



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación de la corrosión en armaduras de hormigón por medio
de la medición del campo potencial*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Miguel Ruiz Ruiz

DIRECTOR: Santiago Rafael Urréjola Madriñán

CURSO ACADÉMICO: 2015-2016

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación de la corrosión en armaduras de hormigón por medio
de la medición del campo potencial*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

En las armaduras de hormigón se produce una capa pasiva de óxido de hierro hidratado que protege a las estructuras de hormigón de la corrosión. Mediante la reacción del hormigón con el dióxido de carbono de la atmósfera, penetración de sustancias agresivas para el acero, cloruros, entre otros, esta capa pasiva puede degradarse. De esta forma se produce en las zonas anódicas y catódicas una diferencia de potencial que se puede medir con equipos especializados.

El siguiente trabajo trata de estudiar el comportamiento del acero en las armaduras de hormigón y cómo se comportan dichas armaduras en un medio tan agresivo como puede ser el marino.

Para ello, primero se realiza una descripción y explicación de algunos conceptos teóricos, como el campo potencial, la corrosión y los métodos a utilizar para estudiar la posibilidad de corrosión. Se estudia cómo afecta la corrosión en función del tiempo mediante la medición del campo potencial y se apoya éste estudio con otras técnicas como el análisis de pesos y termografías.

El presente trabajo trata de demostrar que la evaluación de la corrosión mediante el estudio del campo potencial es efectiva y que su uso nos permite realizar un correcto análisis.

PALABRAS CLAVE

Palabras clave: Corrosión, hormigón, diferencia de potencial, armaduras, campo potencial

AGRADECIMIENTOS

Dedico éste trabajo a toda mi familia, a mis padres y hermano por el apoyo y ánimos que siempre me han dado durante mis años de estudio y formación en la Escuela Naval Militar.

Agradezco el interés, el apoyo y la atención mostrada a mi tutor D. Santiago Urréjola durante la realización y desarrollo de este trabajo de fin de grado.

También agradecer a mis compañeros de camarera Carlos y Gonzalo por el apoyo y ayuda desinteresada mostrada durante la realización del presente trabajo.

Agradecer al personal de la Escuela Naval Militar por su contribución en mayor o menor medida a la realización del proyecto.

Por último recordar a todos mis compañeros de promoción que me han acompañado a lo largo de esta travesía que está a punto de finalizar.

Contenido

Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Justificación	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Factores que causan la corrosión.	8
1.3.1 Corrosión iniciada por iones cloruro	8
1.3.2 Corrosión iniciada por carbonatación	9
1.4 Corrosión en ambientes marinos.....	9
1.5 Ensayos no destructivos	10
1.5.1 Medida del potencial de corrosión.....	11
1.5.2 Termografía	11
1.6 Campo potencial	13
2 Estado del arte	15
2.1 Introducción	15
2.2 Técnicas electroquímicas	16
2.2.1 Técnicas cualitativas. Potencial de corrosión	16
2.2.2 Técnicas cuantitativas de corriente continua	17
2.2.3 Técnicas cuantitativas de corriente alterna	17
2.2.4 Otras técnicas y parámetros para evaluar la corrosión	18
3 Desarrollo del TFG.....	21
3.1 Procedimiento experimental	21
3.2 Preparación de las probetas.....	21
3.3 Procedimiento de ensayo y monitorización	23
3.4 Procedimiento determinación de pesos.....	28
3.5 Procedimiento termográfico.....	29
4 Resultados	31
4.1 Análisis de las medidas del campo potencial.....	31
4.1.1 Análisis de la Probeta de Tipo Normal.....	31
4.1.2 Análisis de las probetas de Tipo Marino	39
4.1.3 Análisis de la Probeta tipo PCM.....	51
4.1.4 Análisis de conjunto de las estructuras	57
4.1.5 Ensayo sobre una estructura de hormigón	58

4.2 Análisis de determinación de pesos	60
4.2.1 Probeta tipo Normal.....	60
4.2.2 Probeta tipo Marino	61
4.2.3 Probeta tipo PCM	62
4.3 Análisis de las termografías	63
5 Conclusiones y líneas futuras	65
5.1 Conclusiones	65
5.1.1 Medición de la corrosión mediante la evaluación del campo potencial	65
5.1.2 Análisis de las probetas mediante termografías.....	66
5.1.3 Análisis de la variación de peso.....	67
5.1.4 Conclusión	67
5.2 Líneas futuras	67
6 Bibliografía.....	68
Anexo I: Ensayos Realizados	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Probeta cúbica de hormigón	22
Figura 3.2: Instrumento analizador de corrosión Canin +	23
Figura 3.3: Conexión del instrumento analizador de corrosión Canin+. [4]	24
Figura 3.4: Esquema general de la medición mediante analizador de corrosión Canin+. [4]	25
Figura 3.5: Preparación de la solución de NaCl	26
Figura 3.6: Probetas contenidas en sus recipientes	26
Figura 3.7: Probetas en exceso de agua salada	27
Figura 3.8: Ensayo en estructura real	28
Figura 3.9: Balanza utilizada para el ensayo	29
Figura 4.1: Mapa potencial de la Probeta 1 para el ensayo 1	32
Figura 4.2: Frecuencia Relativa de la Probeta tipo normal para el ensayo 1	33
Figura 4.3: Mapa de potenciales de la Probeta tipo Normal para el ensayo 2	34
Figura 4.4: Frecuencia acumulada del potencial de la Probeta tipo Normal para el ensayo 2	34
Figura 4.5: Mapa potencial de la Probeta tipo Normal para el ensayo 3	35
Figura 4.6: Mapa potencial de la Probeta tipo Normal para el ensayo 4	35
Figura 4.7: Frecuencia relativa de la Probeta tipo Normal para el ensayo 3	36
Figura 4.8: Frecuencia relativa de la Probeta tipo Normal para el ensayo 4	36
Figura 4.9: Mapa potencial de la Probeta de tipo Normal para el ensayo 5	37
Figura 4.10: Frecuencia acumulada de la Probeta de tipo Normal para el ensayo 5	37
Figura 4.11: Probeta tipo Normal ensayo 6	38
Figura 4.12: Mapa potencial de la Probeta tipo Normal para la semana 6	38
Figura 4.13: Frecuencia relativa de la Probeta Normal para el ensayo 6	39
Figura 4.14: Mapa potencial de la Probeta-1 Marino para el ensayo 1	40
Figura 4.15: Mapa potencial de la Probeta-2 Marino para el ensayo 1	40
Figura 4.16: Frecuencia relativa de la Probeta-1 Marino para el ensayo 1	41
Figura 4.17: Frecuencia relativa de la Probeta-2 Marino para el ensayo 1	41
Figura 4.18: Mapa potencial de la Probeta-1 Marino para el ensayo 2	42
Figura 4.19: Mapa potencial de la Probeta-2 Marino para el ensayo 2	42
Figura 4.20: Frecuencia acumulada de la Probeta-1 Marino para el ensayo 2	43
Figura 4.21: Frecuencia acumulada de la Probeta-2 Marino para el ensayo 2	43
Figura 4.22: Mapa potencia de la Probeta-1 Marino para el ensayo 3	44
Figura 4.23: Mapa potencial de la Probeta-2 Marino para el ensayo 4	44
Figura 4.24: Frecuencia relativa de la Probeta-1 Marino para el ensayo 3	45

Figura 4.25: Frecuencia relativa de la Probeta-2 Marino para el ensayo 3	45
Figura 4.26: Frecuencia relativa de la Probeta-1 Marino para el ensayo 4	46
Figura 4.27: Frecuencia relativa de la Probete-2 Marino para el ensayo 4	46
Figura 4.28: Mapa potencial de la Probeta-1 Marino para el ensayo 5	47
Figura 4.29: Mapa potencial de la Probeta-2 Marino para el ensayo 5	47
Figura 4.30: Frecuencia relativa de la Probeta-1 Marino para el ensayo 5	48
Figura 4.31: Frecuencia relativa de la Probeta-2 Marino para el ensayo 5	48
Figura 4.32: Probeta-1 tipo Marino para el ensayo 6	49
Figura 4.33: Mapa potencial de la Probeta-1 tipo Marino para el ensayo 6	49
Figura 4.34: Probeta-2 tipo Marino para el ensayo 6	50
Figura 4.35: Mapa potencia de la Probeta-2 tipo Marino para el ensayo 6	50
Figura 4.36: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 1	51
Figura 4.37: Frecuencia relativa de la Probeta de tipo PCM para el ensayo 1	52
Figura 4.38: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 2	52
Figura 4.39: Frecuencia acumulada de la Probeta del tipo PCM para el ensayo 2	53
Figura 4.40: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 3	53
Figura 4.41: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 4	54
Figura 4.42: Frecuencia relativa de la Probeta tipo PCM para el ensayo 3	54
Figura 4.43: Frecuencia relativa de la Probeta tipo PCM para el ensayo 4	55
Figura 4.44: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 5	55
Figura 4.45: Frecuencia relativa de la Probeta tipo PCM para el ensayo 5	56
Figura 4.46: Probeta de tipo PCM para el ensayo 6	56
Figura 4.47: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 6	57
Figura 4.48: Gráfica comparativa de los ensayos	57
Figura 4.49: Mapa potencial de estructura de hormigón	59
Figura 4.50: Frecuencia relativa para la estructura de hormigón	59
Figura 4.51: Estructura de hormigón utilizada para el ensayo	60
Figura 4.52: Variación del peso de la Probeta tipo Normal	61
Figura 4.53: Variación del peso de la Probeta-1 tipo Marino	61
Figura 4.54: Variación del peso de la Probeta-2 tipo Marino	62
Figura 4.55: Variación de peso de la Probeta tipo PCM	63
Figura 4.56: Termografía ensayo 1 Probeta-1 tipo Marino	63
Figura 4.57: Termografía ensayo 1 Probeta-2 Marino	63
Figura 4.58: Termografía ensayo 1 Probeta Normal	64
Figura 4.59: Termografía ensayo 1 Probeta PCM	64
Figura 4.60: Probeta Tipo Normal tras haber sido excitada	64

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Composición de las Probetas	22
Tabla 3.2: Órdenes de magnitud para el potencial de media celda de acero en hormigón [4].....	25
Tabla 3.3: Tabla con valores de emisividad conocida para el hormigón [4].....	30
Tabla 3.4: Horno utilizado para el ensayo.....	30
Tabla 4.1: Valores Ecorr y riesgo de corrosión [3]	31
Tabla 4.2: Evolución del peso de la Probeta tipo Normal a lo largo de los ensayos.....	60
Tabla 4.3: Evolución del peso de la Probeta tipo Marino-1 a lo largo de los ensayos.....	61
Tabla 4.4: Evolución del peso de la Probeta tipo Marino-2l a lo largo de los ensayos.....	62
Tabla 4.5: Evolución del peso de la Probeta tipo PCM a lo largo de los ensayos	62

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Justificación

Los elementos que utilizan hormigón armado para su construcción como balcones, cornisas, situados a la intemperie, son los que más probabilidad tienen de sufrir daños y desprendimientos debido, la mayoría de las veces, a la corrosión de sus armaduras.

La corrosión de las barras de acero en estructuras de hormigón tiene origen electroquímico, está causada por la circulación de electrones entre las zonas catódicas y anódicas que se encuentran concentradas en el hormigón el cual actúa como electrolito. Normalmente las barras de acero de las estructuras de hormigón no se corroen debido a que se forma una capa de óxido estable que pasiva la superficie del acero: Esta capa pasiva se forma tras un proceso inicial breve de corrosión.

Durante el proceso de fraguado del hormigón, se desarrolla una alta alcalinidad que, en presencia de oxígeno favorece la consolidación de la capa protectora pasiva, la cual se mantendrá, mientras que el electrolito conserve su alcalinidad.

Existen procesos que pueden alterar la estabilidad de la capa de óxido, y en consecuencia la pasividad del acero, estos procesos son la carbonatación y la contaminación por cloruros.

La carbonatación es un proceso de penetración del dióxido de carbono atmosférico a través de la porosidad del hormigón, neutralizando su alcalinidad. El proceso de carbonatación reduce el pH, la capa de óxido de las barras no es estable y por penetración de oxígeno y humedad, se establece el proceso de corrosión.

Por todo esto es evidente que dependiendo de dónde se encuentre la estructura de hormigón la carbonatación será tanto más activa cuanto más poroso sea el hormigón, no ocurriendo en hormigones compactos de buena calidad y cuya capa de cubrimiento de las barras tenga un buen espesor. La penetración de iones cloro es debida a la adición de sales antihieladas, en pistas de rodadura de puentes y viaductos y, al agua de mar, en estructuras en ambiente marino o sumergidas en ella. Los iones cloro también pueden estar incluidos en aditivos del hormigón. La presencia de iones cloro, ataca la capa de óxido de pasivación iniciando el proceso de corrosión de las barras de refuerzo. Un contenido en cloro de 0,025% (en peso de hormigón) es suficiente para romper la capa pasiva del acero e iniciar el proceso de corrosión de las barras de refuerzo. Una vez iniciado el proceso, los productos de corrosión al tener un volumen específico mayor que el del metal, agrietarán la capa externa de la estructura exponiendo el acero a más elementos antipasivantes (cloruros, oxígeno, polvo) que aceleran la

corrosión proceso que terminará por el desprendimiento de la capa externa del hormigón que dejará al descubierto las barras de refuerzo. [1]

Al degradarse esta capa pasiva que se forma por distintos motivos como la reacción del hormigón con el dióxido de carbono de la atmósfera (CO_2 , carbonatación), penetración de sustancias agresivas para el acero, cloruros. Produciéndose zonas anódicas y catódicas (Fe^{2+} , OH^-) creándose una diferencia de potencial que se puede medir con equipos especializados.

El control de calidad, el mantenimiento y la planificación para la restauración de estas estructuras necesitan inspecciones no destructivas y técnicas de vigilancia que detecten la corrosión en una fase temprana. Se han realizado un gran número de investigaciones sobre los problemas derivados del deterioro del hormigón y la consiguiente corrosión del acero en el hormigón. Una adecuada supervisión de las estructuras de resistencia a la corrosión y la toma de medidas adecuadas en el momento oportuno podría reportar un enorme ahorro.

1.2 Objetivos

El presente trabajo muestra los resultados de la evaluación electroquímica de probetas de hormigón armado. La evaluación se realiza empleando potenciales a circuito abierto. En los resultados se presentan valores del campo potencial, los cuales dan una imagen del estado de la probeta en su interior. Se analizarán las distintas probetas para ver cuál de ellas presenta mejor comportamiento ante el ambiente al que se les ha sometido y de esta manera comprobar que el método utilizado es válido para este tipo de evaluaciones. Este método será apoyado por otros para comprobar el avance de la corrosión y de esta forma validar el método del campo potencial como herramienta de análisis de la corrosión.

1.3 Factores que causan la corrosión.

En el hormigón armado, la corrosión es un problema que no solo afecta a la integridad de la estructural, dado que la corrosión es la causante de agrietamientos y reducción de espesor en las armaduras. También compromete a la seguridad de las personas que lo pueden habitar. De esta forma la evidencia de problemas de corrosión como manchas de óxido, agrietamientos y desprendimiento de material provocan el deterioro de la estructura en cuestión. [2]

Para caracterizar el tipo de deterioro que sufre una estructura de hormigón armado afectada por la corrosión del acero de refuerzo y establecer la agresividad del ataque, se hace necesario identificar el factor desencadenante de la corrosión. Esencialmente son varias las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la película pasiva del hacer que se forma e iniciar la corrosión de las armaduras.

1.3.1 Corrosión iniciada por iones cloruro

Es causada porque en la superficie del acero o de la estructura de hormigón comienza a aparecer la presencia de iones cloruro con una concentración más alta que la concentración crítica. Los iones cloruro pueden romper el estado pasivo en el que se encuentran las armaduras dejando al acero sin

protección, formándose un compuesto soluble, el cloruro ferroso (Fe_2Cl), al entrar en contacto las armaduras con los cloruros.

Una vez perdida la pasivación, el acero tiene más facilidad para corroerse si están presentes todos los elementos necesarios como son el oxígeno y la humedad. En ausencia de alguno de los dos el proceso de corrosión no se produce. La presencia del ión cloruro se puede dar por dos casos. En primer lugar en la preparación de la mezcla y el otro caso sería el ingreso del ión durante la vida útil del hormigón. [3]

1.3.2 Corrosión iniciada por carbonatación

La carbonatación es el resultado de la reacción química que ocurre entre el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera y algunos productos de hidratación del cemento disueltos en la solución de los poros del hormigón. Una vez que el frente carbonatado alcance la armadura, el acero es susceptible de corroerse debido a que se rompe la pasividad.

De la misma forma que ocurre en el caso anterior, para que se produzca la carbonatación se deben dar todos los factores para que se produzca la corrosión del acero (humedad, oxígeno). En el proceso de carbonatación influyen varios factores tanto internos como externos, en los internos el factor más influyente es la porosidad y en los factores externos el más influyente es la humedad. [3]

1.4 Corrosión en ambientes marinos

La acción de los cloruros del agua del mar son el principal proceso de degradación del hormigón armado. El cálculo de la vida útil de una estructura de hormigón armado en ambiente marino debe contabilizar el periodo de iniciación, que es el tiempo que tardan los cloruros en alcanzar el nivel de las armaduras. El periodo de propagación es el tiempo que tarda la estructura en fisurarse.

El periodo de iniciación depende de la velocidad de penetración de los cloruros en el hormigón, en función de su calidad. El periodo de propagación depende de la disponibilidad de oxígeno dentro del hormigón.

Por otro lado el riesgo de que se produzca corrosión está condicionado por el tipo de ambiente marino en el que se encuentra la estructura:

- Zona sumergida, en esta zona el hormigón está siempre saturado y el agua se introduce bajo presión cuando está a una profundidad determinada y por absorción. De esta forma los cloruros pueden avanzar rápidamente y profundizar porque el medio de transporte es la permeabilidad. A estas profundidades existe escasez de oxígeno y por tanto solo se podría producir una corrosión negra con productos poco expansivos sin consecuencias.
- En la zona de marea el hormigón se encuentra siempre saturado debido a que nunca llega a secarse. Los cloruros avanzan lentamente en esta zona por difusión.
- La zona de salpicaduras es aquella que se humedece y se seca continuamente. En esta zona mediante la succión capilar los cloruros pueden avanzar rápidamente, alcanzando una determinada profundidad donde entonces pueden avanzar por difusión.

- En la zona aérea los cloruros alcanzan las estructuras de hormigón mediante la niebla salina, depositada en superficie por el viento, condensación etc. [4]

De particular interés, por su presencia muy común, son el dióxido de azufre (SO_2) y el cloruro sódico (NaCl) los cuales son de los más importantes en la atmósfera de la corrosión. La acción del SO_2 atmosférico en la corrosión de metales ha sido estudiada por numerosos investigadores desde hace tiempo. Sin embargo, la información cuantitativa sobre el efecto de la salinidad atmosférica en la corrosión metálica es menos abundante. Los iones cloruro abundan en las atmósferas marinas, en las que la fuente básica de mineralización la constituyen las partículas de agua salada. El depósito de estas partículas sobre la superficie de materiales metálicos intensifica el proceso de corrosión por variados mecanismos: aumento de la conductividad del electrolito, formación de productos de corrosión solubles, rotura de películas pasivantes, etc. Por otro lado, la cantidad de cloruros en el aire, provenientes del agua del mar y que arrastra el viento, depende de la distancia al mar, decreciendo rápidamente tierra adentro. Más allá de unos pocos cientos de metros del borde del mar, la salinidad y la velocidad de corrosión suelen decaer ostensiblemente. [5]

1.5 Ensayos no destructivos

Hoy en día, los ensayos del hormigón tienen un papel relevante para conocer mejor la estructura interna del hormigón. A partir de estos ensayos podremos crear hormigones de mayor calidad para cada situación en la que se desee utilizar. Los ensayos del hormigón pueden ser de dos tipos:

- Destructivos: Se denomina ensayo destructivo a los que determinan la resistencia del hormigón por medio de la rotura de probetas o de piezas de hormigón.
- No destructivos: se denomina ensayo no destructivo del hormigón (también llamado END, o en inglés NTD non destructive testing) a los que permiten conocer la calidad del hormigón sin destruir o afectar a la estructura interna del hormigón.

La importancia de los ensayos no destructivos reside en que podemos realizar inspecciones de piezas en servicio y controles de calidad de estas sin destruir o influir en las propiedades del hormigón ensayado. Este trabajo se centra en los no destructivos, en concreto en los métodos de la medida del potencial de corrosión, el análisis mediante termografías y el análisis de la durabilidad del hormigón mediante la variación de pesos. [6]

En este aspecto los ensayos no destructivos (END) se presentan como una de las opciones más interesantes a explorar, ya que consisten en un conjunto de técnicas capaces de examinar un elemento, mediante el uso de varias tecnologías, sin afectar la utilidad a futuro de ese elemento. La termografía infrarroja pertenece a esta clasificación

Como una de las 6 categorías básicas que conforman los END,

- Mecánica–óptica,
- Radiación de penetración
- Electromagnético-eléctrico
- Sónico-ultrasónico
- . Térmico e infrarrojo,
- Químico-analítico

En muchos casos estas categorías encierran métodos que no son del todo no destructivos, pero que al compararse con otros métodos tradicionales cuyas técnicas implican sustracción o destrucción de una parte del elemento, se les incluyen como END. Sin embargo la termografía TIR es una técnica de teledetección, por lo que no necesita estar en contacto con el elemento a analizar, y que por tanto su aplicación no compromete en absoluto la integridad estructural del elemento estudiado. [7]

1.5.1 Medida del potencial de corrosión

La corrosión de un metal en medio acuoso, como es el caso de la armadura dentro del hormigón, es un fenómeno que engloba dos semirreacciones de oxidación-reducción, por un lado la oxidación del Fe a Fe^{2+} , y por otro lado la reducción del oxígeno. La intensidad del proceso anódico y del proceso catódico es igual, y son identificadas como la intensidad de corrosión del proceso, I_{corr} , que es la magnitud eléctrica utilizada como medida de la velocidad de corrosión. En estas condiciones, el metal se corroe a un potencial característico de su naturaleza y de la del medio. A este potencial al que se encuentra el metal se le denomina potencial mixto o de corrosión, E_{corr} (potencial de corrosión o de equilibrio).

La medida del potencial de corrosión consiste en determinar la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de las armaduras y un electrodo de referencia que se coloca en la superficie del hormigón (Electrodo de Cu/CuSO₄ con esponja para el contacto con el hormigón).

El E_{corr} en sí, no cuantifica la proporción de metal que se corroe por unidad de área.

Por ello estos valores no deben considerarse más que como valores orientativos y de validez estrictamente cualitativa, sin que se pueda establecer de una forma general y para cualquier condición de exposición una relación constante entre E_{corr} y la cinética del proceso. La interpretación de las medidas de potencial de corrosión se suele hacer calificando el riesgo según el criterio (Norma ASTM C-876-09):

Las principales técnicas utilizadas in situ para evaluar la corrosión en hormigón armado son de naturaleza electroquímica, debido a que ésta es la base del proceso de corrosión. Por su simplicidad, la medida de E_{corr} , es el método más utilizado en las determinaciones de campo. A partir de estas medidas pueden dibujarse mapas de potencial que revelan las zonas que son más propicias de sufrir corrosión en el estado activo. Sin embargo, como estas medidas tienen carácter cualitativo su interpretación es difícil. Esto se debe a que el potencial sólo informa del riesgo de corrosión y no de la actividad en el momento presente. Además, el desarrollo de macropares puede también llevar a conclusiones erróneas ya que las zonas corroídas polarizan los alrededores que pueden parecer también como corroídas cuando son áreas catódicas del macropar. Por ello, estos mapas de potencial tienen todavía la función de lograr una interpretación cualitativa general y actuar como complemento de otras técnicas in situ. Lo mismo que se ha dicho sobre el potencial sucede con las medidas de Resistividad, las cuales son utilizadas en algunas ocasiones conjuntamente con los datos de mapeo de E_{corr} . Los valores de la resistividad proporcionan una indicación del grado de humedad que contiene el hormigón, el cual está relacionado con la velocidad de corrosión cuando el acero se está corroyendo activamente, pero cuya interpretación puede llevar a conclusiones erróneas cuando el acero está pasivo. [7]

1.5.2 Termografía

La radiación consiste en la transmisión continua de energía realizada por los cuerpos o sustancias en forma de ondas electromagnéticas que se transmiten a la velocidad de la luz. A su vez, estas ondas se componen del movimiento de los átomos y las moléculas que conforman la materia. La “radiación

térmica” o de temperatura es la que se produce debido al movimiento térmico de los átomos y moléculas que conforman la materia, y se realiza empleando la energía interna de la sustancia o materia. Cuando un cuerpo que emite recibe energía del exterior, compensa esta pérdida de energía, por tanto se dice que la radiación se realiza en equilibrio; de no recibir el cuerpo energía exterior, se produce un enfriamiento.

La termografía es una técnica que permite medir la temperatura superficial de los cuerpos, basándose en la radiación infrarroja que emiten. Esta radiación infrarroja está formada por ondas electromagnéticas generadas por el movimiento de enlaces moleculares (vibración y rotación).

Algunas ventajas que tienen las termografías son las siguientes, se puede medir en tiempo real mientras se visualiza el objeto en pantalla, no es invasiva, esto quiere decir que la medición se produce sin contacto directo. Es bidimensional, permite medir la temperatura de varios puntos de un objeto en un mismo instante y entre otras muchas cosas es multidisciplinar ya que la interpretación de las imágenes puede tener distintos fines.

Para poder entender bien y poder utilizar correctamente esta técnica hay que conocer el significado de emisividad, que es una característica de los cuerpos negros que expresa la eficiencia de una superficie como radiador (o absorbedor) de radiación electromagnética, en otras palabras, es una propiedad de la superficie de los cuerpos que determina su habilidad para irradiar energía. La emisividad hace referencia al porcentaje de energía que emite un cuerpo real en función de la energía máxima que puede irradiar un cuerpo negro a la misma temperatura. Esta se valora del 0 al 1, siendo el cuerpo con mayor emisividad el que posea un valor cercano al 1. Asimismo, esta actúa en función de otras variables, incluyendo color y rugosidad de la superficie; y varía según la temperatura y longitud de onda.

La técnica de investigación de termografía infrarroja aplicada sobre el hormigón se basa en el principio fundamental de que los materiales con anomalías subsuperficiales, tales como bolsas de aire ocasionadas por la corrosión en el acero de refuerzo, los vacíos causados por la mala consolidación de hormigón llamados coqueras, o la agrupación de los fluidos tales como la infiltración de agua en este material, pueden afectar el flujo de calor a través del mismo. Estos cambios en el flujo de calor causan diferencias localizadas en la temperatura superficial que son captados por la cámara termográfica y luego interpretados. No obstante, esa temperatura de la superficie del hormigón depende a su vez de tres factores [9]:

- La configuración subsuperficial
- Las condiciones en las que se encuentra la superficie a analizar
- el ambiente.

En el primer caso, la configuración subsuperficial se podrá observar gracias al principio de que la transferencia de calor no puede detenerse de circular de una zona más cálida a una más fría, y que solo puede circular a diferentes rangos debido a los efectos aislantes del material en el cual se está moviendo. Esto hace que el hormigón, al igual que otros materiales de construcción, tenga diferentes habilidades de aislamiento térmico o valores de conductividad. Por ejemplo una coquera causada por cavitación o la corrosión asociada a la delaminación tiene una conductividad térmica menor al hormigón que rodea estos defectos. Por tanto el hormigón sano es el que tendrá menor resistencia a la conducción del calor, y los efectos internos por convección y radiación serán insignificantes, mostrando siempre una temperatura uniforme.

El segundo factor a considerar, cuando se usa la termografía infrarroja para medir diferencias de temperatura debido a anomalías en el hormigón, es su superficie. Ella será la encargada de emitir la energía que capta la cámara. Este fenómeno dependerá de la emisividad, propiedad que es inevitablemente de la superficie, y la cual mientras más cercana al valor de 1 mejor. Por lo tanto, el valor de la emisividad será más alto para superficies de hormigón oscuras y rugosas, y por ende menor para superficies lisas y brillantes. En consecuencia el técnico responsable debe estar atento de las

diferencias de texturas causadas por cepillado, huellas de neumáticos, aceite o incluso arena y suciedad sobre las superficies.

Finalmente, el último factor a tener en cuenta es el ambiente que rodea a la superficie. En este caso existirán varios parámetros que podrán variar la medición de la temperatura en las superficies, que variaran dependiendo de si el elemento a analizar está a exterior o interior. Estos parámetros son: la radiación solar, la presencia de nubes, la temperatura y humedad del ambiente, la velocidad del viento y la humedad en las superficies. [10]

1.6 Campo potencial

El potencial eléctrico en un punto, es el trabajo que debe realizar un campo electrostático para mover una carga positiva desde dicho punto hasta el punto de referencia dividido por unidad de carga de prueba. Dicho de otra forma, es el trabajo que debe realizar una fuerza externa para atraer una carga positiva unitaria “q” desde el punto de referencia hasta el punto considerado en contra de la fuerza eléctrica a velocidad constante.

El potencial eléctrico sólo se puede definir unívocamente para un campo estático producido por cargas que ocupan una región finita del espacio. Para cargas en movimiento debe recurrirse a los potenciales de Liénard-Wiechert para representar un campo electromagnético que además incorpore el efecto de retardo, ya que las perturbaciones del campo eléctrico no se pueden propagar más rápido que la velocidad de la luz.

Se considera que las cargas están fuera de dicho campo, la carga no cuenta con energía y el potencial eléctrico equivale al trabajo necesario para llevar la carga desde el exterior del campo hasta el punto considerado. La unidad del Sistema Internacional es el voltio (V).

Todos los puntos de un campo eléctrico que tienen el mismo potencial forman una superficie equipotencial. Una forma alternativa de ver al potencial eléctrico es que la diferencia de la energía potencial eléctrica o electrostática, caracteriza sólo una región del espacio sin tomar en cuenta la carga que se coloca ahí. [11]

Factores que afectan al campo de potencial:

Cuando se miden los potenciales superficiales, los resultados son remotos, es decir, no se realizan directamente sobre la armadura debido al recubrimiento de hormigón. Por tanto, los potenciales medidos están afectados por pérdidas o ganancias óhmicas de potencial a través del hormigón. Estos son los factores con efectos más significantes en la variación de las medidas de potencial:

- Profundidad de los recubrimientos del hormigón: Al aumentar la cobertura del hormigón, los valores de potencial en superficie sobre barras pasivadas o con corrosión activa se aproximan. Por esta razón, localizar pequeñas áreas de corrosión se hace más difícil a medida que las barras se localizan más profundas.
- Resistividad del hormigón: La humedad del hormigón y la presencia de iones en la solución porosa afecta a la resistividad eléctrica del hormigón. La resistividad puede variar en función tanto de la estructura como del tiempo, que hacen variar la humedad local y los contenidos salinos. El resultado puede ser un error de +50 mV en los potenciales medidos.
- Capas superficiales de alta resistividad: Las corrientes de una macrocélula tienden a evitar los hormigones de alta resistividad. Los potenciales medidos superficialmente se positivizan y por ello, en estos casos las áreas de corrosión pueden resultar indetectables.
- Efecto de polarización: El acero en estructuras de hormigón inmersas en agua o en tierra tiene generalmente niveles muy altos de potencial negativo debido a la restricción de acceso del oxígeno a la estructura. En la región de transición de la estructura (zona de

batimiento de agua o del límite con la tierra) se pueden medir potenciales negativos debido a los acoplamientos galvánicos con las barras inmersas. Estos potenciales negativos no tienen relación con la corrosión de los refuerzos. [12]

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

La prevención, control y medición de la corrosión abarca un amplio espectro de actividades técnicas. Dentro del control de la corrosión y su prevención, existen opciones diferentes como son la protección anódica y catódica, la selección de materiales, la inyección química y la aplicación de recubrimientos externos e internos. La medición de la corrosión, por su parte, emplea otra variedad de técnicas destinadas a determinar qué tan corrosivo es el ambiente del sistema y a que tasa o rapidez se experimenta la pérdida de metal. La medición de la corrosión es un método cuantitativo a través del cual la efectividad de las técnicas antes mencionadas para el control y prevención de la corrosión pueden ser evaluadas y proveer la retroalimentación necesaria para optimizarlas. La Monitorización de la corrosión es la práctica de la medición del potencial corrosivo de las condiciones de un proceso, a través del uso de “probetas”, las cuales son insertadas en el proceso y expuestas continuamente a las condiciones ambientales del mismo. Las probetas de monitoreo de corrosión pueden ser dispositivos mecánicos, eléctricos o electroquímicos. Las técnicas de monitoreo de corrosión proveen de una medición directa y en línea de la pérdida de metal y/o tasa de corrosión en el sistema de un proceso industrial. Típicamente, un programa de medición de la corrosión, inspección y mantenimiento utilizada en cualquier industria, utilizaría una combinación de técnicas de medición en línea, directa e indirecta. [13]

La falta de accesibilidad directa a las armaduras, dificulta los estudios sobre la durabilidad de las estructuras. De este modo resultaba muy difícil realizar previsiones fiables del comportamiento de un hacer embebido en un hormigón de características definidas sometido a un determinado ambiente.

La velocidad de corrosión puede informar sobre la cantidad de metal que pasa a óxido así como la superficie de armadura expuesta al ataque de la corrosión. La técnica habitual consiste en la evaluación de la pérdida de masa de la barra de acero debida a la corrosión por la diferencia de las pesadas antes de someterla a un ambiente agresivo con la pesada de después de someterla a este ambiente. Esta operación puede dar un valor medio de la corrosión durante el ensayo, pero no informa de la evolución de la corrosión con el paso del tiempo. Es a partir de los años 70 donde se extienden los métodos electroquímicos basados en señales eléctricas y en el análisis de la respuesta del sistema. Las ventajas con respecto a otras técnicas son la posibilidad de determinar la corrosión casi de manera instantánea y que algunas de las técnicas son no destructivas, además de presentar una elevada sensibilidad a la hora de determinar el grado de corrosión. [14]

2.2 Técnicas electroquímicas

En 1957 fue introducida por Stern y Geary la medida de la corrosión utilizando métodos electroquímicos. La aplicación de estas técnicas está basada en la correlación entre transferencia de cargas eléctricas, de flujo de masa y la densidad de corriente.

Esta clase de técnicas proporcionan información sobre el proceso de corrosión pero no revelan el estado de deterioro del acero. Los resultados que se obtienen solo son válidos para las condiciones concretas en las que se han realizado las diferentes medidas, ya que también dependen de las condiciones de humedad en las que se hayan realizado los ensayos.

La equivalencia entre las intensidades de los procesos de oxidación y reducción en cualquier sistema metal-medio impone que, en ausencia de perturbaciones externas, se impide la medida directa de la velocidad de corrosión puesto que instrumentalmente no se mide corriente alguna, al compensarse las intensidades de la semirreacción anódica y catódica. Para obtener la información que nos permita calcular el índice de corrosión es preciso imponer una alteración al sistema, para de esta manera romper con la equivalencia mencionada. La forma en la que se procede es imponer al sistema una señal eléctrica y analizar la respuesta producida. Un ejemplo de esto sería la aplicación de señales de potencial y el registro de su respuesta en corriente, o bien aplicación de señales y registro de la respuesta en potencial. La corrosividad de un material es mayor cuanto mayor es la intensidad externa, para una polarización. La información acerca del estado de la armadura es obtenida normalmente por medida del potencial en circuito o potencial de corrosión, la resistividad del hormigón e intensidad de corriente. [15]

2.2.1 Técnicas cualitativas. Potencial de corrosión

La corrosión de un metal en un medio acuoso, como es el caso de la armadura dentro del hormigón, es un proceso que engloba dos semirreacciones de oxidación-reducción. La intensidad del proceso anódico es igual a la del proceso catódico y de esta forma se identifican como la intensidad de corrosión del proceso, que es la magnitud eléctrica utilizada como medida de la velocidad de corrosión. En estas condiciones, el metal se corroe a un potencial característico de su naturaleza y del medio. Al valor de potencial en un sistema que está se está corroyendo naturalmente, sin flujo de corriente externa, se denomina potencial de corrosión E_{corr} .

Durante la corrosión, los iones hierro se desplazan desde la armadura hasta el hormigón adyacente, dejando la armadura con carga negativa. El método de potencial se emplea para detectar esta carga negativa y así proporcionar una indicación de la actividad corrosiva. El potencial electroquímico es una medida de la facilidad de transferencia de electrones entre un metal y el ambiente en que se encuentran, en este caso el acero y la solución de los poros de hormigón. En estas condiciones, el valor de potencial de la barra se deduce de su comparación con el electrodo de referencia escogido. Debido a las medidas de potencial, pueden localizarse áreas en las que la armadura está pasiva y que son susceptibles de corroerse si se dan condiciones adecuadas de humedad y de oxígeno. Aparte de esto, las medidas de potencial pueden emplearse para:

- Localizar y definir las zonas en las que se debe realizar ensayos para determinar el estado en el que se encuentra la estructura.
- Evaluar la eficiencia de trabajos de reparación mediante el control del estado de la corrosión.
- Diseño de medidas para prevenir la corrosión como puede ser la protección catódica.

La manera de interpretar los resultados de las medidas obtenidas mediante el potencial de corrosión, se suele hacer calificando el riesgo según el criterio establecido en la Norma ASTM C-876-09.

Por otro lado los resultados de este ensayo deben ser interpretados con precaución. En zonas donde la armadura embebida en el hormigón presenta potenciales más negativos a $-0,35$ V indica que la armadura se encuentra en estado de corrosión, aunque algunos investigadores, no han encontrado corrosión a potenciales más negativos y otros han encontrado un alto grado de corrosión con potenciales más positivos. Esto puede ser debido a que en ocasiones el potencial representa la química de la solución en contacto con el acero, que puede no estar relacionada con la corrosión. Por ejemplo, se pueden obtener potenciales muy negativos en hormigones saturados en agua, en los que no hay oxígeno para mantener o iniciar la corrosión.

A partir de estas medidas se pueden dibujar los mapas de potencial que revelan las zonas pasivas de la estructura y las zonas que presentan corrosión en estado activo. Debido a las diferentes variables que influyen en la medida, y, debido a que las medidas tienen carácter cualitativo deben de ser apoyadas por otras técnicas “in situ”. [17]

2.2.2 Técnicas cuantitativas de corriente continua

Las técnicas electroquímicas para monitorizar el proceso de corrosión y determinar la velocidad a la que se produce, proporcionan valores de corriente de corrosión I_{corr} que representa una estimación del ataque por corrosión de la armadura. El valor de I_{corr} medido puede convertirse a la velocidad de corrosión instantánea (J_r) expresado en $\text{g/cm}^2\text{s}$ y al valor de la penetración (P_r) en cm/s a través de la ley e Faraday:

$$J_r = (W / F) \cdot I_{\text{corr}}$$

$$P_r = (W / F\delta) I_{\text{corr}}$$

Donde, W es el peso equivalente del acero ($55,85/2=27,925$ g) F es la constante de Faraday (96487 C) δ es la densidad del acero ($7,85$ g/cm^3).

Los valores de I_{corr} (velocidad de corrosión por unidad de superficie) medidos suelen ser del orden de 10^{-9} a 10^{-7} A/cm^2 para el estado pasivo y de 10^{-7} a 10^{-6} A/cm^2 para el estado activo. [18]

2.2.3 Técnicas cuantitativas de corriente alterna

Este tipo de técnica se basa en el empleo de la corriente alterna para evaluar la corrosión existente. Esta técnica tiene la ventaja de que cubre varios órdenes de frecuencia desde MHz hasta μHz . La realización de esta prueba se basa en la perturbación sinusoidal (V_m) de pequeña amplitud sobre el potencia del electrodo de trabajo a lo largo de un rango de frecuencias.

La técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica es un método electroquímico, utilizado en estudios de corrosión. En el procedimiento experimental se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias. Es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencia del sistema. Así el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial (tiempo y corriente), dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “ espectro de impedancis”

En el caso de los estudios de corrosión que utilizan la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica, los espectros de impedancia obtenidos suelen ser analizados mediante circuitos

eléctricos, compuestos por componentes tales como resistencias (R), capacitancias (C), inductancias (L), etc. Combinados de tal manera que reproduzcan los espectros de impedancia medidos. Estos circuitos eléctricos son denominados “ circuitos eléctricos equivalentes” .

La impedancia es un término que describe la resistencia (R), utilizando circuitos de corriente alterna (CA). En un circuito de corriente directa (CD) la relación entre corriente (I) y el potencial (E) está dada por la Ley de Ohm. [19]

2.2.4 Otras técnicas y parámetros para evaluar la corrosión

Ruido electroquímico

En el estudio del ruido electroquímico no se trata con señales audibles, sino con oscilaciones en el potencial y corriente electroquímicas. El ruido electroquímico en potencial se define como las oscilaciones estocásticas del potencial electroquímico de un electrodo con respecto a un electrodo de referencia, mientras que el ruido electroquímico en corriente es la oscilación estocástica de una corriente electroquímica. La medición del ruido electroquímico es relativamente simple, aunque lo importante es la obtención de la información relevante que pueda ser en muchos casos más problemática.

La medición del ruido electroquímico de potencial y corriente puede hacerse de manera simultánea. El ruido en potencial se realiza a través de la medición de las oscilaciones del potencial de corrosión respecto a un electrodo de referencia, o bien midiendo un electrodo nominalmente “idéntico”. El ruido en corriente se obtiene midiendo las oscilaciones de la corriente entre dos electrodos idénticos o de un solo electrodo bajo control potencioestático.

La medición simultánea permite obtener por analogía con la Ley de Ohm la resistencia de ruido electroquímico y mediante análisis espectral la impedancia de ruido electroquímico. Esta resistencia es equivalente a la resistencia de polarización, y en ella se incluyen oscilaciones debidas a la transferencia de carga (cinética electroquímica, o bien oscilaciones de la resistencia de la solución debidas a la nucleación, crecimiento y desprendimiento de burbujas. [20]

Medida de la resistencia eléctrica

Se basa en la medida de la resistencia eléctrica de secciones metálicas finas embebidas en el hormigón. Como la resistencia de una lámina o cable metálico es inversamente proporcional a su espesor o diámetro, cuando se produce la corrosión, disminuye de sección, con lo que aumenta su resistencia. [15]

Medida de la resistividad

En el hormigón, la resistividad es un parámetro efectivo para evaluar el riesgo de corrosión en la armadura. La medida de la resistividad proporciona información sobre el contenido de agua en el hormigón, por lo que esto sirve como indicador complementario adecuado para localizar áreas con riesgo de corrosión evaluando la capacidad del hormigón de actuar como electrolito. Las armaduras alcanzan el estado activo cuando la resistividad es menor a $k\Omega \cdot cm$ y el estado pasivo cuando la resistividad es mayor que $30 k\Omega \cdot cm$.

