

CORRIENTES INDUCIDAS PULSADAS (PEC) Y OTRAS TÉCNICAS

Evaluación No Destructiva y Calidad en Estructuras

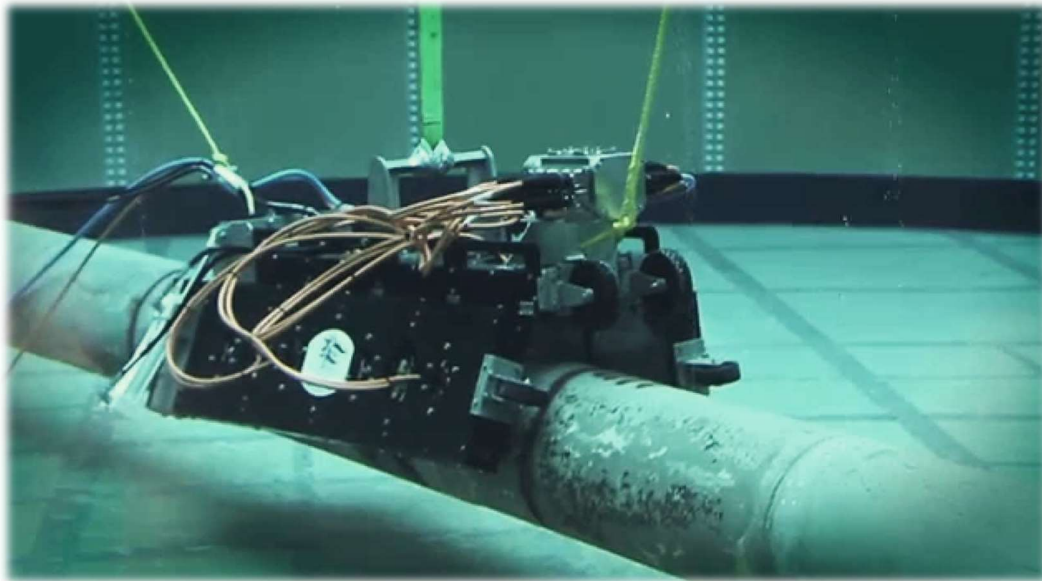
Autores:

Stefano Garritano Leccese

Alberto Espinel Peña

Aarón Batista Martín

Claudia Labrador Yumar



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

ÍNDICE

1. CORRIENTES INDUCIDAS PULSADAS (CORRIENTES PEC)	4
1.1. INTRODUCCIÓN	4
1.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	4
1.3. VENTAJAS RESPECTO A OTROS MÉTODOS	5
1.4. ESPECTROS Y PULSOS DE LA PEC	6
1.5. SISTEMAS DEL PEC	8
1.5.1. SEÑALES DE EXCITACIÓN	8
1.5.2. SONDAS	9
1.6. APLICACIONES DEL MÉTODO PEC	11
1.6.1. MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y PERMEABILIDAD MAGNÉTICA	11
1.6.2. MEDICIÓN DEL ESPESOR DE AISLAMIENTO Y REVESTIMIENTO	11
1.6.3. MEDICIÓN DE ESPESORES Y EVALUACIÓN DE CORROSIÓN	12
1.6.4. DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DEFECTOS	12
1.7. TÉCNICA RTD INCOTEST	13
1.7.1. ¿A QUIÉN VA DIRIGIDO?	13
1.7.2. VENTAJAS	14
1.7.3. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA	15
1.7.4. APLICACIONES	15
2. OTRAS TÉCNICAS INNOVADORAS	16
2.1. MONITORIZACIÓN ONLINE DEL FRAGUADO DEL HORMIGÓN EN TIEMPO REAL (MONSEC)	16
2.1.1. INTRODUCCIÓN	16
2.1.2. SISTEMA	16
2.1.3. AUTOMATIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE SENSORES Y ESTACIÓN	17
2.1.4. SENSORES	17
2.1.5. Monsec Station	17
2.1.6. CONFIGURACIÓN MEDIANTE UNA APP	18
2.1.7. PRESENTACIÓN DE PARÁMETROS CLAVE EN TIEMPO REAL	18

2.1.8.	VENTAJAS	19
2.2.	SISTEMA AUTÓNOMO PARA EL CONTROL Y EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO (CORROCHIP)	19
2.2.1.	INTRODUCCIÓN	19
2.2.2.	ENEMIGO DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	19
2.2.3.	SISTEMA	20
2.2.4.	TÉCNICA INNOVADORA	20
2.2.5.	ENVÍO DE DATOS A LA NUBE	21
2.2.6.	SERVICIO 360°	21
2.2.7.	PROYECTOS QUE ESTÁN EMPLEANDO CORROCHIP	22
2.3.	MONITORIZACIÓN ACTIVA EN REMOTO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE TALUDES Y CONTRA DESPRENDIMIENTOS (ROCKCHIP)	24
2.3.1.	INTRODUCCIÓN	24
2.3.2.	VERSATILIDAD Y FIABILIDAD	25
2.3.3.	INTEGRABLE EN LAS ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN DE TALUDES	25
2.3.4.	MONITORIZACIÓN Y VIGILANCIA MEDIANTE SENSORES INTEGRADOS	25
2.3.5.	MONITORIZACIÓN Y VIGILANCIA MEDIANTE SENSORES INTEGRADOS	25
2.3.6.	COMPONENTES DEL SISTEMA	26
2.3.7.	PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN	27
3.	BIBLIOGRAFÍA	27

1. CORRIENTES INDUCIDAS PULSADAS (CORRIENTES PEC)

1.1. INTRODUCCIÓN

Las pruebas y evaluaciones no destructivas (NDT&E, por sus siglas en inglés) de corrientes inducidas de Foucault pulsadas (PEC, por sus siglas en inglés), se han propuesto y reportado en la literatura diversas aplicaciones de esta técnica que abarcan tanto la inspección de integridad estructural como la caracterización de materiales, tales como tuberías, o en diversos sectores industriales.

A pesar de su larga investigación, el PEC todavía es considerada por muchos como una nueva técnica emergente. Atrayendo la atención de investigadores de todo el mundo, como China, Reino Unido, Canadá, Portugal, EE. UU., Corea del Sur, Japón, Francia, Eslovaquia, Polonia e Italia.

Con este trabajo se consigue recoger el desarrollo y las aplicaciones de vanguardia de PEC, especialmente en los últimos 15 años.

1.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El equipo genera un campo magnético por medio de una bobina transmisora que se encuentra en el sensor, dicho campo atraviesa el aislamiento y cuando llega a la superficie a inspeccionar crea corrientes Eddy en el componente a inspeccionar, esas corrientes son captadas por una bobina receptora que se encuentra en el sensor que se está utilizando.

Una vez que recibe las corrientes mencionadas en el módulo de análisis este mide el tiempo en que tardan en desaparecer las mismas y en base a ciertos algoritmos programados en la unidad de evaluación, nos muestra en la pantalla el porcentaje del material que existe en la parte inspeccionada (huella).

En la siguiente ilustración se muestra cómo se propaga el campo magnético y se generan las corrientes Eddy.

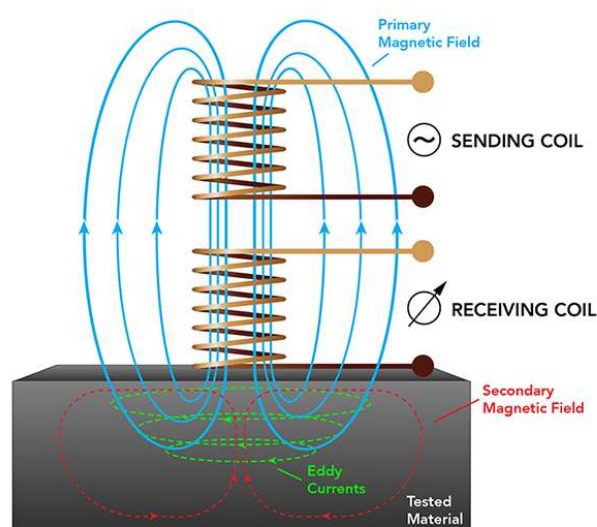


Imagen 1 -Propagación del campo magnético.

