	203
Figura 176. “Casquillo virtual representado zona Este, Agosto”	204
Figura 177. “Densidad de nuevas picaduras - Tiempo”	206
Figura 178. “Densidad de picaduras avanzadas - Tiempo”	208
Figura 179. “Densidad de Colapsos de picadura - Tiempo”	210
Figura 180. “Aproximación media”	213
Figura 181. “Aproximación Oeste”	213
Figura 182. “Aproximación Este”	214
Figura 183. “Zona roscada del casquillo”	215
Figura 184. “Ley de esfuerzos”	216
Figura 185. “Esquema del anillo de pared delgada”	218
Figura 186. Costes Totales	219
Figura 187. Costes Directos	220

Anexo 2

Índice de Tablas

Este documento contiene el listado de todas las tablas que se han presentado en este Proyecto Fin de Carrera y su numeración.

Tablas

	Página
Tabla 1. “Resumen del Informe Hoar”	8
Tabla 2. “Composición química de los casquillos (% wt)”	56
Tabla 3. “Datos de evolución de picadura nuevas, N, propagación de picaduras P y colapso, C, Enero 2013, casquillos (1 - 5)”	83
Tabla 4. “Datos de evolución de picadura nuevas, N, propagación de picaduras P y colapso, C, Enero 2013, casquillos (6 - 10)”	83
Tabla 5. “Estimación del tráfico sobre el Puente”	92
Tabla 6. “Tamaño de cada tipo de picadura”	93
Tabla 7. “Medidas de deformación existente en los casquillos”	95
Tabla 8. “Deformación existente en los casquillos”	95
Tabla 9. “Tasa de deformación a 2,5 cm de la base casquillo a casquillo”	97
Tabla 10. “Comparación de la deformación de los casquillos Oeste-Este”	98
Tabla 11. “Resultados Enero 2013, casquillos (1 - 5)”	99
Tabla 12. “Resultados Enero 2013, casquillos (6 -10)”	99
Tabla 13. “Resultados Febrero 2013, casquillos (1 - 5)”	100
Tabla 14. “Resultados Febrero 2013, casquillos (6 -10)”	100
Tabla 15. “Resultados Marzo 2013, casquillos (1 - 5)”	101
Tabla 16. “Resultados Marzo 2013, casquillos (6 -10)”	101
Tabla 17. “Resultados Abril 2013, casquillos (1 - 5)”	102
Tabla 18. “Resultados Abril 2013, casquillos (6 -10)”	102
Tabla 19. “Resultados Mayo 2013, casquillos (1 - 5)”	103
Tabla 20. “Resultados Mayo 2013, casquillos (6 -10)”	103
Tabla 21. “Resultados Junio 2013, casquillos (1 - 5)”	104

Tabla 22. “Resultados Junio 2013, casquillos (6 -10)”	104
Tabla 23. “Resultados Julio 2013, casquillos (1 - 5)”	105
Tabla 24. “Resultados Julio 2013, casquillos (6 -10)”	105
Tabla 25. “Resultados Agosto 2013, casquillos (1 - 5)”	106
Tabla 26. “Resultados Agosto 2013, casquillos (6 -10)”	106
Tabla 27. “Evolución de cada tipología de picadura, Oeste”	107
Tabla 28. “Evolución de cada tipología de picadura, Este”	108
Tabla 29. “Evolución de cada tipología de picadura, Combinado”	108
Tabla 30. “Área afectada por cada tipología en Enero”	116
Tabla 31. “Área afectada por cada tipología en Febrero”	116
Tabla 32. “Área afectada por cada tipología en Marzo”	117
Tabla 33. “Área afectada por cada tipología en Abril”	117
Tabla 34. “Área afectada por cada tipología en Mayo”	117
Tabla 35. “Área afectada por cada tipología en Junio”	118
Tabla 36. “Área afectada por cada tipología en Julio”	118
Tabla 37. “Área afectada por cada tipología en Agosto”	118
Tabla 38. “Datos de superficie ocupada por cada tipología, Oeste”	119
Tabla 39. “Datos de superficie ocupada por cada tipología, Este”	121
Tabla 40. “Superficie afectada por cada tipología en Enero”	123
Tabla 41. “Superficie afectada por cada tipología en Febrero”	124
Tabla 42. “Superficie afectada por cada tipología en Marzo”	124
Tabla 43. “Superficie afectada por cada tipología en Abril”	124
Tabla 44. “Superficie afectada por cada tipología en Mayo”	125
Tabla 45. “Superficie afectada por cada tipología en Junio”	125

Tabla 46. “Superficie afectada por cada tipología en Julio”	125
Tabla 47. “Superficie afectada por cada tipología en Agosto”	126
Tabla 48. “Datos de superficie afectada por cada tipología, Oeste”	126
Tabla 49. “Datos de superficie afectada por cada tipología, Este”	128
Tabla 50. “Diámetros medios en cm”	131
Tabla 51. “Toma de datos de grietas de corrosión”	132
Tabla 52. “Superficie ocupada por las grietas de corrosión”	133
Tabla 53. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 1, zona Oeste”	137
Tabla 54. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 1, zona Este”	137
Tabla 55. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 1, zona Oeste”	138
Tabla 56. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 1, zona Este”	138
Tabla 57. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 2, zona Oeste”	141
Tabla 58. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 2, zona Este”	141
Tabla 59. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 2, zona Oeste”	142
Tabla 60. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 2, zona Este”	142
Tabla 61. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 3, zona Oeste”	145
Tabla 62. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 3, zona Este”	145
Tabla 63. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 3, zona Oeste”	146
Tabla 64. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 3, zona Este”	146
Tabla 65. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 4, zona Oeste”	149
Tabla 66. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 4, zona Este”	149
Tabla 67. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 4, zona Oeste”	150
Tabla 68. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 4, zona Este”	150
Tabla 69. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 5, zona Oeste”	153
Tabla 70. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 5, zona Este”	153
Tabla 71. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 5, zona Oeste”	154
Tabla 72. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 5, zona Este”	154

Tabla 73. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 6, zona Oeste”	157
Tabla 74. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 6, zona Este”	157
Tabla 75. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 6, zona Oeste”	158
Tabla 76. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 6, zona Este”	158
Tabla 77. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 7, zona Oeste”	161
Tabla 78. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 7, zona Este”	161
Tabla 79. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 7, zona Oeste”	162
Tabla 80. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 7, zona Este”	162
Tabla 81. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 8, zona Oeste”	165
Tabla 82. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 8, zona Este”	165
Tabla 83. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 8, zona Oeste”	166
Tabla 84. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 8, zona Este”	166
Tabla 85. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 9, zona Oeste”	169
Tabla 86. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 9, zona Este”	169
Tabla 87. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 9, zona Oeste”	170
Tabla 88. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 9, zona Este”	170
Tabla 89. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 10, zona Oeste”	173
Tabla 90. “Número de picaduras contabilizadas en el casquillo 10, zona Este”	173
Tabla 91. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 10, zona Oeste”	174
Tabla 92. “Superficie corroída por cada tipo de picadura en el casquillo 10, zona Este”	174
Tabla 93. “Agrupaciones de picadura en los casquillos del Puente Juan José Arenas”	178
Tabla 94. “Porcentaje corroído de cada casquillo”	180
Tabla 95. “Porcentaje corroído en cada agrupación”	181
Tabla 96. “Porcentaje corroído por cada tipología en la zona Oeste (Enero – Agosto)”	182
Tabla 97. “Porcentaje corroído por cada tipología en la zona Este (Enero – Agosto)”	187
Tabla 98. “Nuevas picaduras - Tiempo”	205

Tabla 99. “Valores aproximados de Nuevas picaduras”	206
Tabla 100. “Picaduras avanzadas - Tiempo”	207
Tabla 101. “Valores aproximados de Picaduras avanzadas”	208
Tabla 102. “Colapsos de picadura - Tiempo”	209
Tabla 103. “Valores aproximados de Colapsos de picadura”	210
Tabla 104. “Cálculo de $f(t)$ ”	211
Tabla 105. “Aproximaciones a la cinética de corrosión”	212

Anexo 3

Planos de Macalloy

Este documento contiene los planos proporcionados por Macalloy de la estructura denominada “Tensión Rod Systems”.