La resistividad es uno de los parámetros junto con el mapeo de potencial que más se utilizan en el seguimiento e inspección de estructuras para determinar la gravedad de los problemas de corrosión que pueden presentarse. Proporcionando la información necesaria acerca del riesgo de corrosión debido a que existe una relación lineal entre la intensidad de corrosión y la conductividad electrolítica del hormigón. Aunque la velocidad de corrosión no está controlada únicamente por la resistividad del hormigón. Por lo tanto, no se puede considerar como factor determinante para definir o prevenir un daño potencial en la estructura. [21]

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Procedimiento experimental

El presente trabajo muestra los ensayos y resultados obtenidos de la evaluación de estructuras de hormigón armado expuestas a un medio agresivo, como el marino. La exposición de las probetas a éste medio se ha llevado a cabo en el laboratorio mediante una solución de NaCl al 3,5% y agua. En la parte final de los ensayos, las probetas se sometieron a una disolución sobresaturada de NaCl al 10% para aumentar la velocidad del proceso de corrosión y poder evaluar los resultados de manera más eficiente. La evaluación se realizó empleando un sistema de análisis del campo potencia mediante el analizador Canin+, para su evaluación electroquímica. Los resultados muestran la probabilidad de corrosión de las probetas utilizadas, tanto marinas, como normales, como tipo PCM.

En las probetas de hormigón armado utilizadas, se diseñaron sistemas de celdas para estudiar la utilidad de estas técnicas de monitorización en un ambiente sumergido

En los ensayos realizados para comprobar el grado de corrosión que producen los cloruros marinos sobre las probetas de hormigón se han utilizado diferentes métodos de análisis:

- Análisis del campo potencial
- Análisis de determinación de pesos
- Análisis termográfico de las estructuras

En el presente trabajo también se realiza la prueba para comprobar el grado de corrosión en una armadura de hormigón real, para comprobar el correcto funcionamiento del analizador Canin+. Este análisis se ha llevado a cabo en una estructura de hormigón del Gimnasio de la Escuela Naval Militar “Roger de Lauria.

3.2 Preparación de las probetas

Para los análisis realizados en el trabajo se han utilizado diferentes probetas de hormigón con distinta composición en cada una de ellas, para poder comprobar así como avanza el grado de corrosión debido al efecto producido en la superficie del acero por los iones cloruro y dióxido de carbono. Para llevar a cabo estos análisis se han considerado una serie de análisis de diferentes

probetas que han sido expuestas a una solución de NaCl al 3,5% y agua, y se han analizado todas las probetas por los métodos expuestos anteriormente. Los datos conocidos de las probetas anteriormente a esta evaluación han sido proporcionados por el departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Vigo, ya que estas probetas preceden de un estudio previo y diversos trabajos en los que se han empleado.



Figura 3.1: Probeta cúbica de hormigón

Las probetas consideradas para el análisis del grado de corrosión disponen de tres barras de acero corrugado con un diámetro de 10 mm y calidad B 500 SD (UNE 36068:2011)

Para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo se han escogido probetas de tres tipos diferenciados:

- Probetas de CEM SR/MR.
- Probetas de cemento autocompactante.
- Probetas con cemento 10% en PCM (mortero polímero modificado).

Dependiendo del tipo de cemento que se utiliza para la mezcla podemos diferenciar éste tipo de probetas.

		DOSIFICACIONES (Kg)		
		NORMAL	MARINO	PCM
CEMENTO	CEM I 52,5 R	290		261
	CEM SR/MR		365	
FILLER	La Estrella	290	255	261
GRAVILLA	Granito 6/12mm	704	658	633
ARENA	Granito 0/3mm	882	886	793

Tabla 3.1: Composición de las Probetas

La única y principal diferencia en las probetas tipo CEM radica en el tipo de cemento utilizado para realizar la mezcla, por lo que éste mismo será el que nos proporcione la información sobre qué tipo de cemento debe ser utilizado en el caso de que se someta un ambiente como el marino que es muy agresivo.

Las probetas PCM, que son el otro tipo de probeta utilizado, son aquellas a las que utilizando una composición CEM I se le ha incorporado un 10% de composición de un polímero modificado.

Los hormigones PCM se caracterizan por añadirles en el proceso de mezcla junto con el cemento, el aditivo y los áridos, un polímero como el látex, resinas líquidas o monómeros, formado todo ello con una matriz mixta donde el polímero se homogeniza con los demás componentes. Así se consigue un aglomerante híbrido orgánico-inorgánico (polímero, cemento y agua).

Debe existir una compatibilidad entre ambas partes para que el resultado sea el esperado, tanto en la etapa de amasado como en la etapa de endurecimiento del hormigón. La principal ventaja del hormigón PCM es que es un tipo de hormigón de cambio de fase el cual permite con menos espesor tener la misma capacidad de calor específico de otros materiales, el cual aumentará a medida que aumenta el porcentaje de polímero. [2]

3.3 Procedimiento de ensayo y monitorización

Se han analizado 3 probetas de cemento (una de cada uno de los tipos antes mencionados) con el analizador de corrosión Canin+ para poder realizar una primera evaluación del campo potencial antes de sumergirlas en ningún medio. De esta forma y mediante la medición del potencial de media celda se determina el grado de corrosión así como la degradación de las probetas de la que partimos. Debido a la forma cúbica de las probetas, se realiza una cuadrícula de 3x3 en cada una de las caras laterales para realizar las medidas correctamente.



Figura 3.2: Instrumento analizador de corrosión Canin +

Antes de realizar ninguna medida, y de acuerdo con las instrucciones de uso del analizador, se prepara una solución saturada mezclando 40 unidades de peso de sulfato de cobre ($CuSO_4$) con 100 unidades de peso de agua destilada. Para asegurar que la solución permanece saturada se debe añadir una cucharadita de cristales de sulfato de cobre al electrodo.

El electrodo se debe llenar al máximo dejando una cantidad mínima de aire en el compartimento. De esta forma se garantiza que el tapón de madera del compartimento este en contacto con la solución en todo momento. Una vez preparada la disolución de CuSO_4 conectamos el electrodo de media celda al dispositivo, en la entrada INPUT A que necesita una conexión a tierra.



Figura 3.3: Conexión del instrumento analizador de corrosión Canin+. [4]

Una vez que se ha preparado la disolución que debe estar en todo momento saturada, se conecta el electrodo de celda correspondiente, de manera que se puedan llevar a cabo las mediciones de los potenciales dentro del hormigón y en la superficie del mismo.

Para llevar a cabo las mediciones se necesita conectar un voltímetro de alta impedancia de uno de los electrodos conectado al refuerzo de acero de manera que se mueva en una cuadrícula de la superficie del hormigón.

La medición del campo potencial se basa en medir los potenciales en la superficie del hormigón para que de ésta manera podamos lograr una imagen característica del estado en el que se encuentra la corrosión dentro del hormigón.

De esta forma, hay un electrodo de referencia conectado mediante un voltímetro de alta impedancia (en el caso del sistema Canin+, $R=10\text{ M}\Omega$) al refuerzo de acero y que se mueve en una cuadrícula sobre la superficie de hormigón.

El electrodo de referencia del sistema Canin+ es una media celda Cu/CuSO_4 . Consiste en una barra de cobre sumergida en una solución de sulfato de cobre que mantiene un potencial conocido y constante.

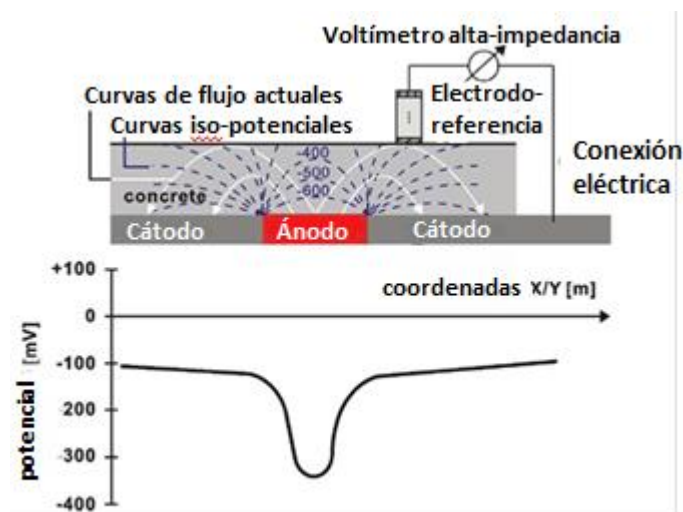


Figura 3.4: Esquema general de la medición mediante analizador de corrosión Canin+. [4]

Es de esperar que el potencia de media celda del acero frente al electrodo de referencia de $Cu/CuSO_4$ se encuentre en el intervalo de -400 a +200mV. [4]

Situación del hormigón	Potencial de media celda
Hormigón saturado de agua sin O_2	De -1000 a -900 mV
Hormigón húmedo contaminado con cloruro	De -600 a -400 mV
Hormigón húmedo sin cloruro	De -200 a +100 mV
Hormigón húmedo carbonatado	De -400 a +100 mV
Hormigón seco carbonatado	De 0 a +200 mV
Hormigón seco no carbonatado	De 0 a +200 mV

Tabla 3.2: Órdenes de magnitud para el potencial de media celda de acero en hormigón [4]

En el desarrollo del proyecto se va a disponer de cuatro probetas de hormigón de los tipos antes mencionados. Inicialmente no se introducirá en ningún medio agresivo y cuando su valor se haya estabilizado, se procederá a su estudio en dicho medio agresivo, que para éste proyecto será un ambiente marino (agua al 3,5% de NaCl).

Una vez analizadas las tres probetas de hormigón mediante el analizador de corrosión Canin+ y habiendo guardado los resultados obtenidos,

Terminados los diferentes ensayos, antes de exponer las probetas al medio agresivo se precede a la preparación de éste. Utilizando una balanza para medir la cantidad de NaCl a utilizar, en este caso 35 gramos por cada litro de disolución (agua destilada). Para la realización de éste trabajo se han necesitado un litro y medio de disolución de NaCl para llenar los so recipientes donde están contenidas las probetas.



Figura 3.5: Preparación de la solución de NaCl

Para la elaboración del proyecto completo fue necesario preparar por segunda vez la disolución de NaCl para mantener el nivel de agua constante. Tras preparar la solución de agua salada se introducen las probetas en los recipientes en los que van a estar contenidas. Durante los periodos en los que no se realizan los ensayos permanecerán en los respectivos recipientes en los cuales se mantendrán húmedas y expuestas a cloruro sódico el cual irá aumentando el grado de corrosión de nuestras probetas a lo largo del tiempo. Para cada ensayo se realiza el mismo procedimiento, se numeran las diferentes caras de las diferentes probetas y se realiza lo mismo con las barras de acero de esta forma permitirá que siempre que se realice un ensayo, utilizar el mismo procedimiento. En cada ensayo se toman nueve muestras por cada cara de la probeta alternando entre las barras de acero más cercanas a cada cara, esto es, dieciocho muestras por cara. Se decide realizar los ensayos espaciados tres o cuatro días, posteriormente y para poder apreciar mayor progresión y diferencia de un ensayo a otro se decide realizar los ensayos a partir del cuarto espaciados cinco días.



Figura 3.6: Probetas contenidas en sus recipientes

Debido al reducido tiempo para la realización del proyecto y para comprobar una evolución notoria del aumento del grado de corrosión se decide acelerar el proceso de corrosión procediendo a aumentar

la concentración de NaCl a 100 gramos de soluto por cada litro de disolvente. También se decide cambiar el recipiente en el que van a estar contenidas las probetas y procede a introducirlas en recipiente cerrado para de esta forma también favorecer la rápida evolución de los productos de la corrosión.

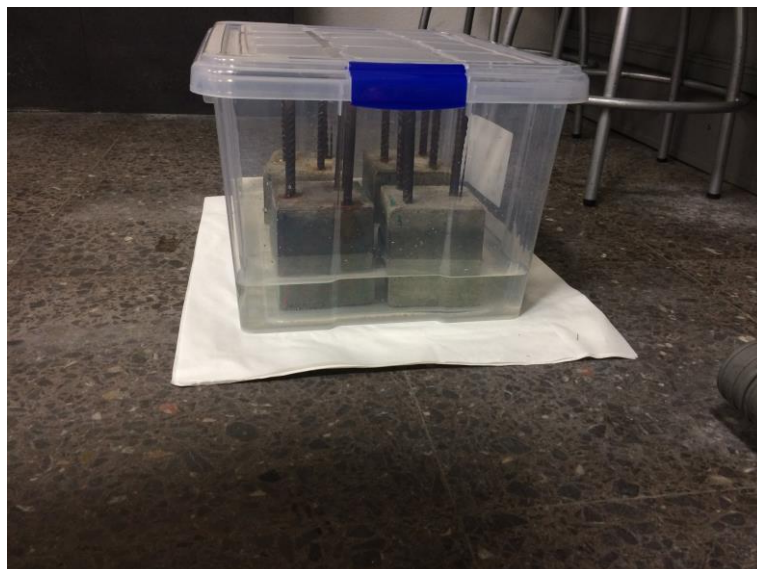


Figura 3.7: Probetas en exceso de agua salada

Por último y para comprobar el correcto funcionamiento de nuestro medidor de corrosión se procede a realizar un ensayo en un lugar fuera del laboratorio. Se realiza el ensayo en una estructura de hormigón en el gimnasio “Roger de Lauria” emplazado en la Escuela Naval Militar. El lugar elegido es de difícil acceso ya que no se encontró otro lugar con las condiciones óptimas para poder realizar el ensayo con el analizador de corrosión Canin+. Una vez situados en el lugar del ensayo se realizaron dieciocho muestras en la cara del hormigón el cual no estaba en el estado óptimo para realizar la medición debido a que se necesita que la cara de hormigón a medir este humedecida. Otro aspecto que hizo que la prueba no se realizara en las mejores condiciones fue la posición en la se encontraba la estructura la cual era difícil de medir, incluso debido a las malas condiciones lumínicas del lugar que impedían que se realizaran las operaciones con el rigor que debían.



Figura 3.8: Ensayo en estructura real

3.4 Procedimiento determinación de pesos

La técnica de pérdida de peso es la más simple y la más conocida de todos los métodos de monitoreo de corrosión. Esta técnica se basa en la exposición por un tiempo determinado de una muestra (cupón) del mismo material de la estructura supervisada, en el mismo ambiente corrosivo al que la estructura está expuesta. La medición obtenida de los cupones al analizarse es la pérdida de peso que ocurre en la muestra durante el período de tiempo al que ha sido expuesto, expresada como tasa de corrosión. La simplicidad de esta medición es tal, que la técnica de monitoreo con cupones es el método básico utilizado en muchos programas de inspección de la corrosión. Esta técnica es extremadamente versátil, debido a que los cupones de pérdida de peso pueden ser fabricados en cualquier aleación comercial disponible. [13]

Con éste tipo de análisis se trata de evaluar la vida útil de las diferentes probetas que se utilizan, realizando ensayos de determinación de pesos, ya sea el peso sumergido o el peso saturado de la superficie seca de las mismas.

La vida prevista o vida útil es el período en el que una estructura cumple sus requisitos funcionales, exigidos a un cierto nivel establecido con anterioridad, sin costes inesperados de mantenimiento y reparación. Si el tiempo es suficientemente largo, la vida útil equivale a la durabilidad. La aptitud del hormigón para resistir depende de su capacidad en limitar los intercambios con el exterior.

Para ello se aplicará el ensayo de ataque por agua de mar.

En el ensayo realizado, los únicos fenómenos de deterioro que se simulan son los de descomposición química del cemento hidratado. Los componentes agresivos del agua de mar son: CO_2 , MgCl_2 y MgSO_4 . El dióxido de carbono reacciona con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produciendo bicarbonato cálcico. El dióxido de carbono puede reaccionar también con el monosulfoaluminato de calcio y destruir el principal compuesto que proporciona resistencia para formar aragonita. Aunque el MgCl_2 y los sulfatos se encuentren en pequeñas cantidades pueden ocasionar también reacciones perjudiciales. Estos compuestos reaccionan con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produciendo CaCl_2 soluble o yesos. El lavado de ellos produce un debilitamiento del hormigón. El sulfato de magnesio puede reaccionar también con el

monosulfoaluminato de calcio en presencia del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formar etringita; la velocidad de esta reacción puede disminuir en presencia de NaCl y puede no suceder si el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es convertido antes por el CO_2 en carbonato. El cloroaluminato de calcio raramente se forma en el agua de mar porque, en presencia de sulfatos, la etringita es la fase que prevalece.

Los parámetros que más condicionarán el hormigón van a ser la porosidad y el tipo de hormigón utilizado en el ambiente agresivo al que se someten las probetas. De esta forma cuanto mayores sean los poros y la su interconexión, peor será el comportamiento del hormigón, pues permitirá el transporte y acumulación de líquidos, sustancias disueltas o gases, y esto influye de manera negativa en la durabilidad del mismo. Los micro poros presentes en las probetas o aparezcan durante los ensayos, no se considerarán por tener una influencia mínima en intercambios o transporte de materia [3]

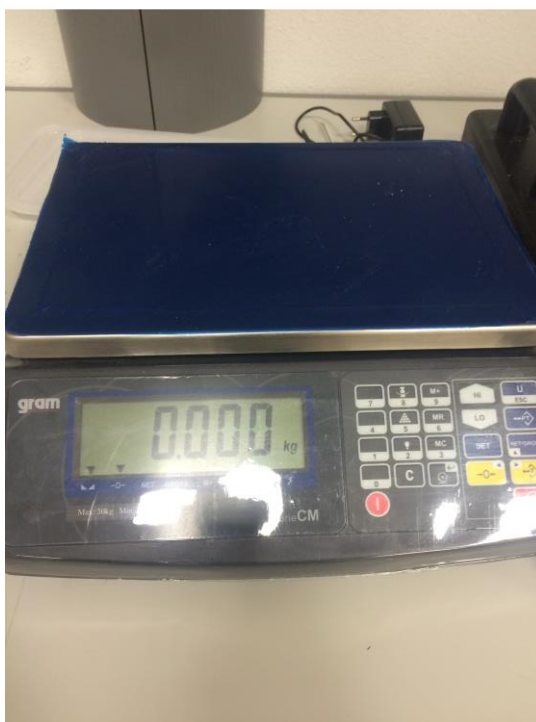


Figura 3.9: Balanza utilizada para el ensayo

Para la evaluación de la durabilidad de las probetas, se han efectuado 6 ensayos de peso para comprobar la variación de este en el tiempo. La primera medición se efectuó sin introducir ninguna de las probetas en el medio marino y las cinco restantes se hicieron diferenciadas en el tiempo una vez ya introducidas en el agua de mar.

El peso de las probetas se ha realizado retirando cada una de las probetas del recipiente de plástico que las contiene junto con el agua de mar y una vez realizado esto, cada una de las pesadas se ha realizado en una balanza con precisión 1 gramo(Figura 3.9: Balanza utilizada para el ensayo).

3.5 Procedimiento termográfico

Tras la revisión de la literatura existente sobre ensayos en elementos de hormigón se ha llegado a la conclusión de utilizar la técnica de termografía activa, específicamente el método de termografía pulsada, como procedimiento de inspección en pos de la identificación de anomalías y del análisis cualitativo de elementos de hormigón.

Para el procedimiento de medición de la toma de imágenes infrarrojas se van a utilizar las probetas de hormigón que disponemos de $10 \times 10 \text{ cm}^3$. Se sabe que la emisividad de un espécimen puede causar errores de medición de la temperatura superficial del mismo. Para ello antes de realizar ninguna toma sobre la superficie, es necesario calcular la emisividad del elemento. Para el cálculo de la emisividad, se pueden utilizar numerosos procedimientos. Cada medición se realiza sobre una mesa de ensayo, donde la cámara termográfica se encuentra situada a unos 0,5-0,7 metros de distancia de la probeta a medir. Las capturas termográficas se realizaron con una cámara infrarroja de la casa Flir en la cual se ajusta la emisividad para el hormigón en 0,97 definida ya por los propios ajustes de la cámara termográfica. El rango de temperaturas de la cámara se estableció entre 15°C la mínima y 22°C la máxima y se eligió como modelo de representación de la radiación, la leyenda de colores arcoíris, siendo los colores más fríos (verdes, azules, negro) que representan las temperaturas más bajas y los colores más cálidos (rojo, naranja blanco) para las temperaturas más altas. [4]

TIPO DE HORMIGÓN	EMISIVIDAD	LONGITUD DE ONDA	EMISIVIDAD (según longitud de onda)
Hormigón	0,92		
Hormigón seco		5	0,95
Hormigón en bruto		2-5,6	0,92-0,97

Tabla 3.3: Tabla con valores de emisividad conocida para el hormigón [4]

Una vez ajustados los parámetros necesarios para poder utilizar la cámara térmica en perfectas condiciones, se iniciará el procedimiento de toma de muestras. Se van a realizar cuatro ensayos que se hacen coincidir con la toma de muestras con el analizador de corrosión Canin+. En la toma de muestras termográficas se deja mayor tiempo entre cada ensayo para poder apreciar cambios en las probetas, en el caso de que existan estos. Por último se realiza una prueba final en la cual se excitó la pieza mediante un horno en el cual se introdujeron las probetas durante dos días a una temperatura de 45°C .



Tabla 3.4: Horno utilizado para el ensayo

4 RESULTADOS

4.1 Análisis de las medidas del campo potencial

Para llevar a cabo el análisis de la investigación se han colocado dos electrodos, uno de los electrodos de referencia sobre la superficie del hormigón y otro entre el acero de las armaduras, de esta manera se puede determinar la diferencia de potencial eléctrico existen. Los valores obtenidos nos proporcionan un valor de E_{corr} que si bien no nos permite cuantificar la unidad de área que se corroe, pero si nos permite obtener valores orientativos del grado de corrosión, de manera que tendrá una validez estrictamente cualitativa.

E_{corr} (SCE) (mV)	Riesgo corrosión
> -200	10 %
-200 a -350	50 %
< -350	90%

Tabla 4.1: Valores E_{corr} y riesgo de corrosión [3]

La realización de este tipo de investigaciones requiere de un estudio previo de la probeta antes de ser expuesto a los diferentes medios, de manera que se pueda comprobar el grado de degradación del mismo.

Otra de elementos utilizados a la hora de realizar el análisis ha sido Tabla 3.2: Órdenes de magnitud para el potencial de media celda de acero en hormigón .En la cual podemos apreciar, dependiendo del potencial obtenido, la situación en la que se encuentra o se puede encontrar el hormigón [2] .

4.1.1 Análisis de la Probeta de Tipo Normal

En el desarrollo de éste análisis se dispone de la probeta de hormigón de tipo normal (CEM I 52.5 R), que inicialmente no se introduce en ningún medio agresivo, y una vez conocido su valor y estado, se procederá a su estudio en dicho medio agresivo.

Los resultados del ensayo de variación del potencial son:

Ensayo 1 (19/01/2016) :

En las imágenes que siguen se puede apreciar en el estado en el que se encuentra la probeta en el momento de iniciar los ensayos sin introducir la misma en el medio agresivo. Se puede apreciar que el potencial se encuentra entre los -50 y -100 mV, lo que nos indica según la Tabla 4.1: Valores Ecorr y riesgo de corrosión y la Tabla 4.1: Valores Ecorr y riesgo de corrosión Tabla 3.2: Órdenes de magnitud para el potencial de media celda de acero en hormigón , el porcentaje de que presente corrosión es menor del 10 % y el hormigón se encuentra en un estado de comienzo de carbonatación así como húmedo sin cloruro

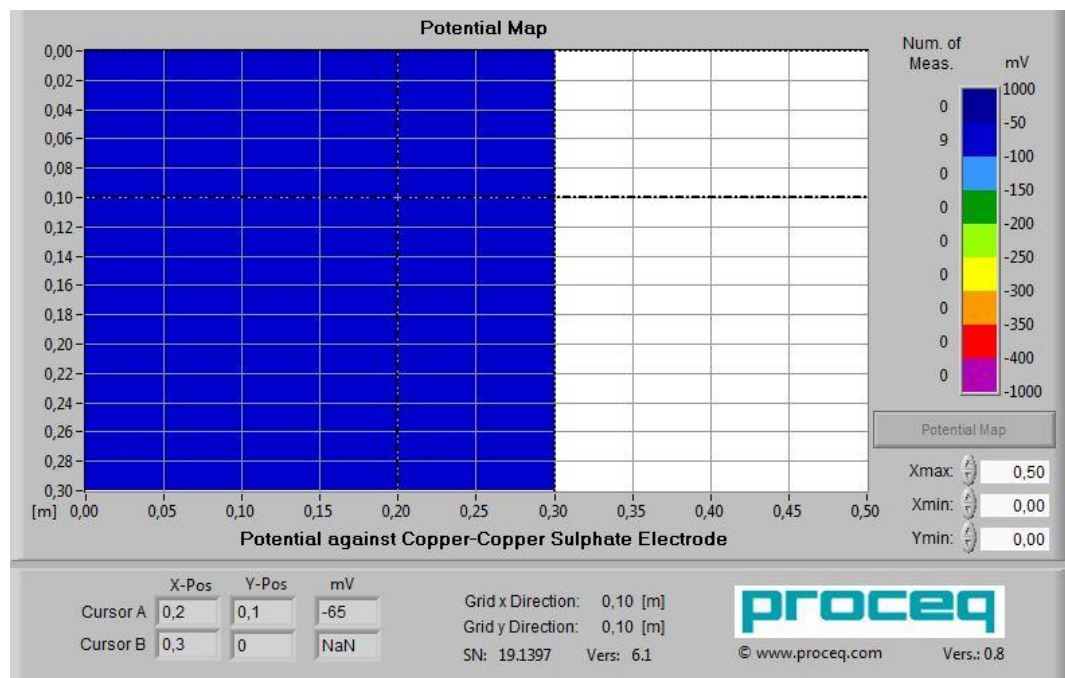


Figura 4.1: Mapa potencial de la Probeta 1 para el ensayo 1

Un análisis de la frecuencia relativa de los valores obtenidos en la medida de la probeta nos muestra como los valores se encuentran entre los -50 y -100 mV en todas las mediciones, se puede apreciar que se encuentra en el intervalo perteneciente al hormigón húmedo sin cloruro y por su proximidad y errores de medición también se podría encontrar en la situación de hormigón seco iniciando la carbonatación.

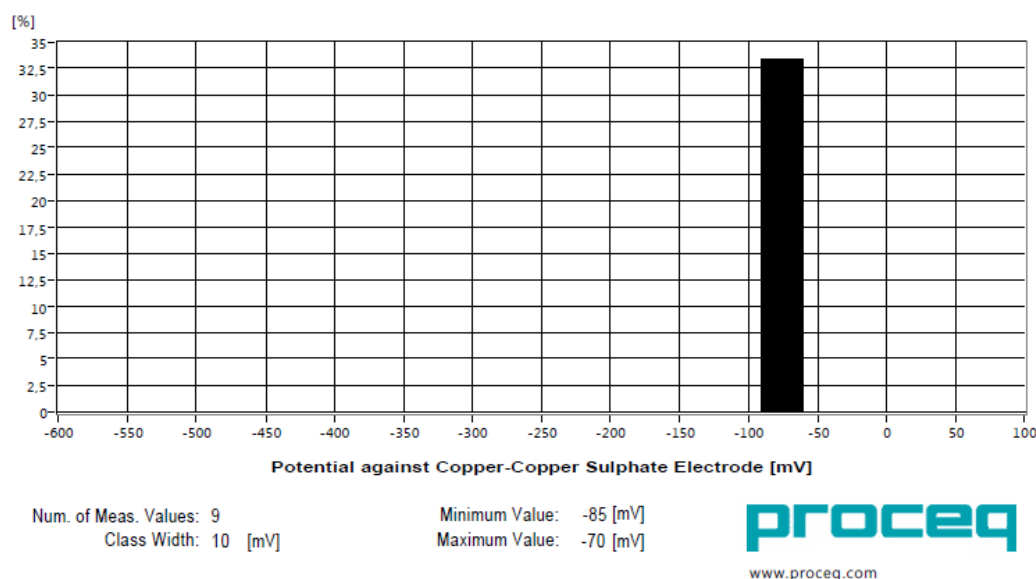


Figura 4.2: Frecuencia Relativa de la Probeta tipo normal para el ensayo 1

Ensayo 2 (22/01/2016)

El análisis del potencial en éste segundo ensayo nos muestra resultados similares. Aunque esta vez ya se ha introducido la probeta en su recipiente expuesta al medio agresivo de NaCl. Se puede apreciar, como transcurridos pocos días, aparecen valores más negativos. Las muestras ya oscilan entre los valores -100 a -150 mV, en parte de la probeta. De esta forma podemos decir que la probeta ya se encuentra en el inicio de estado de hormigón húmedo, aunque hay parte de la probeta que aún sigue en el estado inicial. Aunque manteniéndose dentro de los límites que lo califican como hormigón húmedo sin cloruros y/o carbonatado (entre -400 y +100 mV).

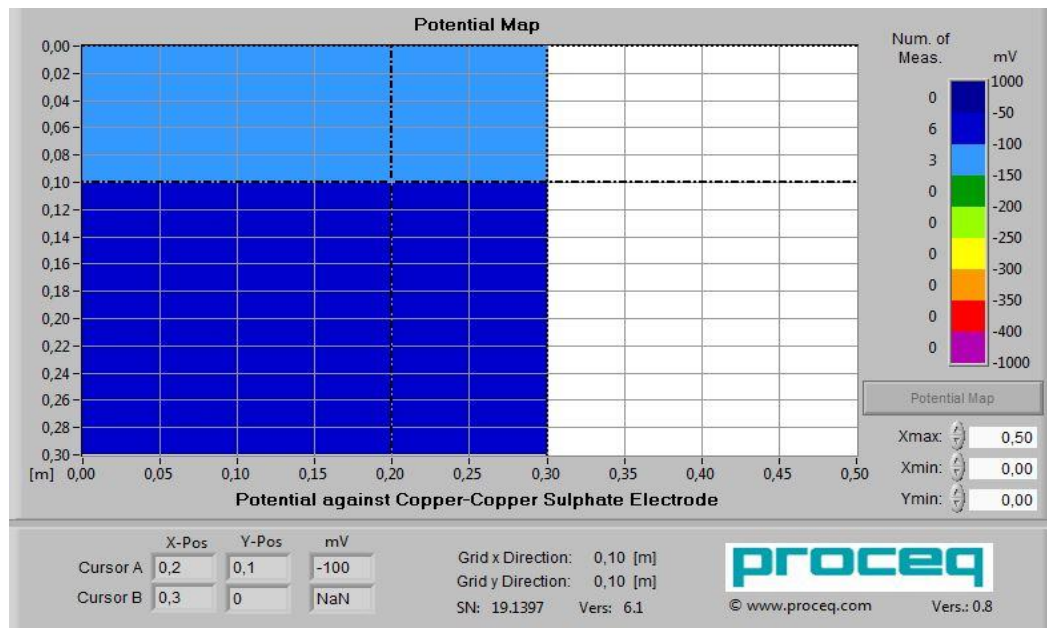


Figura 4.3: Mapa de potenciales de la Probeta tipo Normal para el ensayo 2

Como se muestra en la Figura 4.4: Frecuencia acumulada del potencial de la Probeta tipo Normal para el ensayo 2, los valores de la probeta tienen un valor mínimo de -105 y un máximo de -100mV

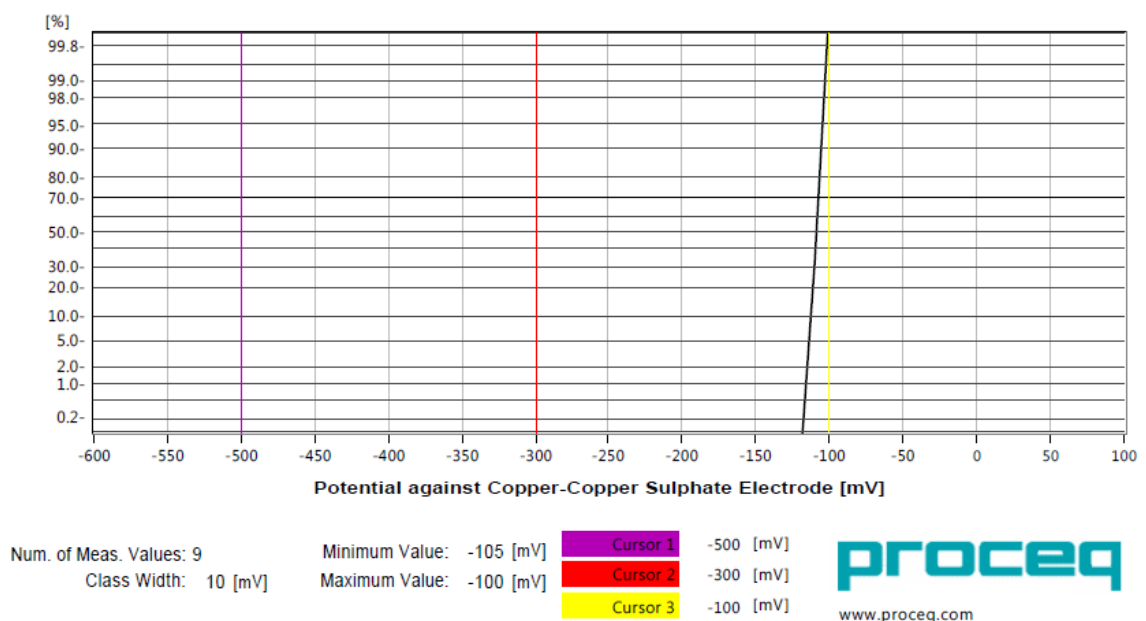


Figura 4.4: Frecuencia acumulada del potencial de la Probeta tipo Normal para el ensayo 2

Ensayo 3 y 4 (25/01/16 y 27/01/16)

El análisis del potencial de los ensayos 3 y 4 nos muestran resultados muy parecidos. Se puede apreciar que el potencial en el ensayo 4 tiene un valor mayor, esto puede ser debido o bien al error en la medición, o bien a que debido a la pérdida de agua, debida al movimiento de las probetas a la hora

de sacarlas de su recipiente para medirlas. También se puede deber a la evaporación del agua lo que hace que la probeta este menos expuesta al medio agresivo al que la sometimos el primer día. Se puede apreciar que en ambos ensayos la totalidad de la probeta se encuentra en una situación de hormigón húmedo sin cloruro, que puede estar carbonatado o no, debido a que se encuentra entre esos márgenes.

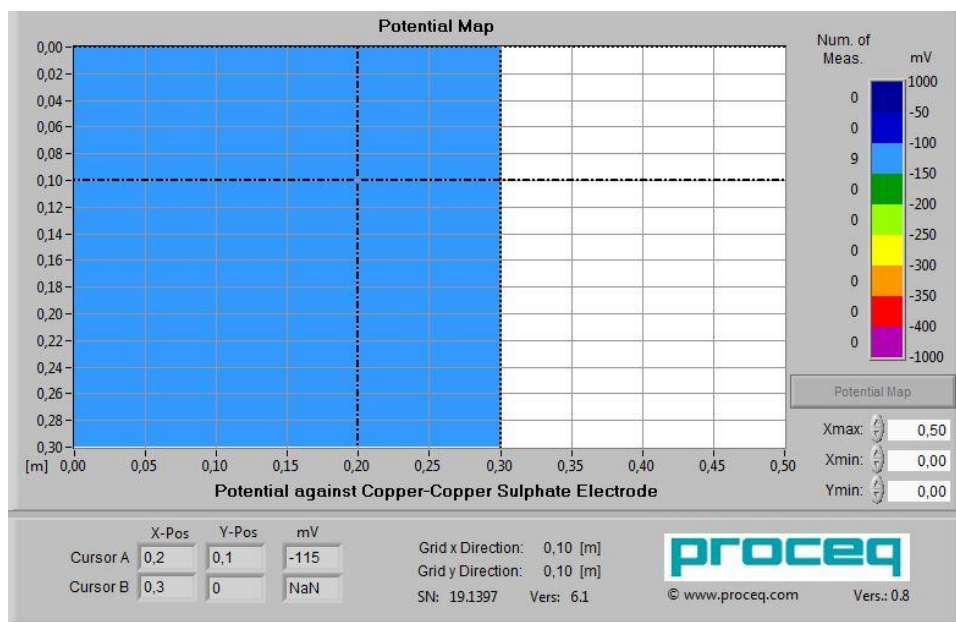


Figura 4.5: Mapa potencial de la Probeta tipo Normal para el ensayo 3

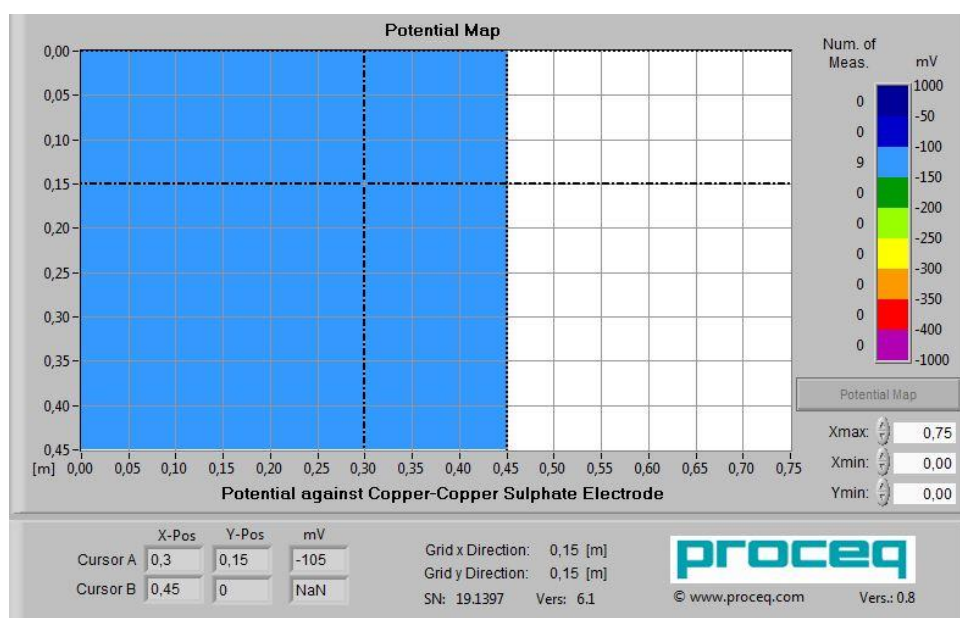


Figura 4.6: Mapa potencial de la Probeta tipo Normal para el ensayo 4

Un análisis de la frecuencia relativa nos muestra que apenas varía el estado de la probeta entre ensayos la mayoría de los valores se encuentran entre los -100 y -130 mV, intervalo perteneciente a la situación de hormigón sin cloruro y húmedo carbonatado

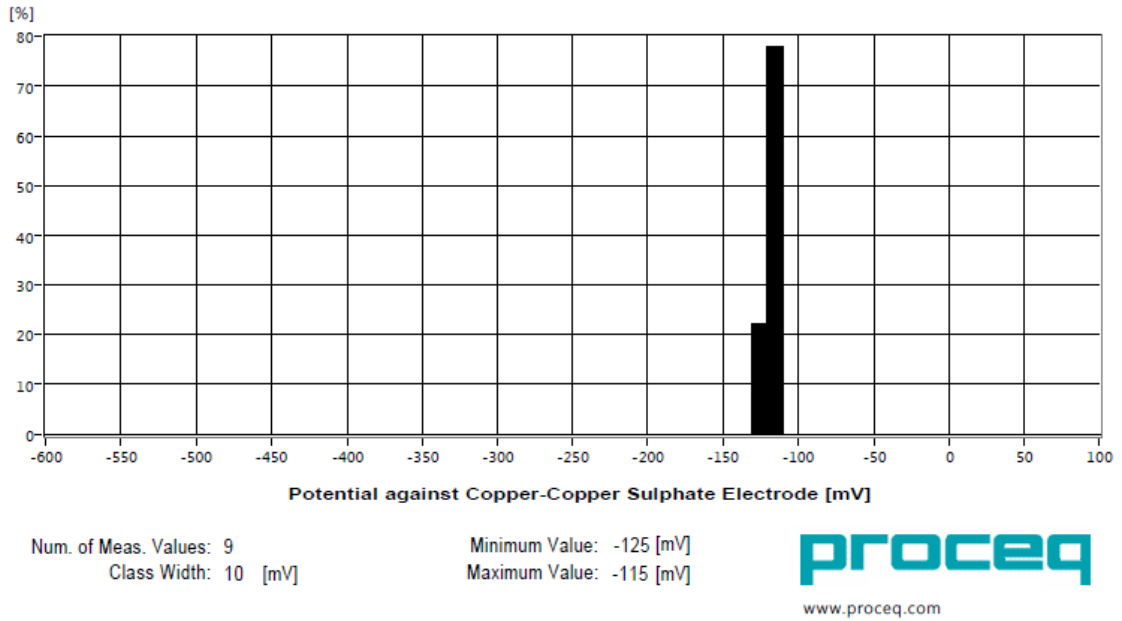


Figura 4.7: Frecuencia relativa de la Probeta tipo Normal para el ensayo 3

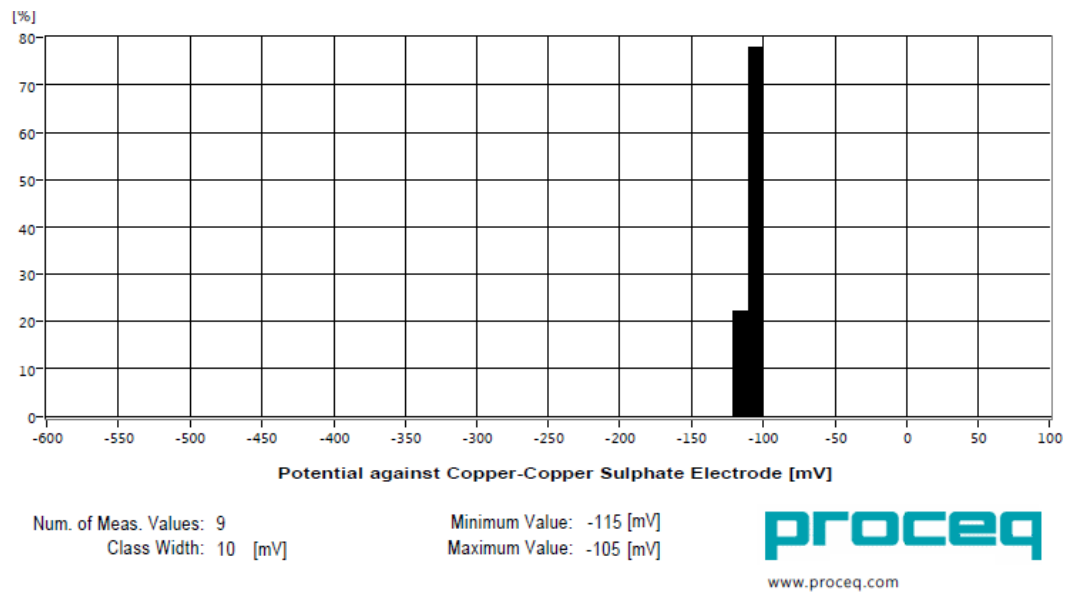


Figura 4.8: Frecuencia relativa de la Probeta tipo Normal para el ensayo 4

Ensayo 5 (1/02/2016)

Para el análisis de este ensayo, se volvió a añadir solución de NaCl que se había perdido para mantener el nivel de agente corrosivo que se había añadido inicialmente. Se puede apreciar que la probeta sigue manteniendo el nivel del potencial entre los -100 y -150 mV, lo cual indica que todavía no ha aumentado el nivel de corrosión ya que sigue en los mismos valores que los dos ensayos

anteriores. Pero si se aprecia que el valor del campo potencial ha disminuido lo que indica el avance de la corrosión en la armadura.