En caso de inspeccionar piezas en forma de anillo, es factible recurrir a la técnica de partículas magnéticas, induciendo una corriente eléctrica a la pieza que a su vez produce un campo magnético.

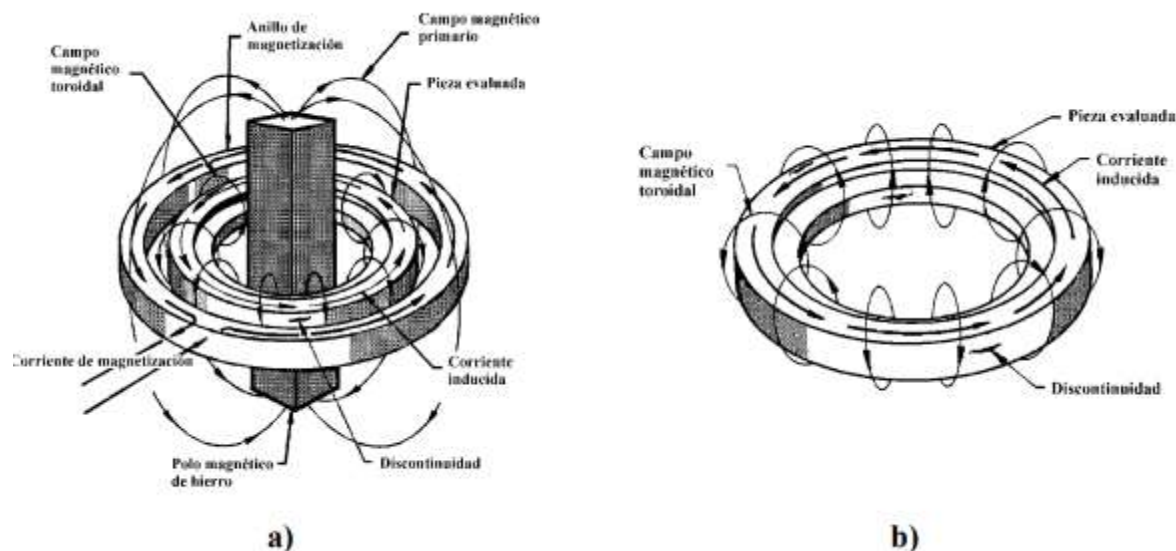


Imagen 2 - Método de inducción eléctrica para la magnetización de un anillo; a) Forma de magnetización; b) Corriente inducida, y campo magnético toroidal resultantes.

Para lograrlo se utiliza un anillo externo que genere un campo magnético primario mediante una corriente eléctrica de magnetización que fluye por el mismo (imagen 2.a). A su vez, el campo magnético primario induce en la pieza que se va a inspeccionar una corriente eléctrica que provoca un campo magnético toroidal secundario (imagen 2.b). La homogeneidad del campo magnético secundario permite detectar los defectos en dirección circunferencial al anillo. Otra gran ventaja, es que no existe contacto eléctrico directo sobre la pieza, reduciendo el riesgo de daño.

1.3. VENTAJAS RESPECTO A OTROS MÉTODOS

La cantidad de atención que ha estado recibiendo PEC NDT&E se debe a los beneficios potenciales clave que ofrece. La primera y principal ventaja es que, en comparación con la ECT (Eddy Current Testing) de frecuencia única, la PEC tiene inherentemente una banda ancha de frecuencias, lo que es ventajoso para cualquier técnica de NDT&E basada en corrientes parásitas debido al efecto de piel dependiente de la frecuencia. Otro beneficio es que las señales PEC son relativamente más fáciles de interpretar, mientras que para el ECT convencional se requiere de habilidad especial de los operadores para interpretar las señales que se presentan en la trayectoria del plano de impedancia.

La ECT convencional solo aplica una frecuencia única para la excitación, lo que hace que no pueda detectar defectos superficiales y subterráneos de manera confiable. La técnica mejorada es la ECT multifrecuencia que aplica diferentes frecuencias de excitación, una tras otra. En comparación con la

ECT multifrecuencia, la PEC se puede aplicar potencialmente en un tiempo más corto para la inspección de diferentes profundidades, ya que se aplica a una banda ancha de frecuencias en un solo pulso, esto permite reducir al mínimo el tiempo de medida en función de las características de la muestra.

La figura 1 proporciona la ilustración de las formas de onda de excitación de cada uno de los métodos.

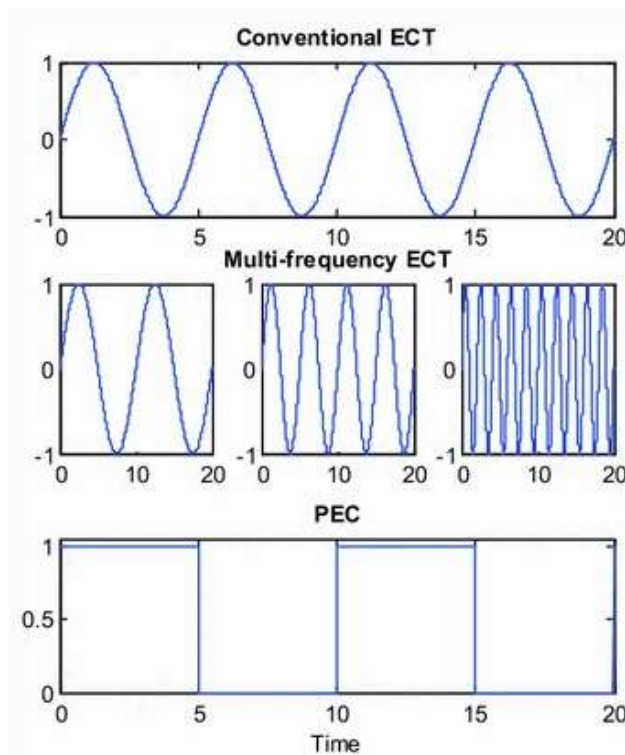


Imagen 3 - Forma de ondas de excitación para diferentes técnicas de END.

Al igual que otras técnicas de ECT, en general, PEC no requiere preparación de la superficie, lo que reduce el tiempo de inspección y mejora la eficiencia de costos. La inspección también se puede realizar sin interrumpir el funcionamiento o el servicio de la estructura que se está probando, a diferencia de, por ejemplo, las pruebas de rayos X. En muchas aplicaciones en las que se recubre la muestra, no es necesario quitar el recubrimiento cuando se usa ECT NDT&E. Cualquier sistema de corrientes de Foucault es relativamente rentable y confiable.

1.4. ESPECTROS Y PULSOS DE LA PEC

La penetración y la densidad de la corriente de Foucault en la muestra es un tema importante en cualquier técnica de evaluación no destructiva. La penetración está limitada por el efecto piel, que hace que su densidad disminuya exponencialmente con la profundidad. La profundidad a la que la densidad se ha reducido a $1/e$ de la densidad en la superficie se denomina profundidad de piel δ y se define por la siguiente formula 1.

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

Fórmula 1 - Densidad en la superficie.

Donde δ es la profundidad de la piel (m), μ es la permeabilidad magnética (H/m), σ es la conductividad eléctrica (S/m) y ω es la frecuencia angular (rad/s).

La ecuación muestra que la profundidad de penetración depende de la frecuencia de excitación. Cuanto más baja es la frecuencia, más profunda es la penetración y viceversa. En contraste con la técnica de corriente de Foucault sinusoidal convencional, donde la excitación se limita a un componente de frecuencia, las técnicas de corriente de Foucault pulsada excitan la bobina de inducción con una forma de onda de pulso.