Anexo 3

Este documento es una copia de la información aportada por la directora de este Proyecto Fin de Carrera, M.V. Biezma gracias a la empresa Macalloy. Se trata de un catálogo llamado “Tension Rod Systems Macalloy 460, S460, 520 European Technical Approval” (23).

Contiene este catálogo los planos de despiece de las estructuras que forman los tirantes instalados en el “Puente Juan José Arenas” además de la normativa empleada para su ejecución.

Macalloy

BAR & CABLE SYSTEMS

Tension Rod Systems
Macalloy 460, S460, 520
European Technical Approval

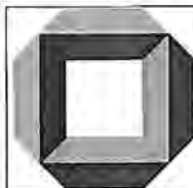


ETA-07/0215

EXPERIENCE

INNOVATION

QUALITY



0769

Universität Karlsruhe (TH)
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
(Amtliche Materialprüfungsanstalt)

Otto-Ammann-Platz 1
D-76128 Karlsruhe

CERTIFICATE OF FACTORY PRODUCTION CONTROL

0769 – CPD – 074269

In compliance with the Directive 89/108/EEC of the Council of the European Communities of December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to the construction products (Construction Products Directive – CPD) amended by the Directive 93/68/EEC of the Council of European Communities of 22 July 1993, it has been stated that the construction product:

Tension Rod Systems MACALLOY 460, S460 und 520

produced by the manufacturer

Macalloy Limited

Caxton Way, DINNINGTON S25 3QE, Großbritannien

in the factory

Macalloy Limited

Caxton Way, DINNINGTON S25 3QE, Großbritannien

is submitted by the manufacturer to the initial type-testing of the product, a factory production control and to the further testing of samples taken at the factory in accordance with a prescribed test plan and that the notified body – Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine – has performed the initial inspection of the factory and the factory production control and performs the continuous surveillance, assessment and approval of the factory production control.

This certificate attests that all provisions concerning the attestation of factory production control described in the European technical approval

ETA-07/0215 from 25. October 2007

were applied.

This certificate was first issued on January 7th, 2008 and remains valid as long as the conditions laid down in the European technical approval in reference or the manufacturing conditions in the factory or the FPC itself are not modified significantly.

Karlsruhe, January 7th, 2008

Head of Certification Body



Deutsches Institut für Bautechnik

Anstalt des öffentlichen Rechts

Kolonnenstr. 30 L
10829 Berlin
Germany

Tel.: +49(0)30 787 30 0
Fax: +49(0)30 787 30 320
E-mail: dibt@dibt.de
Internet: www.dibt.de



DIBt

Mitglied der EOTA
Member of EOTA

European Technical Approval ETA-07/0215

English translation prepared by DIBt - Original version in German language

Handelsbezeichnung
Trade name

Zugstabsysteme MACALLOY 460, S460 und 520
Tension Rod Systems MACALLOY 460, S460 and 520

Zulassungsinhaber
Holder of approval

Macalloy Limited
Caxton Way
DINNINGTON S25 3QE
GROSSBRITANNIEN

Zulassungsgegenstand
und Verwendungszweck
Generic type and use
of construction product

Vorgefertigtes Zugstabsystem
Prefabricated tension rod system

Geltungsdauer:
Validity:
vom
from
bis
to

25 October 2007
25 October 2012

Herstellwerk
Manufacturing plant

Macalloy Limited
Caxton Way
DINNINGTON S25 3QE
GROSSBRITANNIEN

Diese Zulassung umfasst
This Approval contains

17 Seiten einschließlich 10 Anhänge
17 pages including 10 annexes



Europäische Organisation für Technische Zulassungen
European Organisation for Technical Approvals

I LEGAL BASES AND GENERAL CONDITIONS

- 1 This European technical approval is issued by Deutsches Institut für Bautechnik in accordance with:
 - Council Directive 89/106/EEC of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of Member States relating to construction products¹, modified by Council Directive 93/68/EEC² and Regulation (EC) N° 1882/2003 of the European Parliament and of the Council³;
 - Gesetz über das In-Verkehr-Bringen von und den freien Warenverkehr mit Bauprodukten zur Umsetzung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte und anderer Rechtsakte der Europäischen Gemeinschaften (Bauproduktengesetz - BauPG) vom 28. April 1998⁴, zuletzt geändert durch Gesetz vom 06.01.2004⁵;
 - Common Procedural Rules for Requesting, Preparing and the Granting of European technical approvals set out in the Annex to Commission Decision 94/23/EC⁶.
- 2 Deutsches Institut für Bautechnik is authorized to check whether the provisions of this European technical approval are met. Checking may take place in the manufacturing plant. Nevertheless, the responsibility for the conformity of the products to the European technical approval and for their fitness for the intended use remains with the holder of the European technical approval.
- 3 This European technical approval is not to be transferred to manufacturers or agents of manufacturers other than those indicated on page 1, or manufacturing plants other than those indicated on page 1 of this European technical approval.
- 4 This European technical approval may be withdrawn by Deutsches Institut für Bautechnik, in particular pursuant to information by the Commission according to Article 5(1) of Council Directive 89/106/EEC.
- 5 Reproduction of this European technical approval including transmission by electronic means shall be in full. However, partial reproduction can be made with the written consent of Deutsches Institut für Bautechnik. In this case partial reproduction has to be designated as such. Texts and drawings of advertising brochures shall not contradict or misuse the European technical approval.
- 6 The European technical approval is issued by the approval body in its official language. This version corresponds fully to the version circulated within EOTA. Translations into other languages have to be designated as such.

¹ Official Journal of the European Communities L 40, 11.02.1989, p. 12
² Official Journal of the European Communities L 220, 30.08.1993, p. 1
³ Official Journal of the European Union L 284, 31.10.2003, p. 25
⁴ Bundesgesetzblatt I, p. 812
⁵ Bundesgesetzblatt I, p. 2, 15
⁶ Official Journal of the European Communities L 17, 20.01.1994, p. 34

II SPECIFIC CONDITIONS OF THE EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL

1 Definition of the products and intended use

1.1 Definition of the construction products

The construction products are prefabricated tension rod systems of different sizes (system sizes) used as kits. The tension rod systems comprise metric ISO threads with thread sizes from M10 to M100 (systems 460 and 520: M10 to M100, system S460: M10 to M56). The tension rods are made of steel grade S460 (systems 460 and S460) or steel grade S520 (system 520). The tension rod systems consist of tension rods made of steel (systems 460 and 520) or stainless steel (system S460) with external threads, which are connected to each other and to the corresponding structure by special connecting devices. The tension rods are connected to the corresponding structure by steel or steel cast fork end connectors (systems 460 and 520) or stainless steel cast fork end connectors (system S460) with two eye loops and internal thread. The fork end connectors are connected by double shear pin connections to corresponding steel gusset plates (systems 460 and 520) or stainless steel gusset plates (system S460). The tension rods are connected to each other by steel (systems 460 and 520) or stainless steel (system S460) threaded sleeves (couplers or turnbuckles).

Drawings of the tension rod systems and the components as well as the essential dimensions of the components are given in the Annexes to this European technical approval.

1.2 Intended use

The tension rod systems are intended for the use in structures with predominantly static loads. Furthermore the installed tension rod systems shall be accessible (in order) to facilitate replacement of individual components at any time.

The intended use comprises for instance the suspension of roof structures or vertical glazing as well as bracing and truss structures.

The provisions made in this European technical approval are based on an assumed working life of the tension rod systems of 25 years. The indications given on the working life cannot be interpreted as a guarantee given by the producer, but are to be regarded only as a means for choosing the right products in relation to the expected economically reasonable working life of the works.

2 Characteristics of products and methods of verification

2.1 Characteristics of products

2.1.1 Dimensions

The dimensions of the components of the tension rod systems shall correspond to the drawings given in Annexes 3 to 7. The dimensions and tolerances of the components of the tension rod systems not indicated in Annexes 3 to 7 shall correspond to the respective values and information laid down in the technical documentation⁷ to this European technical approval.