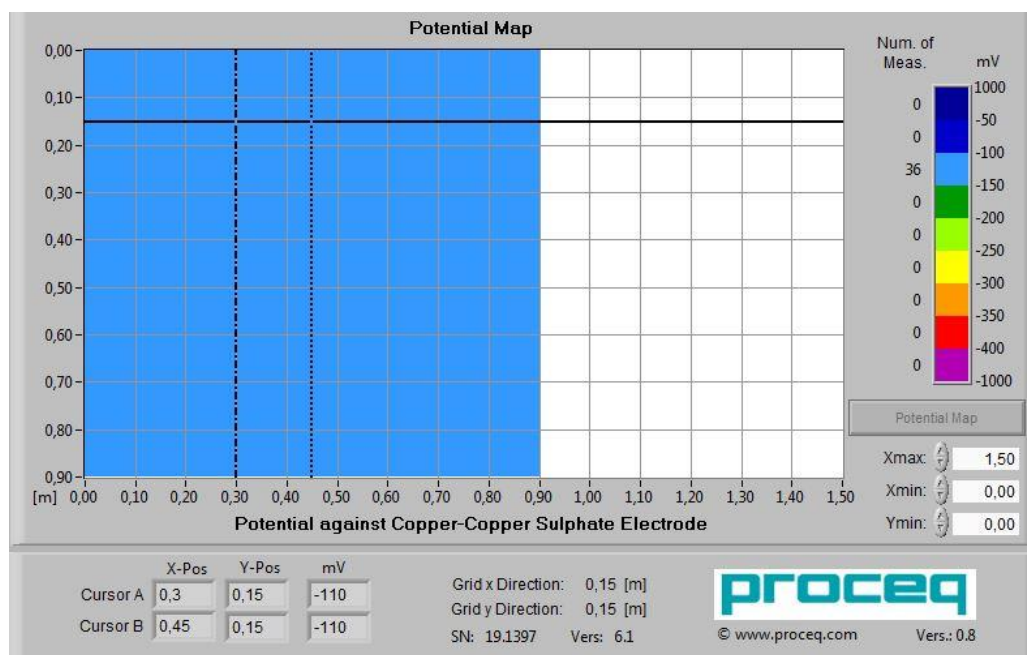


Figura 4.9: Mapa potencial de la Probeta de tipo Normal para el ensayo 5

En un análisis de la frecuencia acumulada se aprecia que el potencia se mantiene entres valores de -110 y -120 mV en el que se aprecia que la corrosión a aumentado con respecto al ensayo anterior.

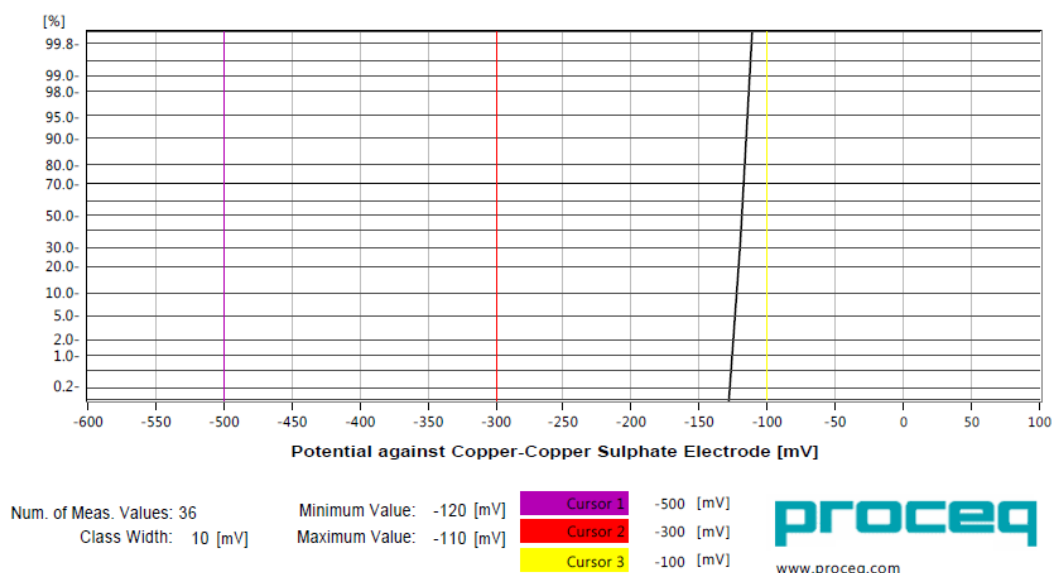


Figura 4.10: Frecuencia acumulada de la Probeta de tipo Normal para el ensayo 5

Ensayo 6 (5/02/2016)

Para el análisis de este ensayo, se ha de mencionar que tras comprobar que el proceso de corrosión era muy lento, se procedió a aumentar la composición de la solución y someter la probeta a un medio aún más agresivo.



Figura 4.11: Probeta tipo Normal ensayo 6

Aunque no se aprecian a simple vista signos de corrosión, mediante las medidas con el analizador de corrosión se puede apreciar que la probeta se encuentra en un estado de corrosión al observar los valores del campo potencial en todo su los valores de -400 y -1000mV. En comparación con el resto de ensayos se ha producido una disminución importante de campo potencial, debida en gran parte a las medidas tomadas antes mencionadas.

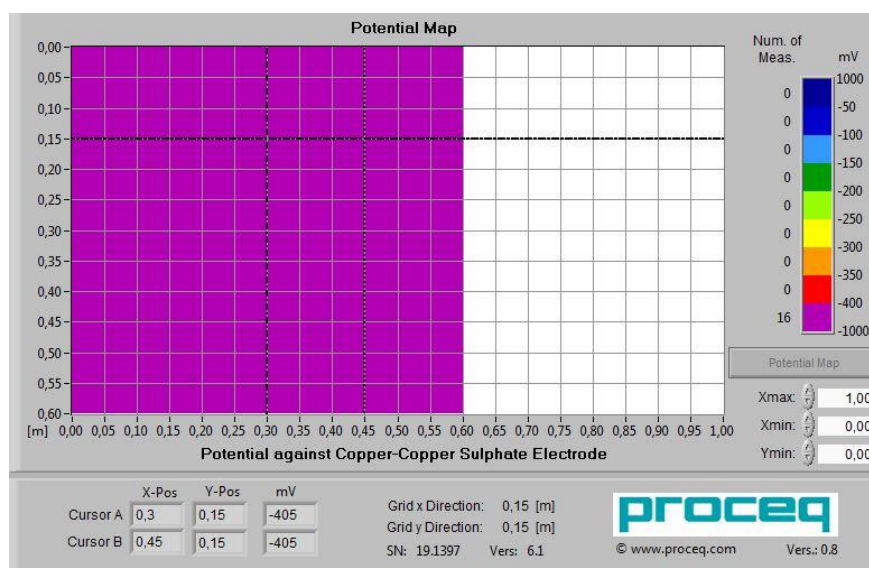


Figura 4.12: Mapa potencial de la Probeta tipo Normal para la semana 6

En el análisis de la frecuencia relativa se puede observar como los valores máximo y mínimo del campo potencial se encuentran entre -405 y -420 mV obtenido en el ensayo nos indican que la probeta se encuentra en estado de hormigón húmedo contaminado con cloruro.

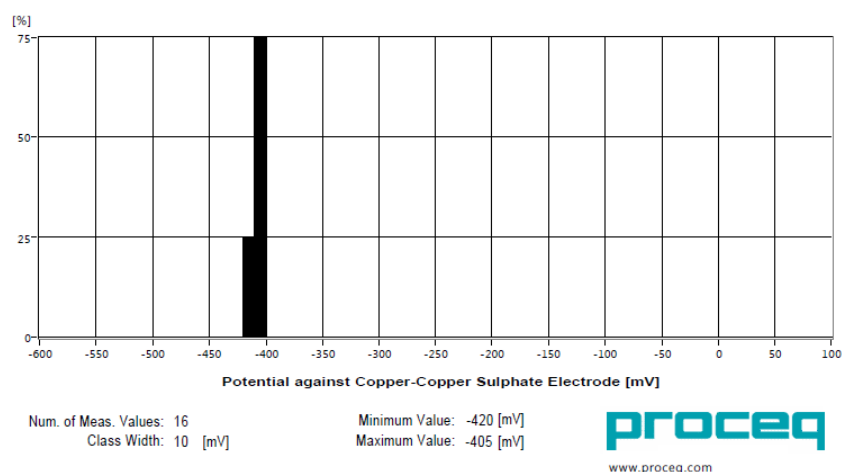


Figura 4.13: Frecuencia relativa de la Probeta Normal para el ensayo 6

4.1.2 Análisis de las probetas de Tipo Marino

En el desarrollo de éste análisis se va a disponer de 2 probetas de tipo marino (CEM SR/MR), las cuales inicialmente no se introducirán en ningún medio agresivo. Una vez vistas las condiciones en las que se encuentran las probetas, se procederá al estudio en dicho medio agresivo.

Ensayo 1 (19/01/2016)

En el análisis de las probetas del tipo marino podemos comprobar que para el primer ensayo realizado, y las probetas intactas, el campo potencial para la probeta 1 ya muestra signos de corrosión alcanzando valores entre a -150 mV y -250mV donde se aprecia que los valores de potencial muestran que distintas partes de la probeta se encuentran en diferentes estados, así como la probeta 2 se parecía que el campo potencia esta en cercano a los valores positivos lo cual indica que en la probeta no se aprecian síntomas de corrosión.

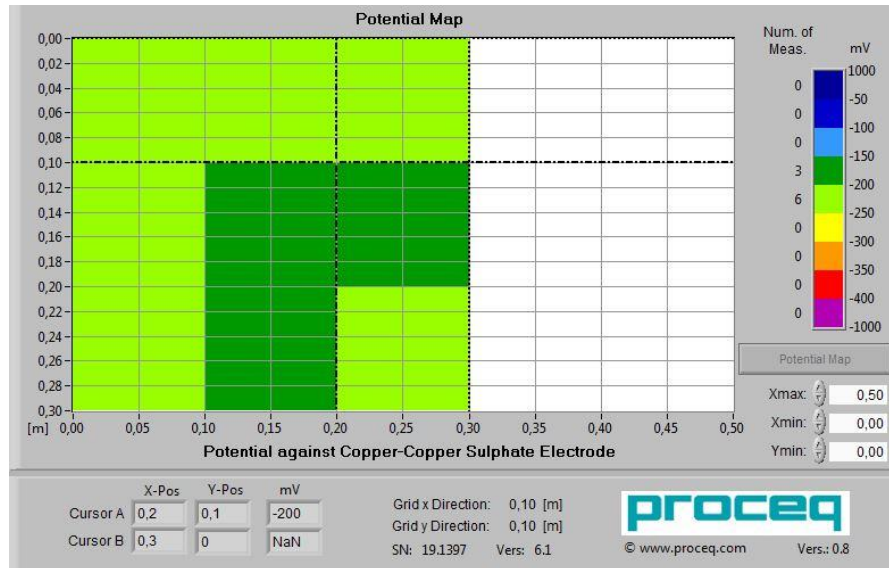


Figura 4.14: Mapa potencial de la Probeta-1 Marino para el ensayo 1

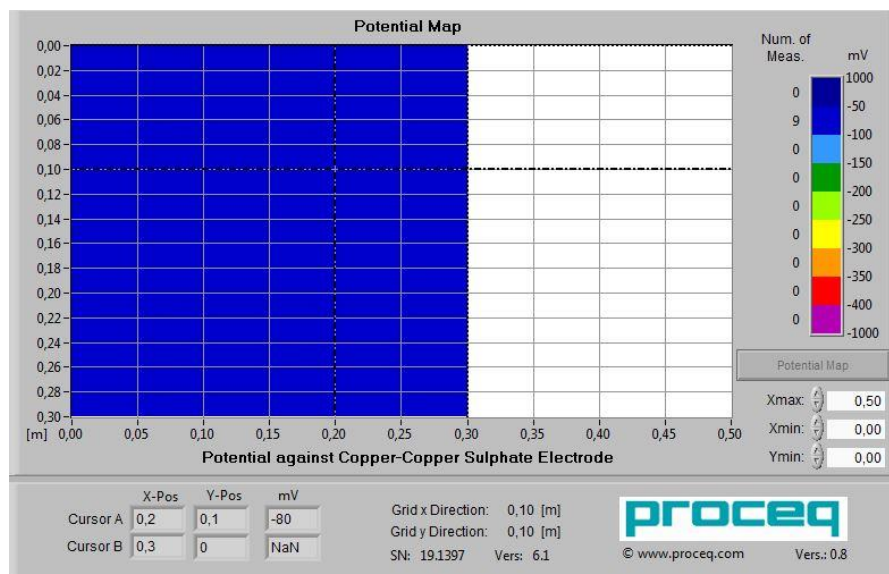


Figura 4.15: Mapa potencial de la Probeta-2 Marino para el ensayo 1

En el análisis de la frecuencia relativa para la probeta 1 se aprecia que ya se encuentra entre las situaciones de hormigón húmedo carbonatado y hormigón húmedo sin cloruro. Estando esta probeta en un estado de corrosión más avanzado que la probeta 2. De ésta misma forma y analizada la probeta 2 se puede deducir que se encuentra entre los -50 y -100 mV lo que indica que se encuentra en situación de hormigón húmedo sin cloruro y húmedo carbonatado.

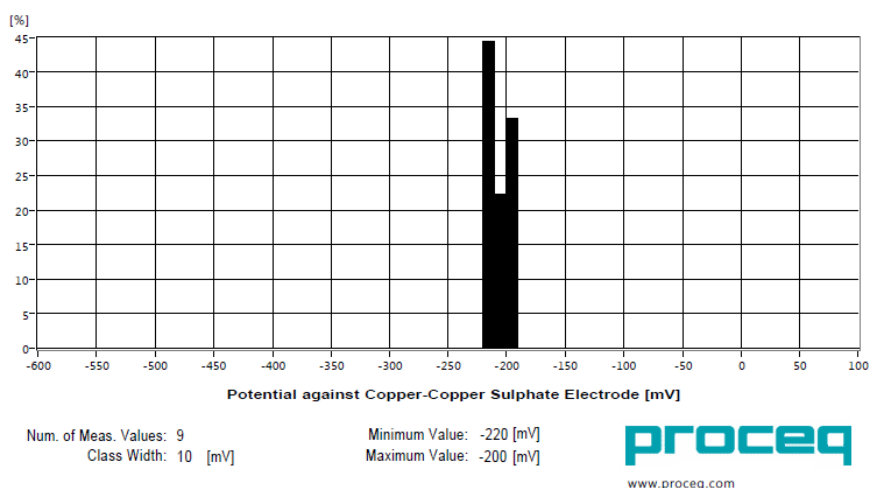


Figura 4.16: Frecuencia relativa de la Probeta-1 Marino para el ensayo 1

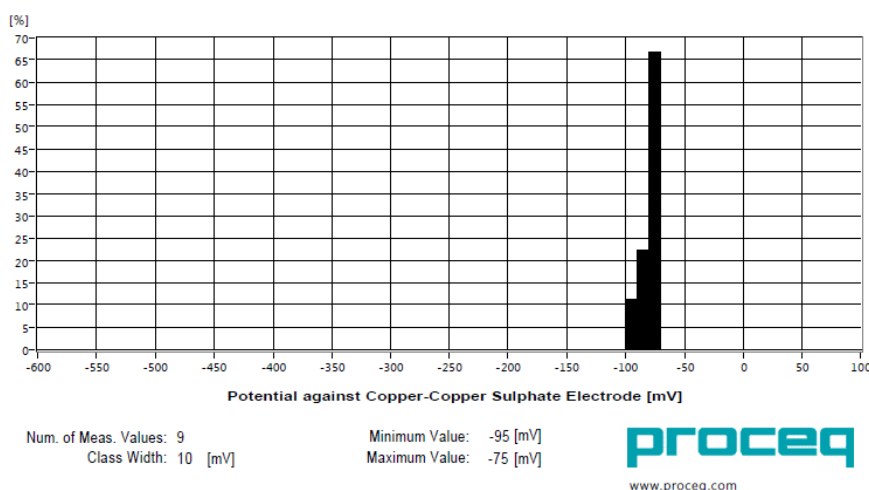


Figura 4.17: Frecuencia relativa de la Probeta-2 Marino para el ensayo 1

Ensayo 2 (22/01/2016)

En este segundo ensayo, las probetas ya están sumergidas en el medio agresivo ya mencionado anteriormente. La probeta 1 toma valores entre los -300 y -350 mV lo que indica un avance rápido del estado de corrosión, a pesar del poco tiempo que en contacto con el NaCl. Por otro lado la Probeta 2 muestra un avance más lento quedando en los márgenes entre los -50 y -100 mV.

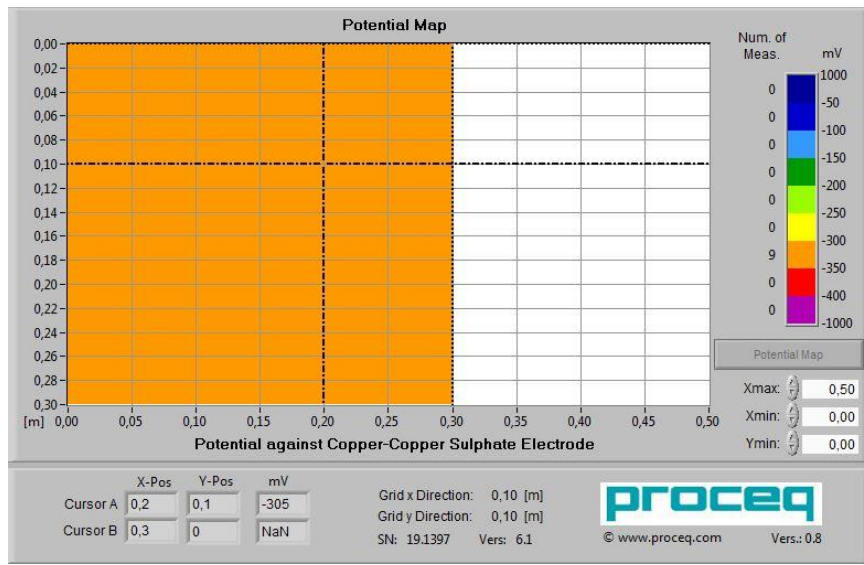


Figura 4.18: Mapa potencial de la Probeta-1 Marino para el ensayo 2

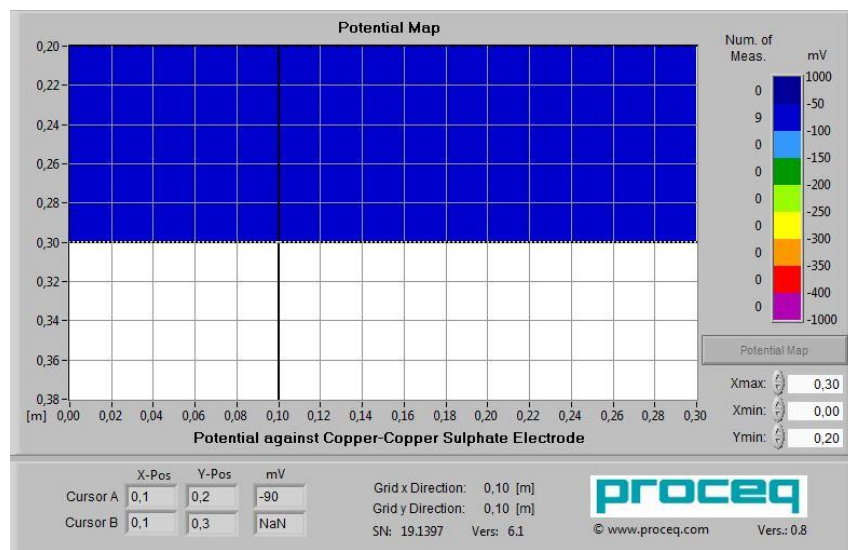


Figura 4.19: Mapa potencial de la Probeta-2 Marino para el ensayo 2

En el análisis de la frecuencia acumulada de la probeta 1 el valor máximo es de -305 mV lo que indica hay una alta probabilidad de corrosión en la armadura y se encuentra en situación de hormigón húmedo carbonatado. Por otro lado en la probeta 2, como se ha mencionado anteriormente se aprecia un avance más lento del proceso corrosivo encontrándose el campo potencial entre los valores de -90 y -95 mV, el hormigón se encuentra en situación de húmedo carbonatado y húmedo sin cloruro.

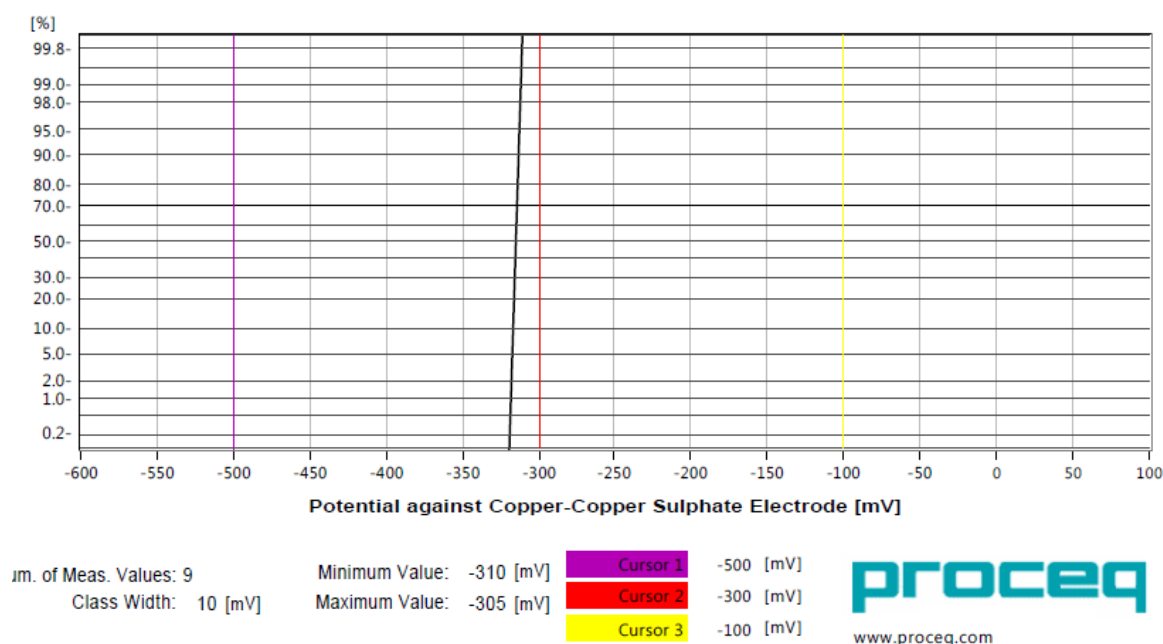


Figura 4.20: Frecuencia acumulada de la Probeta-1 Marino para el ensayo 2

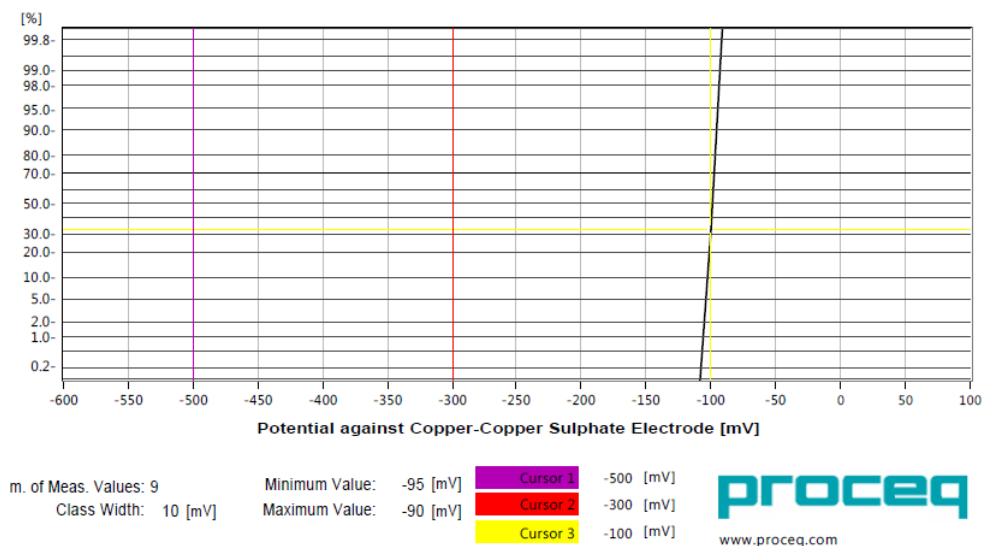


Figura 4.21: Frecuencia acumulada de la Probeta-2 Marino para el ensayo 2

Ensayo 3 y 4 (25/01/2016 y 27/01/2016)

En el análisis de las probetas se aprecia que para ambas probetas en los ensayo 3 y 4 los resultados apenas varían, incluso en la probeta 1 se vuelve el potencial más positivo. Estos pequeños cambios pueden deberse a errores en la medición, al poco tiempo entre ensayos o debido a que durante los ensayos, el retirar las probetas para su estudio volver a colocarlas y la evaporación del agua hacen que

el nivel de agua salada disminuya, lo que hace que las probetas no estén tan expuestas al medio agresivo de la solución de NaCl. En la probeta 1 el grado de corrosión es mayor con respecto al anterior ensayo manteniéndose entre -300 y -350 mV. Por otro lado en la probeta 2 ha aumentado con respecto al anterior ensayo pero sigue aun oscilando entre potenciales en los que no existe aun riesgo de corrosión.

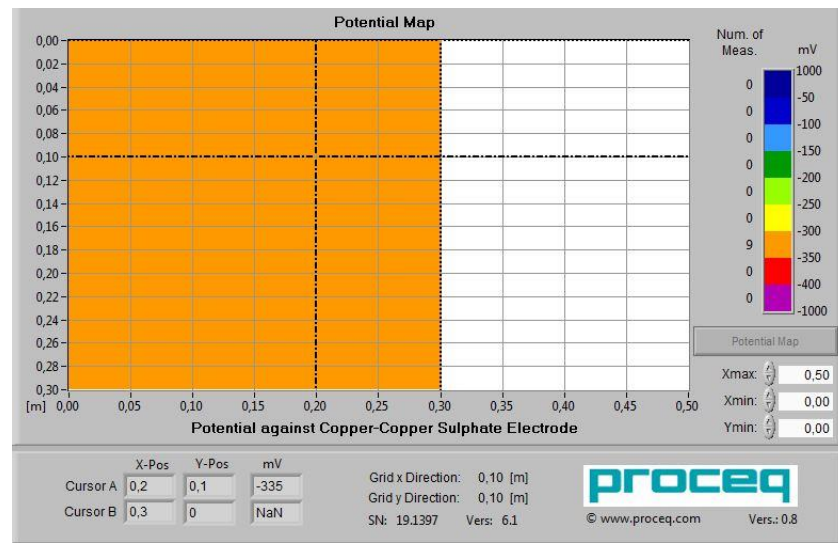


Figura 4.22: Mapa potencia de la Probeta-1 Marino para el ensayo 3

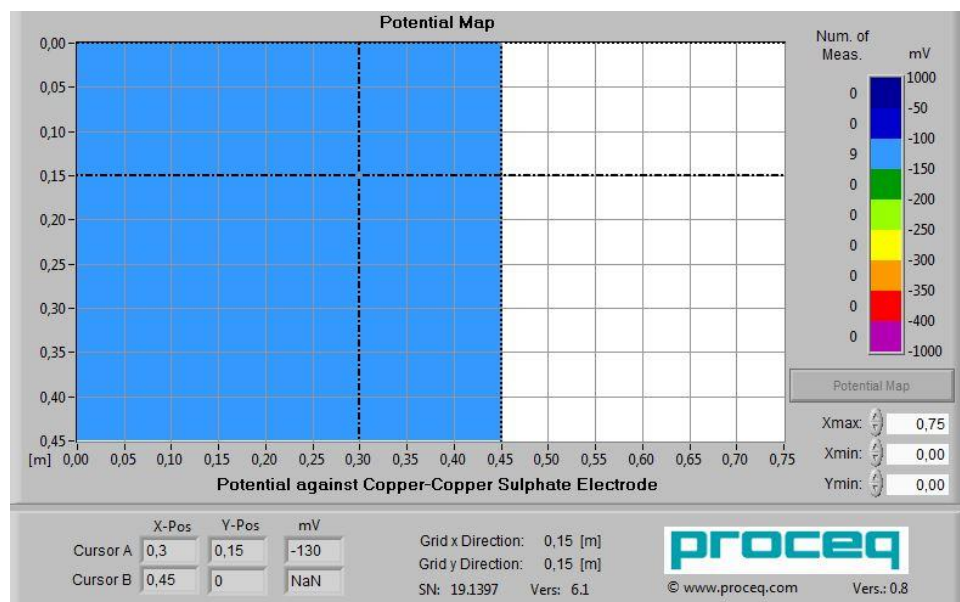


Figura 4.23: Mapa potencial de la Probeta-2 Marino para el ensayo 4

Analizando la frecuencia relativa de la Probeta 1 se observa cómo se encuentra entre los valores de campo potencial de -335 y -340 para el ensayo 3 y de -315 para el ensayo 4. Al estar entre estos valores y según la tabla de órdenes de magnitud el hormigón se encuentra en situación de hormigón húmedo carbonatado. De esta misma forma los valores que nos muestran las frecuencias relativas del los ensayos 3 y 4 son muy cercanos encontrándose entre los -120 y -135 lo que nos indica según las órdenes de magnitud que la probeta 2 se encuentra en situación de hormigón húmedo carbonatado y hormigón húmedo sin cloruro.

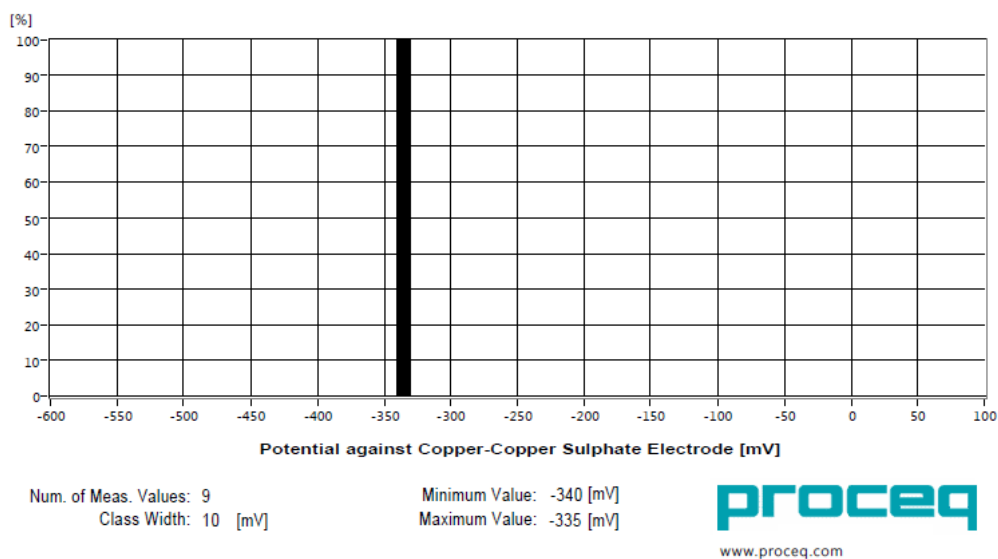


Figura 4.24: Frecuencia relativa de la Probeta-1 Marino para el ensayo 3

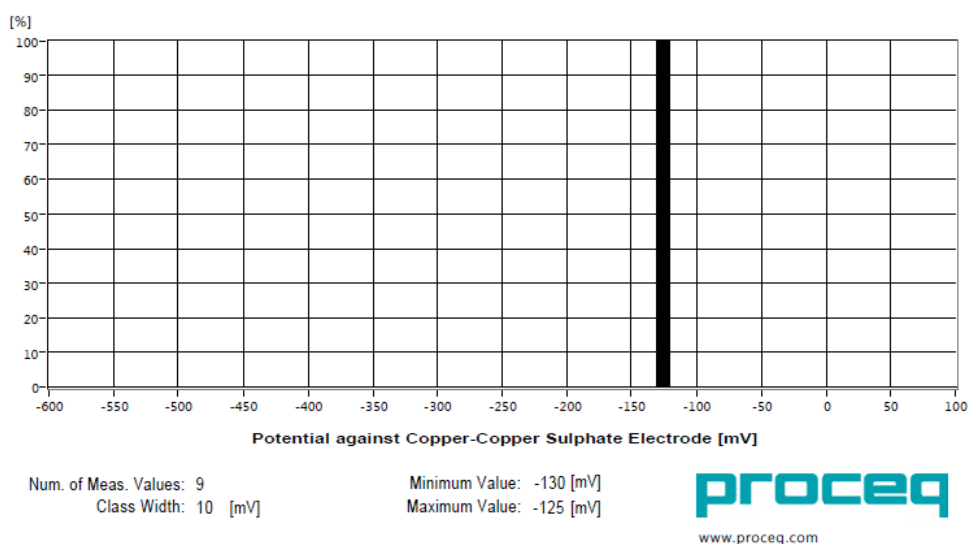


Figura 4.25: Frecuencia relativa de la Probeta-2 Marino para el ensayo 3

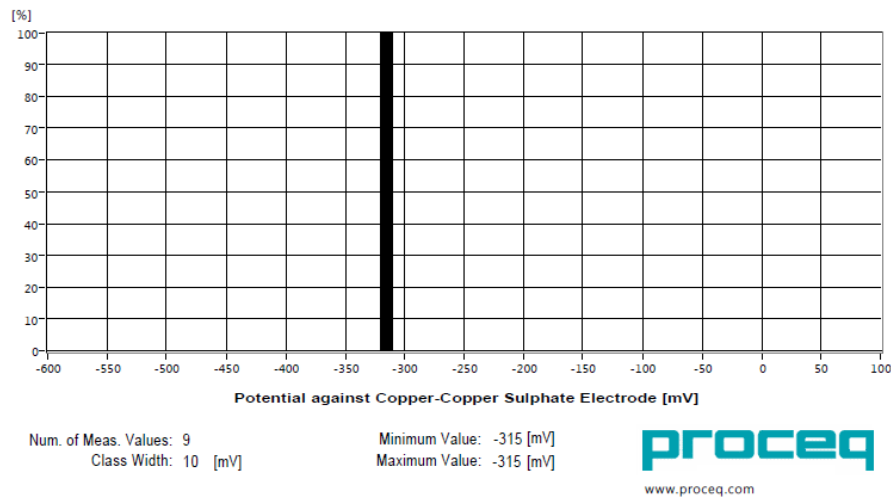


Figura 4.26: Frecuencia relativa de la Probeta-1 Marino para el ensayo 4

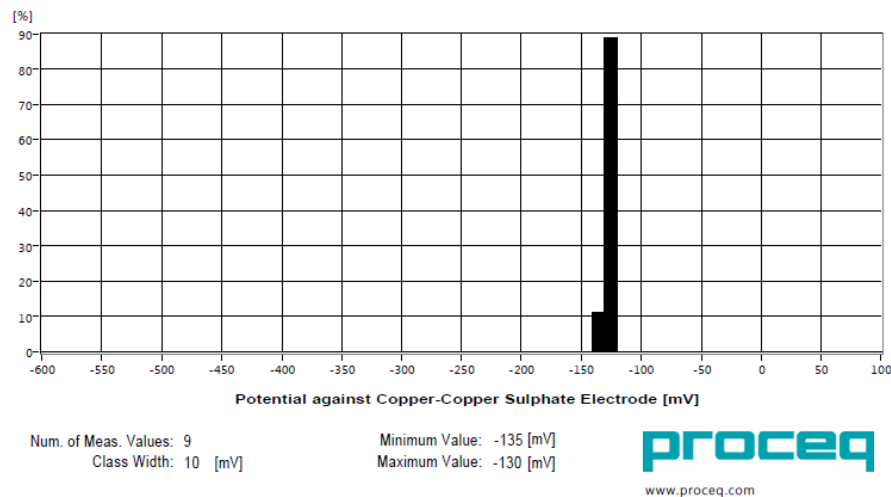


Figura 4.27: Frecuencia relativa de la Probete-2 Marino para el ensayo 4

Ensayo 5 (01/02/2016)

En este ensayo, debido a que en el anterior las probetas no se encontraban con la cantidad necesaria de agua salada en sus correspondientes cajas contenedoras se procede a volver a restaurar el agua perdida para que el medio en el que se encuentran pueda continuar siendo el medio agresivo que era cuando empezaron los ensayos.

En el análisis de la Probeta 1 ya se puede apreciar que se encuentra en un estado de corrosión, al superar los -400 mV. Por otra lado en la Probeta 2 se observa que los valores entre los que oscila el campo potencial son muy negativos pero no ha llegado a sobrepasar los -400 mV aunque en el análisis del campo potencial encontremos algunas partes de la probeta con una corrosión bastante notable.

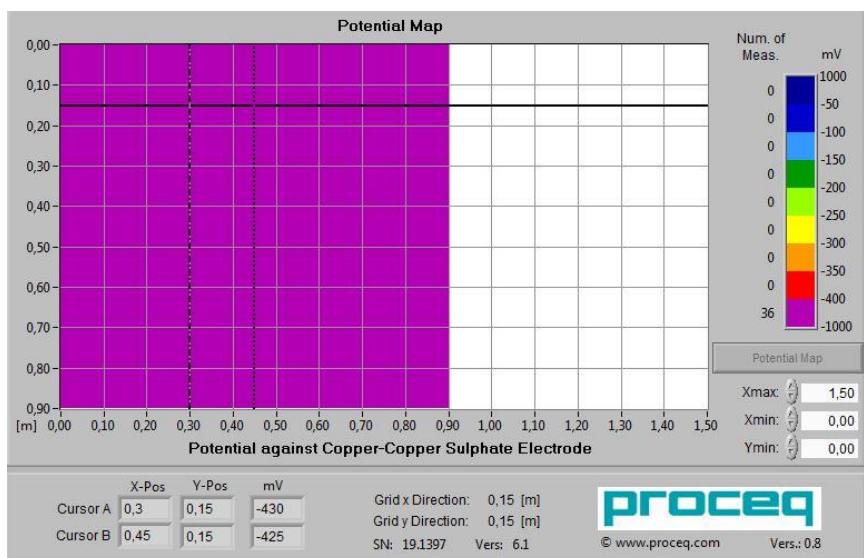


Figura 4.28: Mapa potencial de la Probeta-1 Marino para el ensayo 5

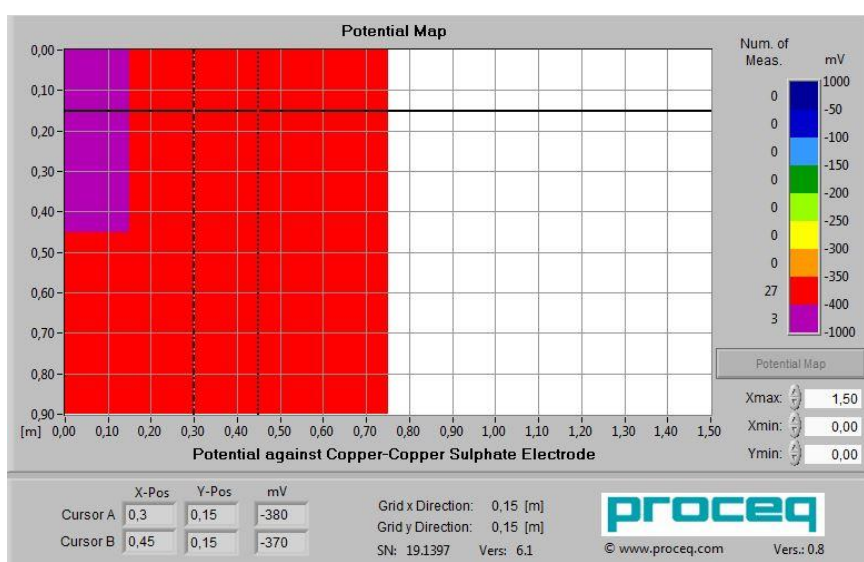


Figura 4.29: Mapa potencial de la Probeta-2 Marino para el ensayo 5

Analizando la frecuencia relativa de la Probeta 1 se pudo apreciar que sus potenciales máximo y mínimo oscilan entre los -420 y -440 respectivamente, lo que nos indica que se encuentra en situación de hormigón húmedo contaminado con cloruro. Para la Probeta 2 los valores de su campo potencial oscilan entre los -365 y -405 mV los que nos indica que se encuentra en situación de hormigón húmedo carbonatado, aunque se puede apreciar que una parte de la probeta ya empieza a estar contaminada con cloruro.

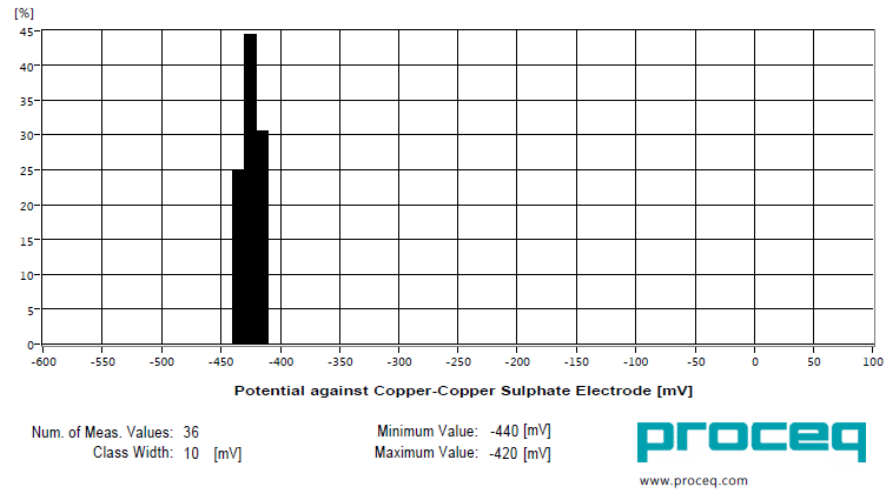


Figura 4.30: Frecuencia relativa de la Probeta-1 Marino para el ensayo 5

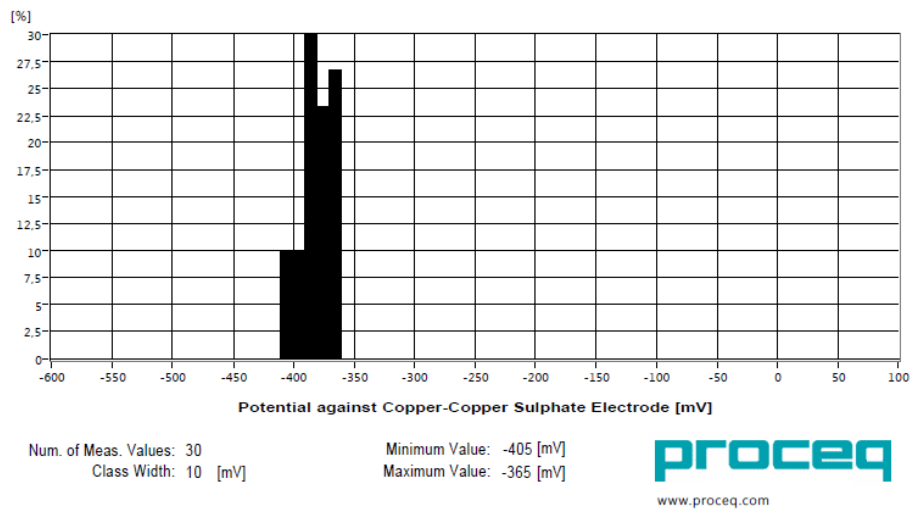


Figura 4.31: Frecuencia relativa de la Probeta-2 Marino para el ensayo 5

Ensayo 6 (5/02/2016)

Para el análisis de este ensayo, se ha de mencionar que tras comprobar que el proceso de corrosión era muy lento, se procedió a aumentar la composición de la solución y someter las probetas a un medio aún más agresivo.