Los componentes de frecuencia de la forma de onda del pulso se pueden demostrar utilizando la Transformada de Fourier, por lo que se define como:

$$F(t) = \begin{cases} un, & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}, \\ 0, & |t| > \frac{T}{2}, \end{cases}$$

Fórmula 2 – Frecuencia.

Donde A es la amplitud del pulso y T es el ancho del pulso.

La imagen 3 muestra ejemplos de los pulsos con dos anchos diferentes y sus espectros de potencia, lo que demuestra que la excitación tiene una serie de componentes de frecuencia, lo que le ha dado a la técnica el potencial para inspeccionar diferentes profundidades simultáneamente y, por lo tanto, podrá ofrecer más información en comparación con el enfoque convencional.

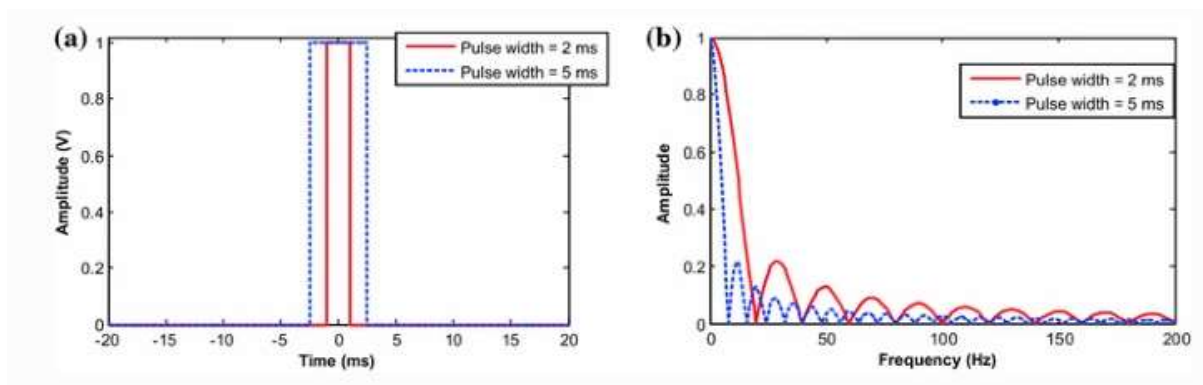


Imagen 4 - Pulsos y Espectros de potencia; a) Pulsos de diferente ancho; b) Espectro de potencia de los pulsos.

1.5. SISTEMAS DEL PEC

A pesar de las variaciones que existen, un sistema PEC típico se verá como la ilustración que se muestra en la imagen 5. Se genera una señal de pulso con una frecuencia y un ancho de pulso elegidos, que luego se amplifica para impulsar una bobina de excitación. A su vez, la corriente en la bobina de excitación induce un campo magnético variable en el tiempo. El campo magnético, que se denomina campo primario, induce una corriente de Foucault en la muestra. Consecutivamente, un campo magnético secundario es inducido por la corriente de Foucault y se opone al campo primario. Este campo secundario luego es detectado por un dispositivo de detección, que normalmente puede ser un sensor magnético o una bobina. Luego, la señal de salida del dispositivo de detección pasa a la siguiente etapa para ser acondicionada y procesada, donde finalmente se extraen las características para inferir los parámetros deseados, como el grosor de la pared y el despegue, a partir de la prueba.

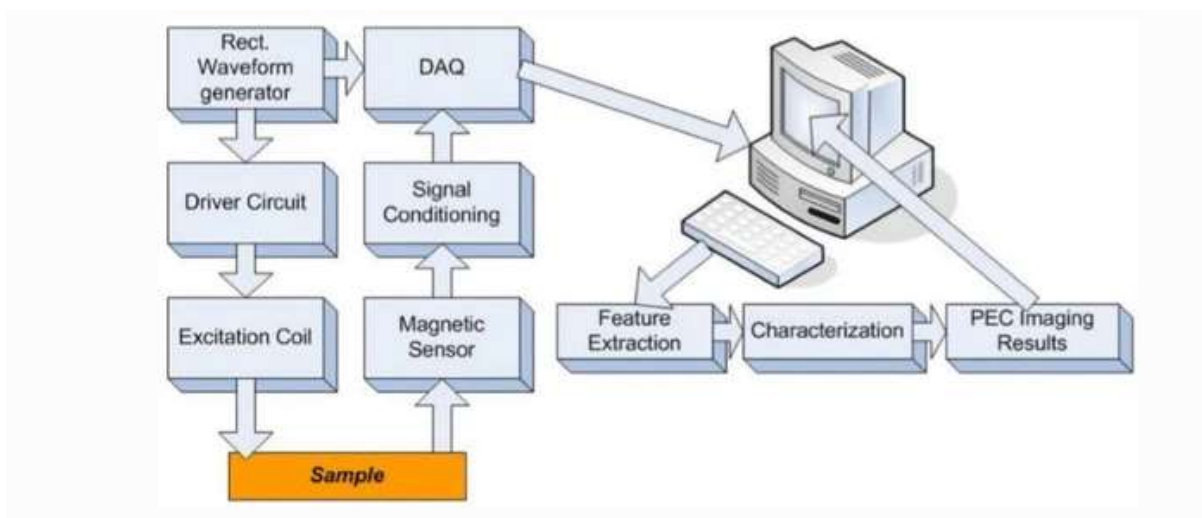


Imagen 5 - Configuración genérica de un sistema PEC.

Visto el sistema de configuración genérica de un sistema PEC, pero puede haber variaciones en cada una de sus partes. Los sistemas varían principalmente debido a las diferencias en la señal de excitación, el sistema de excitación, el dispositivo de detección y las técnicas de procesamiento de señales y extracción de características. Comentadas a continuación.

1.5.1. SEÑALES DE EXCITACIÓN

En muchas implementaciones, la corriente o voltaje de excitación es una forma de onda cuadrada, en cambio, en algunas otras aplicaciones la excitación es de forma de onda rectangular, lo que permite entregar una potencia muy alta en una duración limitada para no sobrecalentar la bobina y la electrónica del controlador. Y también hay otras formas de señal de excitación que también han sido

utilizadas y propuestas por los investigadores. Un estudio sobre diferentes formas de onda de excitación, a saber, cuadrada, semisinusoidal y de rampa, muestra una preferencia por la forma de onda cuadrada.

También se ha propuesto una excitación de ancho de pulso variable, que se utilizó en la inspección de la corrosión subsuperficial en estructuras conductoras. Modulación de ancho de pulso, como se ilustra en la imagen 6, proporciona diferentes espectros de frecuencia y se sugiere poder eliminar la necesidad de una señal de muestra de referencia.

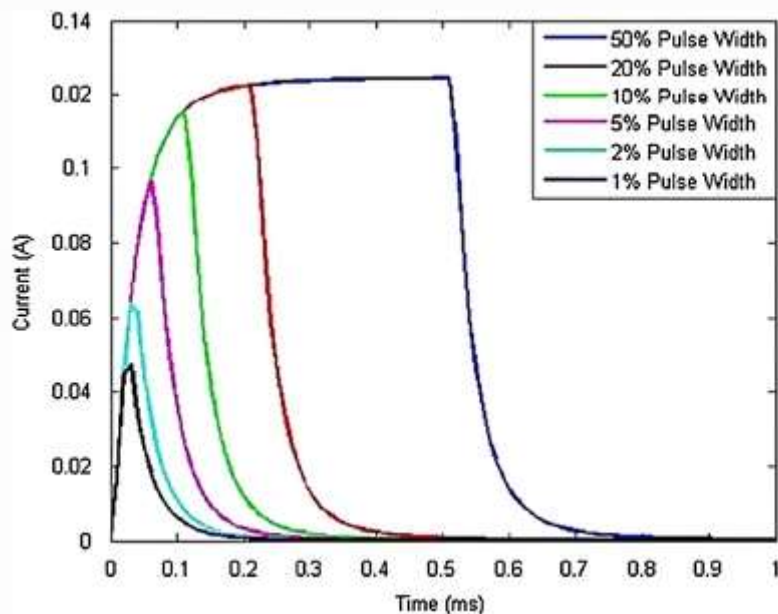


Imagen 6 – Corrientes de excitación con anchos pulsados variados.