2.1.2 Material properties

The material properties of the components of the tension rod systems shall correspond to the details given in Annexes 2.1 (system 460), 2.2 (system S460) and 2.3 (system 520). The material characteristics of the components of the tension rod systems not indicated in Annexes 2.1, 2.2 and 2.3 shall correspond to the respective values and information laid down in the technical documentation to this European technical approval.

⁷ The technical documentation to this European technical approval is deposited with Deutsches Institut für Bautechnik and, as far as relevant for the tasks of the approved bodies involved in the attestation of conformity procedure is handed over to the approved bodies.

2.1.3 Design values of resistance

The design value N_{Rd} of the tension resistance of the entire tension rod system (system 460, S460 or 520) is the design tension resistance $N_{Rd, \text{Tension Rod}}$ of the tension rod.

The design value shall be determined according to EN 1993-1-1:2005 and EN 1993-1-8:2005 as follows:

$N_{Rd, \text{Tension Rod}} =$	$\min \{ A \cdot f_{y,k} / \gamma_{M1}; 0.9 \cdot A_s \cdot f_{u,k} / \gamma_{M2} \}$
$A =$	minimum cross section of the unthreaded part of the tension rod
$A_s =$	cross section of the threaded part of the tension rod
$f_{y,k} = R_{p0,2}$	characteristic value of the yield strength of the tension rod
$R_{p0,2}$	$R_{p0,2}$ is given in Annexes 2.1, 2.2 and 2.3
$f_{u,k} = R_m$	characteristic value of the tensile strength of the tension rod
R_m	R_m is given in Annexes 2.1, 2.2 and 2.3
$\gamma_{M1} =$	1.1
$\gamma_{M2} =$	1.25

The values given for the partial safety factors γ_{M1} and γ_{M2} are recommended values. They should be used in cases where no values are given in national regulations of the Member State where the tension rod system is used or in the respective National Annex to Eurocode 3.

2.1.4 Safety in case of fire

The tension rod system is considered to satisfy the requirements of performance class A1 of the characteristic reaction to fire.

2.2 Methods of verification

2.2.1 General

The assessment of fitness of the tension rod systems for the intended use in relation to the requirements for mechanical resistance and stability, safety in case of fire and safety in use in the sense of the essential requirements No. 1, No. 2 and No. 4 has been made in accordance with the "Common Understanding and Assessment Procedure (CUAP) for Tension Rod System" (Final version, February 2003; ETA request No 06.02/02).

2.2.2 Essential requirement No. 2: Safety in case of fire

The tension rod systems are considered to satisfy the requirements of performance class A1 of the characteristic reaction to fire, in accordance with the provisions of EC Decision 96/603/EC (as amended) without the need for testing on the basis of its listing in that decision.

2.2.3 Essential requirement No. 1: Mechanical resistance and stability

Essential requirement No. 4: Safety in use

In order to verify that the tension resistances of the fork end connectors, couplers, turnbuckles and gusset plates are higher than the tension resistances of the corresponding tension rods and thus not relevant to the resistance of the tension rod systems, the characteristic values of the tension resistances of the couplers, turnbuckles and gusset plates were assessed by calculation according to EN 1993-1-2:2005 and EN 1993-1-8:2005 and the characteristic values of tension resistance of the fork end connectors were assessed by the evaluation of the results of tension tests. Tension tests were carried out on eight system sizes of the fork end connectors (M10, M16, M20, M30, M76, M85, M90 and M100).

The comparison of the characteristic values of resistance of the fork end connectors, couplers, turnbuckles and gusset plates with the characteristic values of resistance of the corresponding tension rods calculated according to EN 1993-1-1:2005 and EN 1993-1-8:2005 has shown that the tension resistances of the fork end connectors (including pins), couplers, turnbuckles and gusset plates are not relevant to the tension resistance of the tension rod systems. Thus it is sufficient to calculate only the tension resistance of the tension rods in order to determine the tension resistance of the tension rod systems.

3 Evaluation and attestation of conformity and CE marking

3.1 System of attestation of conformity

According to the Decision 98/214/EC of the European Commission⁸ system 2+ of the attestation of conformity applies.

This system of attestation of conformity is defined as follows:

System 2+: Declaration of conformity of the product by the manufacturer on the basis of:

- (a) Tasks for the manufacturer:
 - (1) initial type-testing of the product;
 - (2) factory production control;
 - (3) testing of samples taken at the factory in accordance with a prescribed test plan.
- (b) Tasks for the approved body:
 - (4) certification of factory production control on the basis of:
 - initial inspection of factory and of factory production control;
 - continuous surveillance, assessment and approval of factory production control.

Note: Approved bodies are also referred to as "notified bodies".

3.2 Responsibilities

3.2.1 Tasks for the manufacturer

3.2.1.1 Factory production control

The manufacturer shall exercise permanent internal control of production. All the elements, requirements and provisions adopted by the manufacturer shall be documented in a systematic manner in the form of written policies and procedures, including records of results performed. This production control system shall insure that the product is in conformity with this European technical approval.

The manufacturer may only use initial materials stated in the technical documentation of this European technical approval.

The factory production control shall be in accordance with the "Control plan of 25 October 2007 relating to the European technical approval ETA-07/0215 issued on 25 October 2007" which is part of the technical documentation of this European technical approval. The control plan is laid down in the context of the factory production control system operated by the manufacturer and deposited with Deutsches Institut für Bautechnik.⁹

The results of factory production control shall be recorded and evaluated in accordance with the provisions of the control plan.

⁸ Official Journal of the European Communities L 80 of 18.03.1998

⁹ The "control plan" is a confidential part of the European technical approval and only handed over to the approved body involved in the procedure of attestation of conformity. See section 3.2.2.

3.2.1.2 Other tasks for the manufacturer

The manufacturer shall, on the basis of a contract, involve a body which is approved for the tasks referred to in section 3.1 in the field of "Tension rod systems" in order to undertake the actions laid down in section 3.2.2. For this purpose, the control plan referred to in sections 3.2.1.1 and 3.2.2 shall be handed over by the manufacturer to the approved body involved.

The manufacturer shall make a declaration of conformity, stating that the construction product is in conformity with the provisions of the European technical approval ETA-07/0215 issued on 25 October 2007.

3.2.2 Tasks for the approved bodies

The approved body shall perform the

- initial inspection of factory and of factory production control,
 - continuous surveillance, assessment and approval of factory production control,
- in accordance with the provisions laid down in the control plan.

The approved body shall retain the essential points of its actions referred to above and state the results obtained and conclusions drawn in a written report.

The approved certification body involved by the manufacturer shall issue an EC certificate of conformity of the factory production control stating the conformity with the provisions of this European technical approval.

In cases where the provisions of the European technical approval and its control plan are no longer fulfilled the certification body shall withdraw the certificate of conformity and inform Deutsches Institut für Bautechnik without delay.

3.3 CE marking

The CE marking shall be affixed on each packaging of the tension rod system. The letters "CE" shall be followed by the identification number of the approved certification body, where relevant, and be accompanied by the following additional information:

- the name and address of the producer (legal entity responsible for the manufacture),
- the last two digits of the year in which the CE marking was affixed,
- the number of the EC certificate for the factory production control,
- the number of the European technical approval,
- the name of the product,
- the system size and type (e.g., M 36).

4 Assumptions under which the fitness of the products for the intended use was favourably assessed

4.1 Manufacturing

The European technical approval is issued for the products on the basis of agreed data/information, deposited with Deutsches Institut für Bautechnik, which identifies the product that has been assessed and judged. Changes to the product or production process, which could result in this deposited data/information being incorrect, should be notified to Deutsches Institut für Bautechnik before the changes are introduced. Deutsches Institut für Bautechnik will decide whether or not such changes affect the approval and consequently the validity of the CE marking on the basis of the approval and if so whether further assessment or alterations to the approval shall be necessary.

4.2 Installation

The installation is carried out such that the tension rod system is accessible for repair or maintenance at any time.