Figura 4.32: Probeta-1 tipo Marino para el ensayo 6

Como se puede apreciar en la imagen la probeta en éste ensayo ya se encuentra en un estado de corrosión bastante avanzado. En el análisis del mapa potencial, el campo, sobrepasa los -400 mV los que nos indica que el porcentaje de que exista corrosión dentro de la armadura es muy elevado. Encontrándose en situación de hormigón húmedo contaminado con cloruro según la tabla de órdenes de magnitud típicas para el potencial de media celda.

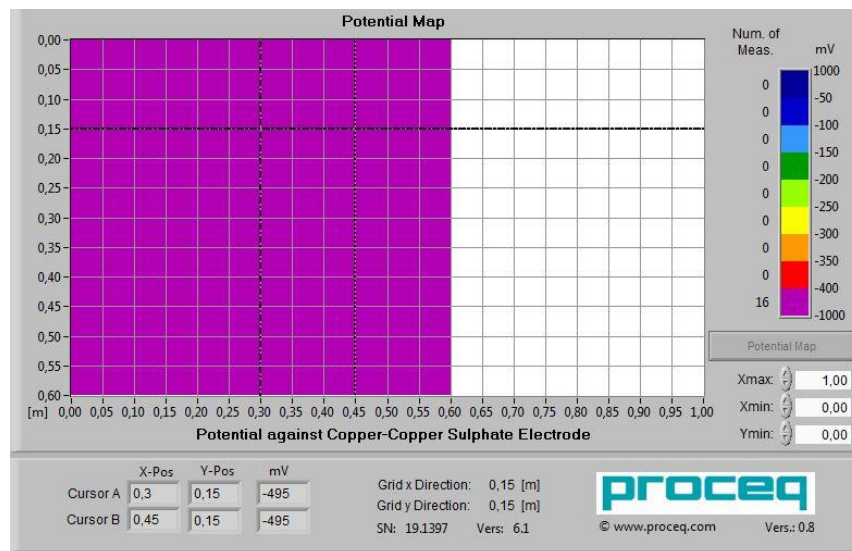


Figura 4.33: Mapa potencial de la Probeta-1 tipo Marino para el ensayo 6



Figura 4.34: Probeta-2 tipo Marino para el ensayo 6

En cuanto al análisis visual de la probeta se puede apreciar que las barras de acero de la armadura de hormigón se encuentran bastante corroídas, aunque la corrosión no se ha propagado por el hormigón como es el caso de Probeta 1. El análisis del mapa potencial es suficiente para comprobar que el potencia en la probeta sobrepasa el valor de -400 mV lo que indica que ya se encuentra en una situación se de hormigón húmedo contaminado con cloruro.

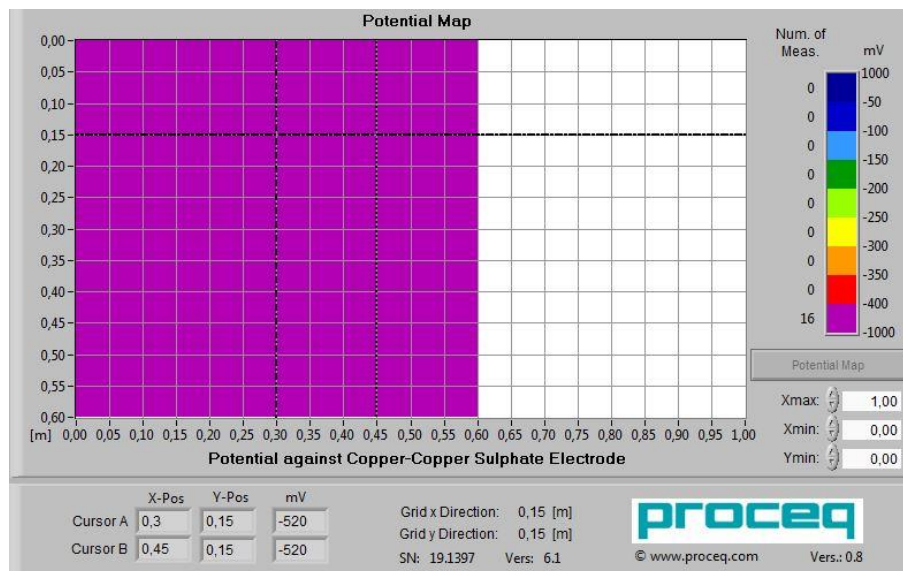


Figura 4.35: Mapa potencia de la Probeta-2 tipo Marino para el ensayo 6

4.1.3 Análisis de la Probeta tipo PCM

Este tipo de probeta ésta compuesta por un 10 % de PCM, siendo las barras de hacer corrugado iguales, de 10 cm de diámetro y calidad B 500 SD (UNE 36068:2011).

La diferencia entre los distintos tipos de probetas radica en el cemento utilizado para la mezcla, en este caso, PCM. Por lo que el mismo cemento PCM será el que nos proporcionará información sobre si es el tipo de cemento a utilizar en un ambiente agresivo como es el marino.

Ensayo 1 (19/01/2016)

En las imágenes que siguen se puede apreciar en el estado en el que se encuentra la probeta en el momento de iniciar los ensayos sin introducir la misma en el medio agresivo. Se puede apreciar que el potencial se encuentra entre los -50 y -100 mV, lo que nos indica según la Tabla 4.1: Valores Ecorr y riesgo de corrosión y la Tabla 4.1: Valores Ecorr y riesgo de corrosión Tabla 3.2: Órdenes de magnitud para el potencial de media celda de acero en hormigón , el porcentaje de que presente corrosión es menor del 10 % y el hormigón se encuentra en un estado de comienzo de carbonatación así como húmedo sin cloruro.

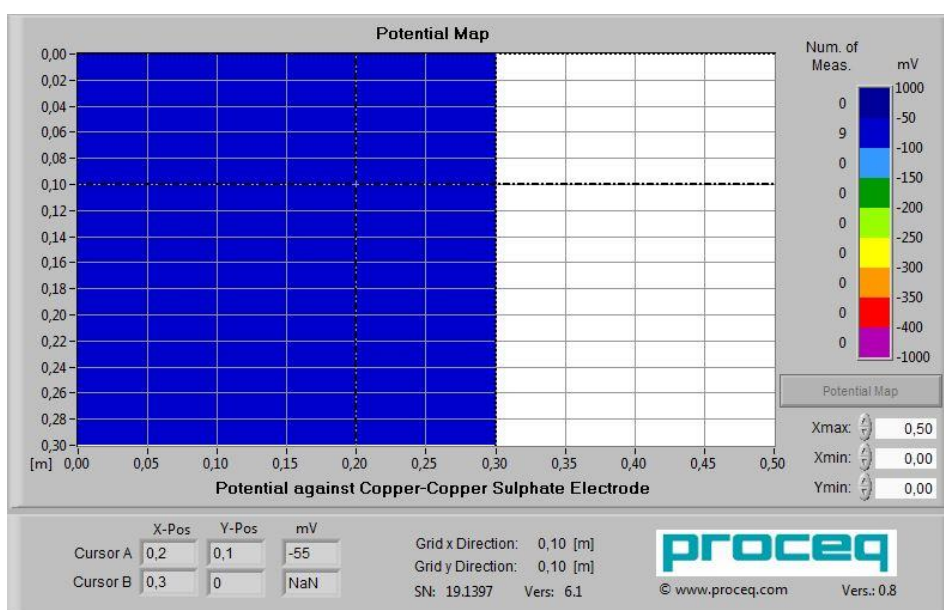


Figura 4.36: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 1

Analizando la frecuencia relativa de la probeta se observa que el potencia los valores de -60 y -55 mV lo que indica que se encuentra dentro los límites en los que está en situación de hormigón húmedo carbonatado y hormigón húmedo sin cloruro. La probeta se encuentra en un estado en el que el porcentaje de que exista corrosión es muy bajo.

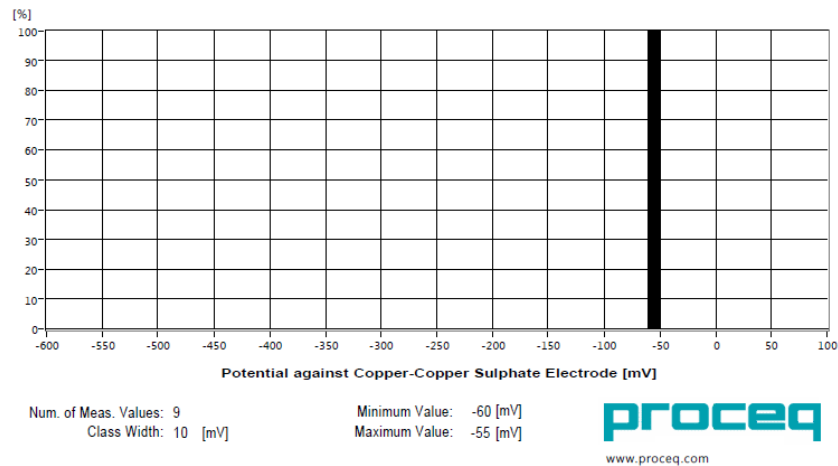


Figura 4.37: Frecuencia relativa de la Probeta de tipo PCM para el ensayo 1

Ensayo 2 (22/01/2016)

En este segundo ensayo, las probetas ya están sumergidas en el medio agresivo ya mencionado anteriormente. La Probeta 2 muestra un avance más lento quedando en los márgenes entre los -50 y -100 mV.

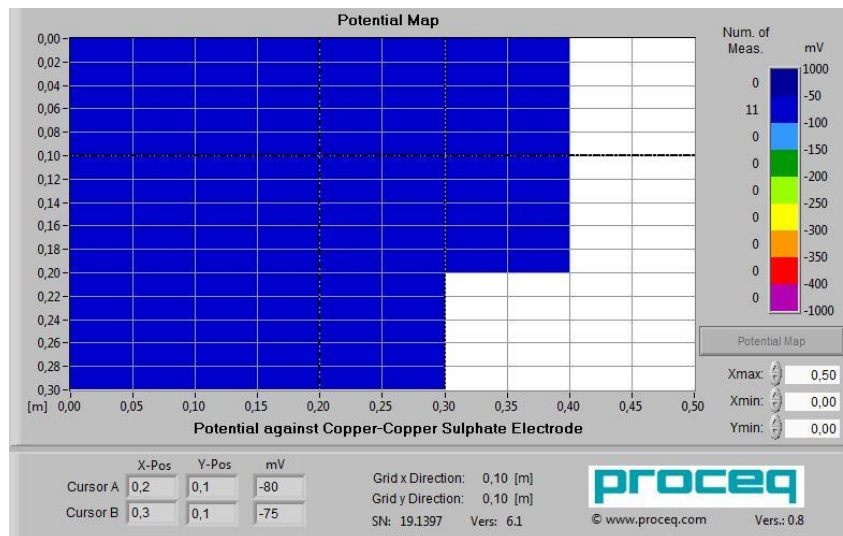


Figura 4.38: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 2

En el análisis de la frecuencia relativa se observa como los valores del campo potencial son más negativos que para el ensayo anterior mostrando como el medio agresivo va corroyendo la estructura de hormigón. En la imagen se puede apreciar como el potencial oscila entre los -80 y -75 mV lo que indica que la situación del hormigón se mantiene con respecto al ensayo anterior encontrándose en situación de hormigón húmedo sin cloruro y hormigón carbonatado.

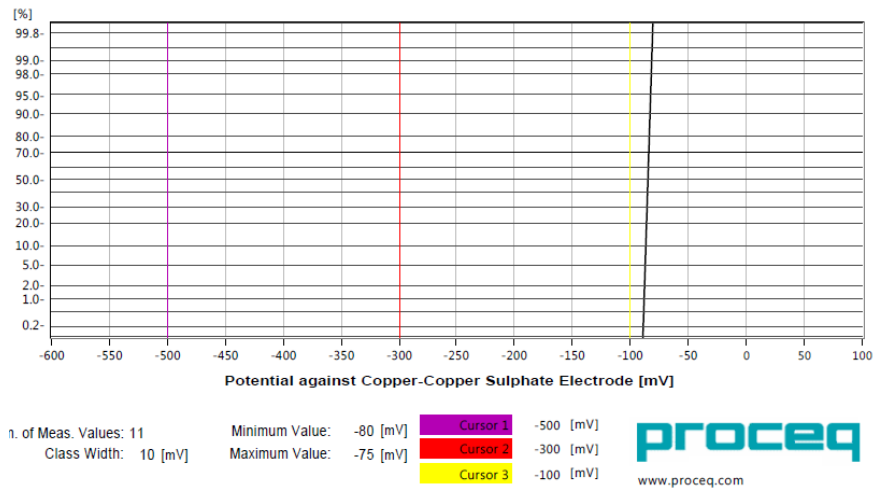


Figura 4.39: Frecuencia acumulada de la Probeta del tipo PCM para el ensayo 2

Ensayo 3 y 4 (25/01/2016 y 27/01/2016)

En el análisis de las probetas se aprecia que para ambas probetas en los ensayo 3 y 4 los resultados apenas varían, Estos pequeños cambios pueden deberse a errores en la medición, al poco tiempo entre ensayos o debido a que durante los ensayos, el retirar las probetas para su estudio volver a colocarlas y la evaporación del agua hacen que el nivel de agua salada disminuya, lo que hace que las probetas no estén tan expuestas al medio agresivo de la solución de NaCl.

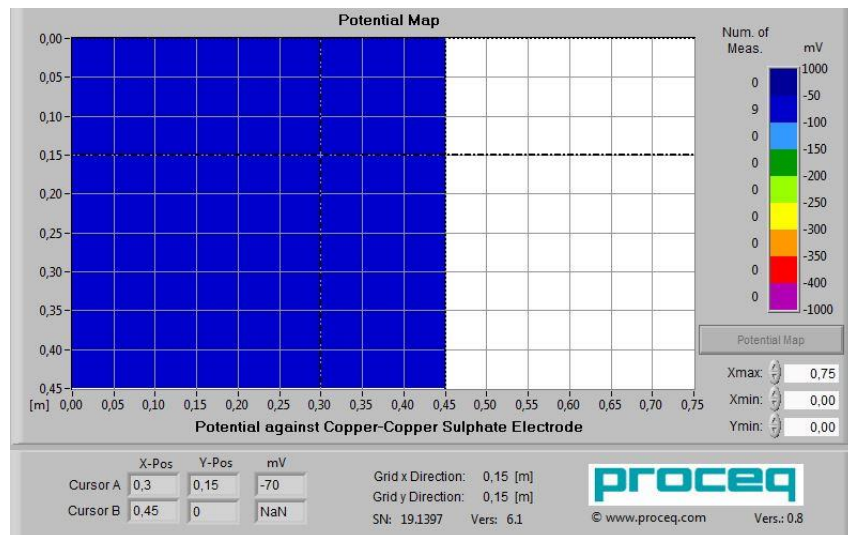


Figura 4.40: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 3

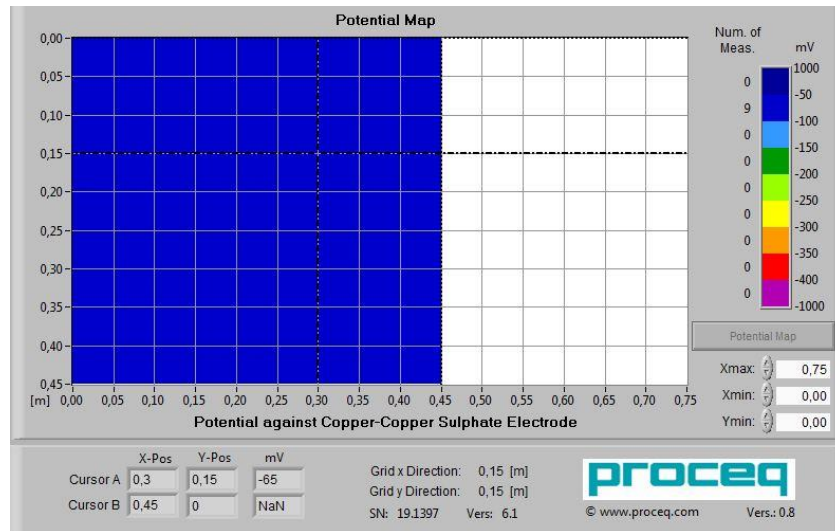


Figura 4.41: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 4

En el análisis de la frecuencia relativa se puede apreciar como los valores se mantienen constantes, con pequeñas variaciones debido a las causas antes mencionadas, ambas probetas se mantienen entre los márgenes de -70 y -65 mV lo que indica que la probeta se encuentra en situación de hormigón húmedo sin cloruro y húmedo carbonatado. Se aprecia como para ambos ensayos el estado de corrosión ha permanecido constante al contrario que para otras probetas en los que se apreciaban cambios muy pequeños incluso con subidas del potencial.

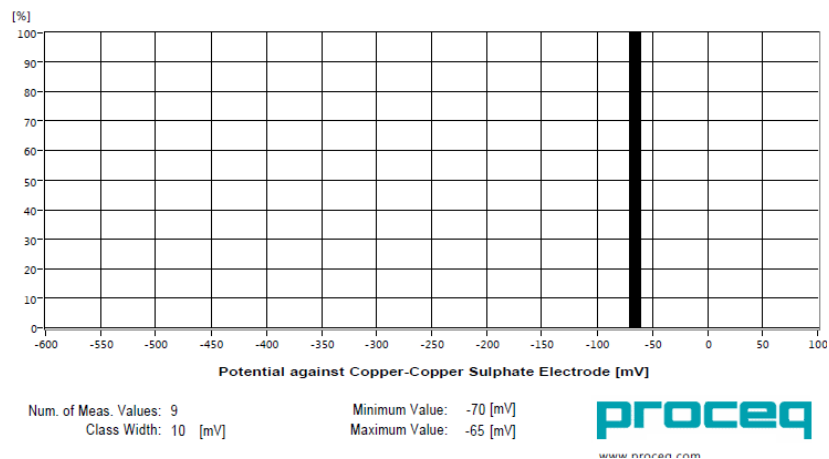


Figura 4.42: Frecuencia relativa de la Probeta tipo PCM para el ensayo 3

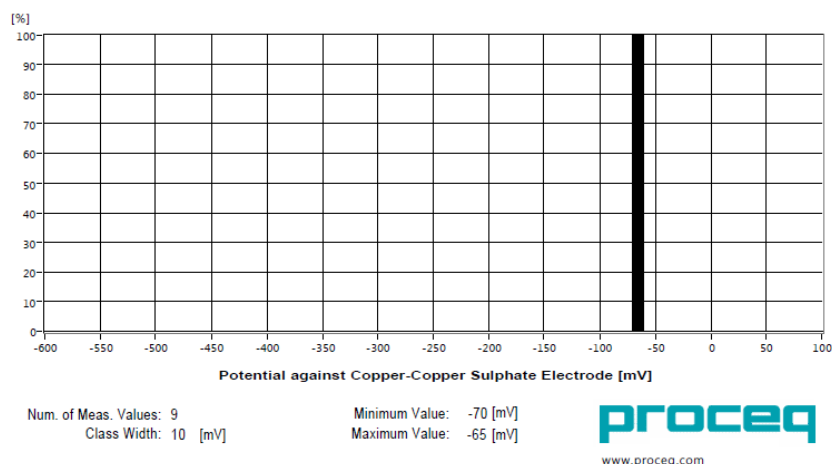


Figura 4.43: Frecuencia relativa de la Probeta tipo PCM para el ensayo 4

Ensayo 5 (1/02/2016)

Para el análisis de este ensayo, se volvió a añadir solución de NaCl que se había perdido para mantener el nivel de agente corrosivo que se había añadido inicialmente. Se puede apreciar que la probeta sigue manteniendo el nivel del potencial entre los -50 y -100 mV, lo cual indica que todavía no ha aumentado el nivel de corrosión ya que sigue en los mismos valores que los dos ensayos anteriores. Pero si se aprecia que el valor del campo potencial ha disminuido lo que indica el avance de la corrosión en la armadura.

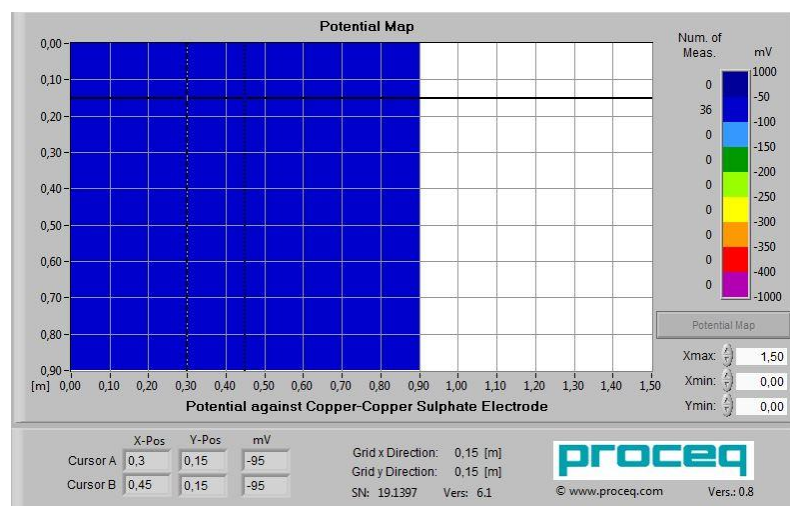


Figura 4.44: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 5

En el análisis de la frecuencia relativa se aprecia como el potencial ha disminuido con respecto al ensayo anterior. El valor del campo potencial se encuentra entre los -100 y -90 mV lo que se traduce según las órdenes de magnitud típicas la probeta se encuentra en situación de hormigón húmedo sin cloruro y hormigón húmedo carbonatado.

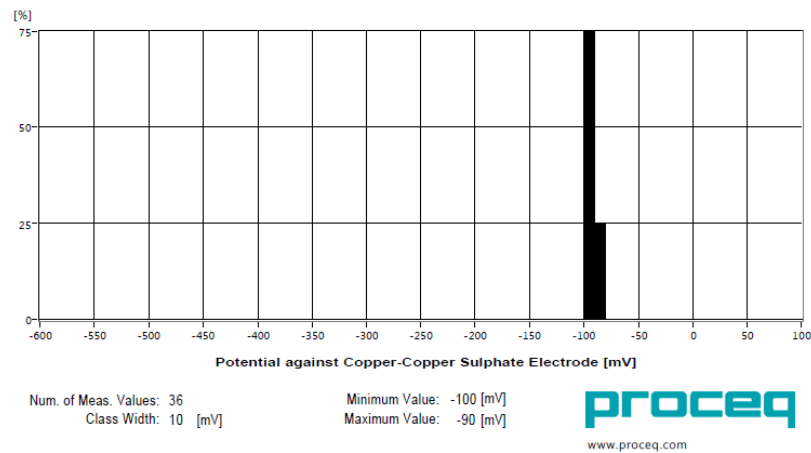


Figura 4.45: Frecuencia relativa de la Probeta tipo PCM para el ensayo 5

Ensayo 6 (5/02/2016)

Para el análisis de este ensayo, se ha de mencionar que tras comprobar que el proceso de corrosión era muy lento, se procedió a aumentar la composición de la solución y someter la probeta a un medio aún más agresivo. Pudiéndose apreciar en la imagen mediante un análisis visual el estado de corrosión de la probeta. La probeta presenta un mayor grado de corrosión en la parte superior de la misma, debido en parte a que cierta cantidad de agua del medio se evapora y tiene que ser repuesta, por lo que se produce en cierto grado un ciclo de humedecimiento y secado alternativamente. Los cloruros pueden avanzar rápidamente por succión capilar, alcanzando así una determinada profundidad. En ésta zona si hay un acceso de oxígeno y elevada humedad, por lo que el riesgo de corrosión es alto. [4]



Figura 4.46: Probeta de tipo PCM para el ensayo 6

Al observar el campo potencial en toda la superficie su los valores se encuentran en el rango de -400 y -1000mV. En comparación con el resto de ensayos se ha producido una disminución importante de campo potencial, debida en gran parte a las medidas tomadas antes mencionadas. La probeta se

encuentra en un estado de corrosión y según la tabla de órdenes de magnitud se encuentra en situación de hormigón húmedo contaminado con cloruro.

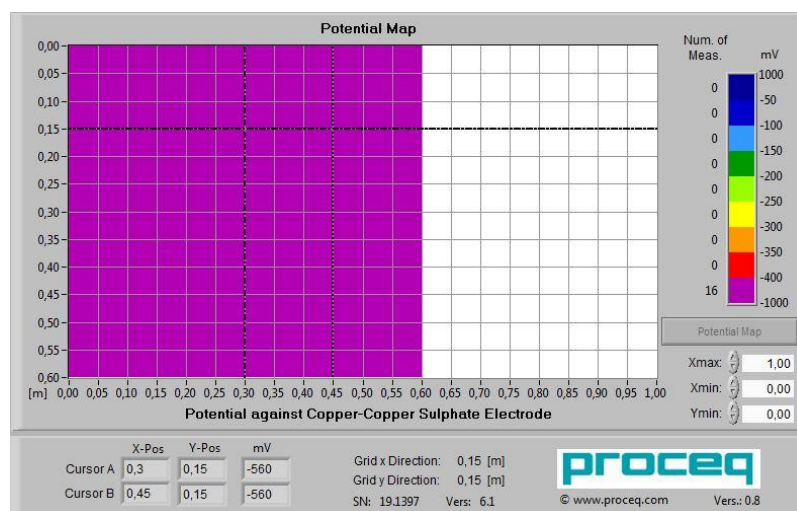


Figura 4.47: Mapa potencial de la Probeta tipo PCM para el ensayo 6

4.1.4 Análisis de conjunto de las estructuras

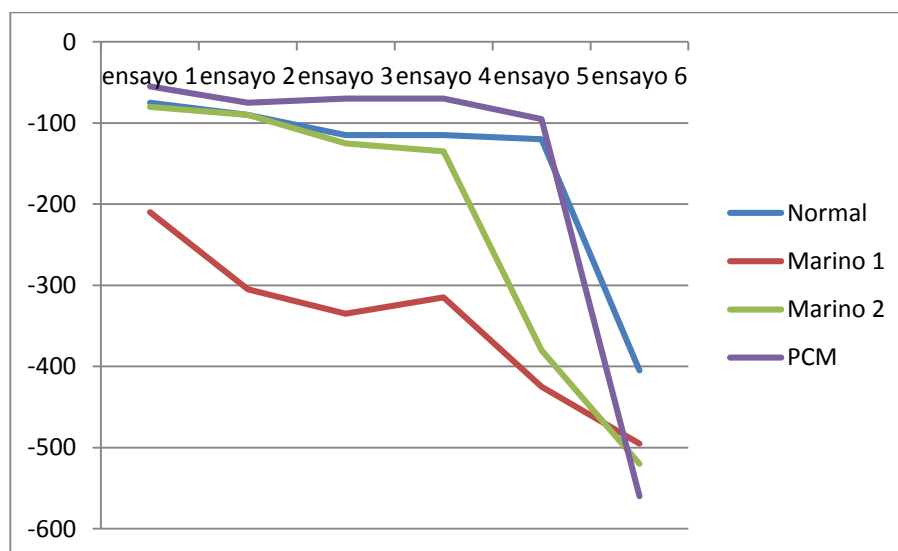


Figura 4.48: Gráfica comparativa de los ensayos

En la Figura 4.48: Gráfica comparativa de los ensayos se puede apreciar el comportamiento de las distintas probetas según el paso del tiempo. En la gráfica se aprecia la evolución de la corrosión que viene definida por la variación del campo potencial. A continuación se muestran los análisis de las diferentes probetas concluidos todos los ensayos.

Probeta tipo Normal

El análisis realizado del campo potencial con el analizador de corrosión Canin+ nos muestra como la probeta presenta un primer intervalo de tiempo en el que se encuentra en estado pasivo de acuerdo a la norma ASTM C-876-09, alcanzando posteriormente valores de potencial equivalentes al 90% de probabilidad de corrosión. Pero resiste mejor a ataques agresivos como puede ser un aumento de la salinidad del medio.

Probeta tipo Marino

El análisis realizado del campo potencial con el analizador de corrosión Canin+ nos muestra un mal comportamiento de la probeta con cemento CEM SR/MR especial para su uso en ambientes agresivos ante el ataque de los cloruros presentes en el medio al que estuvo expuesta. La probeta adquiere rápidamente valores de potencial muy negativos, lo que determina que la probeta se encuentra con más de un 90% de probabilidad en estado de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C-876-09.

Probeta tipo PCM

El análisis realizado del campo potencial con el analizador de corrosión Canin+ muestra como la probeta se mantiene en valores cada vez constantes, hasta el momento en el que se sometieron las probetas a un ambiente excesivamente agresivo y el potencial llegó hasta el entorno de los - 560 mV con los que termina el ensayo. Según la norma ASTM C-876-09, los valores que alcanza al final del ensayo equivalen al 90% de probabilidad de que se esté produciendo corrosión en la probeta analizada.

4.1.5 Ensayo sobre una estructura de hormigón

Éste análisis esta realizado sobre una estructura de hormigón real, fuera del laboratorio de trabajo.

Como se puede observar en el mapa potencial los valores medios oscilan entre los valores de -250 y -300 mV. De acuerdo a la norma ASTM, mencionada con anterioridad, la corrosión se puede detectar sólo con una incertidumbre del 95% con potenciales más negativos de -350 mV. Sin embargo la experiencia demuestra que las estructuras pasivas tienden a mostrar valores más positivos de -200mV. Los potenciales más negativos que -200mV pueden ser indicativos de ataques de corrosión.

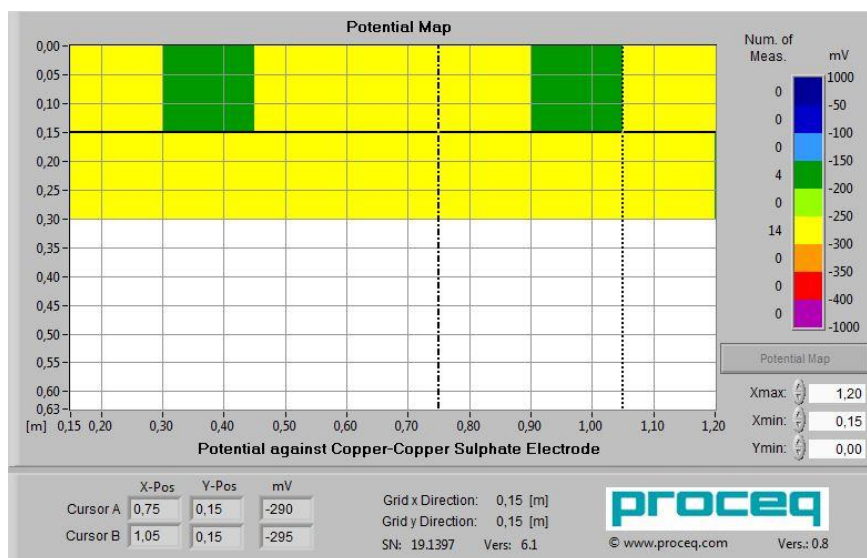


Figura 4.49: Mapa potencial de estructura de hormigón

En un análisis de la frecuencia relativa de la estructura de hormigón se aprecia como la mayor parte de la estructura se encuentra en valores de potencia de -295 mV lo que según la tabla de órdenes de magnitud se encuentra en situación de hormigón húmedo carbonatado. Por otro lado una parte de la estructura, muestra potenciales más positivos lo que indica que también puede encontrarse en situación de hormigón húmedo sin cloruro.

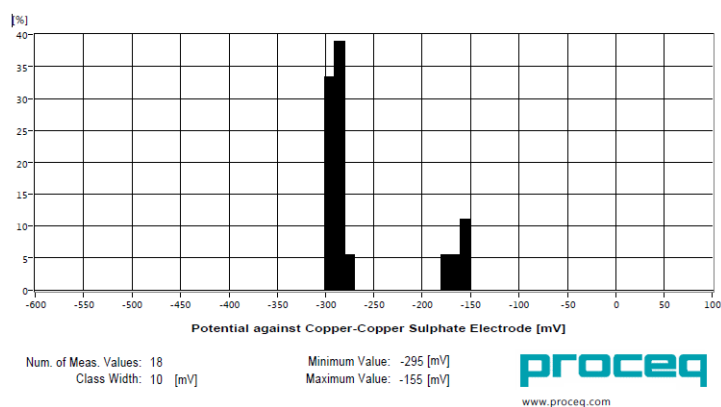


Figura 4.50: Frecuencia relativa para la estructura de hormigón



Figura 4.51: Estructura de hormigón utilizada para el ensayo

Finalizado el análisis de todas las probetas para la medición del campo potencial se incorporan al Anexo 1 todos los ensayos realizados con el analizador de corrosión utilizado.

4.2 Análisis de determinación de pesos

La evolución del peso de las probetas se presenta a continuación. Representando en la tabla cada uno de los pesos después de los seis ensayos realizados.

4.2.1 *Probeta tipo Normal*

En el análisis de la variación de peso de la probeta a lo largo de los ensayos realizado, nos muestra una variación irregular del peso de las probetas, con ensayos consecutivos en los que la variación del peso es contraria en signo, lo cual se debe seguramente a que se están produciendo varios procesos al mismo tiempo. Por un lado tenemos las reacciones de hidratación del hormigón que, en un hormigón normal, se produce hasta seis meses después de su fabricación, lo que produce un progresivo aumento de peso en las probetas durante este periodo. Por otro lado, tenemos el lavado y disolución de componentes solubles del hormigón, que ocasiona una pérdida de peso. Finalmente, es probable que se produzca la precipitación de sales del agua de mar en el interior de los poros del hormigón, que conllevaría un aumento de peso. [3]

Probeta	pesos (Kg)					
Normal	2,649	2,651	2,645	2,653	2,652	2,657

Tabla 4.2: Evolución del peso de la Probeta tipo Normal a lo largo de los ensayos

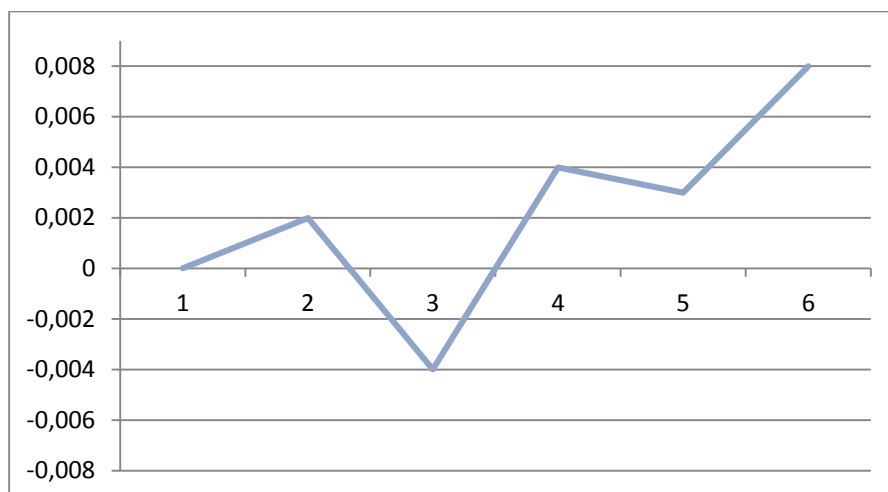


Figura 4.52: Variación del peso de la Probeta tipo Normal

4.2.2 Probeta tipo Marino

En el análisis de la variación de peso de la probeta a lo largo de los ensayos realizado, nos muestra una variación irregular del peso de las probetas, con ensayos consecutivos en los que la variación del peso es contraria en signo, lo cual se debe seguramente a que se están produciendo varios procesos al mismo tiempo. Las variaciones negativas se deben en gran medida a la disolución de componentes solubles del hormigón, mientras que los aumentos de peso se deben a reacciones de hidratación y precipitación de sales del agua de mar en el interior de los poros.

Probeta	pesos (Kg)					
Marino 1	2,713	2,711	2,717	2,715	2,718	2,720

Tabla 4.3: Evolución del peso de la Probeta tipo Marino-1 a lo largo de los ensayos

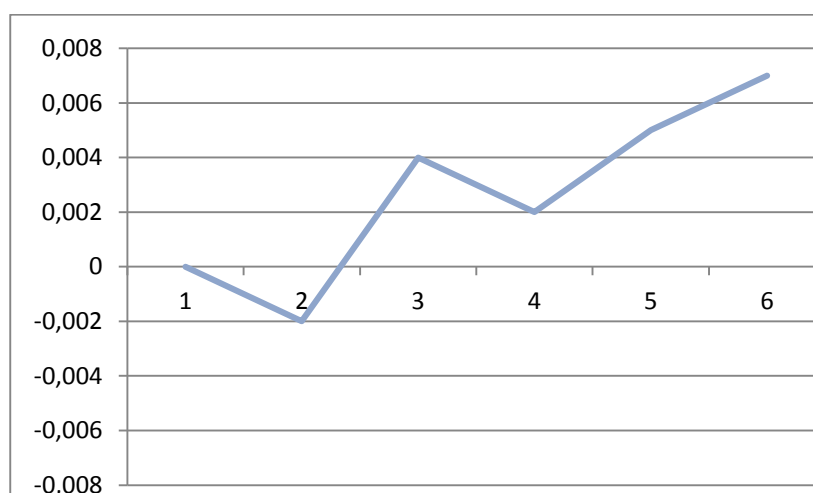


Figura 4.53: Variación del peso de la Probeta-1 tipo Marino

Probeta	pesos (Kg)					
Marino 2	2,676	2,678	2,674	2,683	2,688	2,69

Tabla 4.4: Evolución del peso de la Probeta tipo Marino-2l a lo largo de los ensayos

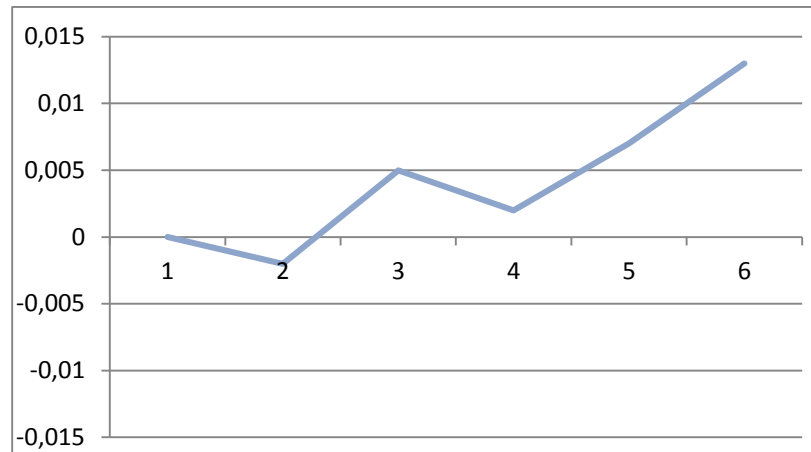


Figura 4.54: Variación del peso de la Probeta-2 tipo Marino

4.2.3 Probeta tipo PCM

En el análisis de la variación de peso de la probeta a lo largo de los ensayos realizado, nos muestra una variación irregular del peso de las probetas, con ensayos consecutivos en los que la variación del peso es contraria en signo, lo cual se debe seguramente a que se están produciendo varios procesos al mismo tiempo. Las variaciones negativas se deben en gran medida a la disolución de componentes solubles del hormigón, mientras que los aumentos de peso se deben a reacciones de hidratación y precipitación de sales del agua de mar en el interior de los poros. Esta probeta toma valores inferiores a los de las Probetas Normales y Marinas debido a la inclusión de PCM.

Probeta	pesos (g)					
PCM	2,601	2,603	2,598	2,603	2,605	2,608

Tabla 4.5: Evolución del peso de la Probeta tipo PCM a lo largo de los ensayos

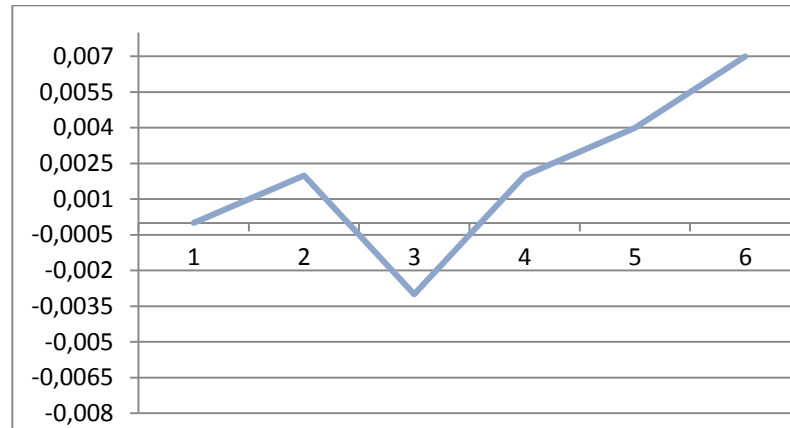


Figura 4.55: Variación de peso de la Probeta tipo PCM

4.3 Análisis de las termografías

Durante los ensayos y como se puede apreciar en las imágenes, no se encontraron ni se aprecian fallos, tanto estructurales como internos de las probetas.

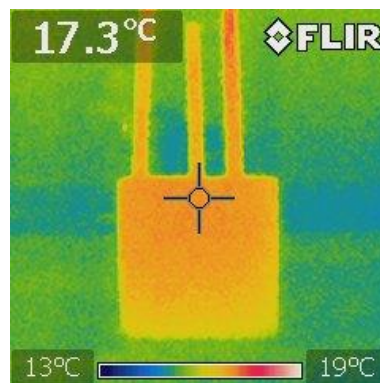


Figura 4.56: Termografía ensayo 1 Probeta-1 tipo Marino

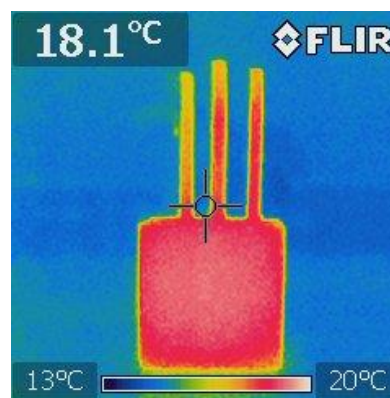


Figura 4.57: Termografía ensayo 1 Probeta-2 Marino

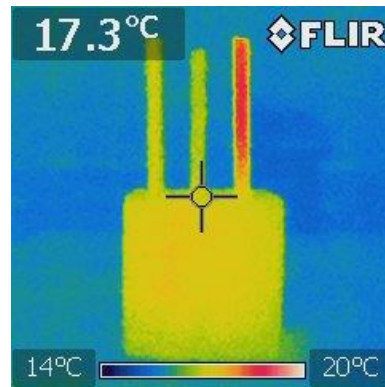


Figura 4.58: Termografía ensayo 1 Probeta Normal

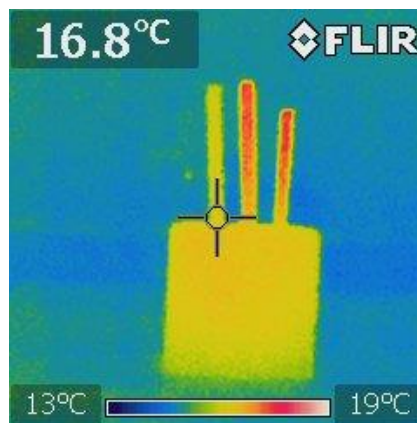


Figura 4.59: Termografía ensayo 1 Probeta PCM

Por último, se procedió a realizar una excitación de las probetas de hormigón mediante un horno eléctrico. Durante la fase de calentamiento de la pieza se pudo observar una distribución equilibrada del calor en la superficie del hormigón. Una vez sacada la probeta del horno demostrando que el calor se concentra más en el centro y tiende a disiparse ligeramente a medida que se acerca a los bordes, siendo estos levemente más fríos. Pero siguen sin apreciarse signos de que se estén produciendo procesos de corrosión. Durante la fase de enfriamiento se ha observado que la temperatura superficial de la pieza, tiende a nivelarse y mantener un descenso constante.