En el PEC también se implementó utilizando la parte decreciente de la señal de paso, en lugar de la parte ascendente, después de desconectar la alimentación suministrada a la bobina de excitación.

1.5.2. SONDAS

Por lo general, una sonda PEC contendría una bobina de excitación y uno o más dispositivos de detección. Una bobina de excitación genera un campo de excitación transitorio primario, mientras que uno o más dispositivos de detección captan un campo de corriente de Foucault secundario debido a una muestra. Los diseños de sondas generalmente se optimizan en términos de su estructura, el tipo de elementos de detección y el uso de núcleos en función de las aplicaciones específicas en las que se implementarán.

Según el acoplamiento electromagnético entre la bobina de excitación y la muestra, las bobinas de excitación de la sonda de corriente de Foucault generalmente se pueden clasificar en uno de los siguientes tres tipos: bobina de superficie (o panqueque), bobina envolvente (OD para el diámetro

exterior) y bobina interna (también llamada bobina o ID por diámetro interior). En la imagen 7 se ilustran los tres tipos de bobinas.

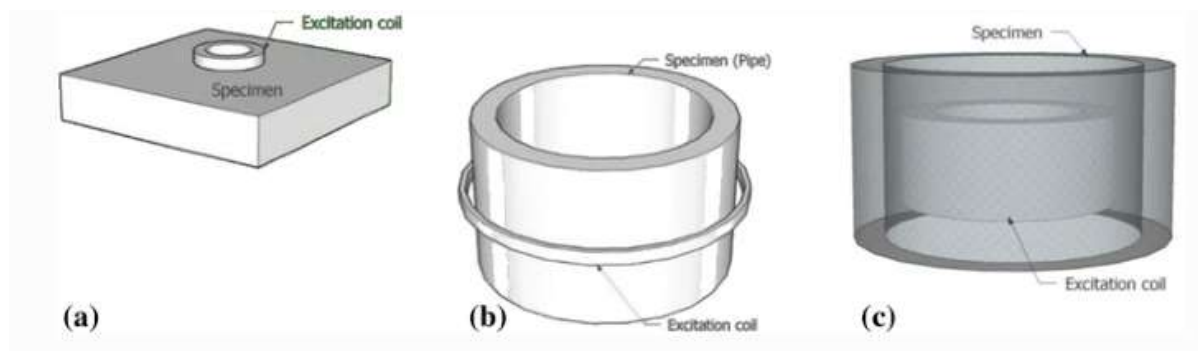


Imagen 7 – Tipos de bobina PEC; a) Bobina de superficie; b) Bobina envolvente; c) bobina interna.

Las bobinas de superficie o de panqueque se pueden orientar paralelas o normales a la superficie de la muestra y se utilizan tanto para muestras planas como curvas. Las bobinas envolventes se utilizan generalmente en la inspección de estructuras cilíndricas alargadas, como tuberías huecas y varillas sólidas. Las bobinas de este tipo forman coaxialmente un círculo alrededor del diámetro del objeto de prueba. La muestra puede estar aislada o recubierta. Las bobinas tipo bobina se utilizan generalmente para inspeccionar estructuras cilíndricas huecas, como tuberías y perforaciones, desde el interior.

También se han utilizado configuraciones de sonda menos comunes, como una sonda de matriz plana que puede generar un mapa de color que es útil en la identificación de defectos. Su trabajo muestra el uso de una matriz de sensores de 8 por 8, como se muestra en la imagen 8.a, mapea con éxito los defectos superficiales que se han hecho artificialmente en la muestra, lo que justifica la complejidad de los circuitos de excitación y detección, utilizado en la sonda. La aplicación de excitaciones independientes conduce a un campo de excitación más uniforme que, a su vez, conduce a una interpretación más sencilla de las señales detectadas.

Otro ejemplo interesante del uso de la matriz de sensores en ECT se muestra en la imagen 8.b, donde la matriz impresa es flexible y se puede usar para producir un mapa de color de la corrosión superficial.

Otro ejemplo único es una bobina de excitación simétrica introducida por Yang et al, que se espera que genere corrientes de Foucault lineales con la ventaja de que el sensor de captación no detectará prácticamente ningún campo cuando no haya ningún defecto.

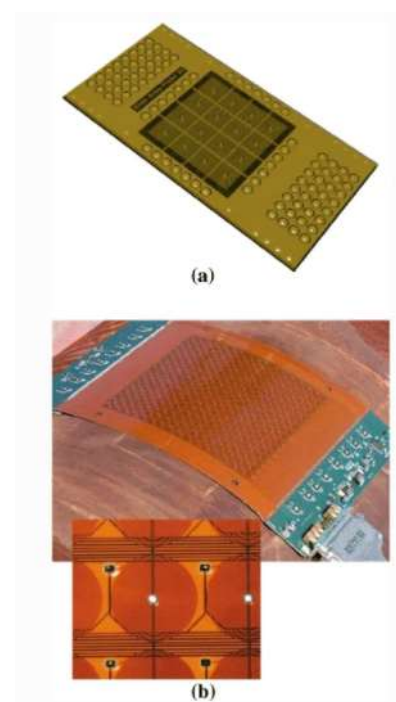


Imagen 8 - Sensores: a) Sonda de matriz plana; b) Sonda flexible

1.6. APLICACIONES DEL MÉTODO PEC

Gracias a su versatilidad, PEC NDT se ha utilizado en numerosas aplicaciones diferentes, tanto en la caracterización de materiales como en la inspección de integridad estructural. En la caracterización de materiales, se ha sugerido el uso de PEC para medir la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética de los materiales. Mientras que, en las pruebas de integridad estructural, PEC NDT se ha aplicado para la detección y caracterización de defectos, evaluación de la corrosión, medición del espesor del aislamiento, espesor de la placa y espesor de la pared de la tubería. Esto cubre materiales aislados y no aislados, revestidos y no revestidos. Además, aún dentro del área de pruebas de integridad, también se ha explorado e implementado la detección de grietas debajo de los sujetadores y entre sujetadores en estructuras de aeronaves utilizando PEC.

1.6.1. MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y PERMEABILIDAD MAGNÉTICA

El uso de PEC en la medición de la conductividad eléctrica de materiales ferromagnéticos, como placas de acero al carbono, ha sido investigado por Chen. Han establecido con éxito la PEC como un método de medición sin contacto con un error máximo del 1,6 %. En una aplicación similar Desjardins mencionaron en su estudio que la conductividad resultante de la corriente de Foucault transitoria está dentro de 0,5 MS/m de la obtenida por la medición de cuatro puntos. En su experimento se utilizó un tubo de acero al carbono con un espesor de pared de 0,035", que también fue respaldado por un cálculo analítico con una excelente concordancia. En el mismo trabajo, también mostraron un buen resultado sobre el uso de PEC en la medición de la permeabilidad magnética.

1.6.2. MEDICIÓN DEL ESPESOR DE AISLAMIENTO Y REVESTIMIENTO

Para garantizar su eficiencia, el espesor del aislamiento térmico de recipientes y tuberías es un parámetro importante que debe controlarse regularmente en las industrias petroquímicas. Se han realizado mediciones experimentales del espesor del aislamiento térmico en una placa de acero utilizando PEC y el informe muestra que es posible una medición efectiva del espesor de hasta 80 mm.