The installation is only carried out according to the manufacturer's instructions. The manufacturer hands over the assembly instructions to the assembler. From the assembly instructions it is followed that, prior to installation, all components of the tension rod systems shall be checked for their perfect condition and that damaged components shall not be used.

The fork end connectors are not subjected to sudden or impact loads (for instance pins of fork end connectors may not be adjusted by hammer blows).

The minimum thread engagement is marked in an appropriate way. The keeping of the minimum thread engagements given in Annexes 3 (fork end connectors), 6 and 7 (couplers and turnbuckles) is checked by the assembler. How to do this is described in the assembly instructions.

The conformity of the installed tension rod system with the provisions of the ETA is attested by the executing assembler.

4.3 Design

The loading is predominantly static.

Dimensions, material properties and the thread engagement as stated in the ETA are observed.

The tension rod systems are not subjected to systematic bending.

The verification concept stated in EN 1990:2002 as well as the values of resistance stated in 2.1 are used for design.

The rules given in ENV 1090-1:1996, EN 1993-1-4:2006 and EN ISO 12944:1998 are taken into account.

Design is carried out by the designer of the structure experienced in the field of steel structures.

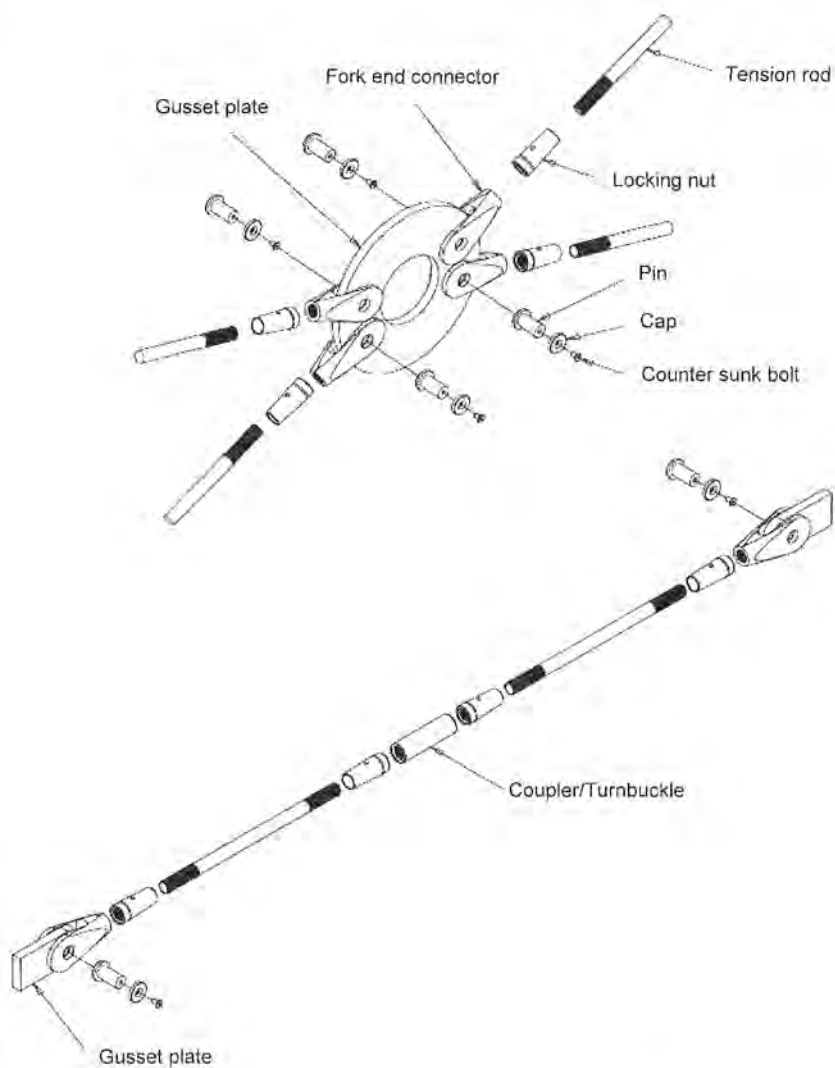
5 Indications to the manufacturer

The manufacturer shall ensure that the information on the specific conditions according to 1, 2, 4.2 and 4.3 (including Annexes referred to) is given to those who are concerned. This information may be given by reproduction of the respective parts of the European technical approval. In addition all essential installation data (e.g., minimum thread engagement according to Annexes 3, 6 and 7) shall be shown clearly on the package and/or on an enclosed instruction sheet, preferably using illustration(s).

The prefabricated tension rod system shall be packaged and delivered as a complete unit only (tension rods, fork end connectors incl. pins, turnbuckles and couplers).

Dipl.-Ing. Erich Jasch
President of Deutsches Institut für Bautechnik
Berlin, 25 October 2007

beglaubigt:
Dr.-Ing. Hothan



MACALLOY Tension Rod Systems 460, S460 and 520

System, Components

Annex 1

to European
 Technical Approval

ETA-07/0215

Component	Annex	System Size	Material	Techn. Delivery Condition	Mechanical Properties (Minimum Values)	
			Material or Steel grade		Yield strength $R_{p0.2}$ [N/mm ²]	Tensile strength R_m [N/mm ²]
Fork end connector	3	M10 to M100	steel cast A4	acc. to technical documentation ¹⁾	335	600
		M20 to M56	S355J2G3	acc. to technical documentation ¹⁾ , EN 10250-2:1999	380 ³⁾	550
Pin	4.1	M10 to M100	8.8	acc. to technical documentation ¹⁾	640	800
Tension rod Coupler	3 7	M10 to M100	S460	acc. to technical documentation ¹⁾	460	610
Turnbuckle	6					
Gusset plate	5	M10 to M100	≥ S355 ²⁾	EN 1993-1-1:2005	EN 1993-1-1:2005	

¹⁾ The technical documentation is deposited at Deutsches Institut für Bautechnik and contains specifications for the chemical composition as well as values for the elongation after fracture A_5 and the Charpy impact value ISO-V

²⁾ At least steel grade S355 or higher strength (acc. to EN 1993-1-1:2005).

³⁾ R_e

MACALLOY Tension Rod System 460

Material properties of steel/steel cast components
 (M10 to M100)

Annex 2.1
 to European
 Technical Approval
 ETA-07/0215

Component	Annex	System Size	Material	Techn. Delivery Condition	Yield strength $R_{p0.2}$ [N/mm ²]	Mechanical Properties (Minimum Values) Tensile strength R_m [N/mm ²]
Fork end connector	3	M10 to M56	stainless steel cast 4A	acc. to technical documentation ¹⁾	335	600
Pin	4.2	M10 to M24	316S11	acc. to technical documentation ¹⁾	640	800
			316S13			
			316S31			
			316S33			
Tension rod Coupler Turnbuckle	3 7 6	M30 to M56	1.4462	EN 10088-3:2005	835	1030
			7M			
			316S11			
			316S13			
			316S31			
			316S33			
Gusset plate	5	M10 to M56	1.4460	EN 10088-3:2005	460	610
			1.4462			
			1.4507			
			$\geq S355$ ²⁾			
¹⁾ The technical documentation is deposited at Deutsches Institut für Bautechnik and contains specifications for the chemical composition as well as values for the elongation after fracture A_5 and the Charpy impact value ISO-V.						
²⁾ At least stainless steel grade S355 or higher strength						
MACALLOY Tension Rod System S460					Annex 2.2 to European Technical Approval ETA-07/0215	
Material properties of stainless steel/stainless steel cast components (M10 to M56)						

Component	Annex	System Size	Material	Techn. Delivery Condition	Mechanical Properties (Minimum Values)	
			Material or Steel grade		Yield strength $R_{p0.2}$ [N/mm ²]	Tensile strength R_m [N/mm ²]
Fork end connector	3	M10 to M100	steel cast A4	acc. to technical documentation ¹⁾	335	600
Pin	4.1	M10 to M16	8.8	acc. to technical documentation ¹⁾	665	800
		M20 to M100	8.8	acc. to technical documentation ¹⁾	685	882
Tension rod Coupler Turnbuckle	3 7 6	M10 to M100	S520	acc. to technical documentation ¹⁾	520	690
Gusset plate	5	M10 to M100	≥ S355 ²⁾	EN 10025-1:2005	EN 10025-1:2005	