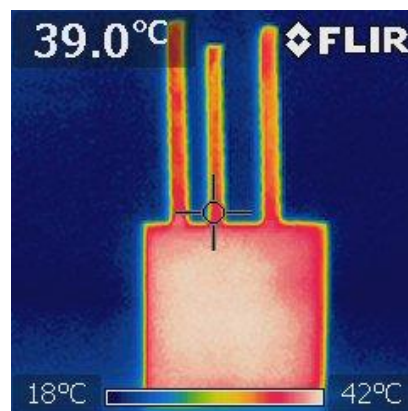


Figura 4.60: Probeta Tipo Normal tras haber sido excitada

Finalizado el análisis de todas las probetas mediante termografías se incorporan al Anexo 2 todos los ensayos realizados con la cámara termográfica..

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Durante el desarrollo del presente trabajo se ha realizado un estudio diferenciado para verificar el correcto funcionamiento del método de evaluación de la corrosión empleando potenciales de circuito abierto, para medir el potencial de corrosión. Este método se ha llevado a cabo mediante en analizador de corrosión Canin+. Este método ha sido apoyado por otros dos para comprobar el estado y durabilidad de las estructuras de hormigón, estos métodos son imágenes termográficas y análisis de la variación de pesos al sumergir las probetas en agua salada.

Para comprobar la validez del trabajo realizado se ha estudiado el comportamiento de tres tipo de probetas de manera que se pueda establecer cuál de las probetas se comporta de una manera más eficiente ante un medio tan agresivo como el marino.

En estos ensayos se ha podido comprobar que la Probeta de tipo PCM, es mejor dentro de un ambiente estable debido a la aparición de pequeñas muestras de corrosión, estableciendo una estabilización de los valores obtenidos, pudiéndose considerar que estos se encontraban en estado pasivo. En cambio la Probeta de tipo Normal ha sido más efectiva cuando se sometieron las diferentes probetas a un ambiente mucho más agresivo.

En comparación con la Probeta de tipo PCM, las probetas de tipo Marino y la Probeta de tipo Normal al ser analizadas se ha podido comprobar que la corrosión aparece más rápidamente en las probetas de tipo Marino, siendo el grado de avance de la corrosión muy elevado. La Probeta de tipo Normal en los primeros ensayos se mantuvo estable pero en los ensayos finales comenzó a alcanzar potenciales cada vez más negativos.

5.1.1 Medición de la corrosión mediante la evaluación del campo potencial

5.1.1.1 Probeta de cemento autocompactante tipo Normal

Las probetas presentan un mayor grado de corrosión en su parte superior, debido, en parte a que cierta cantidad de agua del medio se evapora y tiene que ser repuesta, por lo que se produce en cierto grado un proceso de humedecimiento y secado alternativamente. Los cloruros pueden avanzar rápidamente por succión capilar, alcanzando así una determinada profundidad, a partir

de la cual continúan profundizando por difusión. En esta zona si hay acceso de oxígeno y elevada humedad, por lo que el riesgo de corrosión es más elevado que en el resto de zonas. .

5.1.1.2 Probetas de cemento del tipo Marino

Las probetas presentan un mayor grado de corrosión en su parte superior, debido, en parte a que cierta cantidad de agua del medio se evapora y tiene que ser repuesta, por lo que se produce en cierto grado humedecimiento y secado alternativamente. Los cloruros pueden avanzar rápidamente por succión capilar, alcanzando así una determinada profundidad, a partir de la cual continúan profundizando por difusión. En esta zona si hay acceso de oxígeno y elevada humedad, por lo que el riesgo de corrosión es alto. El grado de corrosión en éste ambiente más agresivo también es superior en el caso de la probeta de tipo Marino.

5.1.1.3 Probetas con contenido en PCM

Las probetas presentan un mayor grado de corrosión en su parte superior (como ya ocurría con las Probetas normales y marinas), debido, en parte a que cierta cantidad de agua del medio se evapora y tiene que ser repuesta, por lo que se produce en cierto grado un proceso de humedecimiento y secado alternativamente. Los cloruros pueden avanzar rápidamente por succión capilar, alcanzando así una determinada profundidad, a partir de la cual continúan profundizando por difusión. En esta zona si hay acceso de oxígeno y elevada humedad, por lo que el riesgo de corrosión es más elevado que en el resto de zonas.

5.1.2 Análisis de las probetas mediante termografías

En ninguno de los ensayos que se realizaron con las probetas, la tecnología infrarroja dio resultados concluyentes para los diferentes tipos de probetas utilizadas.

Sin embargo hay estudios en los que se ha probado esta técnica y funciona de manera eficiente. Puede ser que los motivos que llevaron a que no fuera satisfactorio el uso de ésta técnica sea que la cámara utilizada no tiene la suficiente precisión para este tipo de ensayo.

La técnica de la termografía infrarroja ha demostrado ser de aplicación simple, rápida y segura. Simple porque el equipo utilizado para realizar las capturas de imágenes IR durante las mediciones termográficas, es de manejo fácil y sencillo, equiparables a otros equipos digitales comunes de captura de imágenes y video en rango visible, por lo que no necesita de conocimientos especializados avanzados para su operación. Es rápida, porque además de examinar grandes áreas y superficies, se evita la realización de catas destructivas en el hormigón como la extracción de testigos durante los ensayos, esto permite un gran ahorro de tiempo durante las inspecciones. Además su portabilidad, y el rápido montaje y desmontaje de los equipos, permite su utilización en situaciones que así lo amerite, tales como inspecciones en edificaciones habitados, espacios comerciales o con alto tránsito de personas o incluso cuando existe la posibilidad de vandalismo. Es segura, porque el equipo utilizado para hacer las mediciones termográficas no emite radiaciones. Este solo capta las radiaciones térmicas que son naturalmente emitidas por el hormigón. En adición, no se generan residuos o polvo de este material que pudieran causar problemas ambientales o riesgos a la salud del personal de trabajo.

5.1.3 Análisis de la variación de peso

La variación de peso, no muestra resultados concluyentes en ninguno de los casos para alguno de los tipo de probetas analizados (normales, marinas y PCM), tomando valores similares en sus porcentajes.

5.1.4 Conclusión

Se ha podido comprobar que el método de evaluación electroquímica utilizado en el presente trabajo es válido y ofrece buenos resultados para el análisis de la corrosión en estructuras de hormigón. Al probar el método en el laboratorio se pudo seguir el progreso de las probetas y comprobar que el método utilizado es eficaz para el uso que se le ha dado. Por otro lado el ensayo en una estructura de hormigón que no era una probeta de laboratorio fue igualmente efectivo a pesar de que no se pudo realizar la prueba en las mejores condiciones debido al emplazamiento de la estructura. Otra de las conclusiones que se sacan al realizar este trabajo es que sería necesario más tiempo para poder efectuar de forma más efectiva, debido a que se tuvieron que realizar medidas para aumentar la velocidad del proceso y no se pudo comprobar el avance de la corrosión de manera natural.

5.2 Líneas futuras

A continuación y para finalizar el TFG se proponen una serie de líneas futuras de trabajo relacionadas con el asunto tratado, que sería interesante de desarrollar y estudiar:

- Aplicación de otro tipo de evaluación electroquímica como puede ser la evaluación de la corrosión mediante ruido electroquímico
- Comparación del campo potencial con otras técnicas de análisis
- Profundizar en la aplicabilidad de la técnica en estructuras reales
- Planificación de un estudio con un margen de tiempo mayor

6 BIBLIOGRAFÍA

- 1] S. e. d. t. anticorrosivos, «Corrosión en estructuras de hormigón,» ARGO. SA. [En línea]. Available: <http://www.argo-es.com/pdf/E2.%20Corrosion%20estructuras%20hormig%C3%B3n.pdf> [Último acceso: Febrero 2016].
- 2] A. Vico, W. Morris y M. Vázquez «Evaluación del avance de la corrosión de refuerzo en estructuras de hormigón,» Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata [En línea]. Available: http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/tecnologia_hormigon/coreMARCELA.pdf [Último acceso: Febrero 2016].
- 3] J. A. G. Fernández, Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión. Editorial CSIC-CSIC Press 1984
- 4] P.M.Rodriguez,«ARQHYS,» [En línea]. Available: <http://www.arqhys.com/arquitectura/corrosion-contacto-hormigon.html>. [Último acceso: Febrero 2016].
- 5] M. A. B. Odriozola, «Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino : zona de carrera de mareas y zona sumergida,» Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2007.
- 6] B. Chico, E. Otero, L. Mariaca y M. Morcillo. La corrosión en atmósferas marinas. Efecto de la distancia a la costa. Revista de Metalurgia, 34(Extra), 71-74. 1998
- 7] V. P. LLopis, «Ensayos no destructivos en hormigón. Georadar y ultrasonidos» Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.2014
- 8] X. P. Maldague, «Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing.,» Toronto: John Wiley & Sons, INC., 2001.
- 9] C.Andrade, I. Martínez Sierra, C.Alonso y J. Fulla, «Nuevas técnicas avanzadas para la medida in situ de la corrosión,» Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), 2001.
- 10 G. J. Weil, «Infrared Thermographic Techniques. En A. international, Handbook on Nondestructive] Testing of Concrete (Segunda ed.),» Philadelphia: CRC press LLC., 2004.
- 11 C. Natali. G. Mena, «Evaluación de la Aplicabilidad de la Técnica de la Termografía Infrarroja,» PFM, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, BARCELONA, 2013.

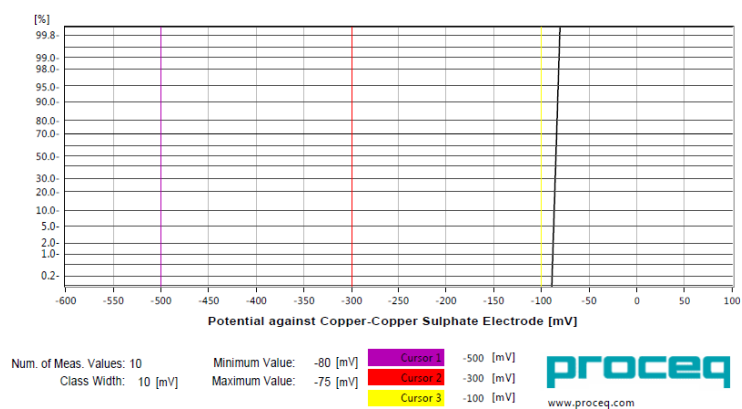
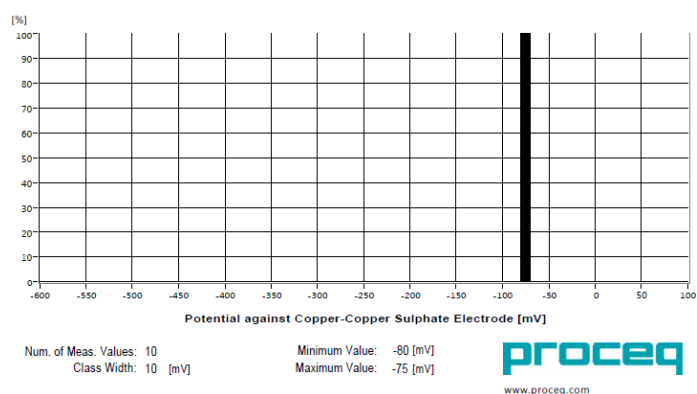
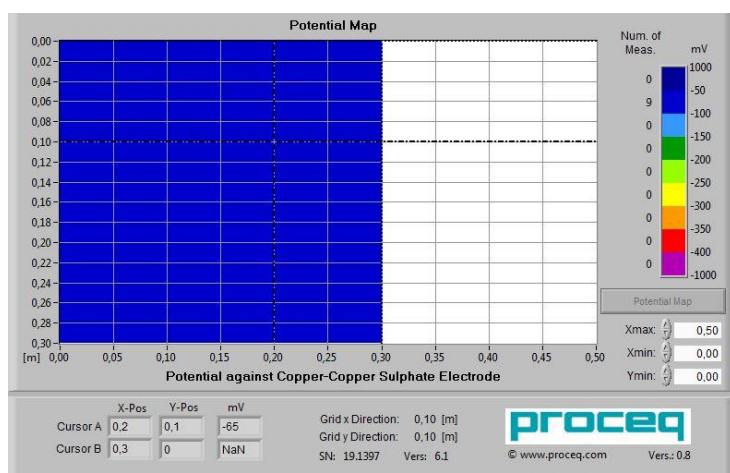
- 12 Halliday/Resnick, Física, tomo II, pp. 125,126, CECSA, 2006.
- 13 C. d. i. DAGA, «DAGA SL,» DAGA SL, [En línea]. Available: <http://www.dagasl.es/art7.htm>. [Último acceso: Febrero 2016].
- 14 I. Alabama Specialty Products, «Metal Samples Corrosion Monitoring Systems,» Division of Alabama Specialty Products, Inc., Munford[En línea]. Available: <http://www.alspi.com/ms.htm> [Último acceso: Febrero 2016].
- 15 E. M. Fernández, «Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón: Estudio experimental de la variación de la ductilidad en armaduras corroídas aplicando el criterio de acero equivalente,» Tesis Docotral Universidad Carlos III, Madrid, 2008.
- 16 A. Geary y M. Stern, «Electrochemical polarization: I.A theoretical analysys of the shape of the polarization curves,» J. Electrochem. Soc. 1957, 104(1), 56-63.
- 17 M. I. H.R Soleymani, «Comparing corrosion measurement methods to assess the corrosion activity of laboratory OPC and HPC concrete specimens,» de *Cement and Concrete Research. Vol 34*, 2004, pp. 2037-2044.
- 18 J. G. V.Feliu, «Equivalent circuit for modelling the steel-concrrete interface. Experimental evidence and theoretical predictions,» de *Corrosion Science*, 1998, pp. 975-993.
- 19 J. MENDOZA, J. DURÁN y R. GENESCA. Espectroscopía de impedancia electroquímica en corrosión. Instituto Mexicano del Petróleo. Facultad de Química UNAM.(sf). 2002
- 20 J. M.Malo y J. Uruchurtu, «La técnica del ruido electroquímico para el estudio de la corrosión.,» Instituto de Investigaciones Eléctricas XVI Congreso Sociedad mexicana electroquímica. Querétaro 2001.
- 21 W Morris, A Vico, M Vazquez, SR De Sánchez, «Corrosion of reinforcing steel evaluated by jeans of concrete resistivity measurements,» *Corrosion Science*, 2002 vol. 44, nº 1, pp. 81-99,.
- 22 A. Cerezuela Parish, «Estudio térmico de las fachadas ventiladas con aletas de PCM,» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4862/fichero/1.+Estado+del+arte.pdf>. [Último acceso: Febrero 2016].
- 23 Schwerzenbach, «Instrucciones de uso Canin+,» Proceq SA, Suiza, 2012. [En línea]. Available: http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/Canin_/Spanish/canin_OI_S_2012.04.24_low.pdf [Último acceso: Febrero 2016].
- 24 F. Albareda Parés, «Durabilidad de Hormigones con adición de lodos secos de depuradora de aguas residuales,» 2003-02. [En línea]. Available: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3387/40862-7.pdf?sequence=7>. [Último acceso: Febrero 2016].
- 25 A. international, «ASTM C876-09,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.astm.org/Standards/C876>. [Último acceso: Febrero 2016].
- 26 J M Morcillo, J Alcántara, I Díaz, B Chico, J. Simancas y D. de la Fuente. Marine atmospheric corrosion of carbon steels. *Revista de Metalurgia* 2015, 51(2), 10-3989..
- 27 T. Pérez, «Aplicación de la técnica espectroscopía de impedancia electroquímica en el estudio de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto,» Universidad Autónoma de Campeche,

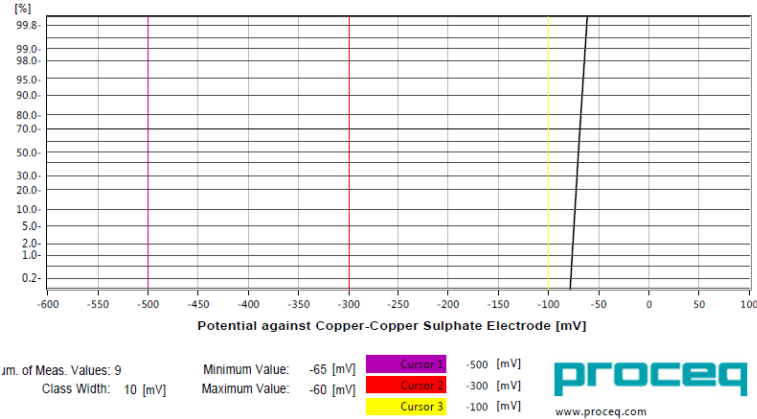
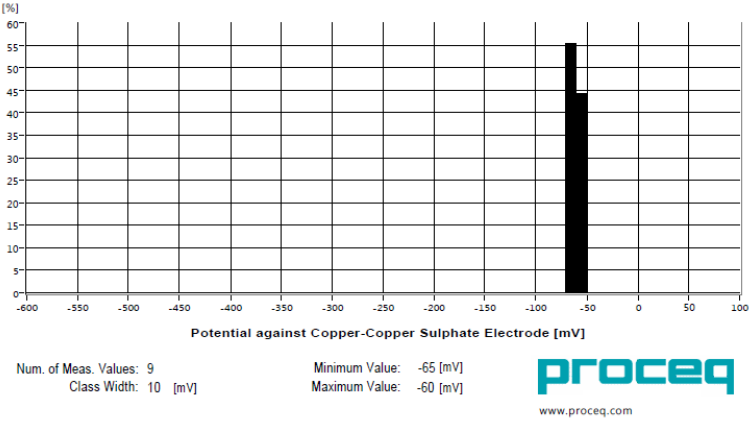
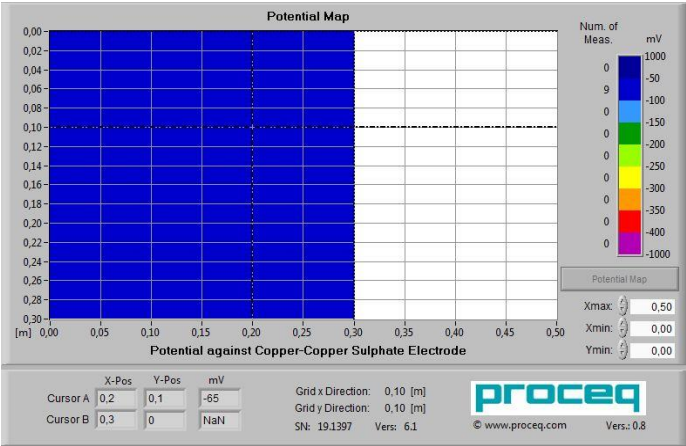
Campeche.

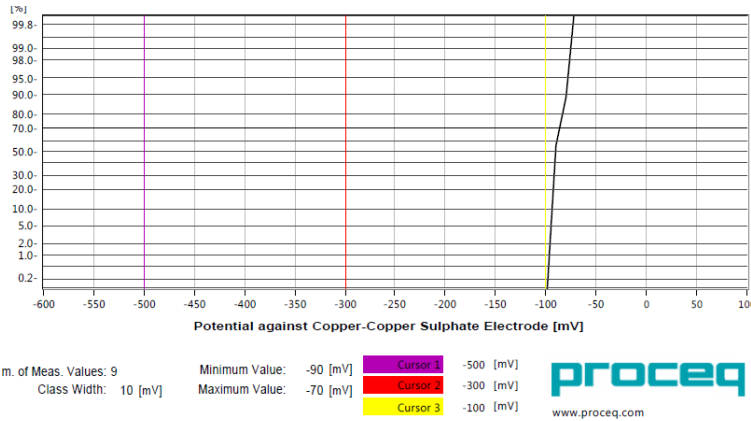
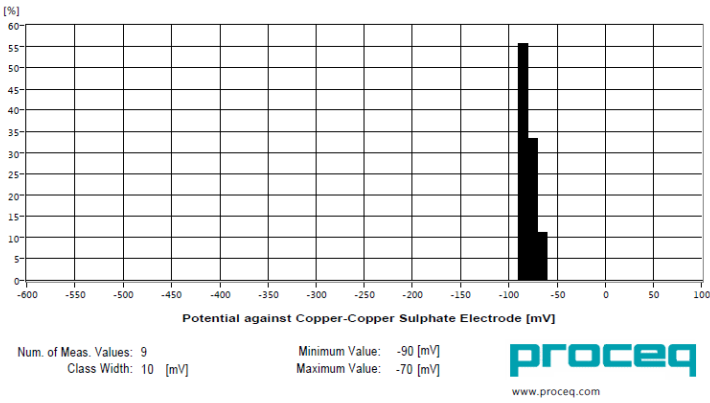
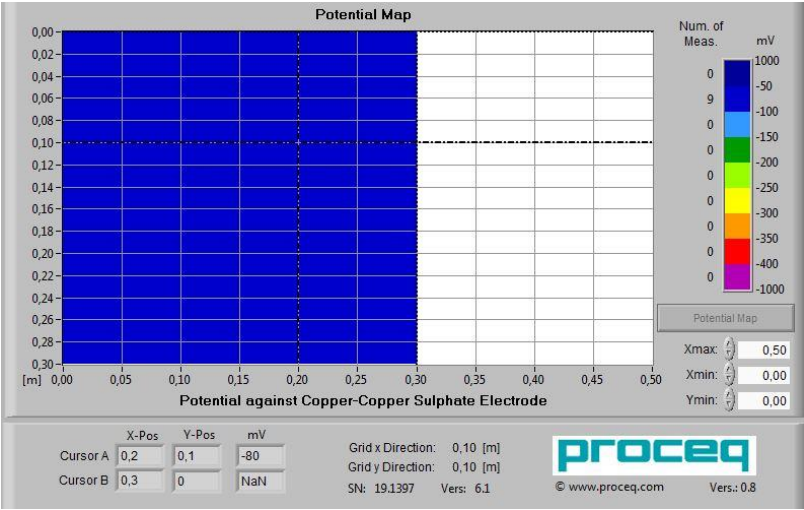
ANEXO I: ENSAYOS REALIZADOS

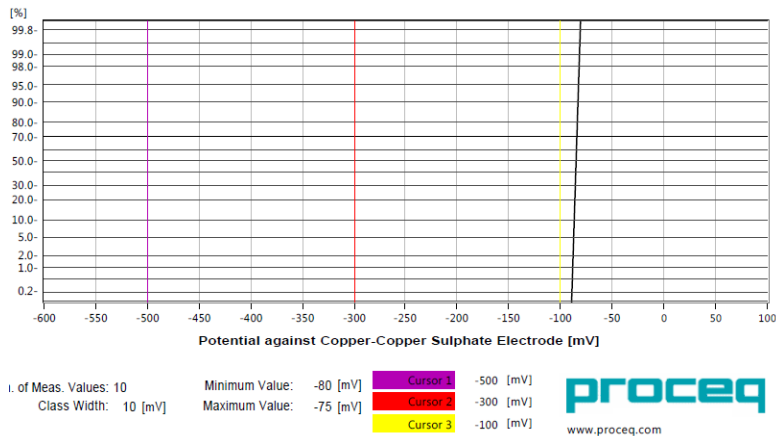
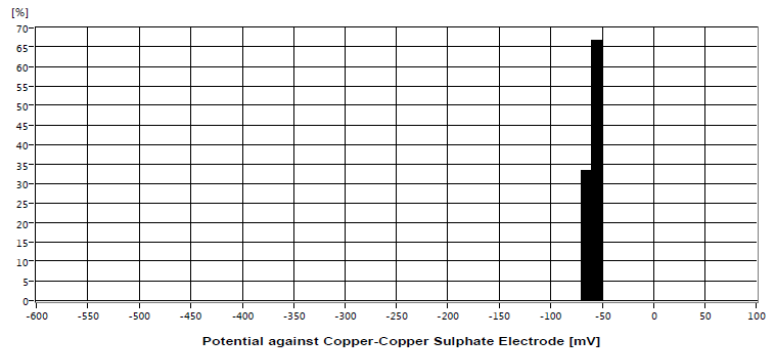
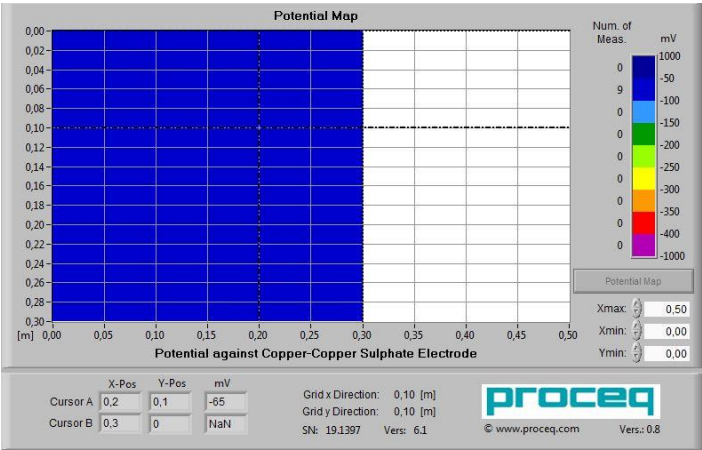
Probeta tipo Normal

-Ensayo 1:

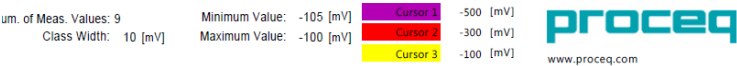
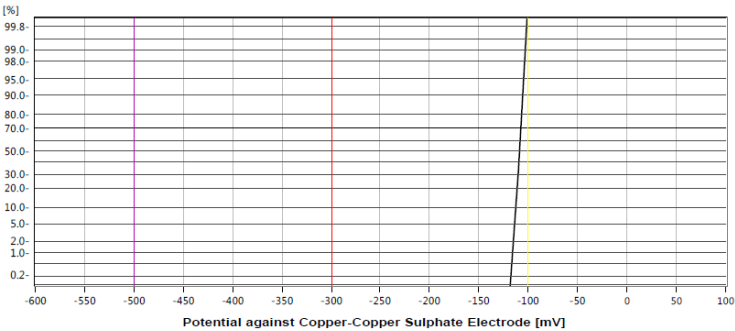
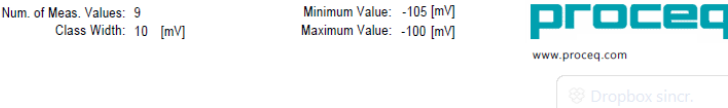
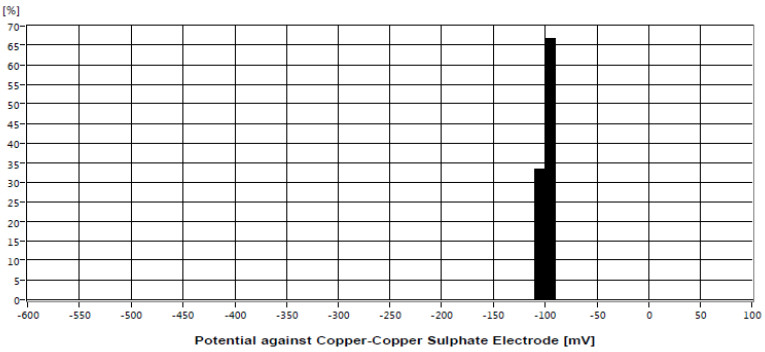
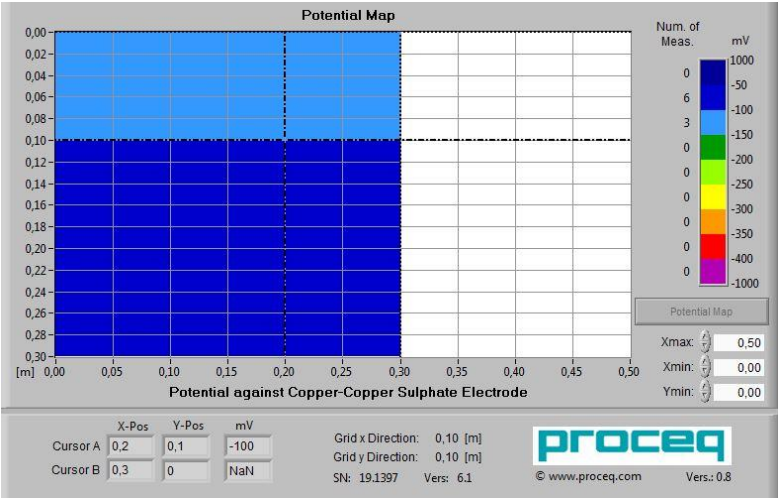


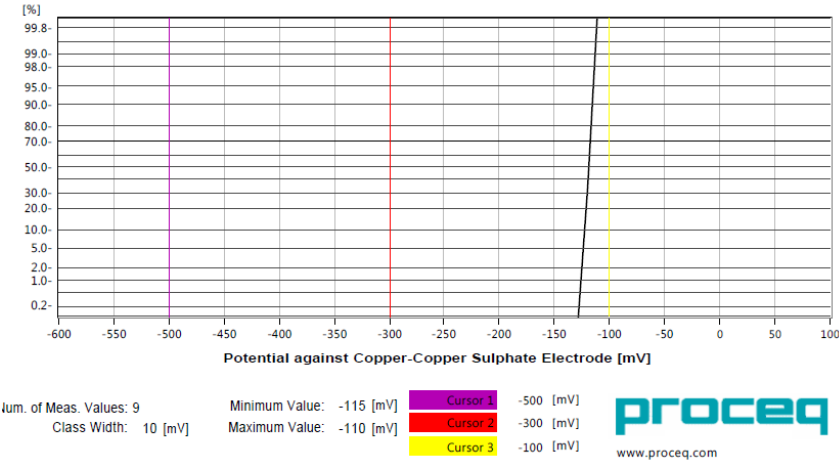
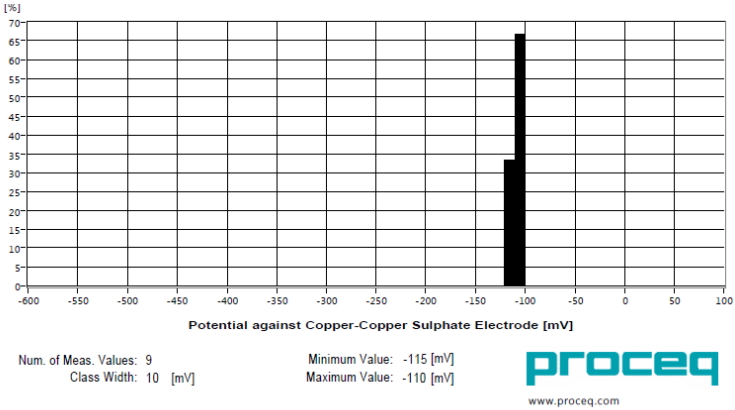
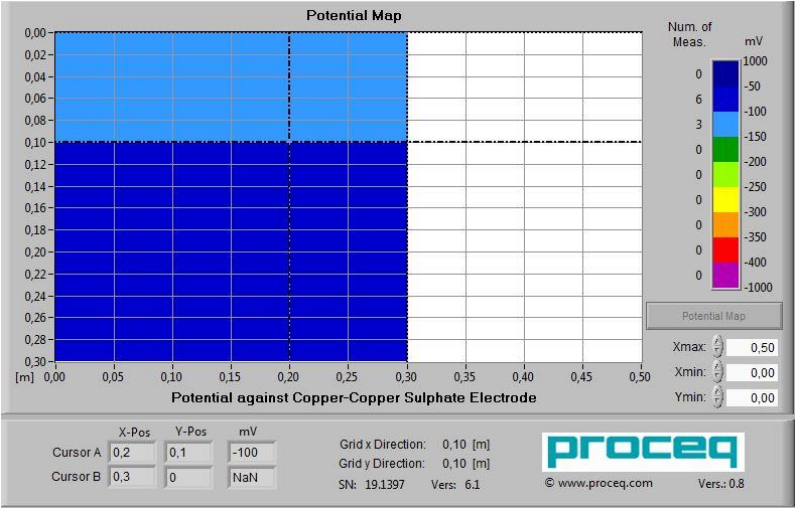




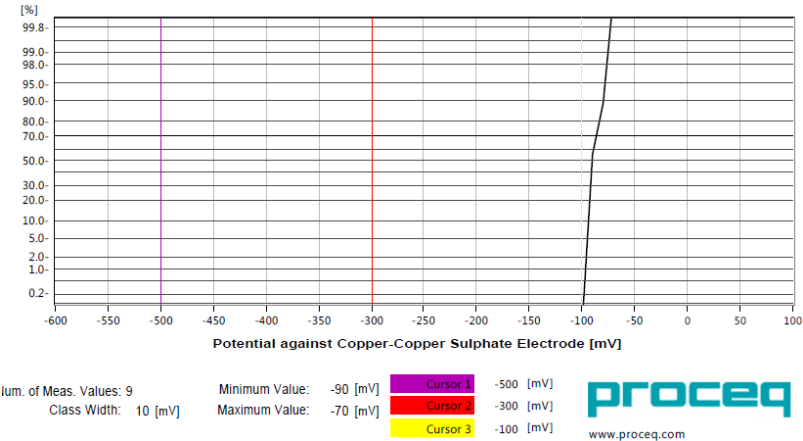
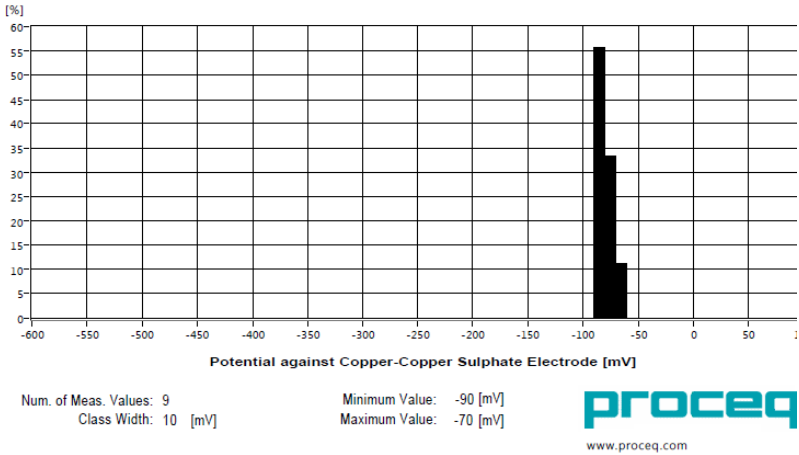
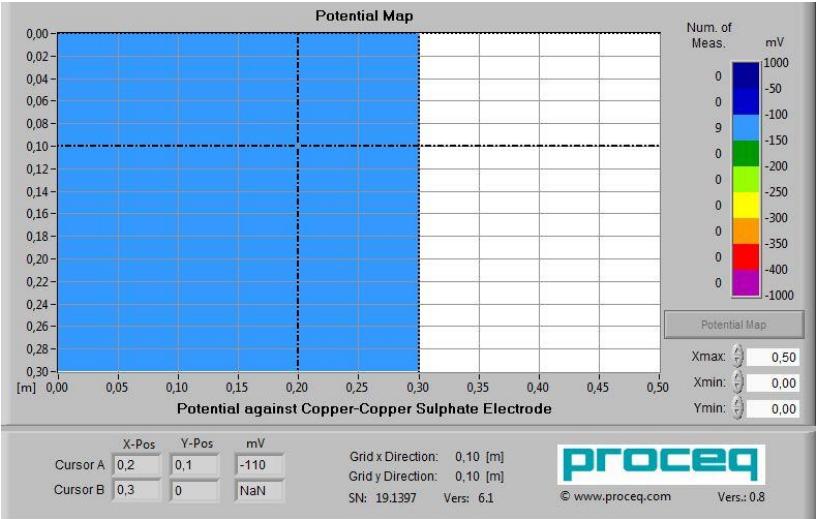


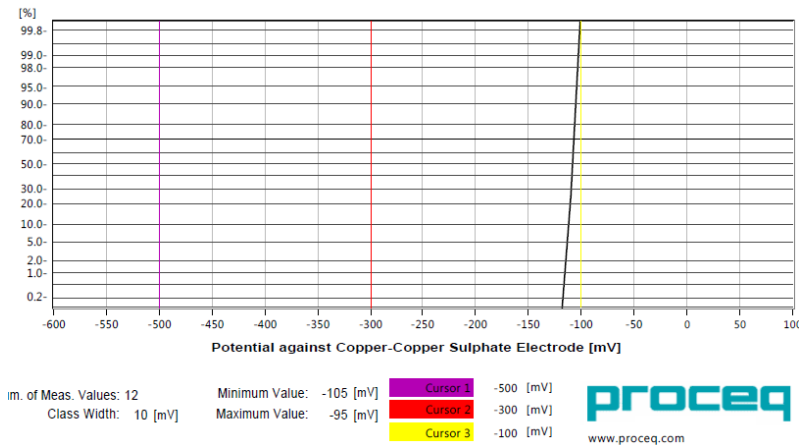
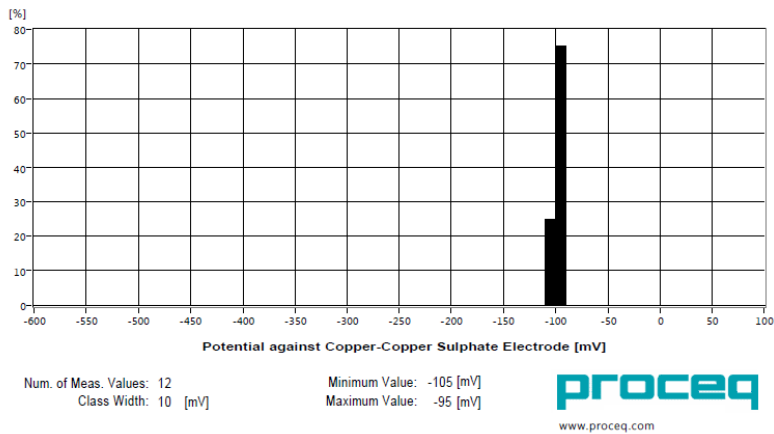
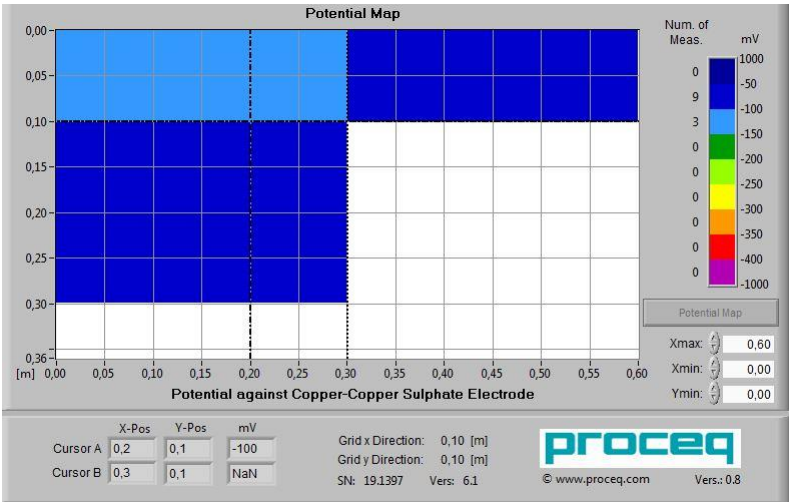
-Ensayo 2:



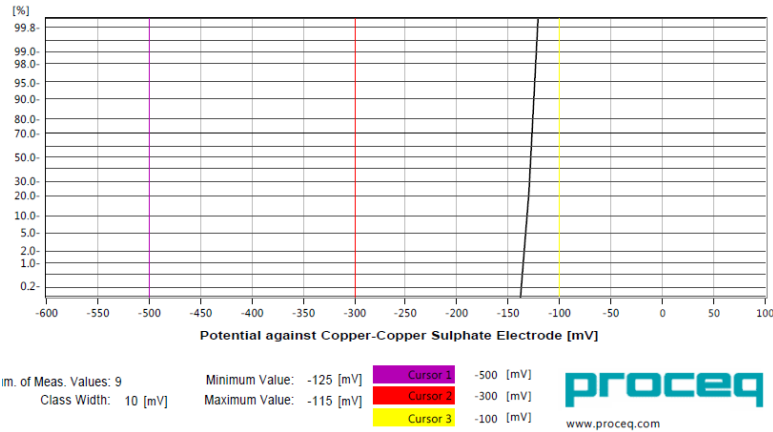
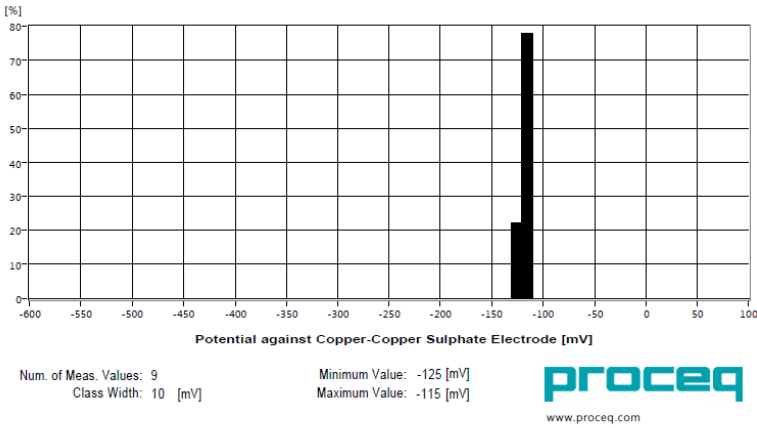
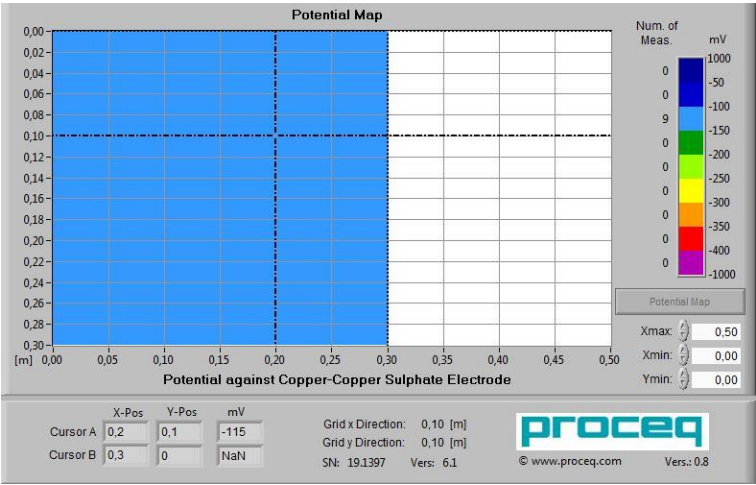