En el área de la determinación del espesor del recubrimiento, Tai, obtuvo excelentes resultados para recubrimientos magnéticos y no magnéticos en sustratos magnéticos y no magnéticos mediante el uso de valores máximos. Su trabajo también fue apoyado por modelos teóricos analíticos. El recubrimiento es muy importante para la protección contra la corrosión, entre otros.

1.6.3. MEDICIÓN DE ESPESORES Y EVALUACIÓN DE CORROSIÓN

La medición del espesor y la evaluación de la corrosión se analizan en la misma sección, ya que básicamente el trabajo se basa en el mismo principio y muchos de los trabajos realizados en la medición del espesor están destinados a la inspección de la corrosión. Se demostró que se midió con éxito un espesor de hasta 30 mm. La placa estaba hecha de acero Q235.

Otra línea de investigación fue presentada por Shin, quienes investigaron diferentes materiales, incluidos cobre, tungsteno, inconel 600, aluminio y titanio.

Röntgen Technische Dienst (RTD), ahora conocido como Applus RTD, ha creado un sistema PEC llamado RTD-Incotest que puede medir el espesor de la pared, que va desde 6 mm hasta 65 mm, tanto de tuberías como de placas hechas de carbono de baja aleación. acero, incluso cuando están bajo aislamiento de hasta 150 mm de espesor. Al medir el espesor de la pared, se puede evaluar la corrosión bajo el aislamiento (CUI).

Otra empresa, Eddyfi, con sede en Canadá, también ha creado un sistema PEC comercial más recientemente. El sistema es capaz de medir espesores de pared de hasta 64 mm bajo aislamiento no magnético y no conductor con un espesor de hasta 203 mm. La prueba se puede realizar incluso en presencia de chaquetas conductoras contra la intemperie de hasta 1,5 mm de espesor (dependiendo del material). La capacidad de medir el espesor de la pared a través del aislamiento y la cubierta impermeable es claramente una ventaja única para los sistemas PEC.

1.6.4. DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DEFECTOS

Este punto ha sido el enfoque principal de los investigadores en PEC. La muesca más profunda se localizó 6 mm por debajo de la superficie en un bloque de 8 mm de espesor. Tian GY, Sophian A, también informaron trabajos con tipos similares de defectos artificiales y formas similares de muestra, es decir, placa o bloque.

Otros ejemplos de detección y caracterización de defectos incluyen fallas en la superficie interna de la tubería debajo del aislamiento, corrosión externa en tuberías de acero al carbono utilizadas en la industria del petróleo y el gas, grietas superficiales y subterráneas y detección de cavidades en fundición conjunta losas (CCS), corrosión subsuperficial en una placa, corrosión superficial en placas recubiertas de acero dulce S275 y varios tipos de defectos en las estructuras de soporte del generador

de vapor. La detección de adelgazamiento de paredes en estructuras de tuberías se ha incluido en la subsección anterior.

Por otra parte, la comunidad de investigación de PEC también ha prestado mucha atención a la industria aeronáutica desde las primeras etapas de la historia de esta tecnología. Las grietas inducidas por el estrés que se producen debajo de un sujetador y entre los sujetadores en las estructuras de múltiples capas de las alas son cruciales para ser detectadas a tiempo para la seguridad de la aeronave durante sus vuelos. Relacionado con la industria aeronáutica está el nuevo material emergente plástico reforzado con fibra de carbono o CFRP para abreviar. CFRP está creciendo en uso en varios sectores industriales gracias a su resistencia y ligereza. Sin embargo, su relativa propensión al daño por impacto conduce inmediatamente al requisito industrial de técnicas efectivas de END para garantizar su integridad. A la luz de esto, los investigadores han investigado la aplicación de END de corrientes de Foucault, incluido PEC, para detectar y caracterizar defectos y daños en CFRP. El problema de CFRP es particularmente debido a su característica anisotrópica. Se puede decir que el logro en esta aplicación aún es limitado.

1.7. TÉCNICA RTD INCOTEST

La técnica RTD INCOTEST (INSulated COMponent TESTing) es una técnica empleada por la empresa “Applus+” que está basada en el principio de las corrientes inducidas pulsadas y se trata de un método fiable de examinar tuberías y recipientes ferrosos a través de su aislamiento térmico y de su recubrimiento de protección. La tecnología de corrientes inducidas pulsada, capaz de examinar los componentes en profundidad, resulta una herramienta excelente para priorizar futuras inspecciones. En esta técnica, la bobina emisora genera corrientes inducidas en la superficie del material. A medida que estas corrientes se difunden, generan un campo magnético que se detecta en la bobina receptora situada en la sonda. El grosor remanente promedio de la pared situado dentro del campo magnético es proporcional al tiempo de caída de la señal recibida.

1.7.1. ¿A QUIÉN VA DIRIGIDO?

Los ensayos por corrientes inducidas son útiles para cualquier sector en el que se utilicen sistemas de transferencia de calor, tales como la industria petroquímica o los sectores de la generación de electricidad, el aire acondicionado industrial o los equipos de calefacción comercial.

Entre las industrias para las que resulta adecuada la técnica RTD INCOTEST se encuentran:

- Plantas químicas

- Plataformas marítimas
- Estructuras portuarias
- Plantas eléctricas
- Refinerías
- Almacenes
- Instalaciones submarinas
- Conducciones de transmisión
- Tuberías no inspeccionables con robots automáticos

También puede emplearse en diferentes circunstancias:

- Preparación de cierres y paradas
- Cierres y paradas
- Evaluaciones de la ampliación de vida útil
- Programas de cumplimiento de la normativa
- Programas de mantenimiento y reparación
- Seguimiento
- Prevención de riesgos
- Zonas peligrosas (zonas de salpicaduras con mar revuelto, tuberías aisladas a altas temperaturas, aguas profundas, etc.)

1.7.2. VENTAJAS

Entre las ventajas de RTD INCOTEST se encuentra:

- Detecta la corrosión y la erosión, internas y externas
- Para efectuar mediciones no es necesario que haya contacto
- No requiere ninguna preparación especial de la superficie
- Mide a través de organismos marinos, suciedad, cemento, costras, petróleo
- Realiza mediciones desde el interior de las conducciones y a profundidades de hasta 3000 metros (9842 pies)
- No necesita consumibles de productos químicos
- Velocidad: hasta 1000 mediciones al día
- Funciona con batería o con conexión a la red
- El mejor de su clase en evaluación de la calidad de la señal

- El mejor de su clase en discriminación de defectos (internos/externos) y medida de sus dimensiones
- Adecuado para realizar seguimientos
- No se ve influido por las laminaciones
- Almacenamiento digital de las medidas

1.7.3. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

- Grosor nominal de la pared de 6-65 mm (0,236"-2,559")
- Grosor del aislamiento o del recubrimiento de hasta 200 mm (7,874")
- Diámetros desde 50 mm (1,968") hasta placas planas
- Rango de temperaturas de -150 °C a 500 °C (-238 °F-932 °F)
- Precisión de $\pm 5\%$
- Duración de una medición: entre 2 y 10 segundos, en función del grosor de la pared
- Métodos de puesta en práctica: Oruga, buceador, operador, elevador, acceso mediante cuerdas, orugas teledirigidas, andamiaje, trípode.