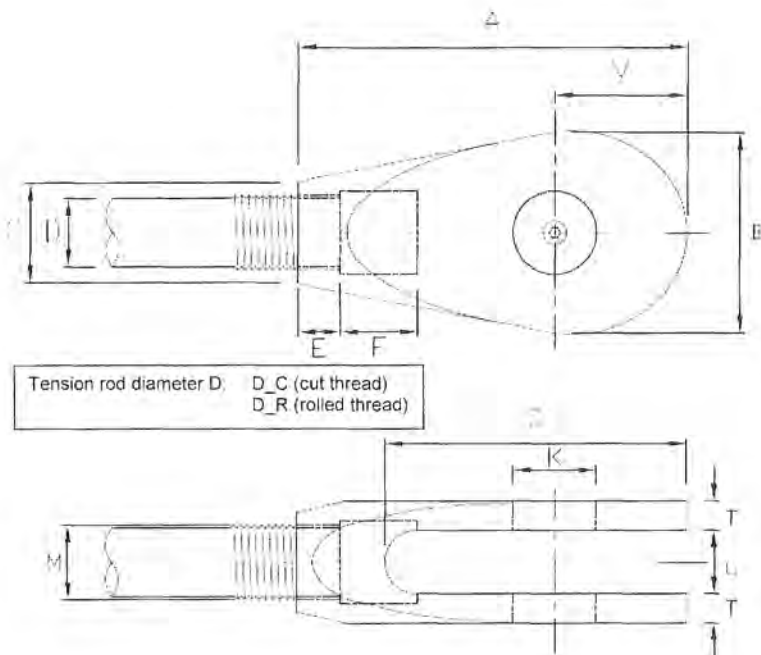
¹⁾ The technical documentation is deposited at Deutsches Institut für Bautechnik and contains specifications for the chemical composition as well as values for the elongation after fracture A_5 and the Charpy impact value ISO-V.

²⁾ At least steel grade S355 or higher strength (acc. to EN 10025-1:2005).

MACALLOY Tension Rod System 520

Material properties of steel/steel cast components
(M10 to M100)

Annex 2.3
to European
Technical Approval
ETA-07/0215



thread (M)	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M76	M85	M90	M100
A (mm)	63	75	99	122	148	178	204	232	266	314	348	410	459	489	555
B (mm)	30	34	45	53	64	81	93	109	123	147	169	201	236	248	289
C (mm)	17	19	25	29	35	44	52	60	69	80	91	108	121	129	143
D_C (mm)	10	12	16	20	24	30	36	42	48	56	64	76	85	90	100
D_R (mm)	10	11	15	19	22	28	34	39	44	52	60	72	82	87	97
E (mm)	12	14	18	24	27	32	38	44	50	58	66	78	87	92	102
F (mm)	8	10	14	16	22	28	34	41	46	55	49	49	49	49	49
G (mm)	11	12	15	19	24	26	34	39	44	49	59	76	78	86	91
K (mm)	11.5	13	17	21.4	25.5	31.5	37.5	43.5	49.5	57.5	65.5	78.5	91.5	96.5	111.5
S (mm)	46	54	70	85	104	127	148	167	191	227	259	309	349	374	430
T (mm)	4	4.5	6	8.5	9.5	11.5	14.5	17.5	21	23.5	27.5	34.5	37	41	41
V (mm)	18	22	29	34	42	53	61	70	81	97	111	132	153	162	188

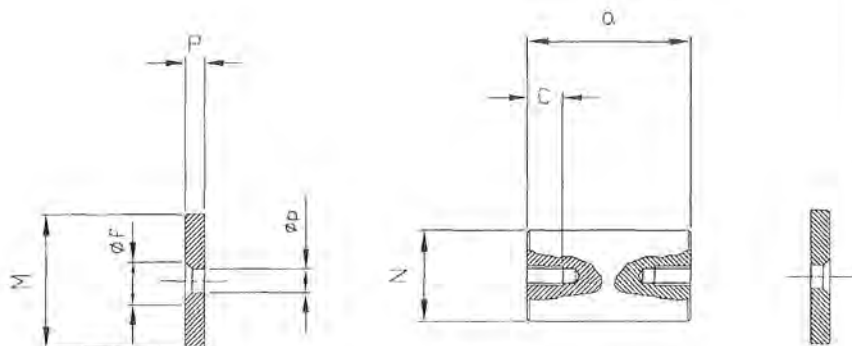
MACALLOY Tension Rod Systems 460, S460 and 520

Dimensions of fork end connectors
 Systems 460 and 520 (M10 to M100); System S460 (M10 to M56)

Annex 3

to European
 Technical Approval

ETA-07/0215



thread (M)	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M76	M85	M90	M100
bolt	10	10	10	18	18	10	18	20	25	25	25	25	25	25	25
a (mm)	22	24	30	39	46	52	66	78	91	100	120	151	158	175	180
c (mm)	7	7	7	12	12	12	12	14	18	18	18	18	18	18	18
Ø f (mm)	9	9	11.2	13.4	13.4	13.4	13.4	17.9	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4
M (mm)	15	18	24	28	31	40	45	55	65	75	85	95	105	110	120
N (mm)	10.5	12	16	20	24	29	35	41	47	54.5	62.5	75.5	89	93	108
P (mm)	4	4	4	5	5	5	5	8	10	10	10	10	10	10	10
Ø p (mm)	4.5	4.5	5.5	6.5	6.5	6.5	6.5	9	12	12	12	12	12	12	12

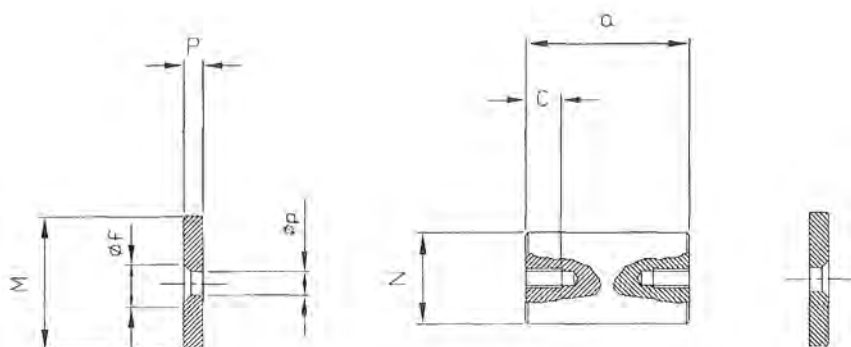
MACALLOY Tension Rod Systems 460 and 520

Dimensions of pins
 Systems 460 and 520 (M10 to M100)

Annex 4.1

to European
 Technical Approval

ETA-07/0215



thread (M)	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56
bolt	10	10	10	16	16	16	16	20	25	25
a (mm)	22	24	30	39	46	52	66	78	91	100
c (mm)	7	7	7	12	12	12	12	14	18	18
f (mm)	9	9	11.2	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	22.4	22.4
M (mm)	15	18	24	28	31	40	45	55	85	75
N (mm)	11	12.5	16.5	20.5	24.5	30	36	42	49	56
P (mm)	4	4	4	5	5	5	5	8	10	10
p (mm)	4.5	4.5	5.5	6.5	8.5	6.5	6.5	9	12	12