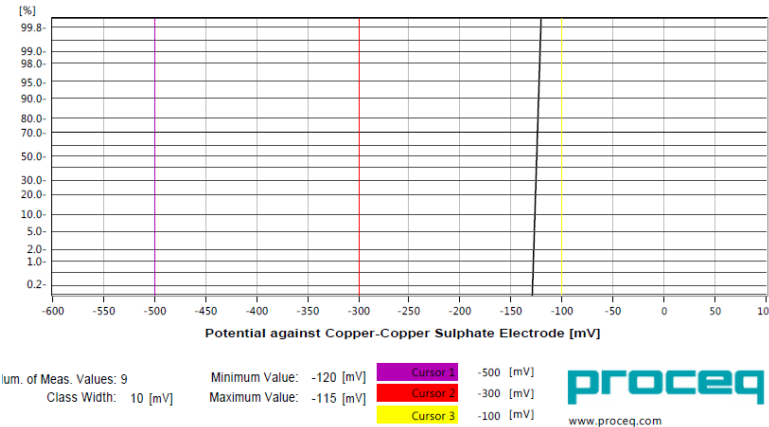
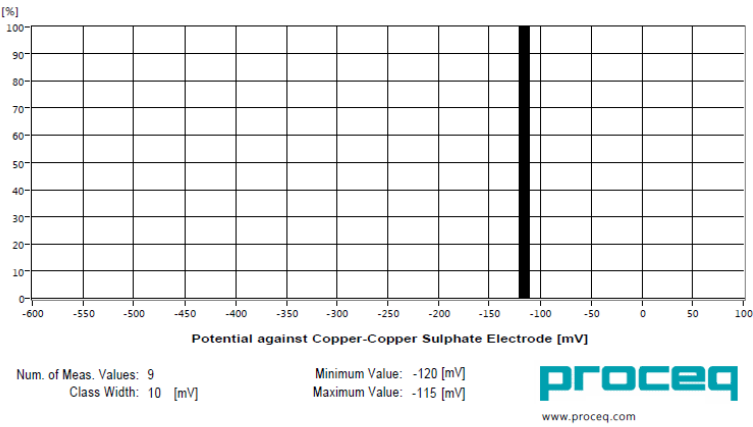
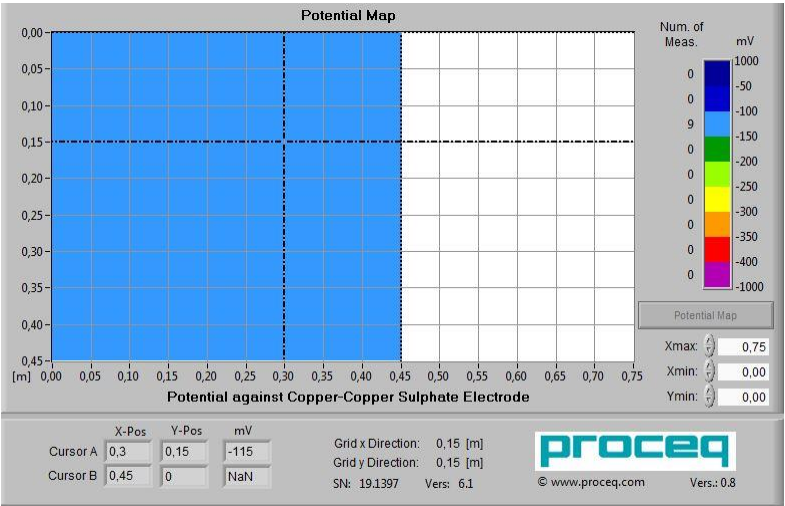
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE
LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL



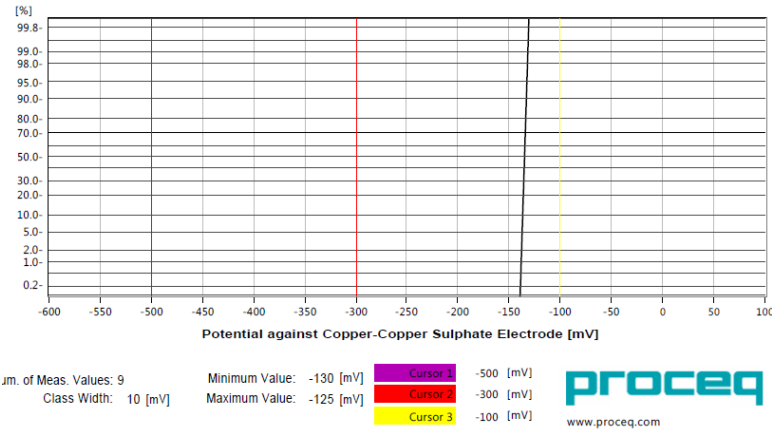
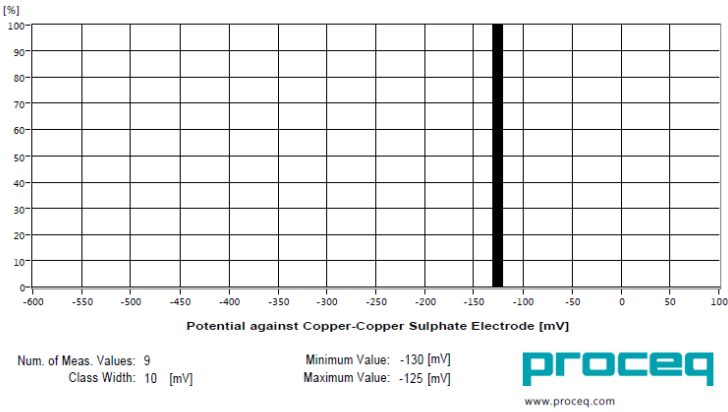
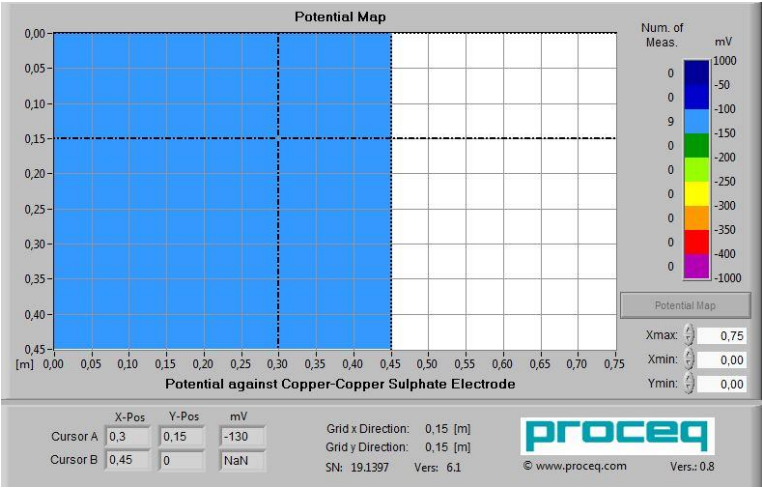


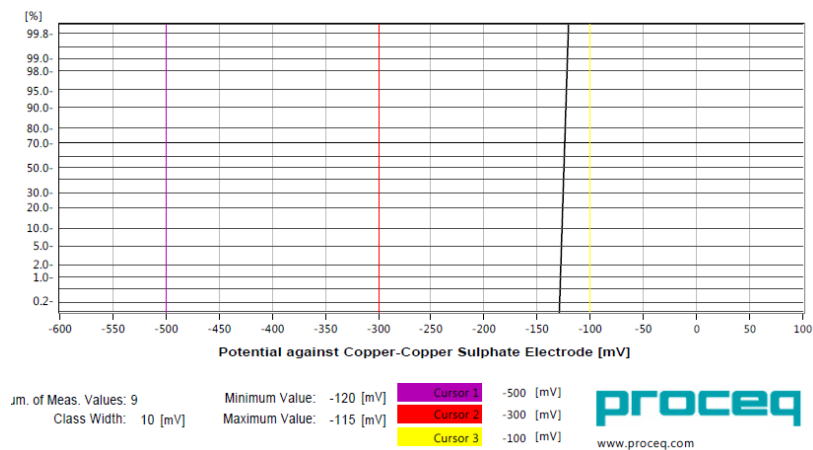
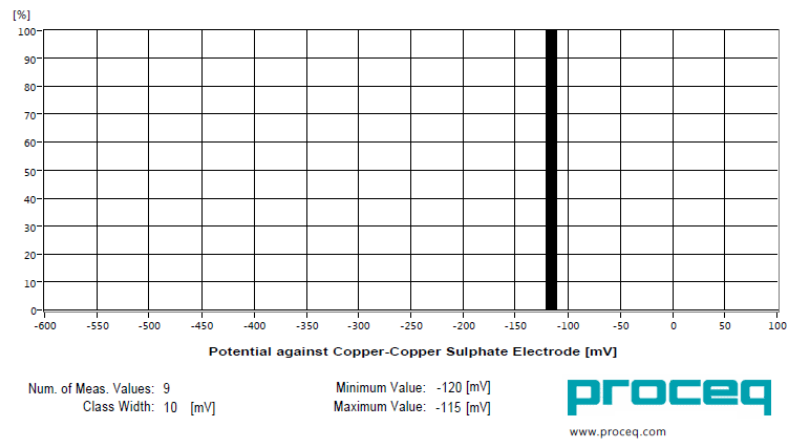
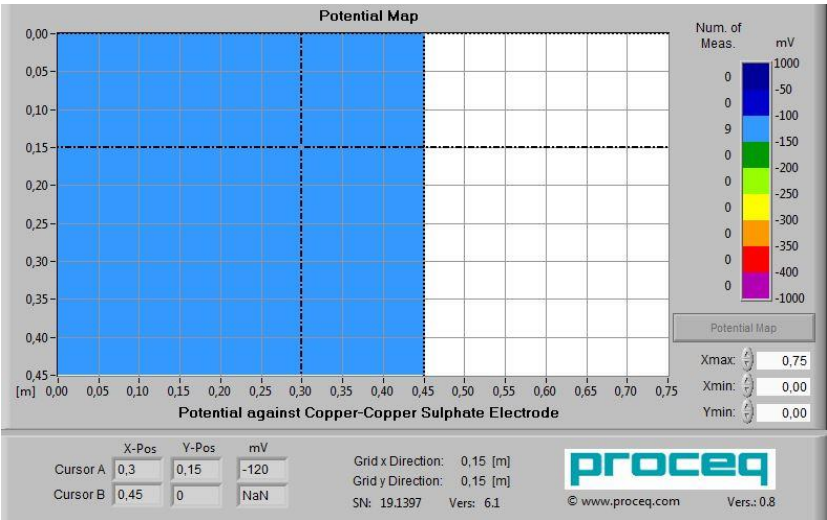
-Ensayo 3:



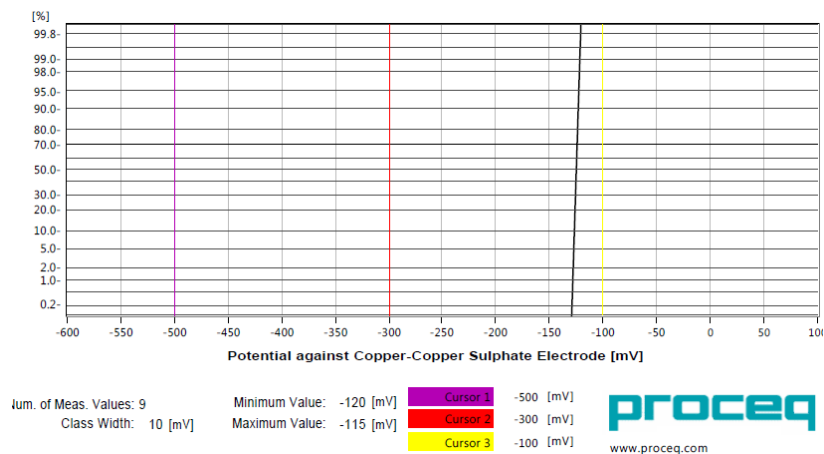
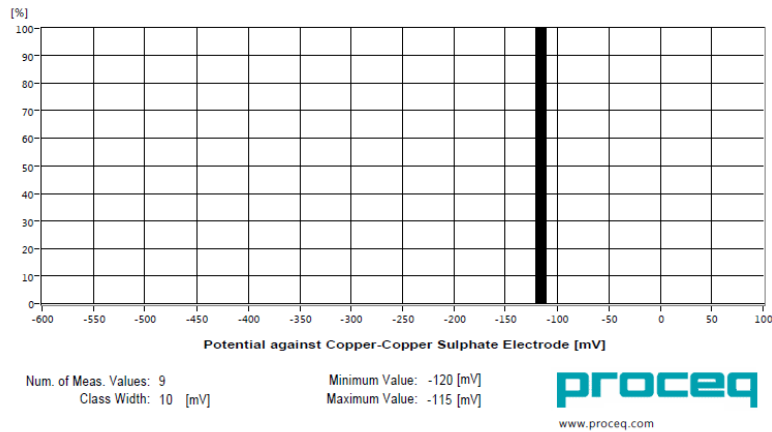
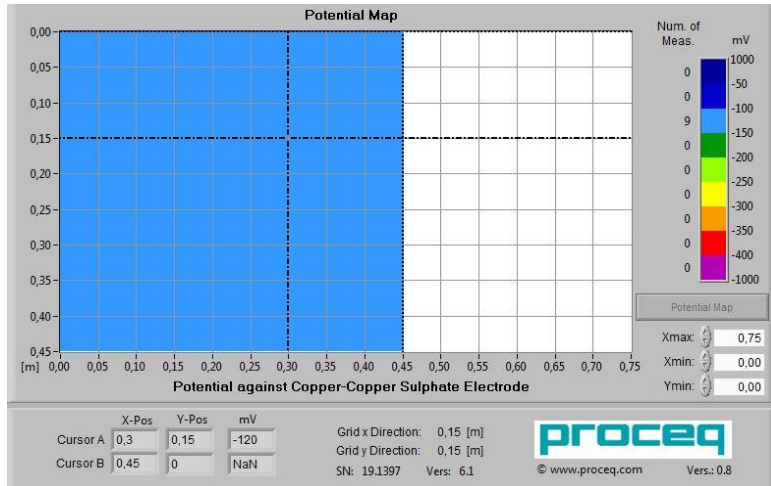


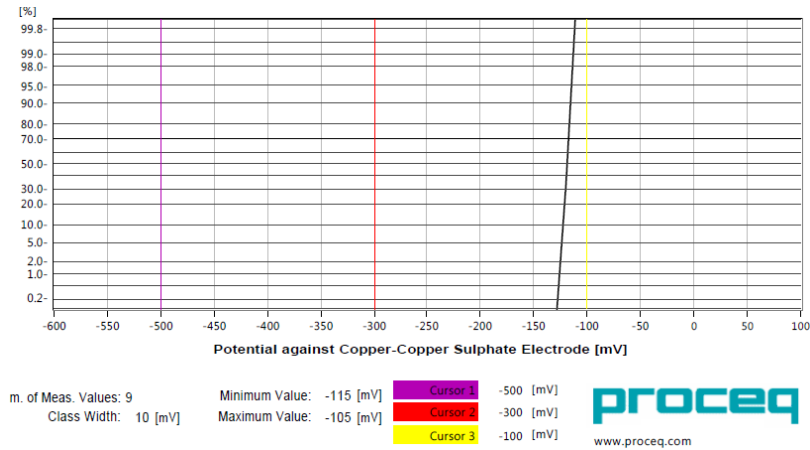
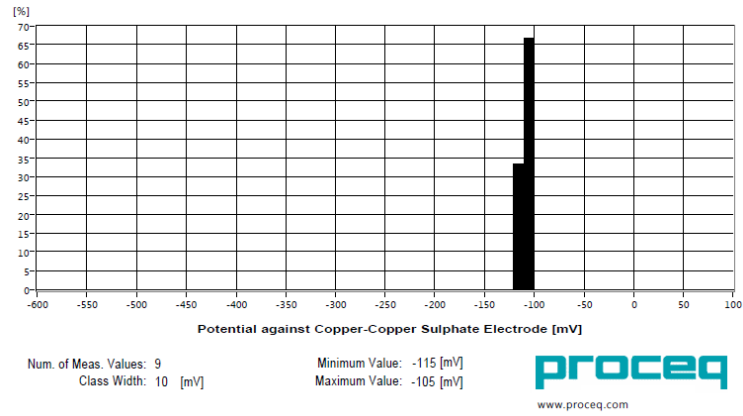
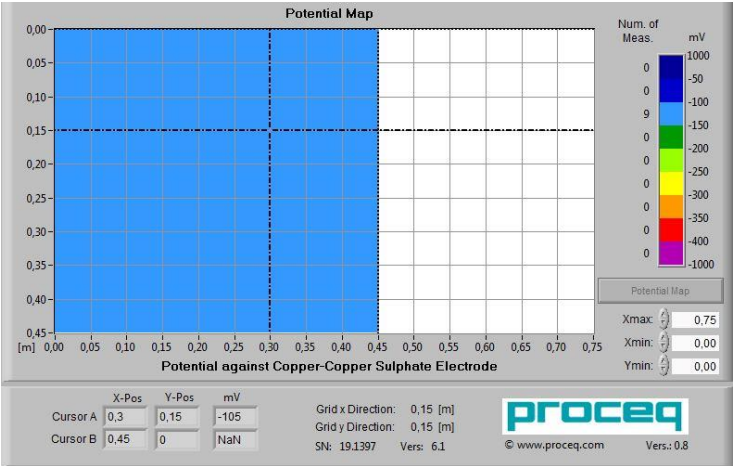
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE
LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

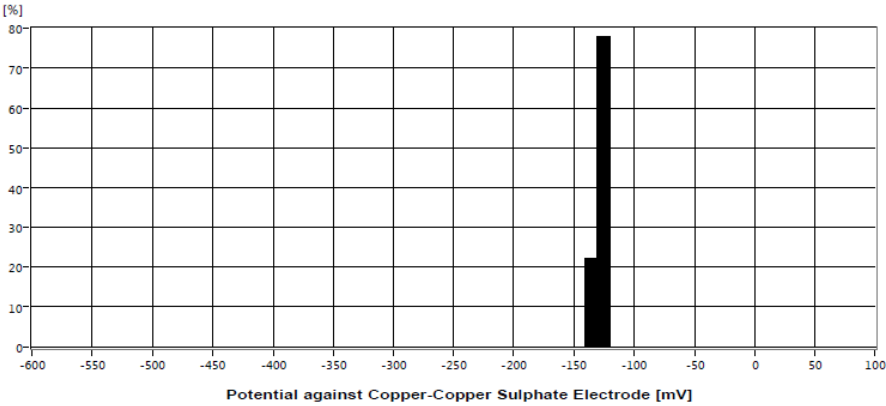
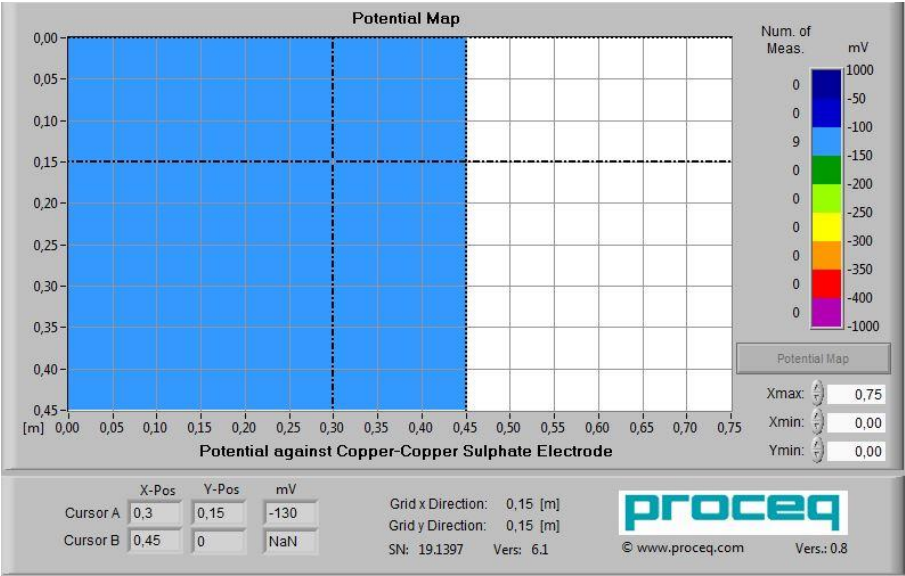




Ensayo 4:



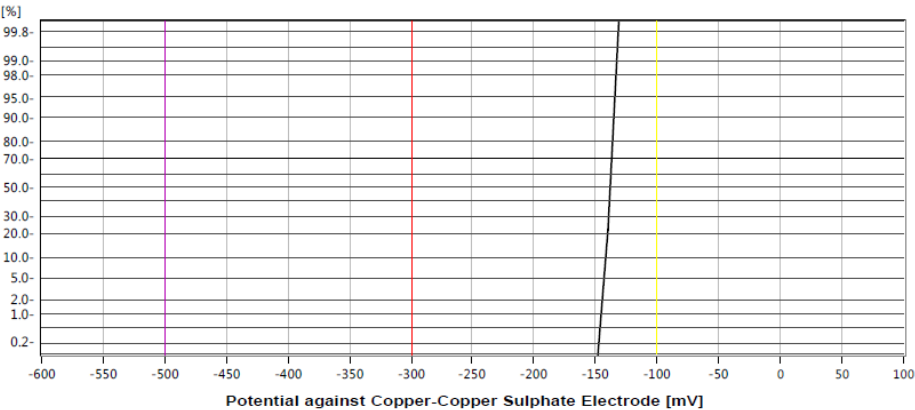




Num. of Meas. Values: 9
Class Width: 10 [mV]

Minimum Value: -135 [mV]
Maximum Value: -130 [mV]

proceq
www.proceq.com

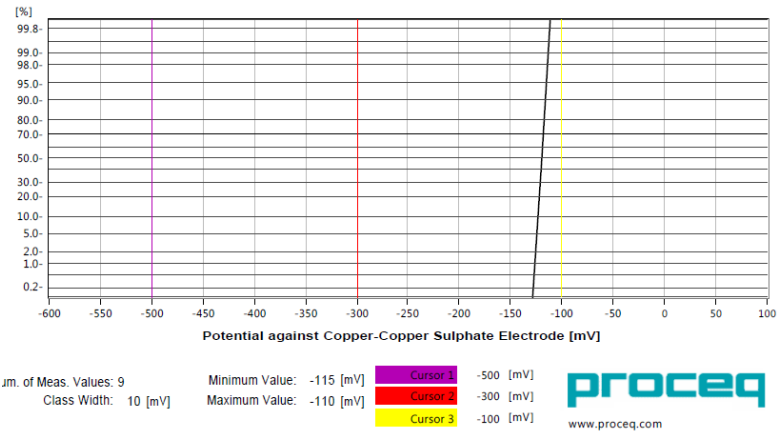
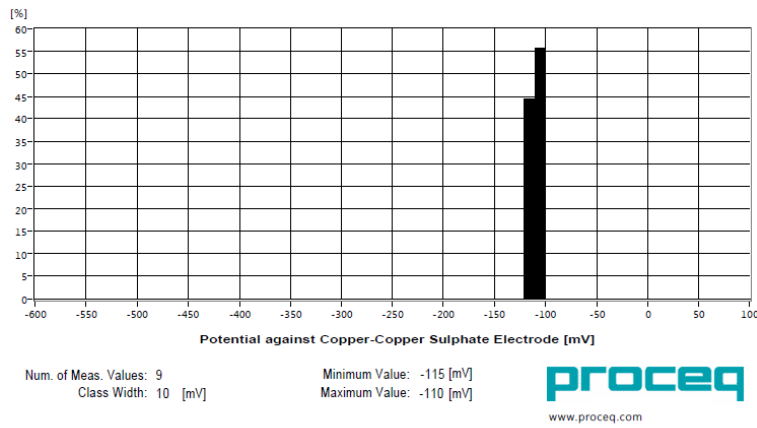
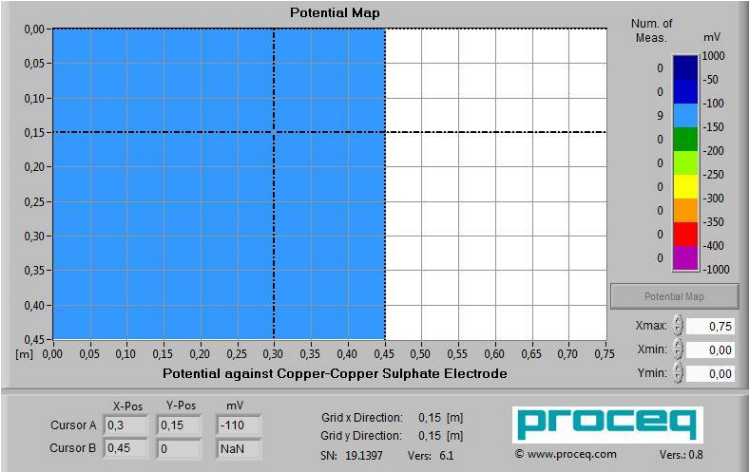


n. of Meas. Values: 9
Class Width: 10 [mV]

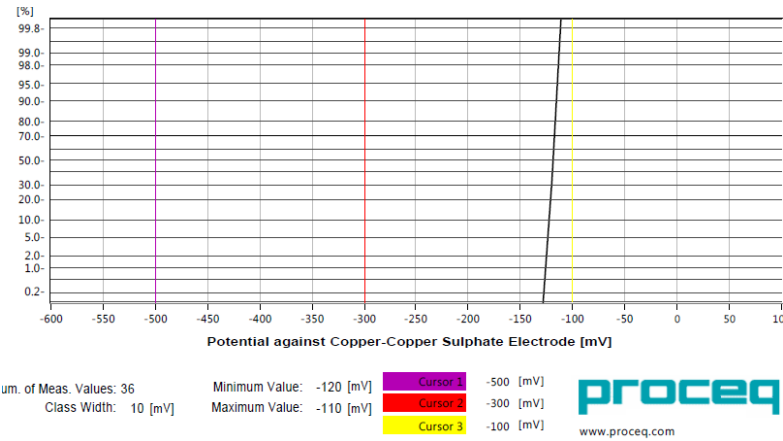
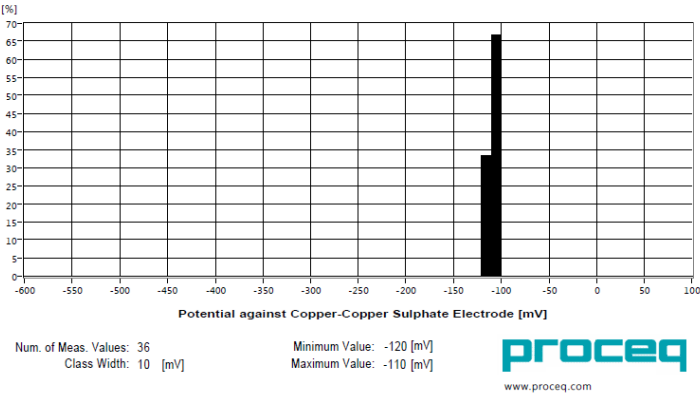
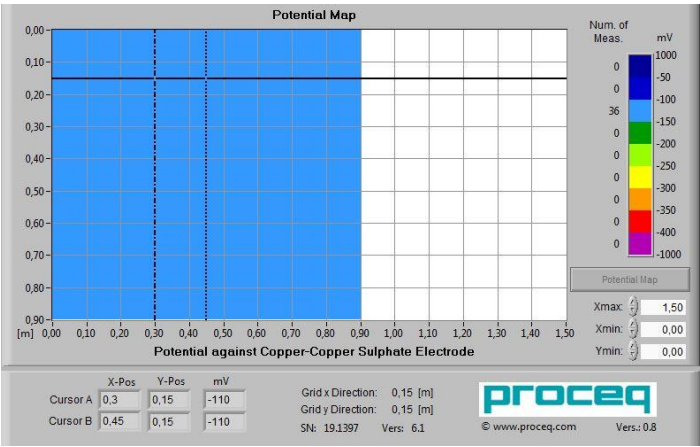
Minimum Value: -135 [mV]
Maximum Value: -130 [mV]

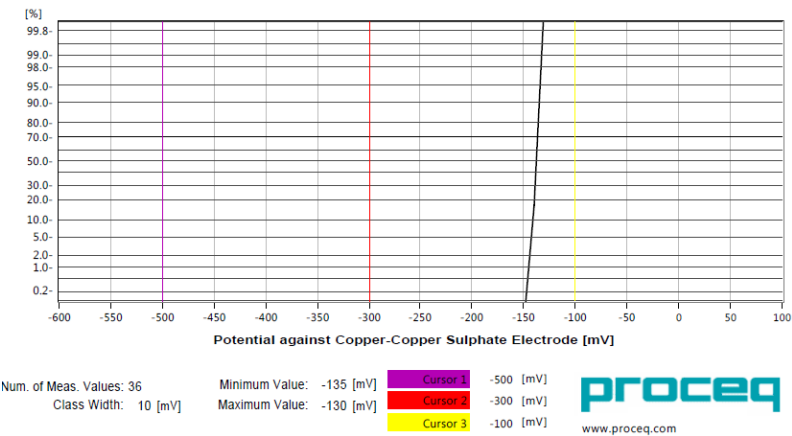
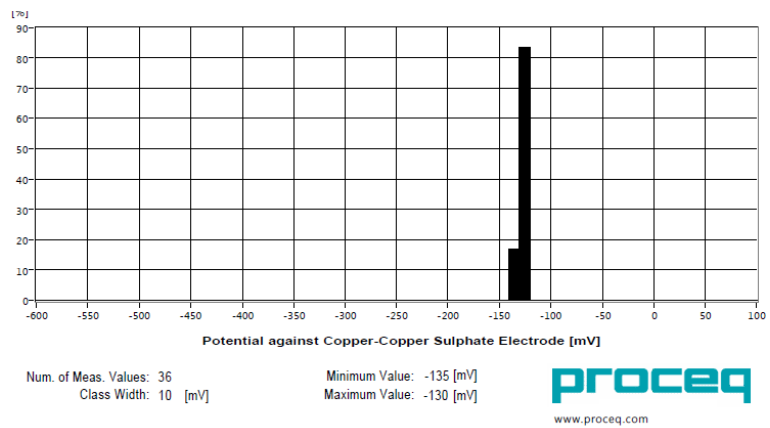
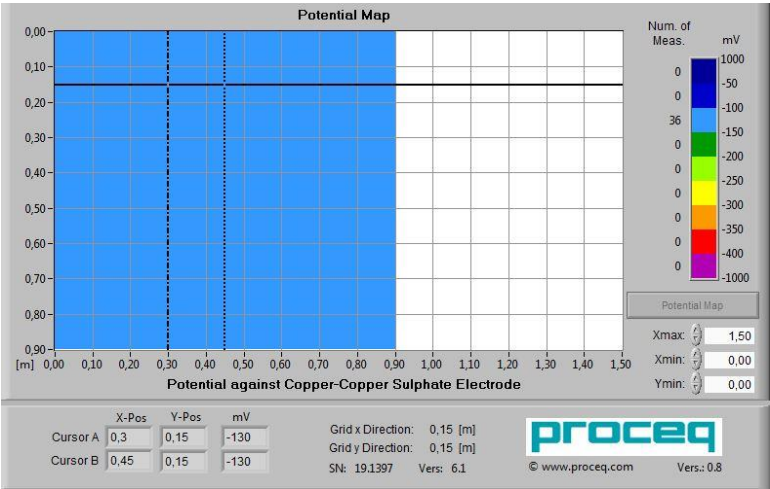
Cursor 1 -500 [mV]
Cursor 2 -300 [mV]
Cursor 3 -100 [mV]

proceq
www.proceq.com

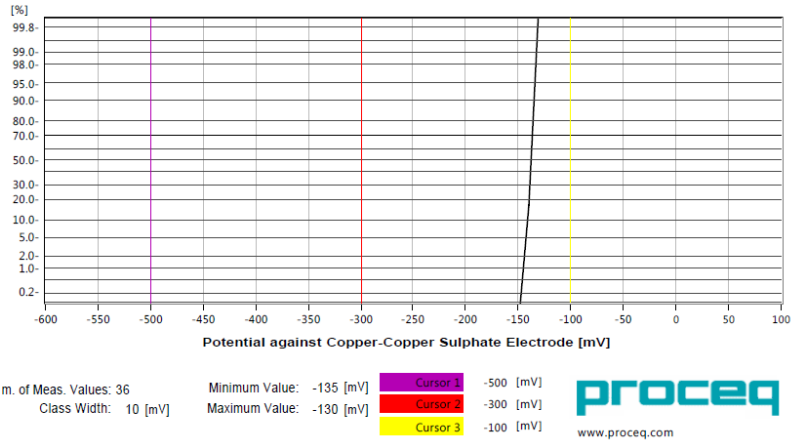
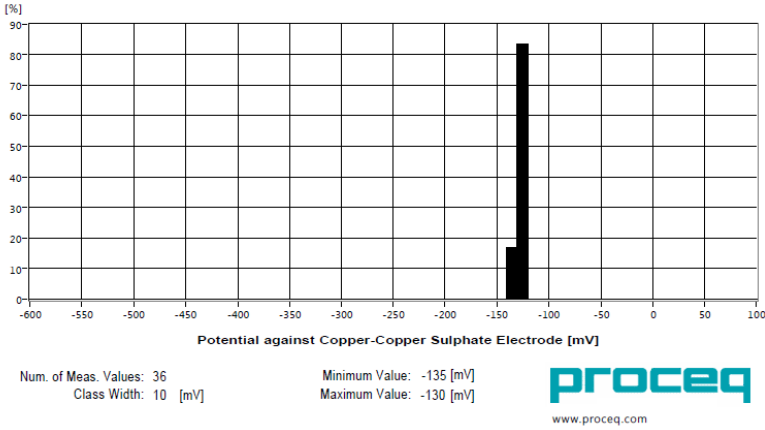
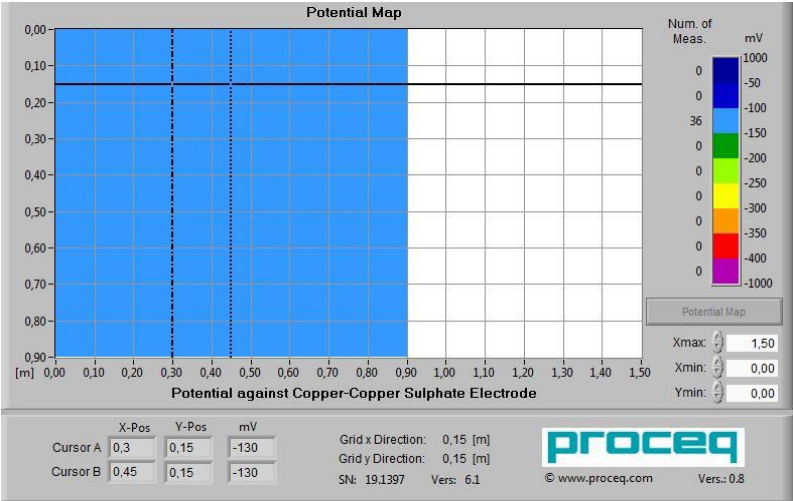


Ensayo 5

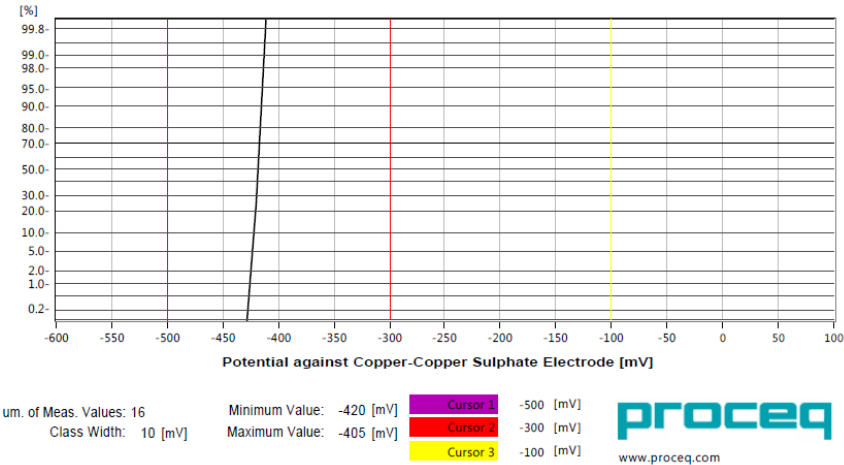
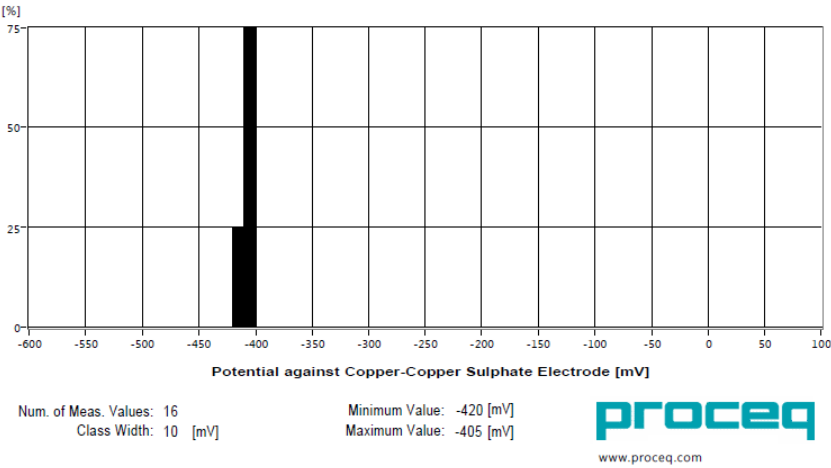
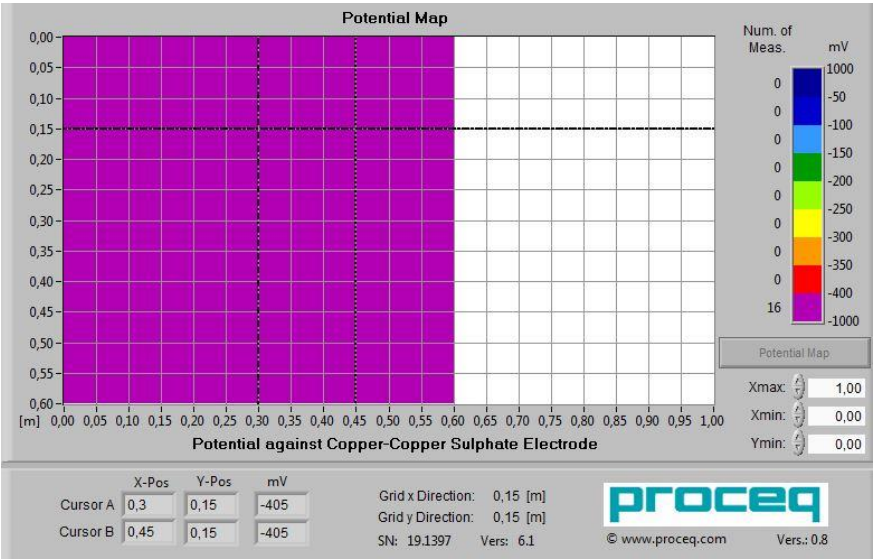




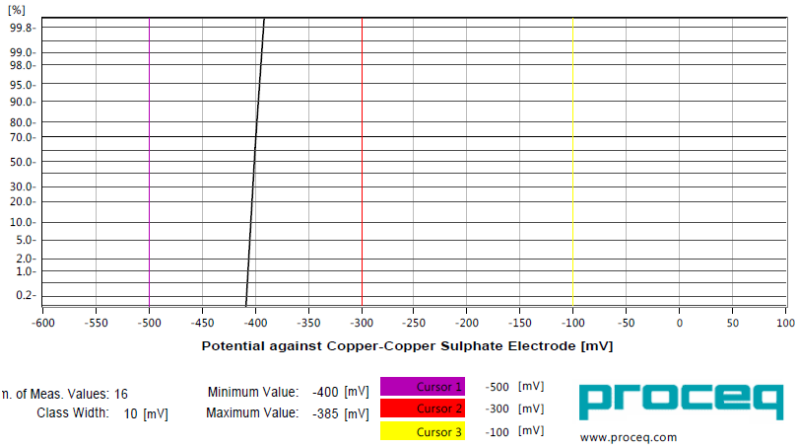
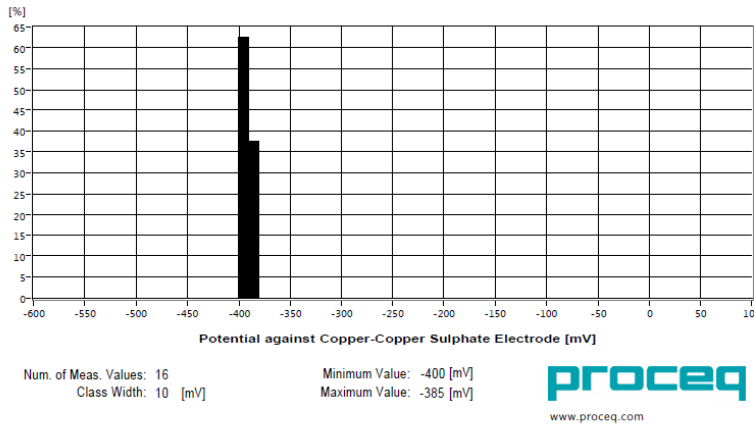
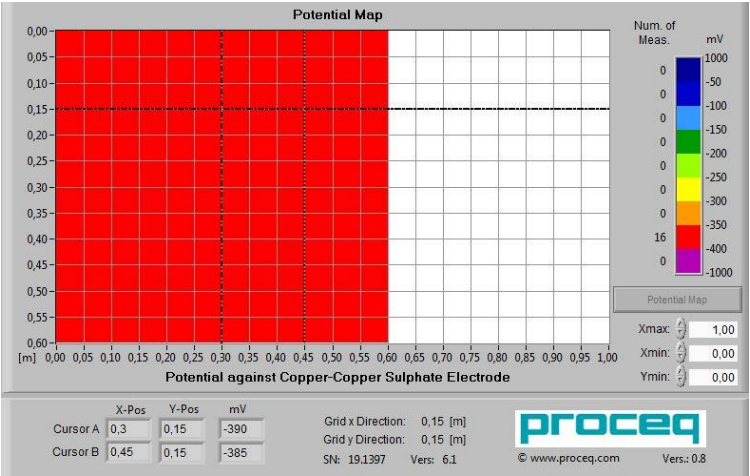
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE
LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