1.7.4. APLICACIONES

- Corrosión bajo el aislamiento con láminas galvanizadas
- Inspección de la corrosión bajo la protección ignífuga en tuberías
- Inspección de la corrosión bajo la protección ignífuga en recipientes
- Inspección de la corrosión bajo el aislamiento en recipientes
- Seguimiento de columnas de destilación
- Inspección de la corrosión acelerada por caudal
- Líneas de tuberías enterradas no inspeccionables con robots automáticos (con una oruga)
- Tuberías y conducciones de tuberías de centrales nucleares
- Montantes marítimos
- Cajones de elevación de agua marina
- Inspección de cascos de embarcaciones
- Estructuras marinas salpicadas por el agua
- Tuberías submarinas

2. OTRAS TÉCNICAS INNOVADORAS

2.1. MONITORIZACIÓN ONLINE DEL FRAGUADO DEL HORMIGÓN EN TIEMPO REAL (MONSEC)



2.1.1. INTRODUCCIÓN

Monsec permite realizar el seguimiento del fraguado del hormigón en proyectos de construcción de manera remota. Es capaz de ofrecer información precisa sobre la resistencia y madurez del hormigón durante el proceso de fraguado en tiempo real. Aunque su producto se encuentra en fase de validación y pruebas piloto

2.1.2. SISTEMA

Su principio se basa en emplear sensores inalámbricos de nueva generación para el registro automático de parámetros clave en el interior del encofrado. Es capaz de procesar los datos en la nube y le ofrece parámetros útiles para la toma de decisiones en la gestión del curado del hormigón, así como la optimización de los tiempos de desencofrado



Sistema integrado y automatizado



Información precisa en tiempo real



Todos sus encofrados en una sola herramienta



Información en la nube accesible 24/7



Intervalo de medida programable para cada sensor



Envío de alarmas vía SMS



Optimice plazos y costes



Fácil y rápido de implementar

2.1.3. AUTOMATIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE SENSORES Y ESTACIÓN

Los sensores son inalámbricos de ultra – bajo consumo que van distribuidos a lo largo del encofrado. Una vez se realiza el llenado del mismo con hormigón, los sensores miden la temperatura y humedad a intervalos que pueden ser programados, por lo que proporciona información constante sobre lo que ocurre en el interior del hormigón.

2.1.4. SENSORES

Existen dos modelos que se adaptan entre profundidades de 30 – 50 cm. La batería del mismo tiene una duración media de 3 meses, con la frecuencia de toma de datos por defectos. La instalación de los sensores se resume en sujetarlos al mallado mediante una brida y activarlos mediante un botón.

Además, podremos marcar la situación de los sensores en el encofrado. Al realizar una instalación distribuida a lo largo del mismo podremos obtener una visión completa del proceso de fraguado en las distintas zonas del encofrado con la app.

2.1.5. Monsec Station

La Monsec Station se encarga de recibir los datos enviados por los sensores, almacenarlos y enviarlos al servidor de Monsec en la nube. Se puede conectar a la red eléctrica o bien alimentarse mediante batería con carga en la red o solar.

La tramitación de datos se puede realizar mediante el envío a través de una red WI – Fi o conexión a internet, mediante modem GPRS/3R/4G/LTE o recuperarlos de manera manual mediante volcado a memoria USB.

El software de Monsec incluye un algoritmo de desarrollo propio que permite el cálculo preciso de la resistencia instantánea del hormigón “Rc” (MPa) mediante registros de temperatura y humedad relativa realizados por los sensores.

Este sistema es capaz de ofrecer información precisa y completa sobre los distintos parámetros relativos al hormigón, facilitando la evolución del proceso de fraguado y ofreciendo un apoyo fiable a la dirección de los proyectos en la toma de decisiones para las intervenciones en el encofrado. Genera curvas de temperatura, humedad relativa, resistencia y madurez del hormigón representados con diferentes gráficas e informes.

En caso de disponer diversos sensores en un mismo encofrado, el software genera un diagrama térmico a partir de los valores registrados por cada sensor, lo que proporciona una imagen gráfica del estado de fraguado del hormigón en distintos puntos.

2.1.6. CONFIGURACIÓN MEDIANTE UNA APP

En primer lugar, esta aplicación es capaz de generar un número ilimitado de encofrados, pues se puede introducir y configurar todos sus encofrados, así como desactivarlos cuando le convenga. Por otro lado, se puede personalizar la configuración de cada encofrado trazando el área del mismo, marcando la posición de los sensores y añadiendo la información adicional relevante.

Además, podremos parametrizar el intervalo de registro de datos, es decir, podremos ajustar la frecuencia con la que los sensores realizan la toma de datos en función de las características del proyecto.

Por último, la aplicación nos da la posibilidad de programar alarmas automáticas recibiendo un aviso por SMS en caso de que los registros se desvíen de los parámetros predeterminados. Además, esta aplicación está disponible tanto para dispositivos Android como para iOS.

2.1.7. PRESENTACIÓN DE PARÁMETROS CLAVE EN TIEMPO REAL

De manera resumida es capaz de generar:

- Gráficas de humedad relativa del hormigón en tiempo real.
- Gráficas de temperatura del hormigón en tiempo real.
- Cálculo de la resistencia a la compresión, calculada mediante el algoritmo.
- Diagrama técnico encofrados con múltiples sensores que muestra el gradiente de temperatura en el encofrado.

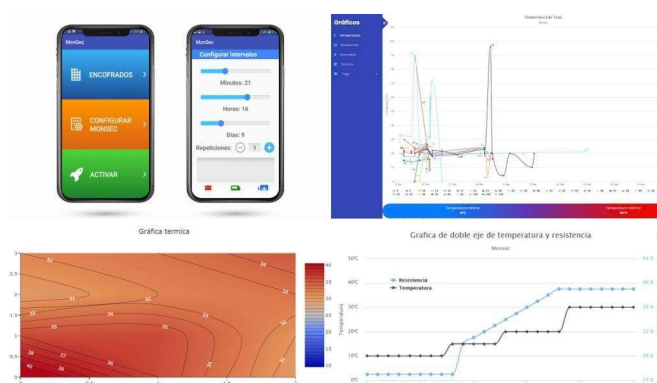


Imagen 9 - Resultados obtenidos con la aplicación en tiempo real.

2.1.8. VENTAJAS

Entre las ventajas principales de esta técnica destaca el ahorro de tiempo innecesario de espera para el desencofrado y reducir el riesgo de no conformidad en los ensayos de compresión mediante probetas. Por tanto, la utilización de este sistema de Monsec permite un ahorro en tiempo y recursos humanos, además de una gran agilización en los procesos y toma de decisiones sobre las intervenciones en los encofrados.

2.2. SISTEMA AUTÓNOMO PARA EL CONTROL Y EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO (CORROCHIP)



CONTROL Y EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO

2.2.1. INTRODUCCIÓN

Corrochip es un sistema para la detección y evaluación de procesos de corrosión en el acero embebido en hormigón que permite detectar cuando se inicia un proceso de corrosión, realizar un seguimiento remoto del estado de la estructura a lo largo del tiempo y obtener información sobre la progresión de la corrosión con un alto grado de fiabilidad.

Utiliza sensores embebidos en la estructura para evaluar el estado de las armaduras, envía y procesa los datos en la nube y proporciona diversos parámetros físico – químicos. Además, realiza una estimación de la velocidad de corrosión mediante una técnica novedosa, de forma muy precisa y en tiempo real.

2.2.2. ENEMIGO DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

La corrosión es uno de los procesos más preocupantes relacionados con las armaduras y la durabilidad de las estructuras, además de ser el de mayor repercusión económica. Es un proceso que se da de forma interna en el elemento, así que cuando se manifiesta de manera visible, el daño suele estar muy avanzado.

La medida precisa de la corrosión en el hormigón armado es esencial para analizar la durabilidad y la vida útil de la estructura. Si se detecta a tiempo la corrosión y se actúa de manera proactiva se alarga el tiempo de la vida de la estructura, se reduce significativamente los costes de mantenimiento y se garantiza la seguridad.

2.2.3. SISTEMA

Este sistema es una herramienta clave para evaluar la seguridad, pues permite conocer en todo momento el estado de las estructuras, sin tener que hacer intervenciones in situ. Ofrece la información necesaria para evaluar dicho progreso de corrosión y poder anticiparse a situaciones de deterioro que puedan comprometer su integridad. Esto permite actuar a tiempo garantizando la seguridad estructural.