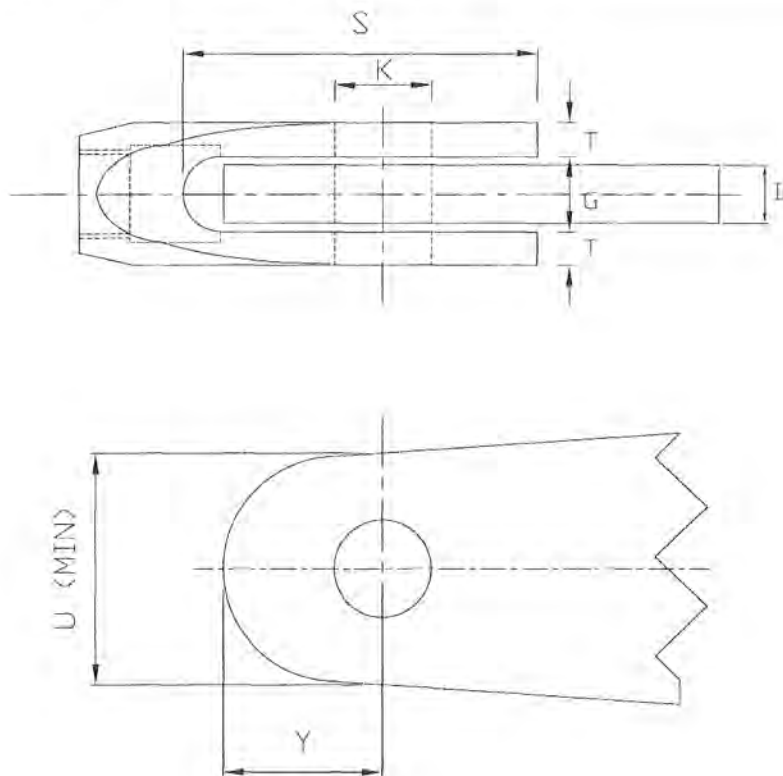
MACALLOY Tension Rod System S460

Dimensions of pins
 System S460 (M10 to M56)

Annex 4.2

to European
 Technical Approval

ETA-07/0215



hread (M)	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M35	M42	M48	M56	M64	M75	M85	M90	M100
D (mm)	10	10	12	15	20	22	30	35	40	45	55	70	70	80	85
G (mm)	11	12	15	19	24	25	34	39	44	46	59	76	78	86	91
K (mm)	11.5	13	17	21.4	25.5	31.5	37.5	43.5	49.5	57.5	65.5	78.5	91.5	98.5	111.5
S (mm)	46	54	70	85	104	127	148	187	191	227	259	309	349	374	430
T (mm)	4	4.5	6	8.5	9.5	11.5	14.5	17.5	21	23.5	27.5	34.5	37	41	41
U (mm)	29	34	48	60	69	90	103	116	135	163	180	211	259	266	317
Y (mm)	19	22	30	37	43	58	64	74	84	101	112	132	160	166	196

MACALLOY Tension Rod Systems 460, S460 and 520

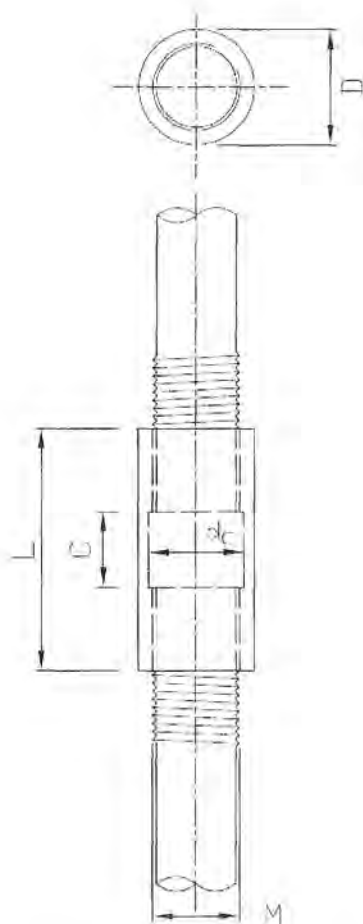
Dimensions of gusset plates

Systems 460 and 520 (M10 to M100); System S460 (M10 to M56)

Annex 5

to European
Technical Approval

ETA-07/0215



thread (M)	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M75	M85	M90	M100
d_s (mm)	12	14	18	22	26	32	36	44	50	58	66	78	87	92	102
C (mm)	50	50	50	50	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
D (mm)	17	19	25	29	35	43	52	60	68	80	91	108	121	129	143
L (mm)	74	78	86	90	98	150	172	184	196	212	228	252	270	280	300

MACALLOY Tension Rod Systems 460, S460 and 520

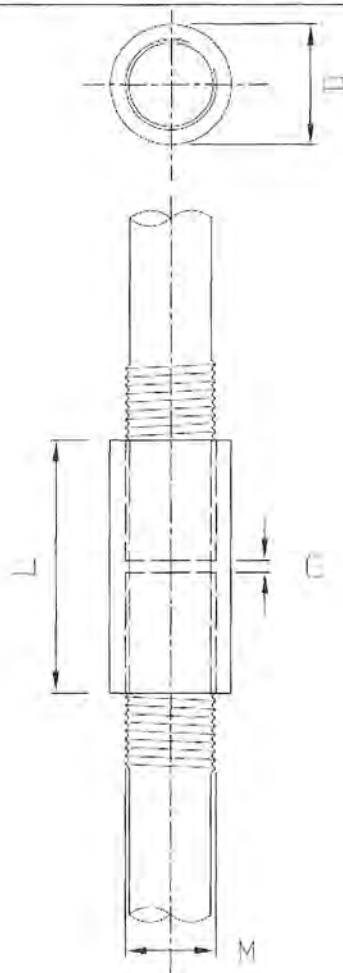
Annex 6

to European
Technical Approval

Dimensions of turnbuckles

Systems 460 and 520 (M10 to M100); System S460 (M10 to M56)

ETA-07/0215



thread (M)	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M75	M85	M90	M100
D (mm)	17	19	25	28	35	43	52	60	68	80	91	108	121	129	143
G (mm)	$1 \leq G \leq 5$														
L (mm)	25	29	37	45	53	65	77	89	101	117	133	157	175	185	205

MACALLOY Tension Rod Systems 460, S460 and 520

Dimensions of couplers

Systems 460 and 520 (M10 to M100); System S460 (M10 to M56)

Annex 7

to European
Technical Approval

ETA-07/0215

Fußgängerbrücke Walverdang,
Luxembourg
Contractor: Bohlen AG, Speicher



Clarke Quay, Singapore
Contractor: Hightex GmbH

Treetop Walkway
at Lough Key Forest Park
Co. Roscommon, Republic of Ireland



Macalloy, Caxton Way, Dinnington, Sheffield S25 3QE, U.K.

Tel: +44 1909 519200. Fax: +44 0190 519201

Web site: www.macalloy.com Email: sales@macalloy.com

Anexo 4

Póster de EUROCORR y documento presentado

Este documento contiene el póster elaborado para el congreso anual EUROCORR titulado “STUDY OF THE PITTING CORROSION EVOLUTION OF STAINLESS STEEL STRUCTURES IN MARINE ENVIRONMENTS BY FINITE ELEMENT MODELING” y el documento presentado en el mismo.

Anexo 4

Este documento contiene el póster elaborado para el congreso anual EUROCORN titulado “STUDY OF THE PITTING CORROSION EVOLUTION OF STAINLESS STEEL STRUCTURES IN MARINE ENVIRONMENTS BY FINITE ELEMENT MODELING” y el documento presentado en Estoril (Portugal) en 2013. El poster fue presentado por la directora de este Proyecto Fin de Carrera M.V. Biezma con los resultados obtenidos durante los 5 primeros meses de estudio.

Este póster ha sido recientemente galardonado por la Sociedad Española de Materiales con el primer premio.

STUDY OF THE PITTING CORROSION EVOLUTION OF STAINLESS STEEL STRUCTURES IN MARINE ENVIRONMENTS BY FINITE ELEMENT MODELING

Biezma M. V. (biezmau@unican.es), Prieto, A., Universidad de Cantabria, Santander, Spain.



INTRODUCTION AND AIMS

There are a lot of metallic components prone to experiment pitting corrosion. The electrochemical parameters are well defined since is associated to a local break of protective layer. In service conditions appear a lot of variables very difficult to control in order to measure with high precision the pitting corrosion parameters, so it must be necessary use stochastic or probabilistic tools to do it.