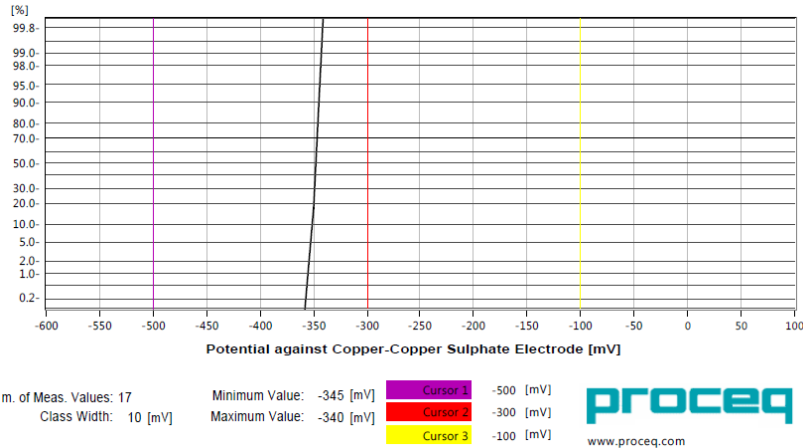
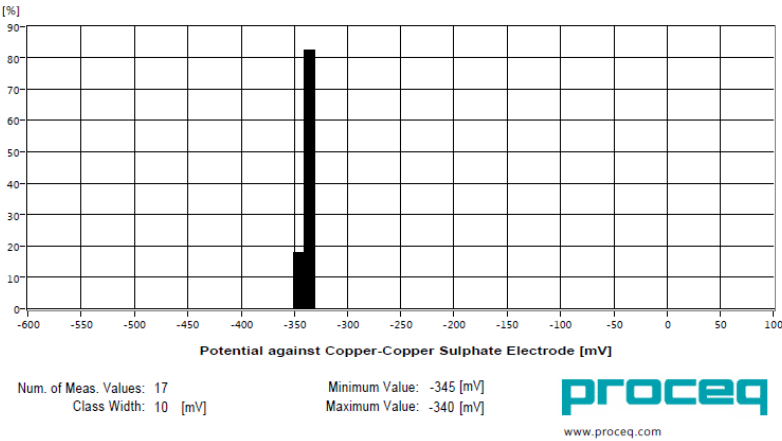
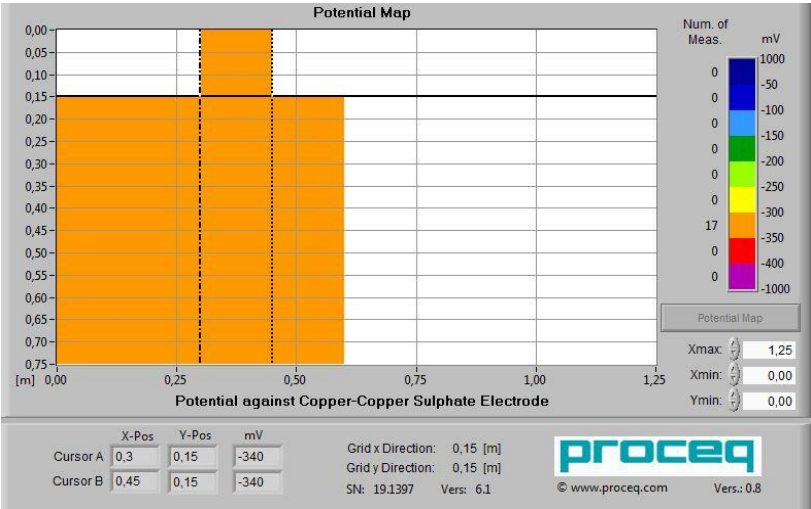


Ensayo 6:

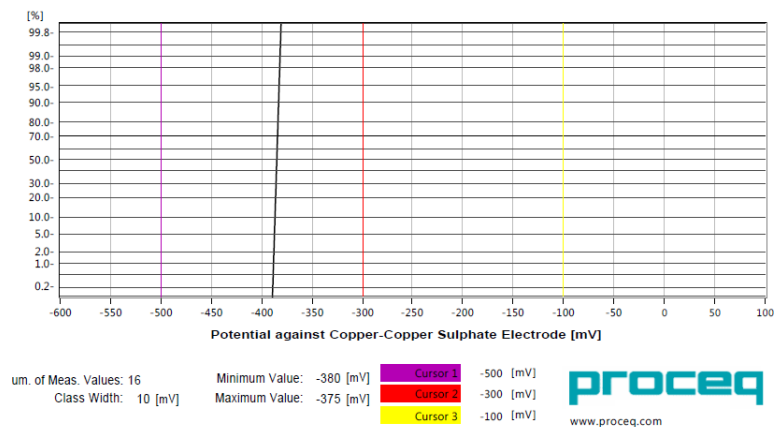
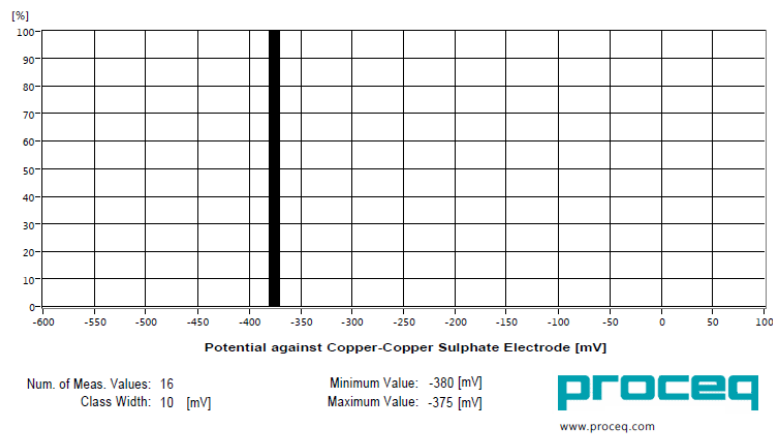
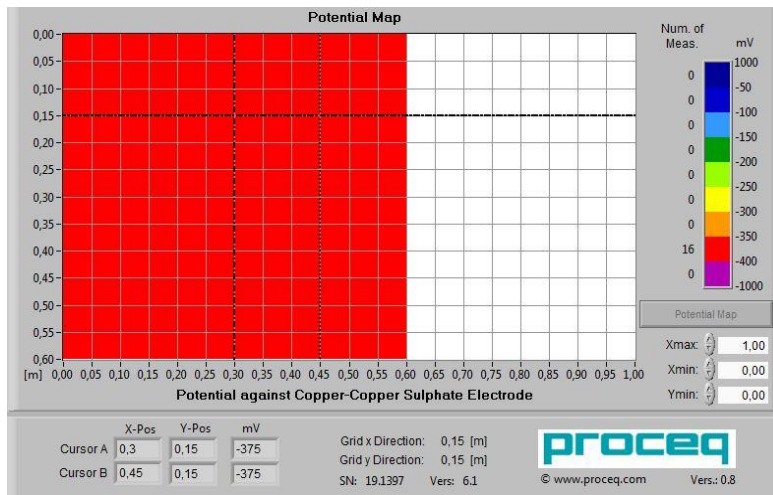


EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE
LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL



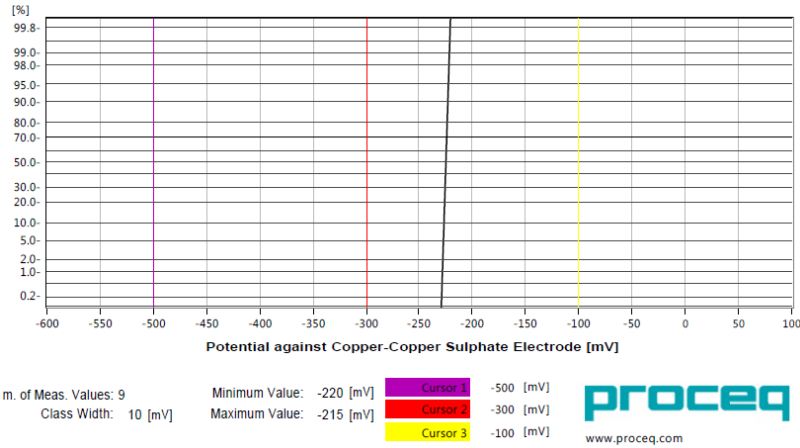
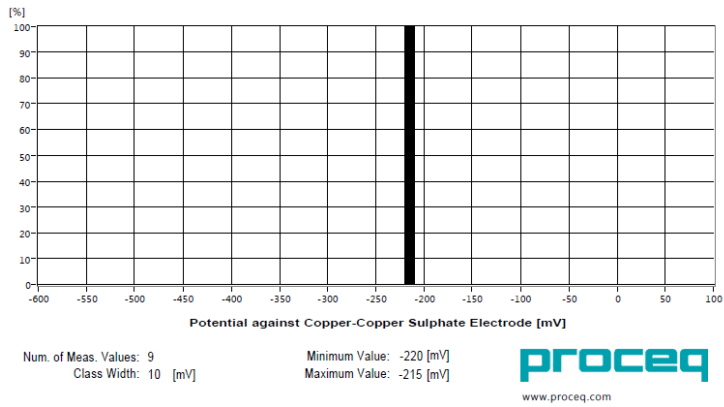
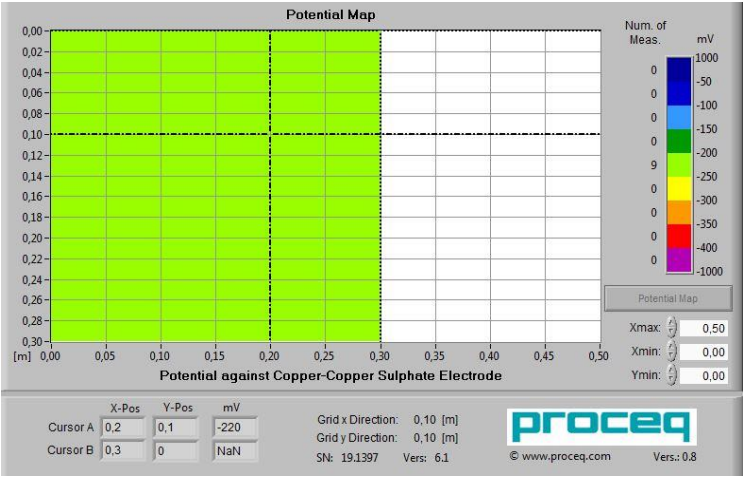


EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

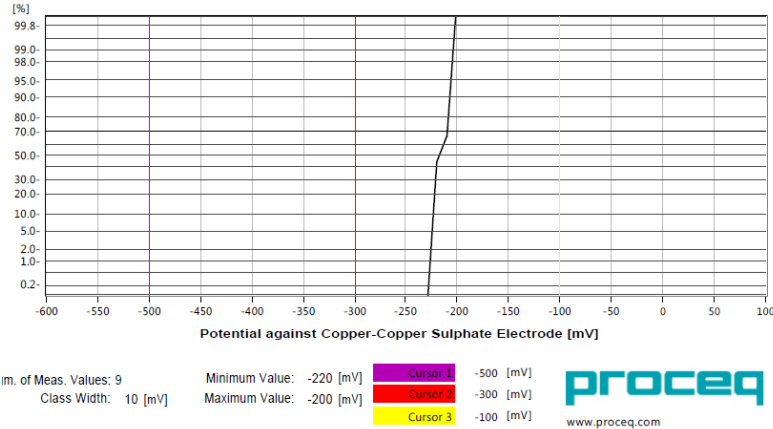
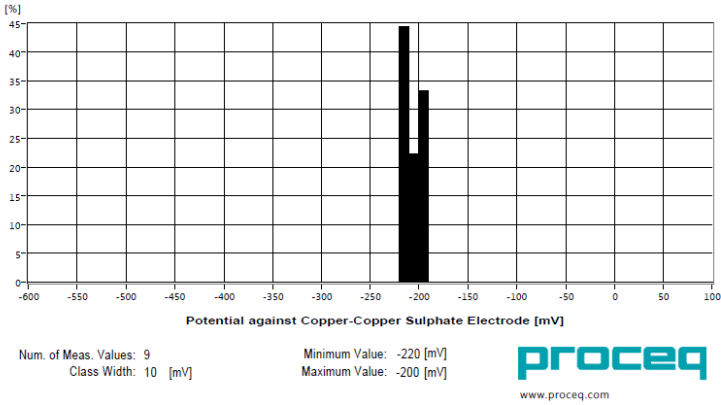
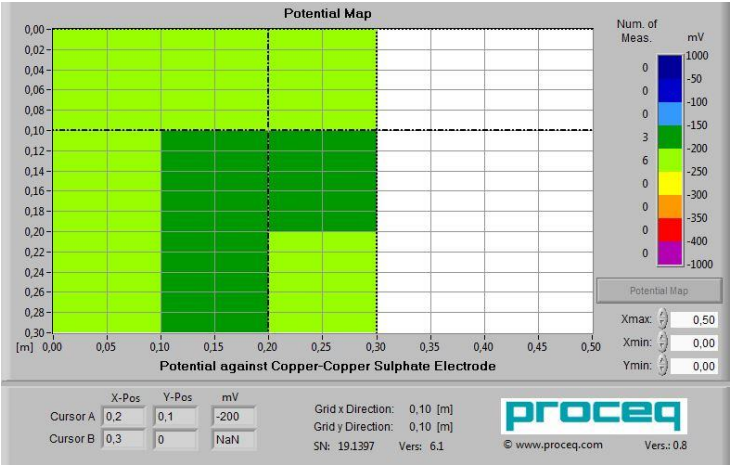


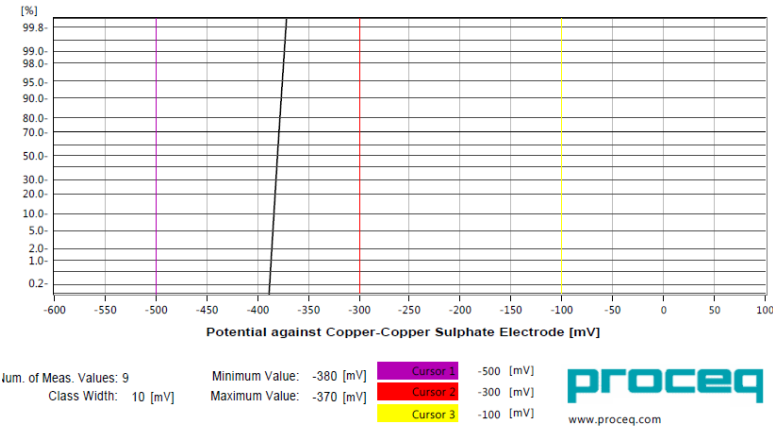
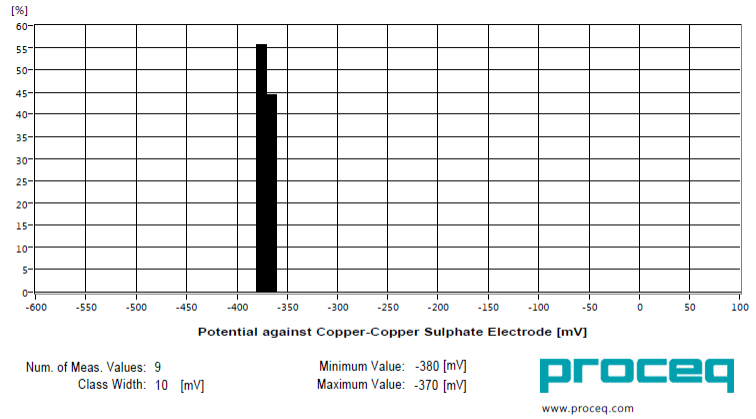
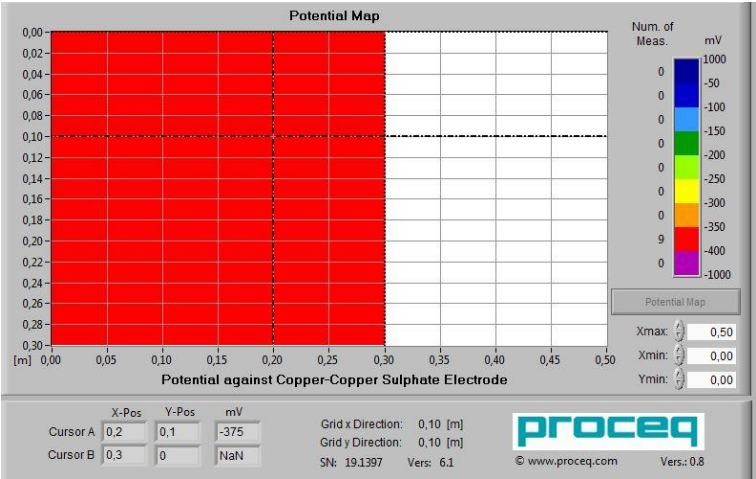
Probeta tipo Marino 1

Ensayo 1:

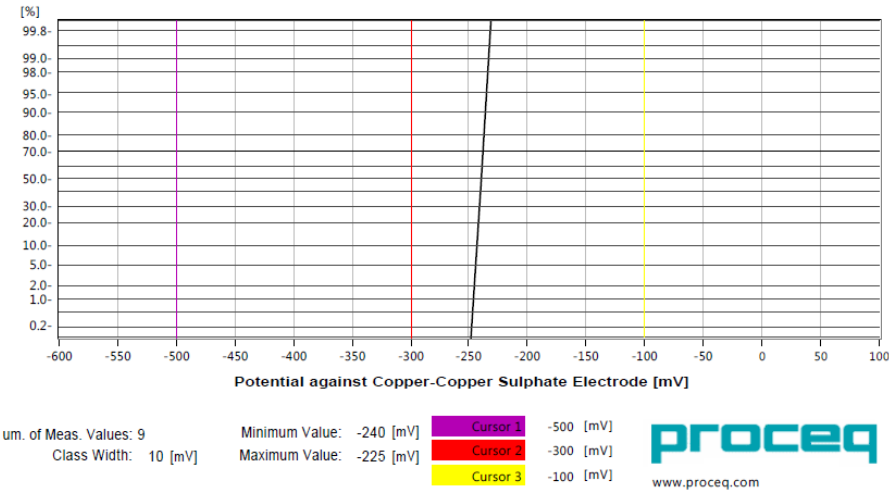
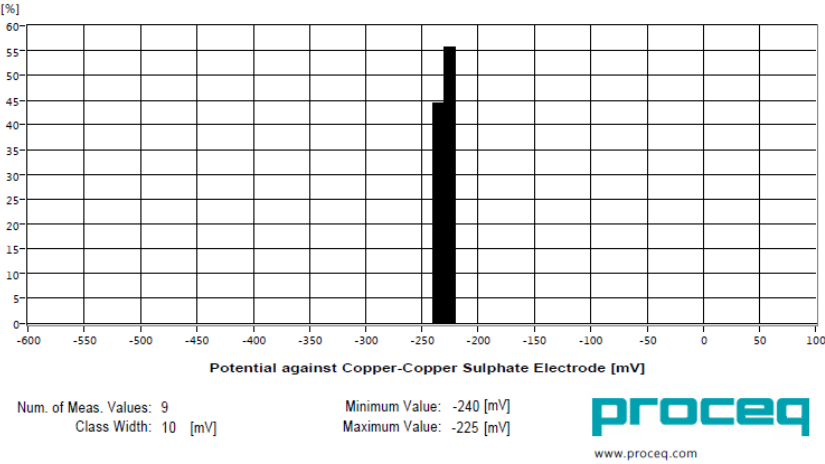
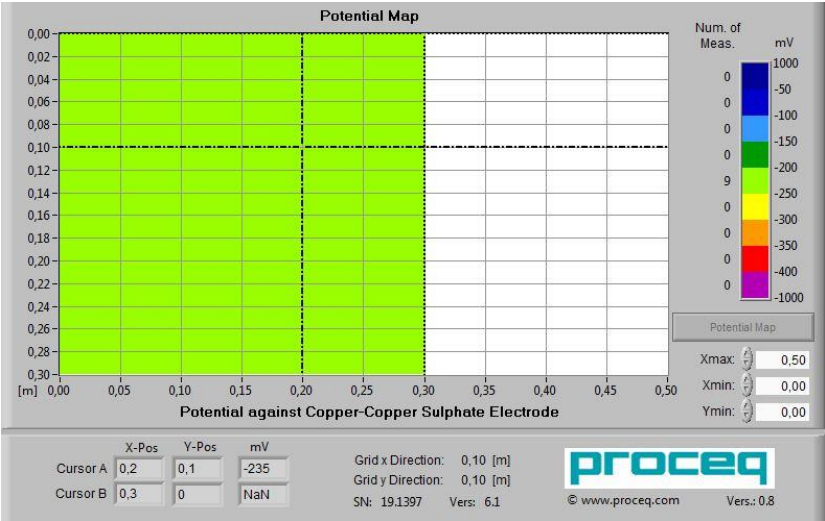


EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE
LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

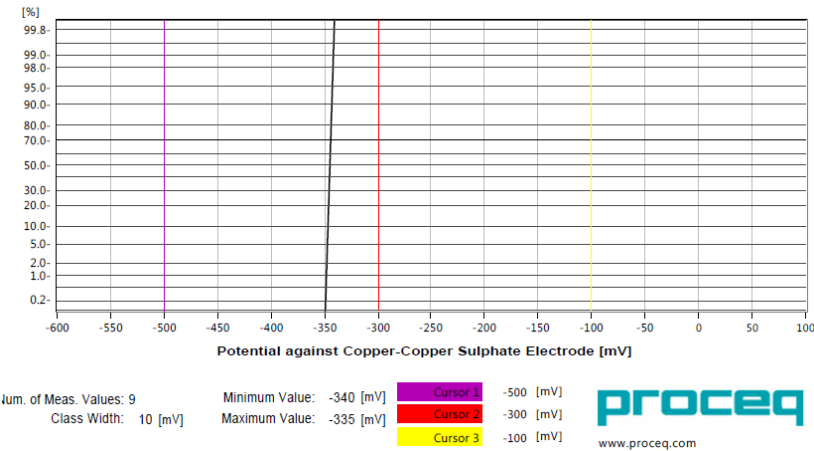
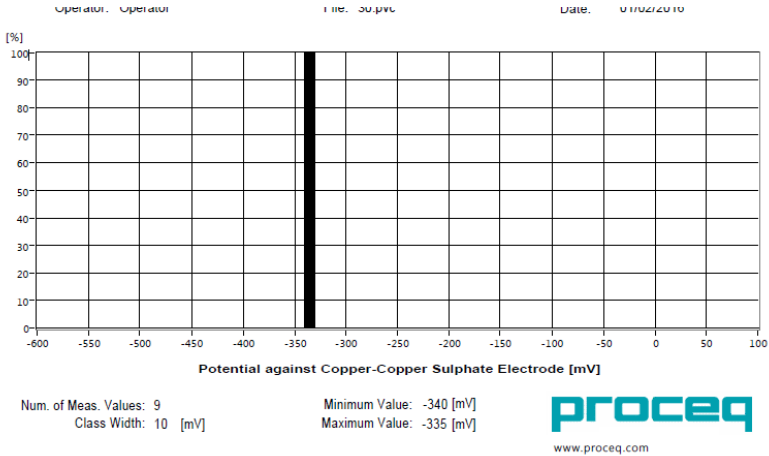
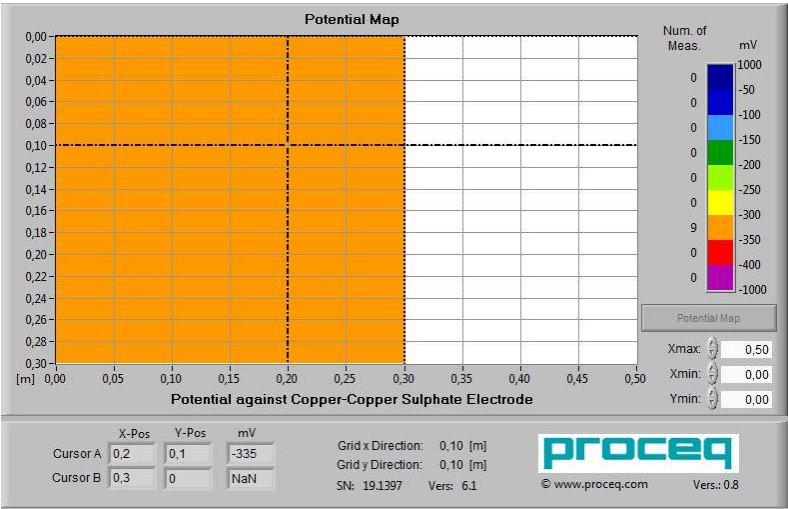


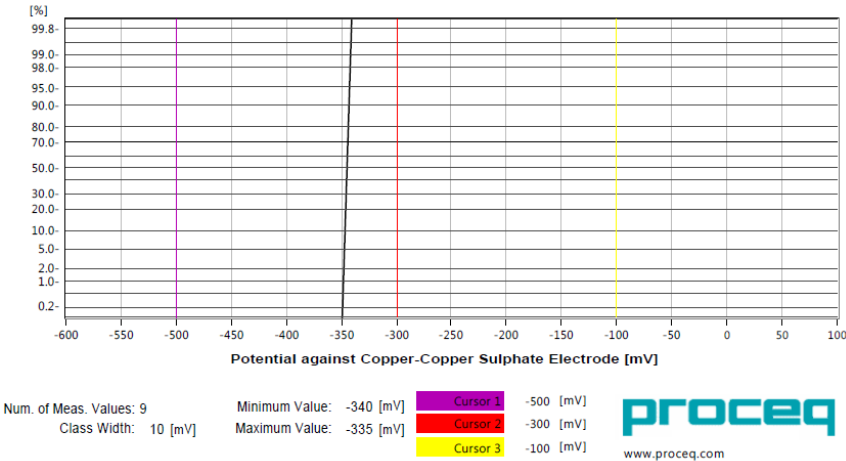
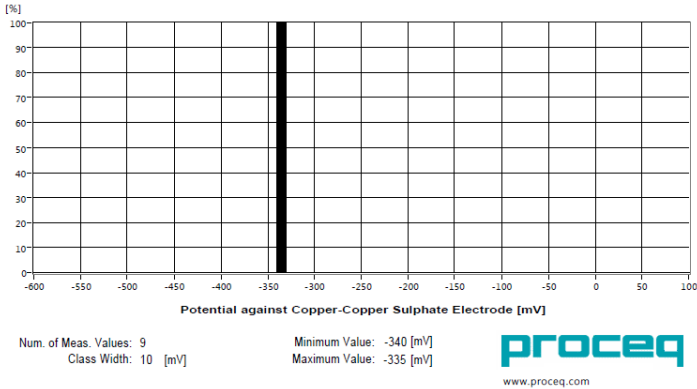
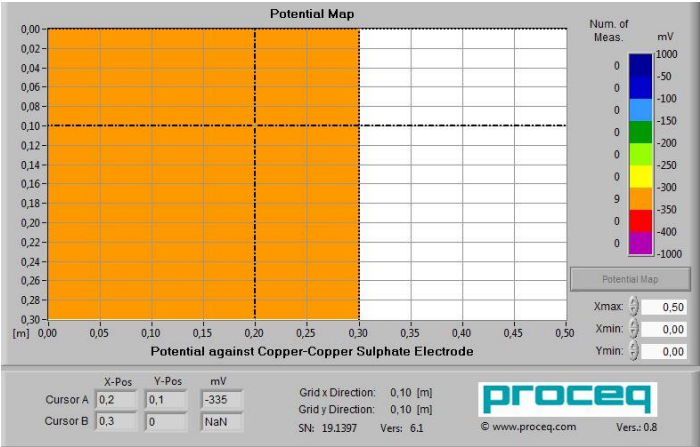


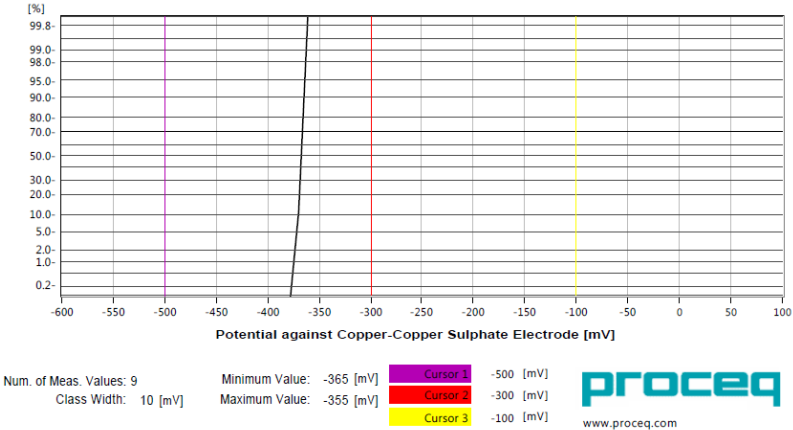
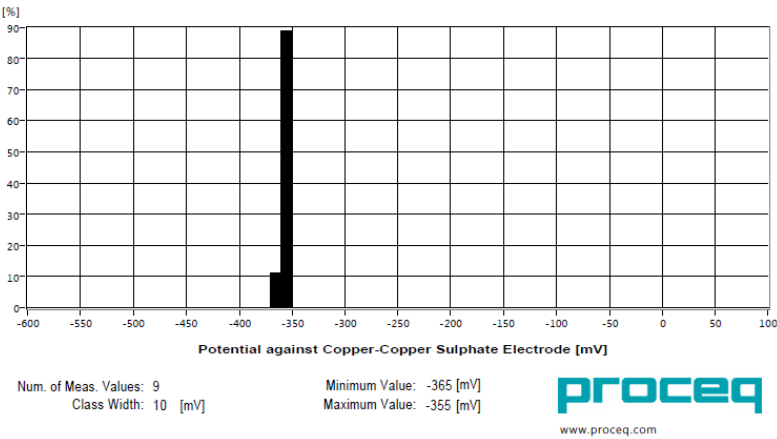
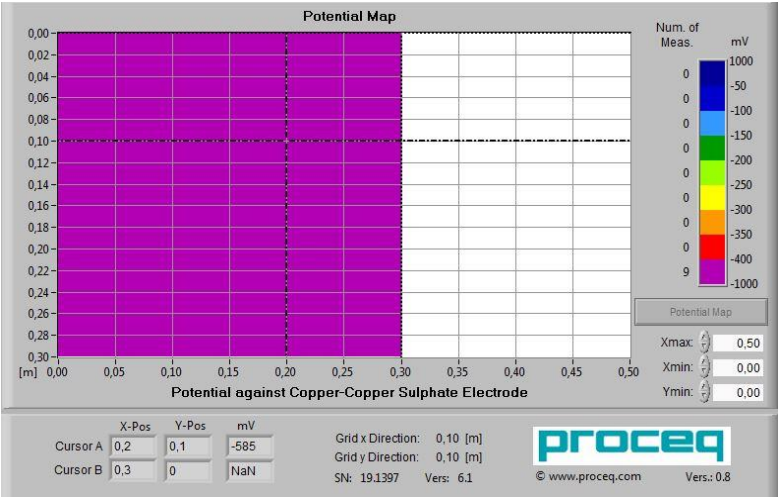
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE
LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

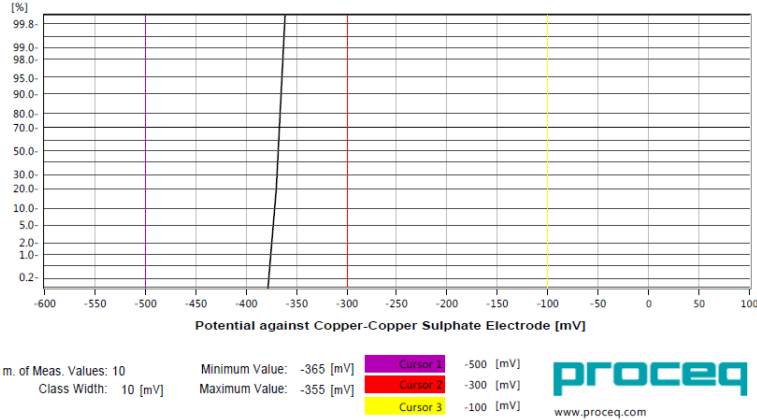
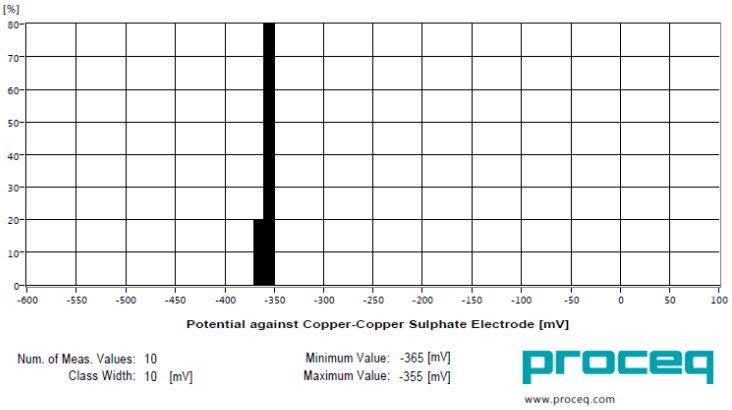
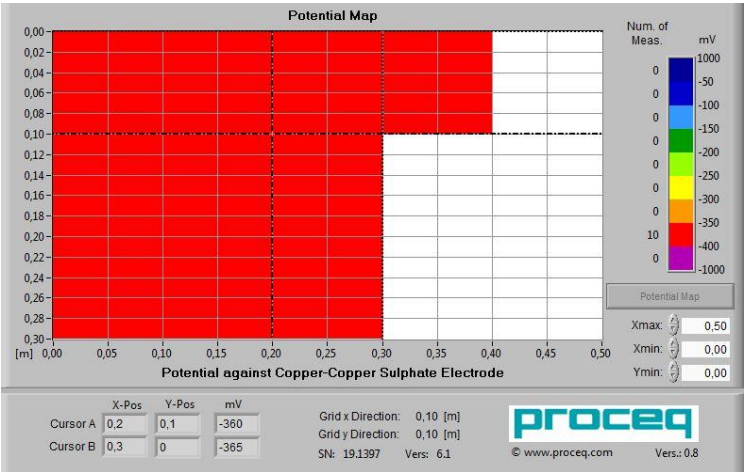


Ensayo 2:

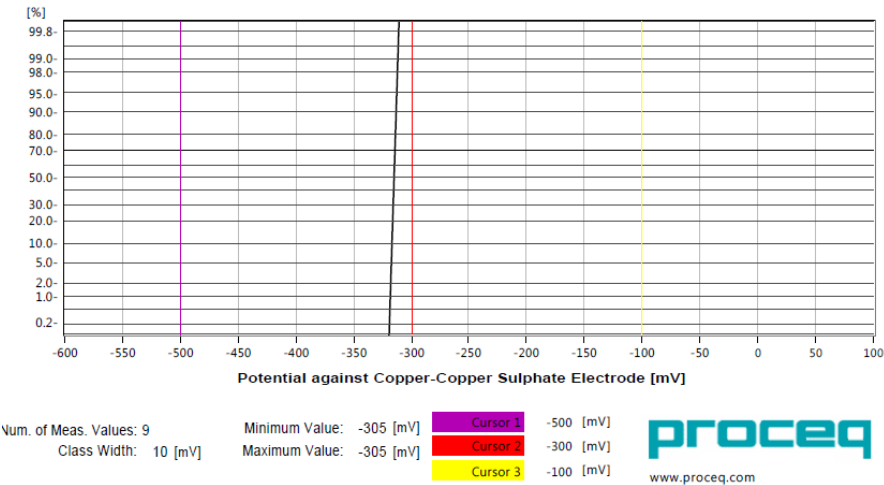
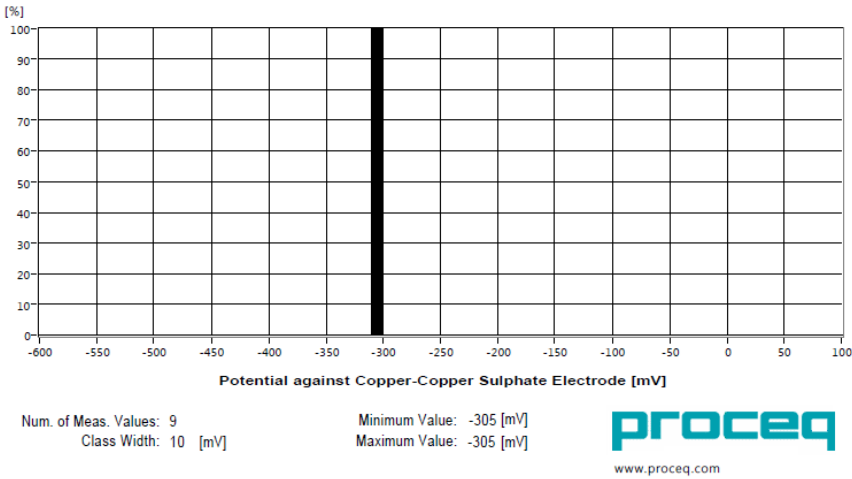
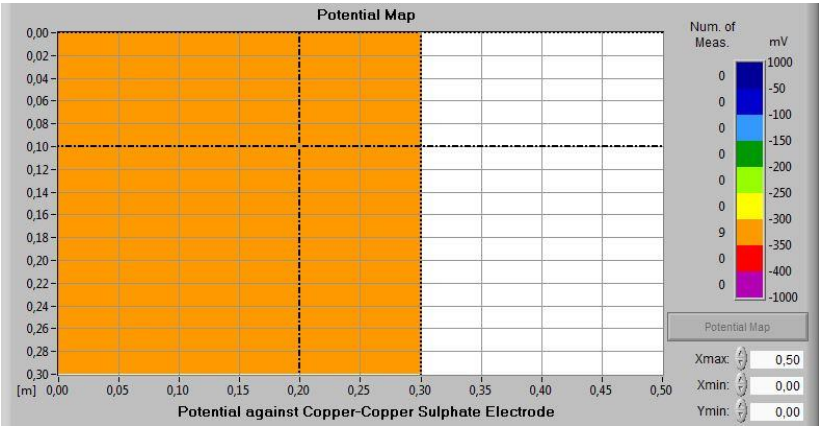


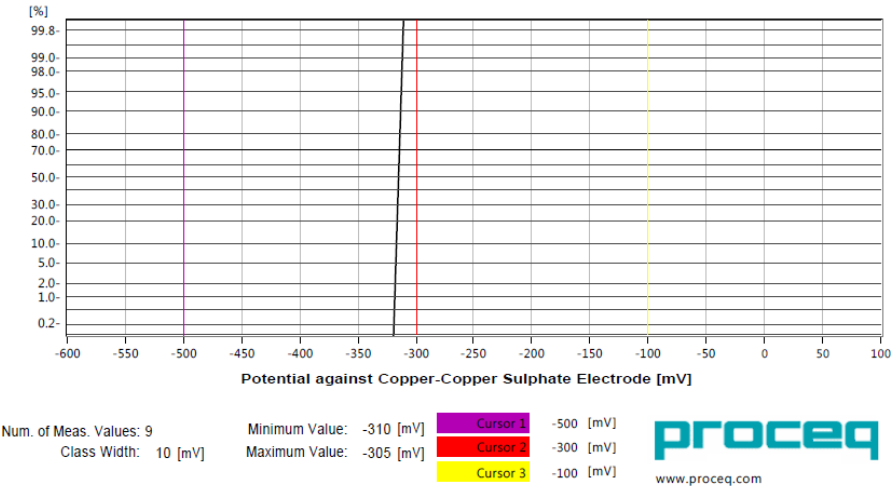
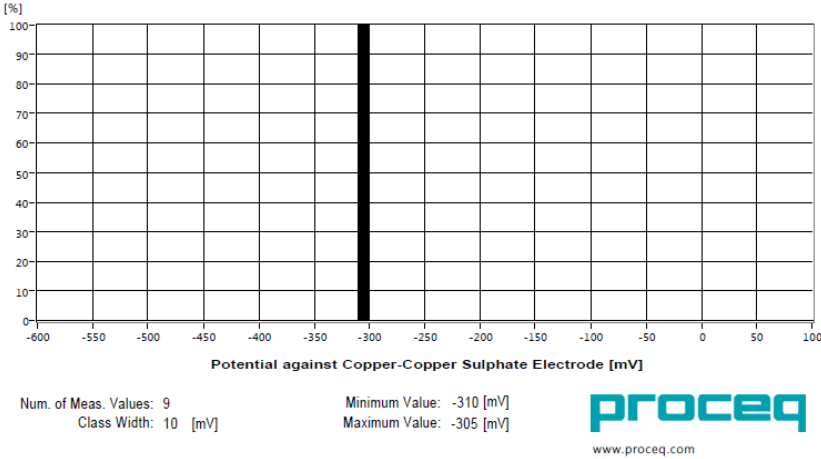
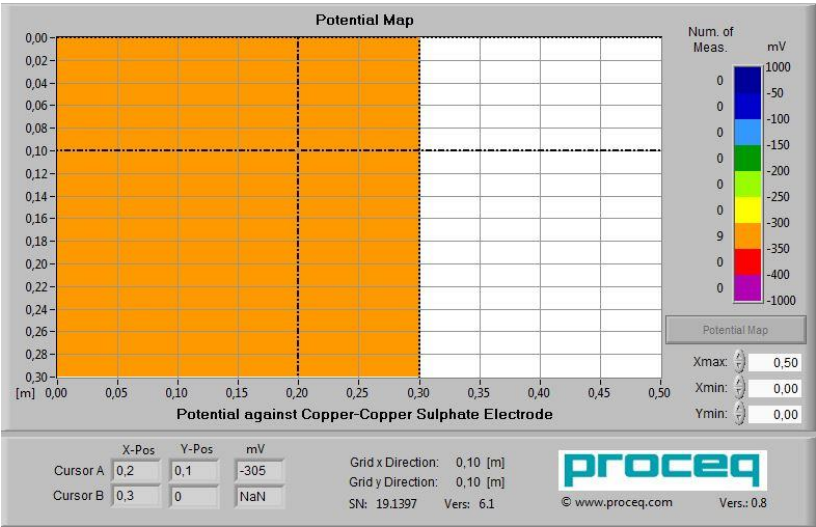


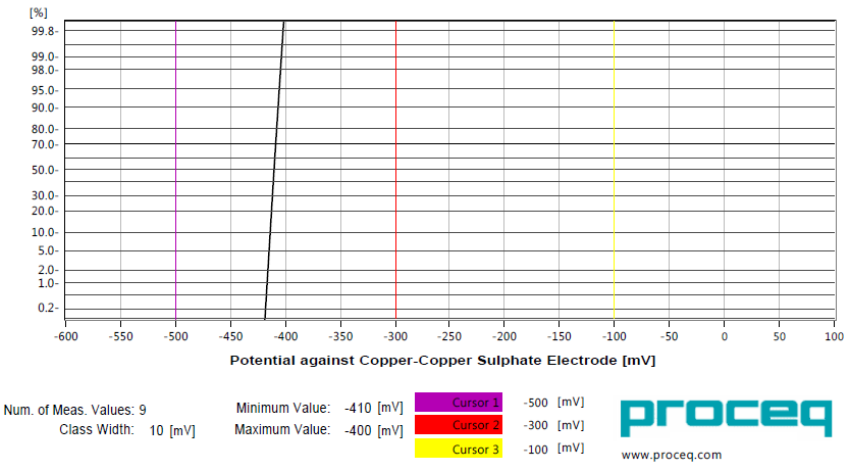
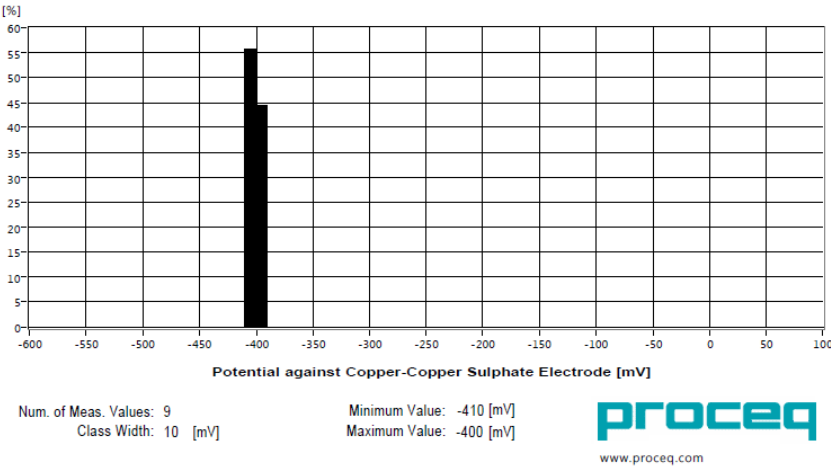
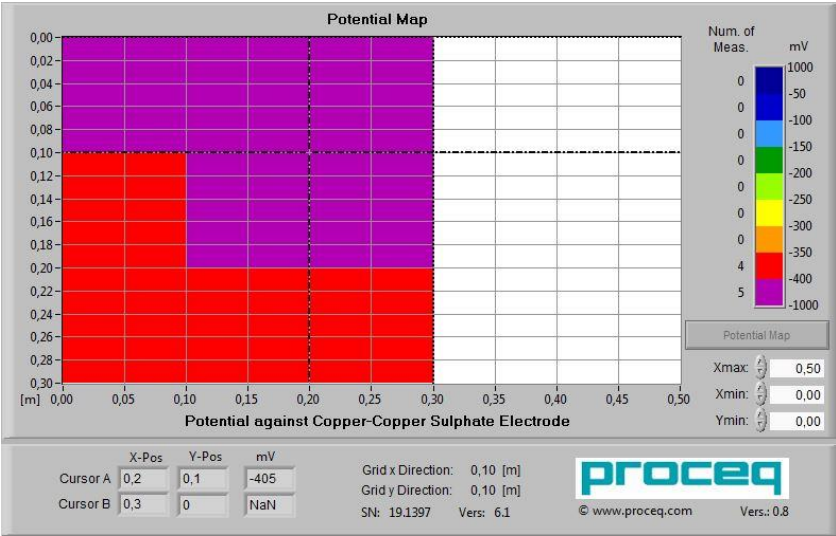