Por otro lado, se puede realizar un seguimiento continuo a largo plazo, pues este sistema queda integrado en la estructura y actúa de sistema centinela realizando y enviando medidas de forma periódica durante la vida útil de la estructura. El sensor tiene una vida útil de al menos 100 años en cualquier tipo de estructura, por lo tanto, la durabilidad y el uso de la técnica no destructiva posibilitan el control de la corrosión a muy largo plazo.

Además, este sistema es integrable en estructuras nuevas y preexistentes. Los sensores deben ser embebidos en el hormigón determinando primero las zonas críticas para las mediciones. En obra nueva este procedimiento se realiza antes del vertido del hormigón, mientras que en estructuras preexistentes es posible integrar el sistema mediante una intervención mínima.

Por último, la monitorización en remoto y la fiabilidad de la técnica PSV – TE exclusiva de corrochip permite optimizar enormemente la gestión de las estructuras y lograr reducciones significativas en los costes de inspección y mantenimiento al proporcionar los parámetros críticos necesarios para evaluar una estructura desde el punto de vista de la durabilidad en tiempo real.

2.2.4. TÉCNICA INNOVADORA

A partir de las mediciones físico – químicas realizadas por los sensores a lo largo del tiempo y usando la técnica novedosa de barrido por pulsos escalonados PSV – TE, permite estimar la velocidad de corrosión desde el periodo de iniciación de la propagación, en base a mediciones obtenidas en tiempo real y con un alto nivel de precisión.

Esta técnica ha sido desarrollada por un equipo multidisciplinar de investigadores de la Universitat Politècnica de València, está protegida por patente.

Utiliza un método basado en la extrapolación de Tafel (TE) para la detección de la corrosión y al emplear pulsos potencioestáticos elimina sus principales inconvenientes, como la polarización irreversible de las armaduras embebidas. La nueva técnica PSV – TE es por tanto un método no destructivo que permite la monitorización constante en el tiempo y es muy precisa en comparación con otras técnicas de laboratorio empleadas en el campo.

2.2.5. ENVÍO DE DATOS A LA NUBE

Este sistema corrochip se compone de:

- Sensor de medida que se embeben en la armadura y consta de:
- Placa de adquisición de datos y pre – procesamiento
- Uno o varios electrodos de trabajo (WE)
- Un contraelectrodo de medida (CE)
- Un electrodo de referencia (RE)
- Estación interna que recoge las mediciones realizadas por los sensores
- Estación externa con alimentación autónoma fotovoltaica, conectada al servidor de Corrochip en la nube vía enlace radio de datos 3G/4G/5G
- Software que permite la visualización de los parámetros físicos medidos e incorpora un sistema de alarmas por diferentes niveles de corrosión de la estructura.

2.2.6. SERVICIO 360°

1. Pre – proyecto. El equipo especializado de Corrochip realizará un estudio de la estructura para definir los puntos más representativos para la monitorización de la corrosión y recomendará el posicionamiento y número óptimo de los sensores.
2. Instalación del sistema de medición . Consiste en la integración de los electrodos con el cableado hasta la electrónica de medida y sellado hermético. A continuación, se realiza la instalación final de la estación de alimentación y conexión a la red de datos para la transmisión de las mediciones al servidor.

3. Informes y consultoría. Un equipo de técnicos se ocupa de la monitorización de los parámetros y de las alarmas programadas. Además, elabora los informes periódicos establecidos con el cliente. También ofrece asesoramiento sobre la interpretación de los informes y la adopción de medidas de reparación y/o refuerzo.

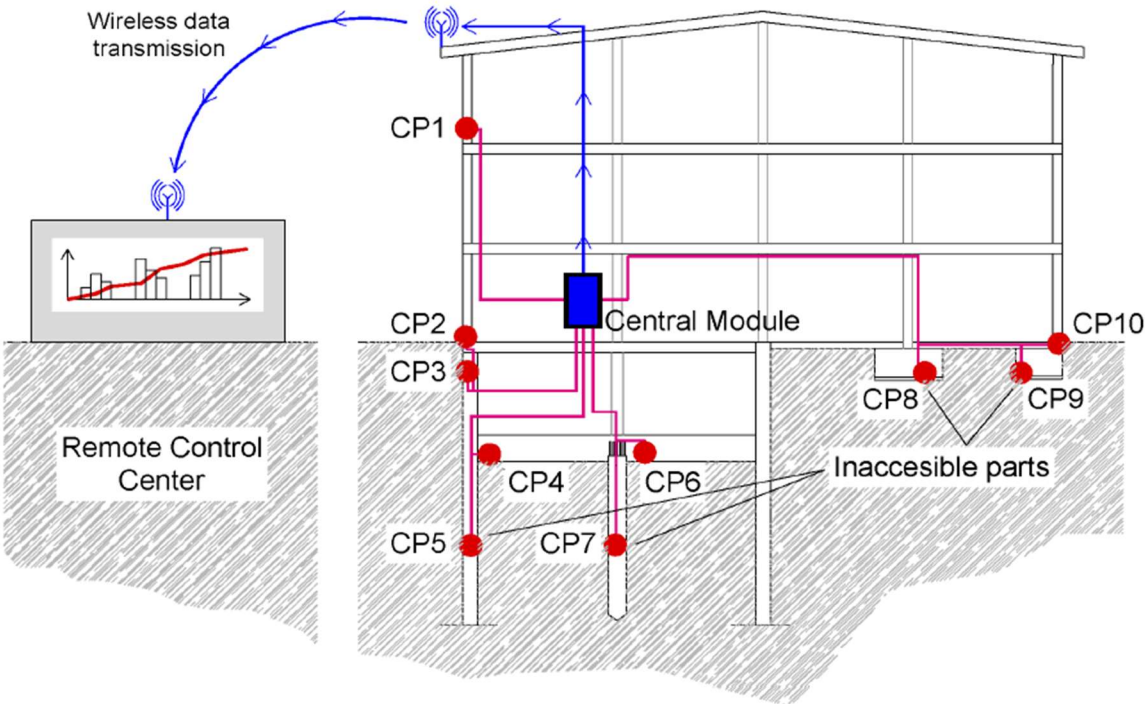


Imagen 10 - Esquema de monitorización con la tecnología Corrochip

2.2.7. PROYECTOS QUE ESTÁN EMPLEANDO CORROCHIP

1. Monitorización de la corrosión en paso superior. Autovía A2.



Acciona. Monitorización de la corrosión en autovía A2 mediante Corrochip. Proceso de reparación.



Acciona. Monitorización de la corrosión en autovía A2 mediante Corrochip. Disposición de nueva armadura.



Acciona. Monitorización de la corrosión en autovía A2 mediante Corrochip. Aspecto de la viga una vez reparada.

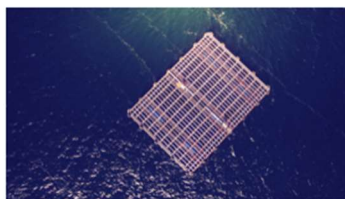


Acciona. Monitorización de la corrosión en autovía A2 mediante Corrochip. Detalle sensor de medida.

2. Bateas para el cultivo de mejillones. Proyecto SELMUS, Ría de Arousa.



Batea Formex® para cultivo de mejillones diseñada por RDC dentro del proyecto SELMUS. Instalada en la ría de Arousa. Las vigas maestras y secundarias están fabricadas con Hormigón de Muy Alto Rendimiento.



Fotografía desde dron de la batea Formex® diseñada por RDC dentro del proyecto SELMUS. Instalada en la ría de Arousa.



Batea Formex® Plus diseñada por RDC dentro del proyecto SELMUS. Instalada en la ría de Arousa. El emparrillado completo es de Hormigón de Muy Alto Rendimiento.