The aim of work is to present the results of accelerated pitting corrosion evolution of an austenitic stainless steel employed in the bridge lock covers, by marine environment and the west winds predominant action. It has been employed Finite Element Modeling. So, this model would be useful to do prediction about the future evolution of size and number of pits on metallic surface, considering that in some instances the pits have disappeared with a coalescence mechanism forming cracks.



METHODOLOGY. Visual inspection

Lock cover's selection in a random way in order to determine of pitting attack evolution

in situ observation sequence (5 months)

Location (west and east)

Measure of diameter pits and pits density (ASTM G 46-94)

Type of pits observed:

N, Initiation (news)

D, Developed (growth)

C, Coalescence / consequence of cooperative interactions between neighbors pits
where? Stressed areas of lock covers (conical center line). Similar to a rectangle defect



CRACKS

RESULTS AND ANALYSIS: The general data of pitting attack is defined by the equations:

$$\zeta = \frac{(N \cdot r_N^2 + D \cdot r_D^2)}{r^2 \cdot K} \cdot f(t)$$

$$f(t)_{\text{Jan}} = 2.1778 + 0.0123 \cdot t + 0.00084 \cdot t^2 \quad f(t)_{\text{May}} = 0.9625 + 0.0315 \cdot t + 0.006 \cdot t^2$$

$$C_{\text{Jan}} = \frac{(N \cdot r_N^2 + D \cdot r_D^2)}{r^2 \cdot K} \cdot (2.1778 + 0.0123 \cdot t + 0.00084 \cdot t^2)$$

$$C_{\text{May}} = \frac{(N \cdot r_N^2 + D \cdot r_D^2)}{r^2 \cdot K} \cdot (0.9625 + 0.0315 \cdot t + 0.006 \cdot t^2)$$

Wherein:

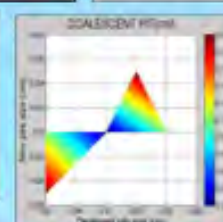
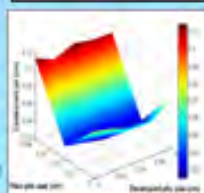
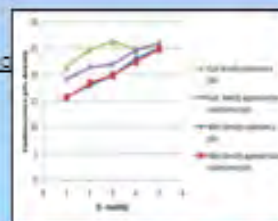
t = time in months

C = Coalescence pits density; rC = Coalescence pits average radius (0.0335 cm)

N = New pits density; rN = New pits average radius (0.015 cm)

D = Developed pits density; rD = Developed pits average radius (0.0345 cm)

K = Corrosion correlation = 0.849s



The coalescence pits mechanism could be independent to the new pits sizes. The more unlikely conditions to form coalesce pits, so, cracks, have been produced with diameter of 0.03 and 0.07 cm for N and D pits respectively

General vision of the different types pits sizes

CONCLUSIONS: In situ observation on the evolution pitting corrosion of a bridge lock cover has permitted established a general model of pitting attack pointing out the need to identify in a clear way the new, developed and crack pits. Nevertheless, it is very difficult to simulate the real process of pit nucleation and growth pitting since can appear variables out of control. In such cases, linked with manufacture. Because the nucleation and growth pits processes are of stochastic nature, the time-to-pits coalescence is modeled as a random variable that can be characterized by a suitable reliability model that is characterized by a parabolic law with a correlation corrosion factor. So, perhaps, this work could help to advance in the complex phenomenon of pitting corrosion.

Study of the pitting corrosion evolution of stainless steel structures in marine environments by Finite Element Modeling.

Biezma, M., Prieto, A. University of Cantabria, Santander/ Spain

Summary

There are a lot of metallic components prone to experiment pitting corrosion. The electrochemical parameters are well defined since supposes a local rupture of passive layer when the tests are developed at laboratory. In service conditions appear a lot of variables very difficult to control in order to measure with high precision the pitting rate, so it must be necessary use stochastic or probabilistic tools to do it.

The aim of this paper is present the results of the study of pitting evolution attack of an austenitic stainless steel employed in lock cover of a bridge wherein pass as cars such as people located very near to the sea and by the west winds predominant action. It has been employed a Finite Element Modeling. So, this model would be capable of simulating pitting corrosion in this material and could be used to do prediction about the future evolution of the size and number of pits on metallic surface, considering that in some instances the pits has disappeared with a coalescence mechanism forming cracks. The main conclusion is that the model helps us to do a most safe design of the critical part of the bridge.

Key words: pitting corrosion, stainless steel, bridge, modeling

1 Introduction

Pitting corrosion is a very insidious phenomenon since is difficult to determine its evolution in situ. The measures take account at lab are defined by Norms, but in service conditions appear a lot of variables very difficult to control in order to measure with high precision the pitting rate, so it must be necessary use stochastic or probabilistic tools to do it [1-5]. The origin of pitting corrosion is due to a local rupture of passive layer and the propagation sometimes is out of control since there are very important metallurgical, electrochemical, microstructural and stress conditions that can stop or accelerate the process [6]. The particular case of pitting corrosion of stainless steels is known to be strongly influenced by a variety of internal factors such as composition, microstructure of the steel as well as external parameters, e.g., chemistry, pH, temperature of the environment.

The aim of this paper is present the results of the study from the in situ observations on the pitting evolution attack suffered by a stainless steel employed in lock cover of a bridge wherein pass as cars as people located very near to the sea and by the west predominant winds action. It has been employed a Finite Element Modeling that would be capable of simulate the most critical points of pitting corrosion, so, could be used to make prediction about

the future evolution of attack degree, considering that the pits can disappear by a coalescence mechanism forming cracks. In this way, the model helps us to do a most safe design of the critical part of the bridge.

2 Methodology

This section will present the idea background to do this study. Las Llamas Bridge, Figure 1 a) is located very near of the Cantabric Sea, Santander, Spain, wherein appeared pitting accelerated corrosion at the lock cover bridge, Figure 1 b). The average traffic is 813 per hour. Since considering the in situ continuous observations was surprising, so it was the key to study the pitting corrosion evolution of this metallic element, with a conical design.



Figure 1: a) Las Llamas Bridge b) lock cover with pitting attack

2.1 Material

The chemical composition and mechanical properties of the stainless steel AISI 316 lock cover is presented in Table 1.

Table 1: Chemical composition and mechanical properties AISI steel (Fe bal)

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	(MPa)	
0,076	0.534	0.474	0.025	0.005	16.487	10.411	2.224	σ_y	>205
								UTS	>520
								% ϵ	>40

2.2 Tests

The lock covers have been selected in a statistical way in order to determine the evolution of pitting attack. The first variable taken account was the position, so, west and east since the location of the bridge is by the west action winds in deep. The second variable was the sequence of in situ observation in order to

collect data during five months to measure the diameter and density of pits using the Norm ASTM G 46-94 [7].

3 Results and Analysis

Taking account the eye resolutions and lens x3 observation we can define three types of pits: initiation or news, N, growth or developed, D, and coalescence, C. Last ones are consequence of cooperative interactions between neighbors pits and have produced cracks at more stressed zones of the lock cover (conical center line) in some instances. It is necessary point out that the coalescence pits are formed by a lot of pits, similar to a rectangle defect. The Figure 2 presents a general view the different types of pits.



Figure 2: Different types of pits

The general data of pitting attack are defined by the following equations:

$$C = \frac{(N \cdot r_N^2 + D \cdot r_D^2)}{r_C^2 \cdot K} \cdot f(t) \quad (1)$$

$$f(t)_{East} = 1.1778 + 0.0123 \cdot t + 0.00084 \cdot t^2 \quad (2)$$

$$f(t)_{West} = 0.9625 + 0.0315 \cdot t + 0.006 \cdot t^2 \quad (3)$$

$$C_{East} = \frac{(N \cdot r_N^2 + D \cdot r_D^2)}{r_C^2 \cdot K} \cdot (1.1778 + 0.0123 \cdot t + 0.00084 \cdot t^2) \quad (4)$$

$$C_{West} = \frac{(N \cdot r_N^2 + D \cdot r_D^2)}{r_C^2 \cdot K} \cdot (0.9625 + 0.0315 \cdot t + 0.006 \cdot t^2) \quad (5)$$

Wherein:

t = time in months

C= Coalescence pits density; r_C = Coalescence pits average radius (0.0555 cm)

N = New pits density; r_N = New pits average radius (0.015 cm)

D = Developed pits density; r_D = Developed pits average radius (0.0345 cm)

K = Corrosion correlation= 0.8496

Figure 3 shows the evolution of coalescence pits density considering east and west orientation as in situ data such as approximation using above equations.