3. Batea instalada en el puerto de Valencia. Proyecto ReSHEALience, Piloto 3



Proceso de montaje de la Batea Formex® fabricada por PREFFOR e instalada en el puerto de Valencia dentro del proyecto ReSHEALience (Piloto 3, TRL7).

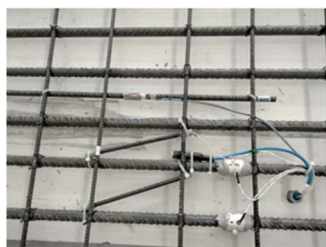


Flotación de la batea Formex® instalada en el puerto de Valencia, en el marco del proyecto ReSHEALience (Piloto 3, TRL7).



Batea Formex® instalada en el puerto de Valencia, en el marco del proyecto ReSHEALience (Piloto 3, TRL7).

4. Plataforma flotante para aerogenerador offshore. Proyecto ReSHEALience



Detalle sensor de medida Corrochip en prototipo de plataforma flotante para aerogeneradores offshore, realizado por Rover Maritime en el marco del Proyecto Reshealience Piloto 4, TRL 6.



← Prototipo de plataforma flotante para aerogeneradores offshore con sistema Corrochip. Realizado por Rover Maritime en el marco del Proyecto Reshealience Piloto 4, TRL 6.

2.3. MONITORIZACIÓN ACTIVA EN REMOTO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE TALUDES Y CONTRA DESPRENDIMIENTOS (ROCKCHIP)



2.3.1. INTRODUCCIÓN

Rockchip es un sistema autónomo de telemetría que detecta cambios en los sistemas de protección de taludes y proporciona datos de forma automatizada sobre el estado del elemento monitorizado, su integridad y la evolución de las tensiones a las que está sometido. Aunque su producto se encuentra en fase de validación y prueba piloto.

A diferencia de otros tipos de inspección a distancia este sistema emplea sensores autónomos y un eficiente sistema de conectividad mixta, para registrar parámetros en campo, transmitirlos al servidor en la nube y presentar los datos en tiempo real mediante una plataforma web.



Imagen 11 – Talud con la tecnología Rockchip implementado.

Básicamente se trata de un sistema autónomo con sensores integrados en el sistema de protección, tiene una monitorización en remoto y tiempo real, así como una gran adaptación a todo tipo de configuraciones y a terrenos complicados. Es usado para una mayor seguridad pues detecta cambios y podemos anticiparnos a problemas de integridad. Asimismo, soluciona la inspección de los sistemas de protección en zonas de difícil acceso y reduce los costes en vigilancia e inspecciones presenciales.

2.3.2. VERSATILIDAD Y FIABILIDAD

Este sistema es altamente flexible pues, como hemos comentado con anterioridad, se adapta a todo tipo de configuraciones y orografías, gracias a la interconexión de los elementos mediante señal radio. Proporciona información al minuto sobre el estado de los taludes, envía alertas y ofrece parámetros relevantes para poder anticipar problemas en los sistemas de protección. Gracias a su fiabilidad, el sistema de detección puede sustituir o complementar las inspecciones visuales y constituye un recurso altamente útil para la inspección en zonas de difícil acceso

2.3.3. INTEGRABLE EN LAS ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN DE TALUDES

Puede utilizarse como complemento de un sistema de estabilización y protección de taludes:

- Mallas reforzadas
- Mallas de triple torsión
- Red de cable
- Redes de anillos

Por otro lado, también se puede emplear en sistemas de protección contra desprendimientos como:

- Barreras dinámicas

2.3.4. MONITORIZACIÓN Y VIGILANCIA MEDIANTE SENSORES INTEGRADOS

El sistema Rockchip se basa en la monitorización mediante sensores que se integran en el elemento de protección del talud. Además, consta de un sistema de comunicación que transmite los datos registrados por los sensores mediante red radio de largo alcance, hasta el servidor central en la nube.

Una vez se ha instalado el sistema de detección en campo es capaz de proporcionar en tiempo real la información necesaria para evaluar a distancia el estado del sistema de protección y permite observar eventos puntuales que se registren en el mismo.

2.3.5. MONITORIZACIÓN Y VIGILANCIA MEDIANTE SENSORES INTEGRADOS

El sistema Rockchip se basa en la monitorización mediante sensores que se integran en el

elemento de protección del talud. Además, consta de un sistema de comunicación que transmite los datos registrados por los sensores mediante red radio de largo alcance, hasta el servidor central en la nube.

Una vez se ha instalado el sistema de detección en campo es capaz de proporcionar en tiempo real la información necesaria para evaluar a distancia el estado del sistema de protección y permite observar eventos puntuales que se registren en el mismo.

2.3.6. COMPONENTES DEL SISTEMA

- Sensores avanzados de diversa tipología para un despliegue óptimo

El sistema de dirección puede incluir sensores de diferentes tipologías para detectar movimientos, desplazamientos o esfuerzos. Esto permite diseñar la configuración más adecuada para ser capaz de cubrir las necesidades en cada caso particular, según la tipología del talud, del sistema de protección a monitorizar y del tipo de cambios a detectar.

Los sensores se desarrollan en el laboratorio para permitir la modificación de los umbrales de detección a distancia, por medio de un mensaje móvil SMS de forma individual.

- Conectividad mediante red de radio y datos

La transmisión de los parámetros registrados por los sensores se soluciona mediante el despliegue de una red radio de largo alcance y ultra bajo consumo, cuya finalidad es dotar el sistema de la conectividad necesaria y enviar información al servidor central en la nube, mediante conexión de datos GSM / GPRS / 3G / 4G.

Cabe destacar que la alimentación de los equipos de comunicaciones se realiza mediante paneles solares de larga duración.

- Adaptación al entorno

Este sistema posee una gran capacidad de adaptación a todo tipo de configuraciones y a terrenos complicados. Es posible configurar el sistema de comunicación de forma centralizada o distribuida, en función de los requerimientos específicos, determinando la distribución óptima de elementos sensores y el sistema de comunicación más indicado para dotar la conectividad necesaria entre sus elementos

1. Sistema centralizado: Un equipo de radio central recibe las medidas de los sistemas sensores y los empaqueta para ser transmitidos al servidor en la nube
2. Sistema distribuido: Se crea una red en la que cada uno de los sensores realiza de puente o repetidor de las señales de los otros sensores, dirigiendo las señales hacia un canal central o Gateway, que realiza la transmisión al servidor.

2.3.7. PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Rockchip incluye una webapp para la visualización en tiempo real de los datos transmitidos por los sistemas de detección y gestión remota de los mismos.

- Visualización en mapa de los sistemas de protección activos y de cada elemento de monitorización
- Acceso a medidas y estado de los sensores y otros elementos del sistema de detección
- Configuración de perfiles de usuario con diferentes niveles de acceso
- Configuración de alarmas con envío vía SMS y/o correo electrónico. Integrable mediante API en otras plataformas
- Generación y descarga de informes

3. BIBLIOGRAFÍA

- <https://www.applus.com/global/es/what-we-do/sub-service-sheet/incotest-corrientes-inducidas-pulsadas#:~:text=En%20esta%20t%C3%A9cnica%2C%20la%20bobina,receptora%20situa da%20en%20la%20sonda.>
- <https://www.corrienteseddypulsadas.com.mx/>
- <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt231.pdf>
- <https://cjme.springeropen.com/articles/10.1007/s10033-017-0122-4>
- <https://www.witeklab.com/es/monitorizacion-online-del-fraguado-del-hormigon-en-tiempo-real/>
- <https://www.witeklab.com/es/corrochip-control-a-distancia-y-evaluacion-de-la-corrosion-en-hormigon/>
- <https://www.witeklab.com/es/rockchip-monitorizacion-activa-en-remoto-de-sistemas-de-proteccion-de-taludes/>