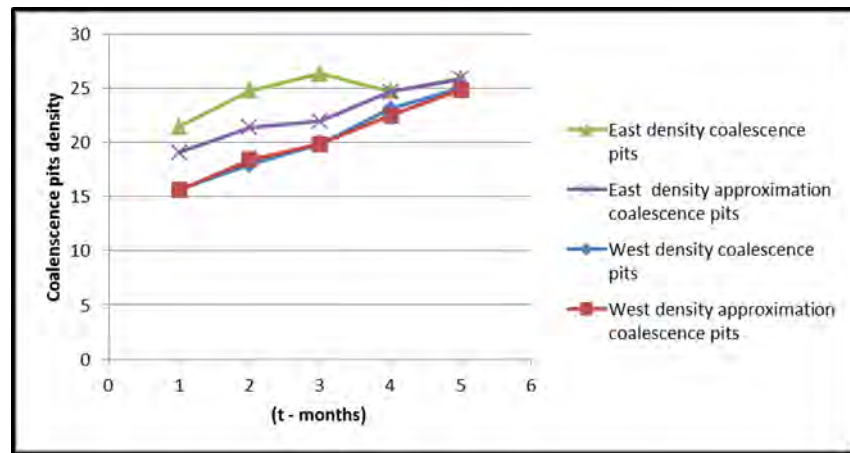


Figure 3: Evolution of coalescence pits density (east and west orientation)

So, the analysis has point out that pitting corrosion is treated as a time dependent stochastic damage process characterized by an exponential or logarithmic pit growth in the sense previously observed [8], involving the four variables, N, D, C and t. It is necessary point out the effect of east and west position of lock cover. The area percentages of west lock cover attack in relation to different types of pits are showed in Figure 4, wherein reflects increases of 50%, 18% and 60% for N, D and C pits from January to May respectively

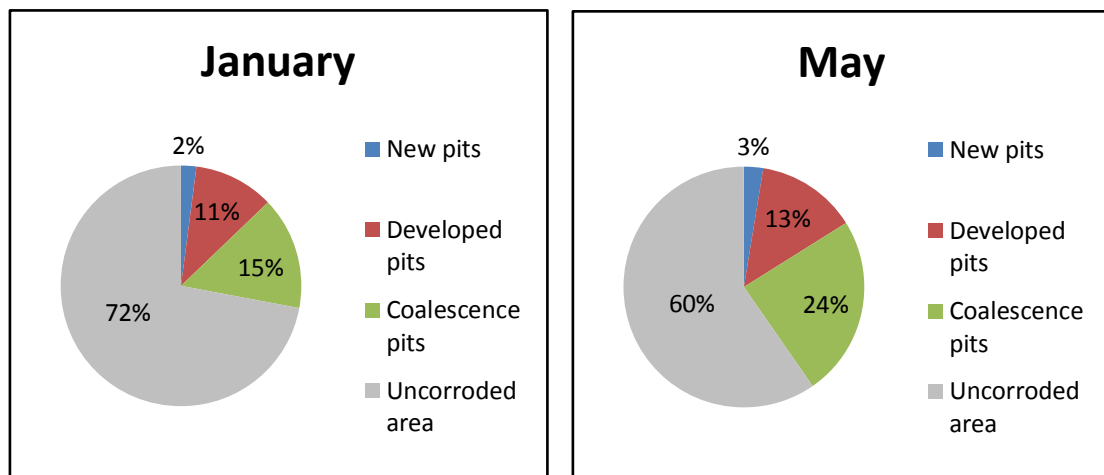


Figure 4: Percentage evolution of different types of pits (west part)

The FEM has permit elaborate a general vision of the distribution of the different size pit types, Figure 5. The coalescence pits are more prone to form with little as big new pits sizes. The last case needs the cooperative presence of developed pitting big size. The more unlikely conditions to form coalesce pits,

so, cracks, have been produced with diameter of 0.03 and 0.07 cm for N and D pits respectively.

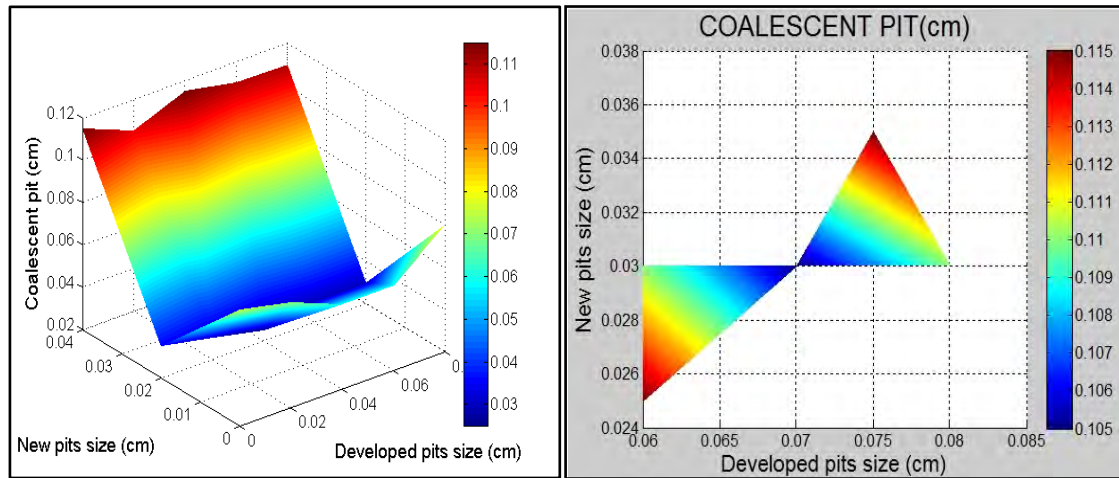


Figure 5: FEM of lock cover pitting

3 Conclusions

From the in situ observations on the evolution pitting corrosion of a bridge lock cover has been established advance in the complex phenomenon of pitting corrosion. Nevertheless, it is very difficult to simulate the real process of pit nucleation and growth pitting since can appear variable out of control, in such cases, linked with manufacture. Because the nucleation and growth pits processes are of stochastic nature, the time-to-pits coalescence is modeled as a random variable that can be characterized by a suitable reliability model that is characterized by a parabolic law with a correlation corrosion factor.

4 References

- [1] G. Engelhardt, D.D. Macdonald, Deterministic Prediction of Pit Depth Distribution, Corrosion 54 (1998) 469
- [2] P. Ernst, N.J. Laycock, M.H. Moayed, R.C. Newman, The mechanism of lacy cover formation in pitting, Corros. Sci. 39 (1997) 1133
- [3] J. W. Provan, E. S. Rodriguez Part I: Development of a Markov Description of Pitting Corrosion. Corrosion 45 (1989) 178
- [4] N.J. Laycock, S.P. White, J.S. Noh, P.T. Wilson, R.C. Newman, Perforated covers for propagating pits, J. Electrochem. Soc. 145 (1998) 1101
- [5] A. Valor, F. Caleyó, L. Alfonso, D. Rivas, J.M. Hallen, Stochastic modeling of pitting corrosion: A new model for initiation and growth of multiple corrosion pits, Corros. Sci. 49 (2007) 559
- [6] N.J. Laycock, J.S. Noh, S.P. White, D.P. Krouse, Computer simulation of pitting potential measurements, Corros. Sci. 47 (2005) 3140
- [7] ASTM G46 - 94(2005) Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion
- [8] A. K. Sheikh, J. K. Boah, and D. A. Hansen (1990) Statistical Modeling of Pitting Corrosion and Pipeline Reliability, Corrosion, 46 (1990) 190