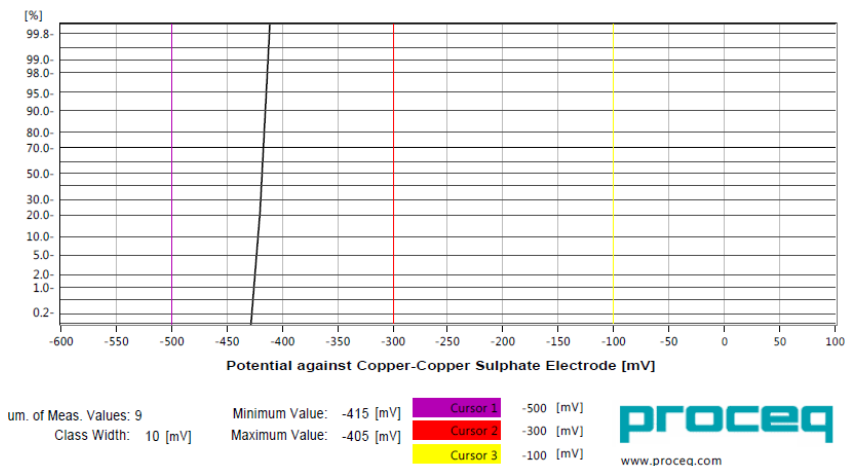
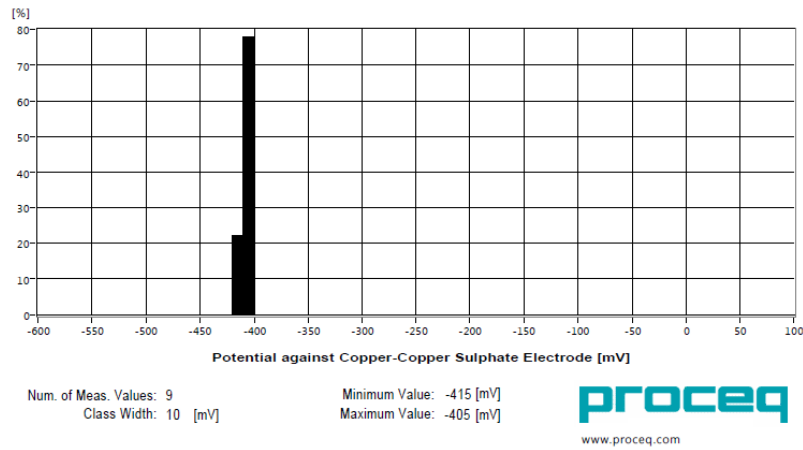
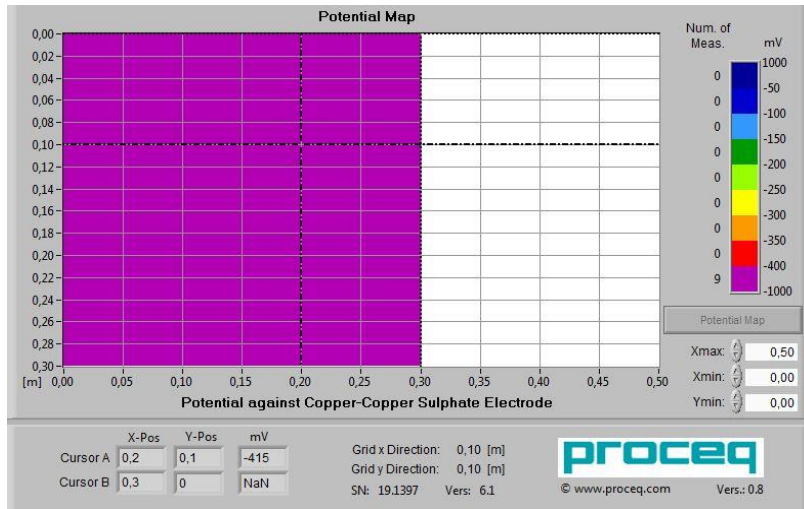
Ensayo 3:



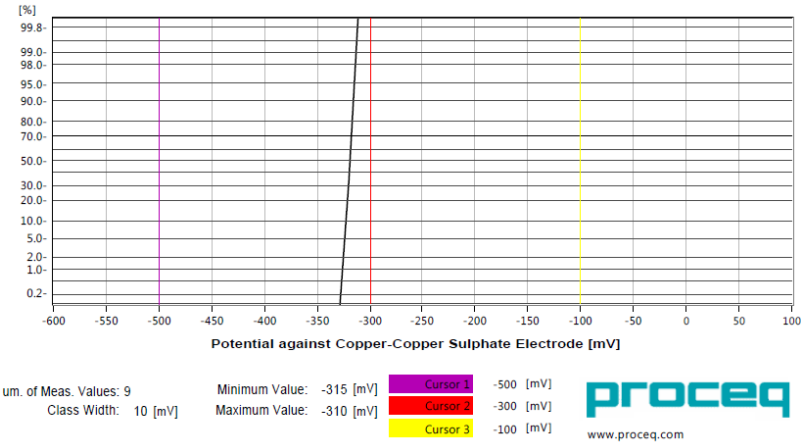
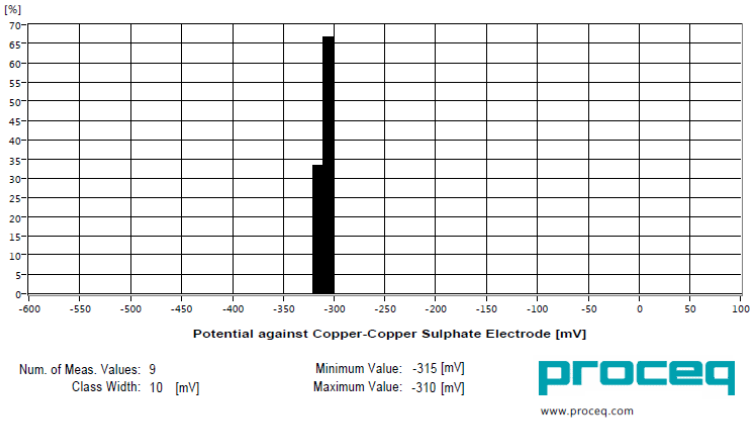
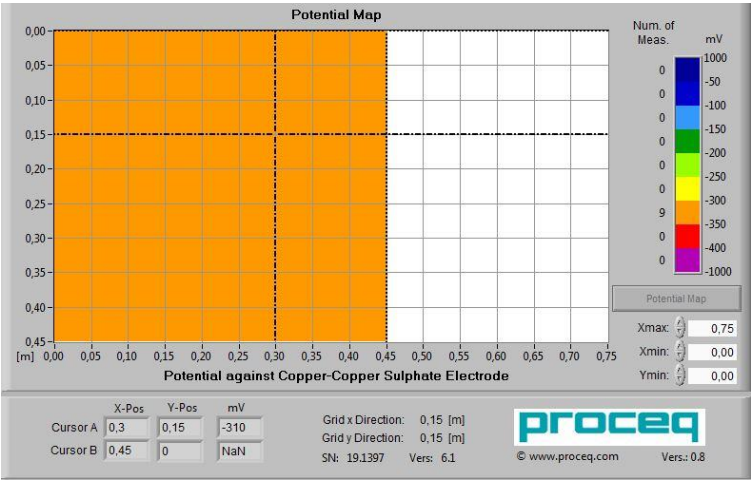


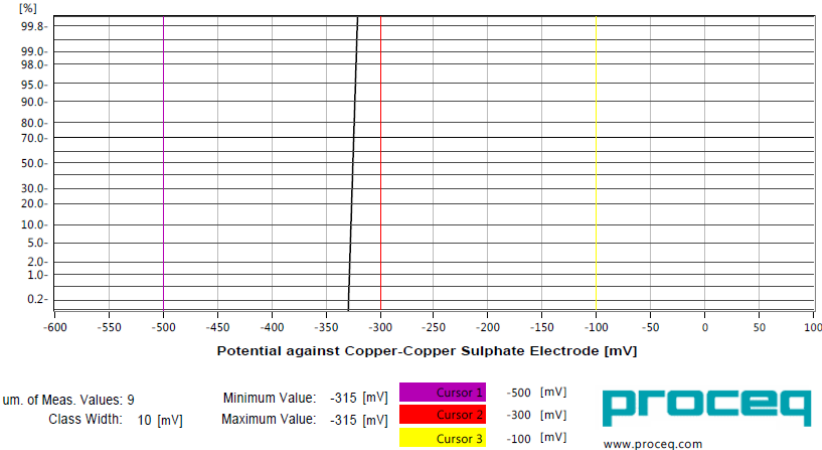
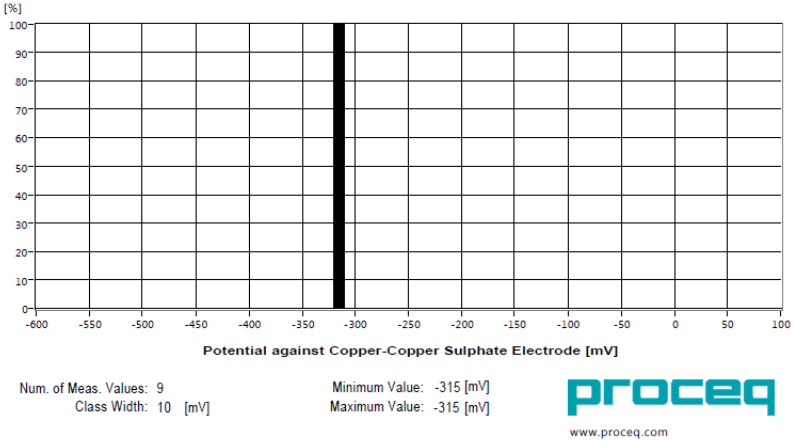
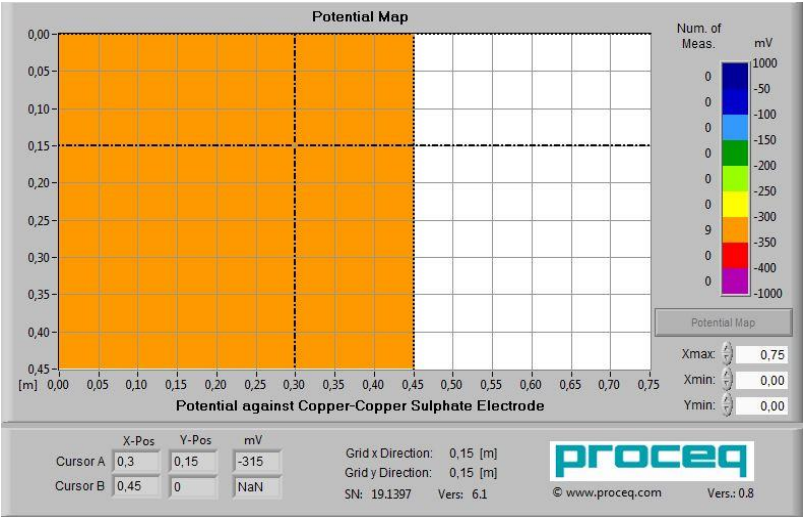


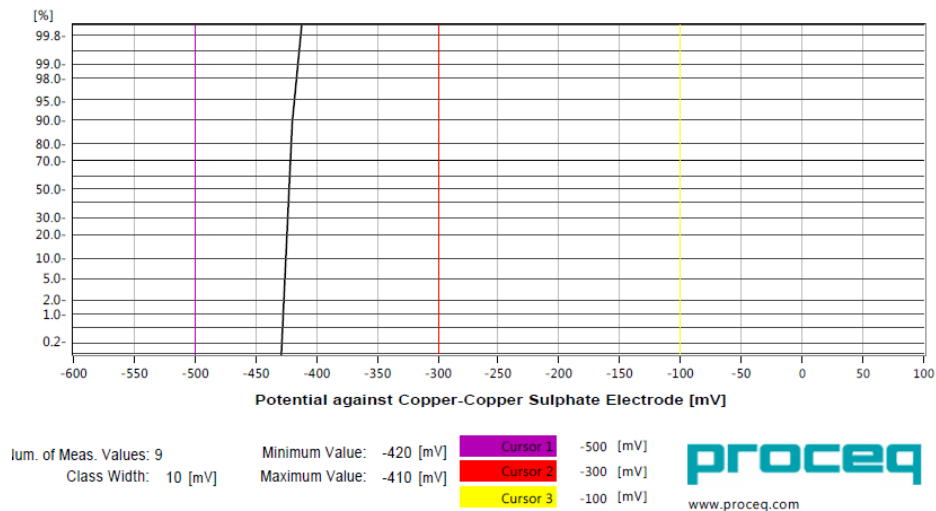
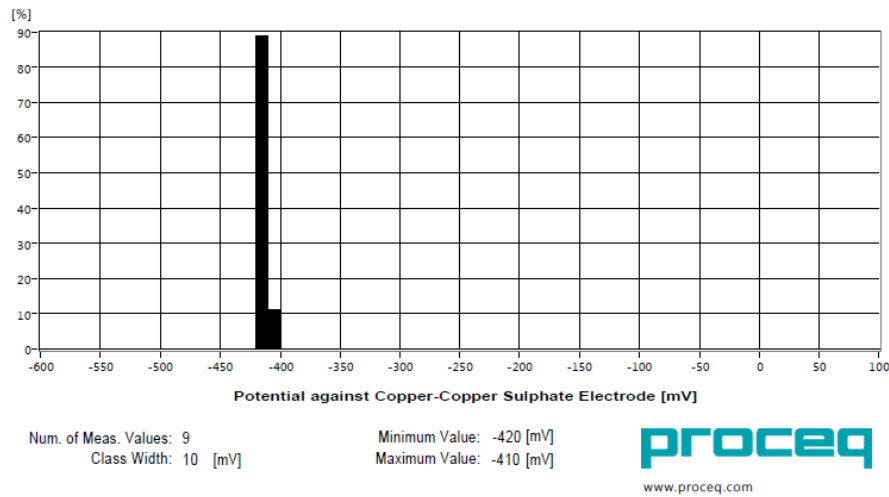
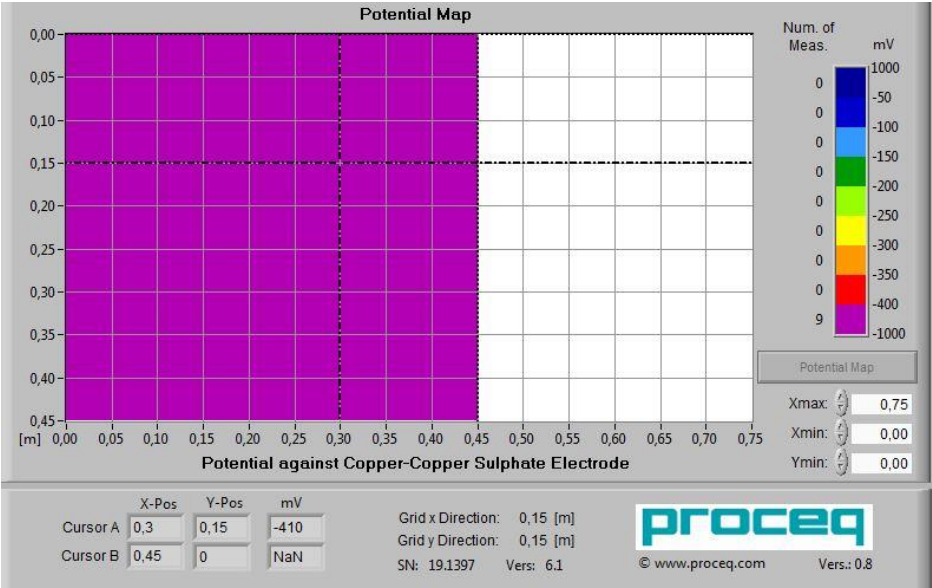
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

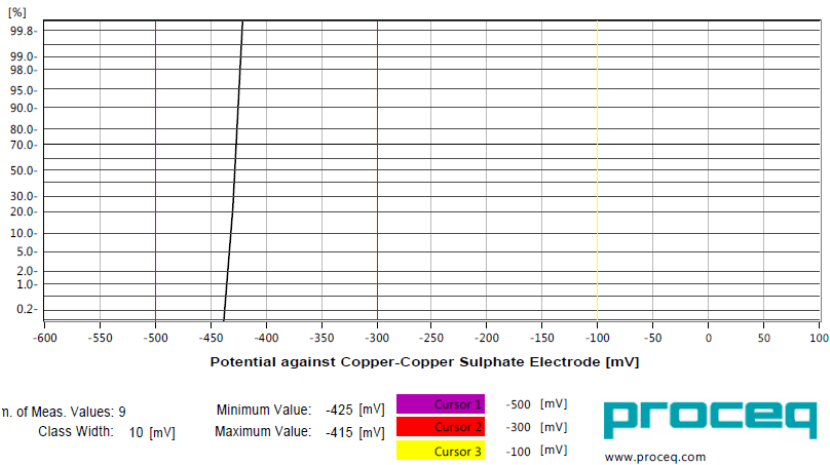
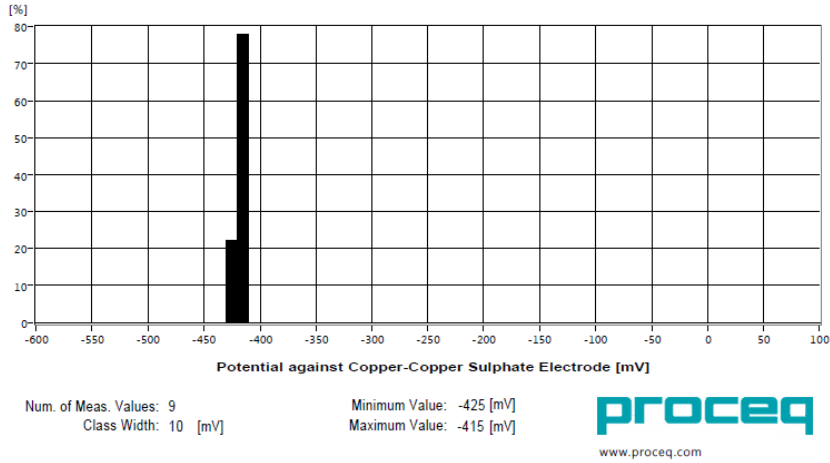
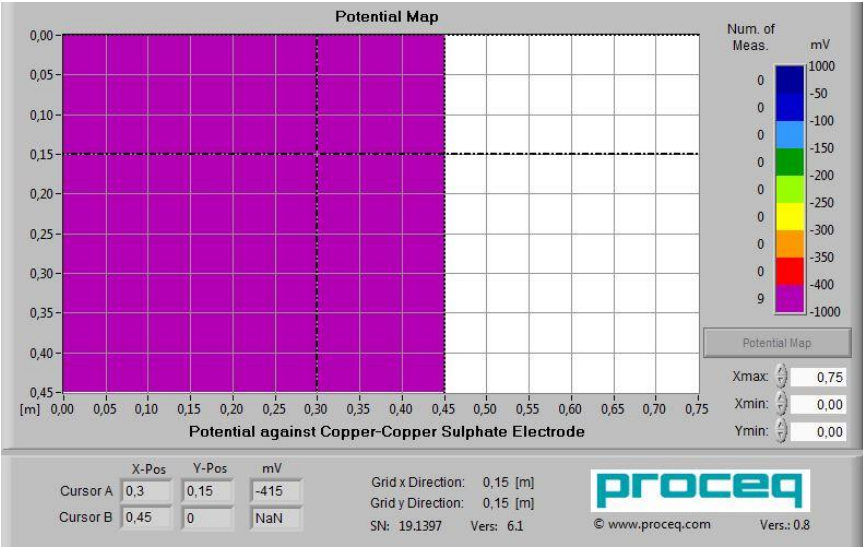


Ensayo 4:

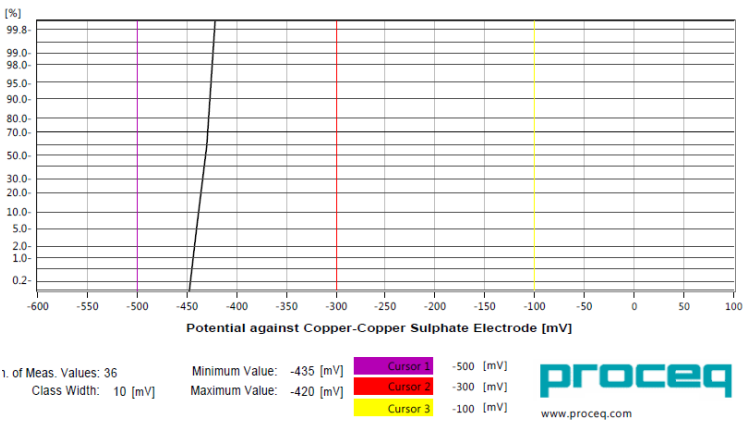
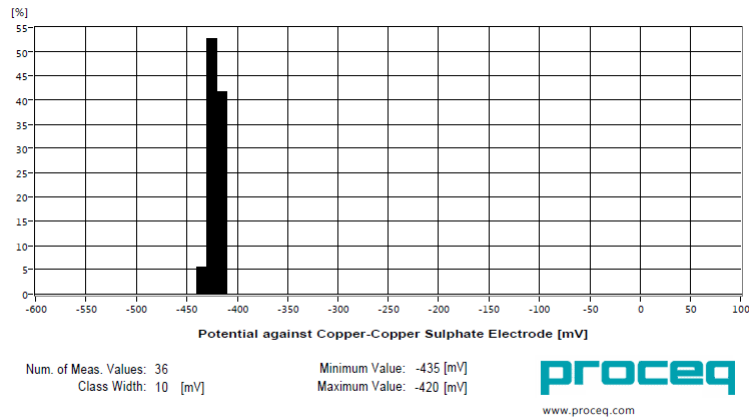
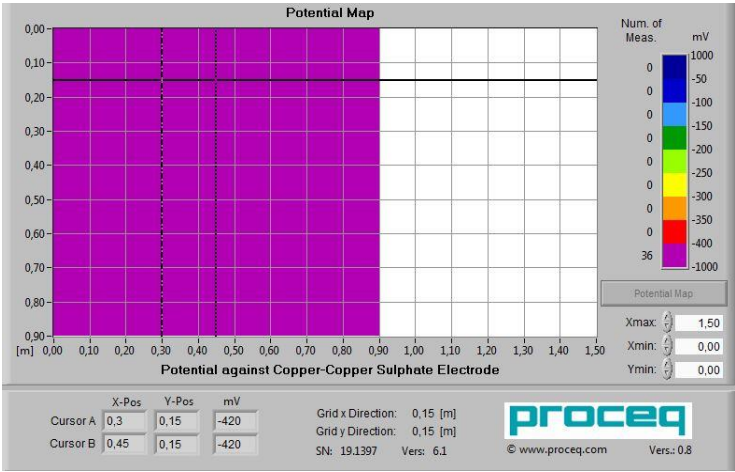




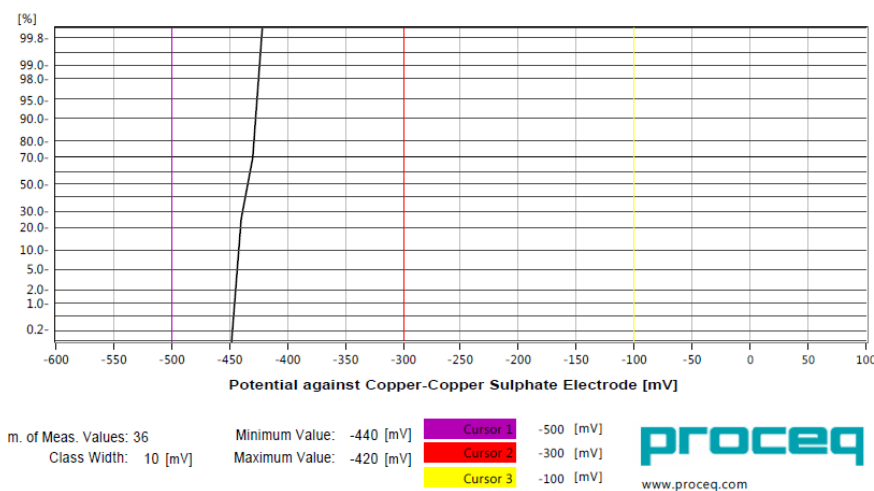
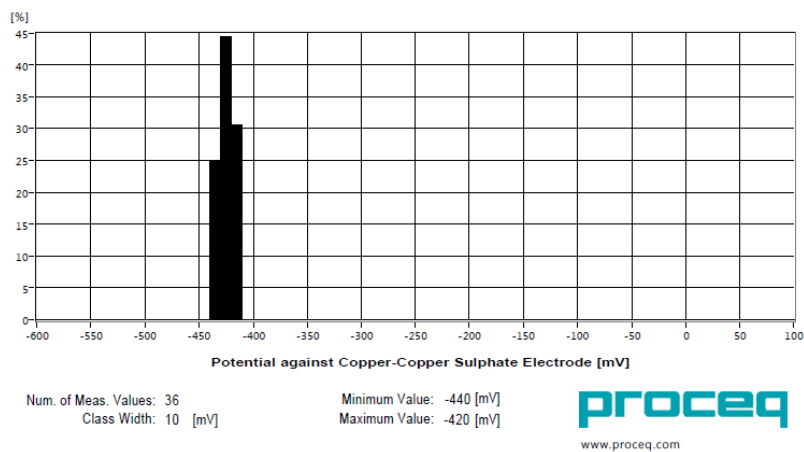
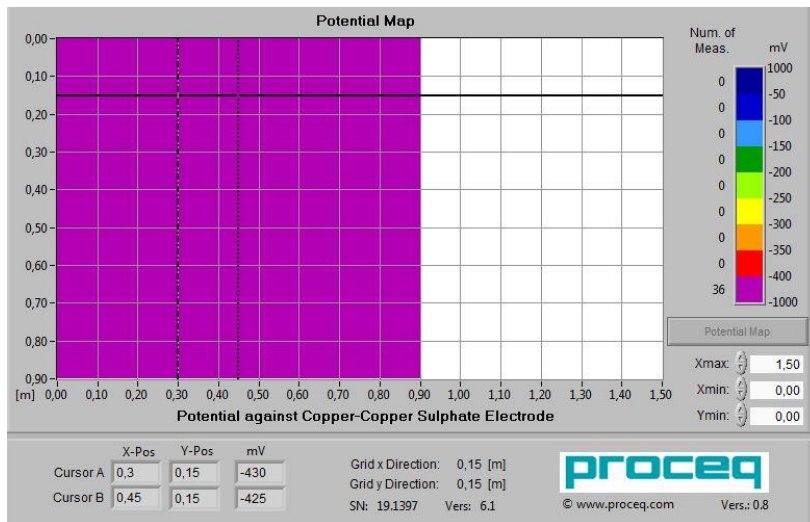


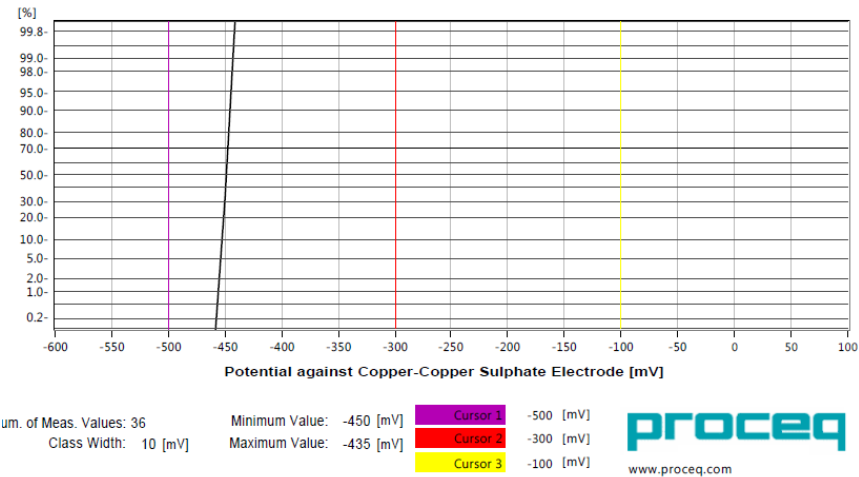
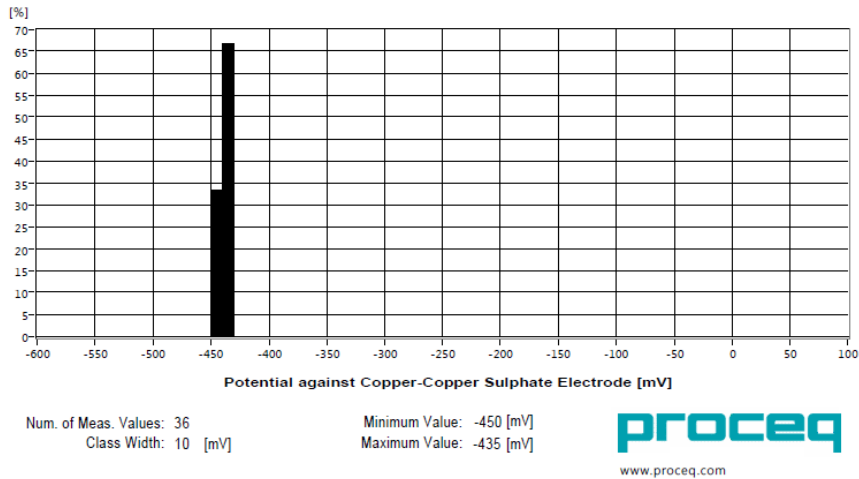
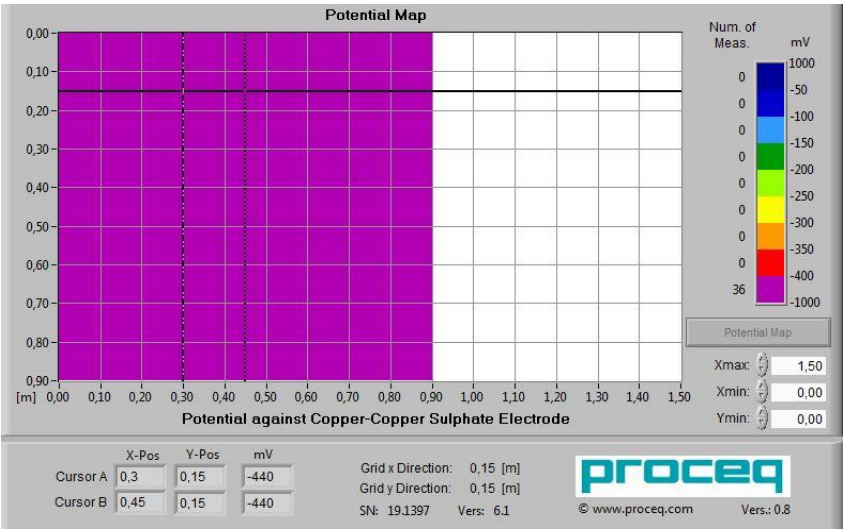


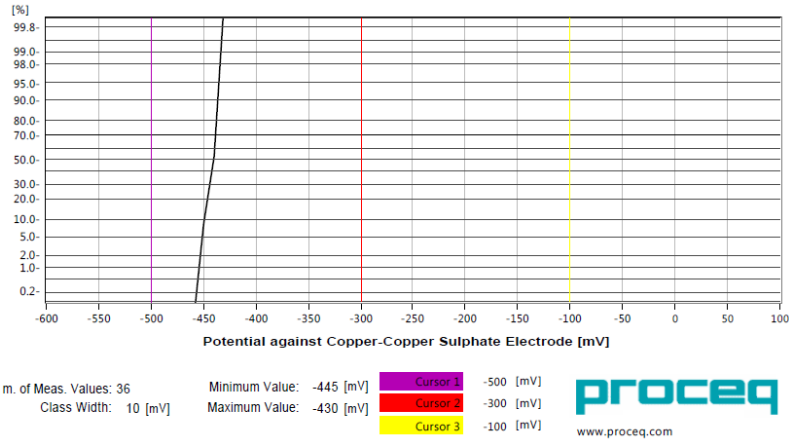
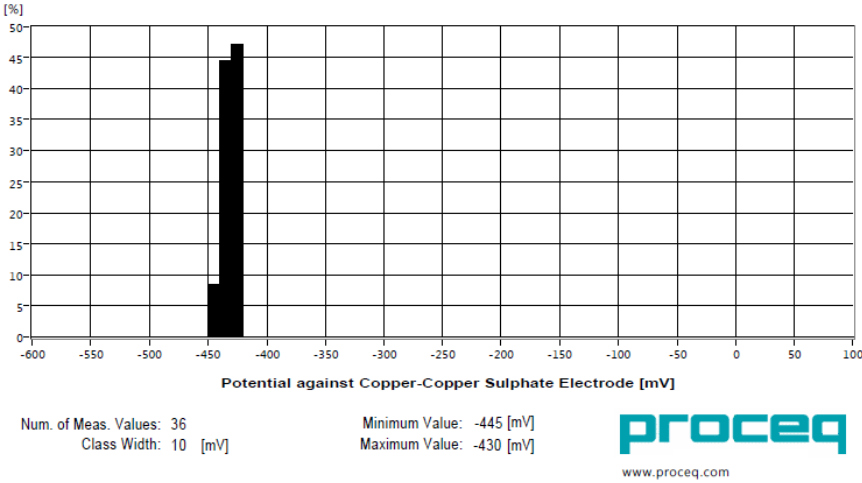
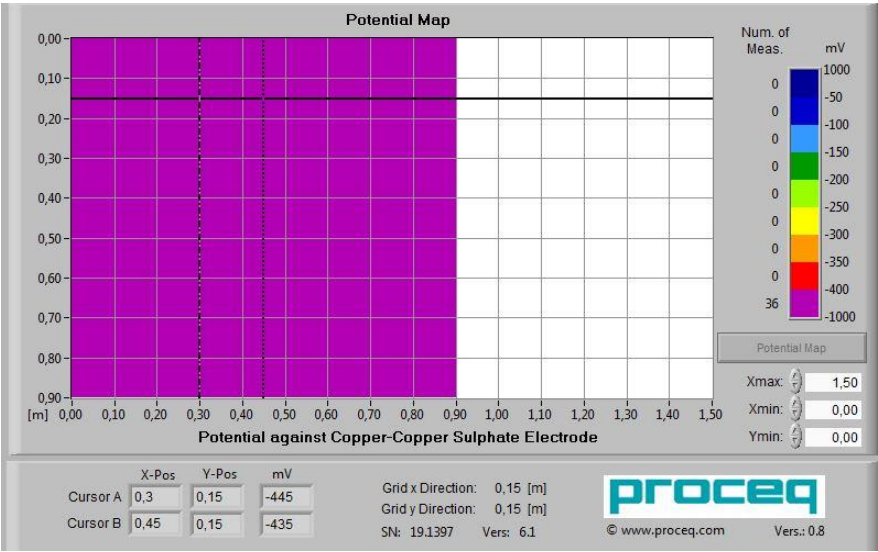
Ensayo 5:



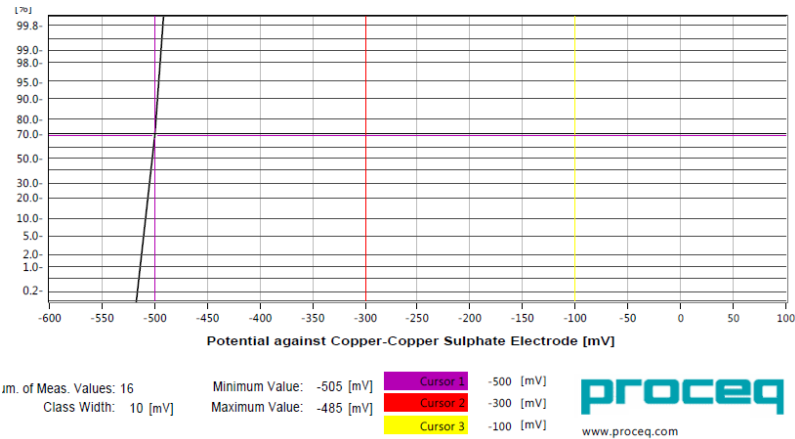
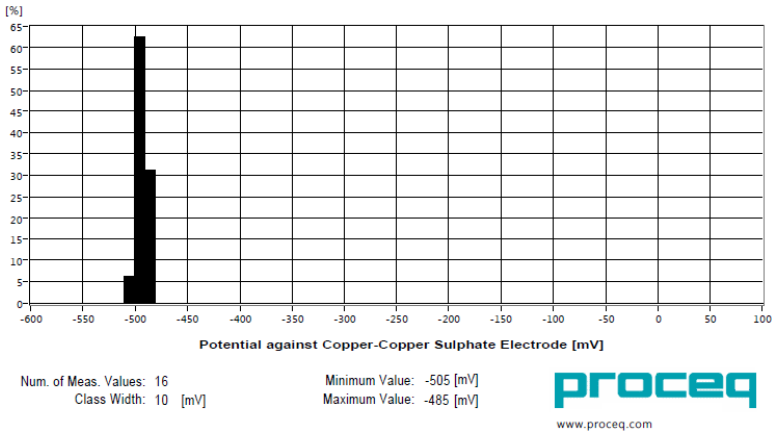
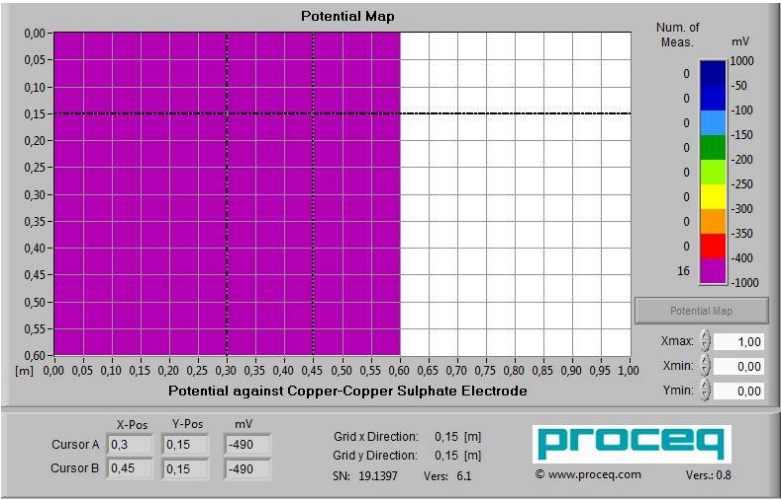
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

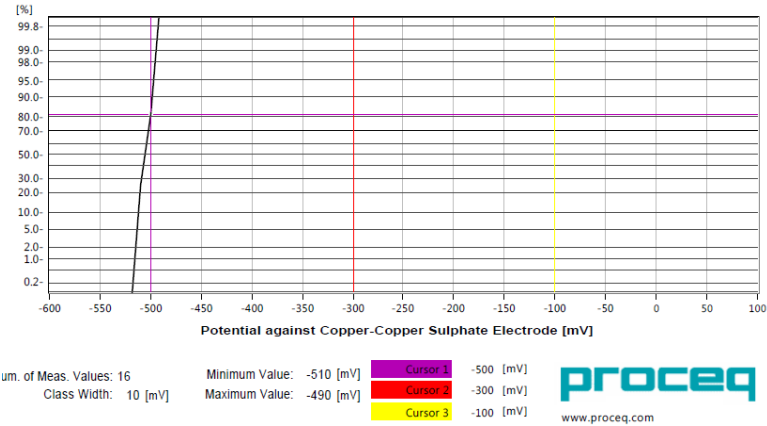
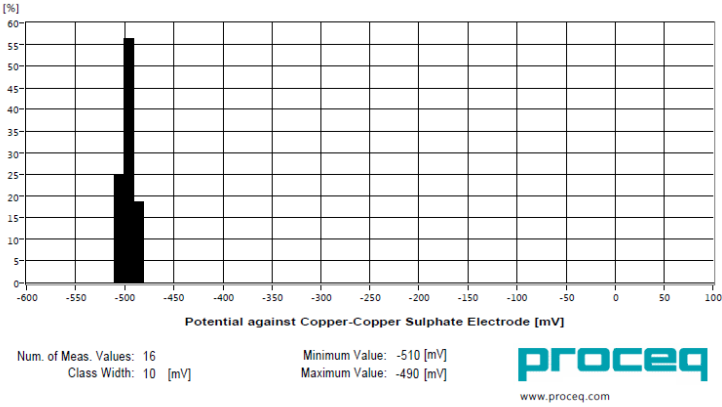
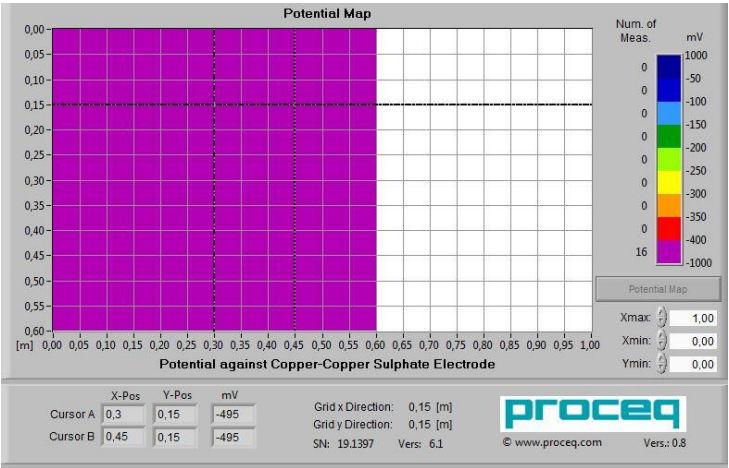


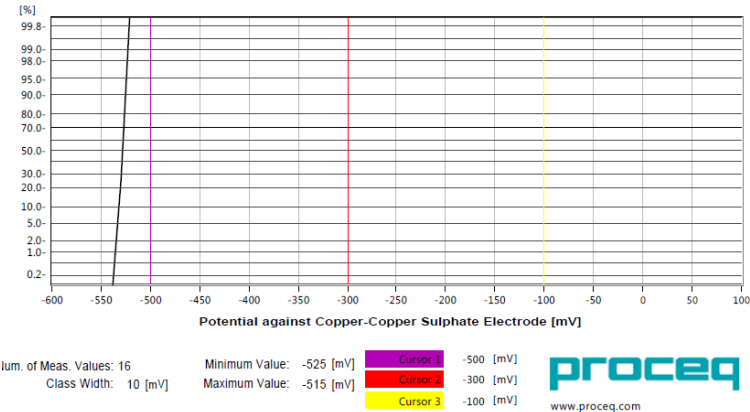
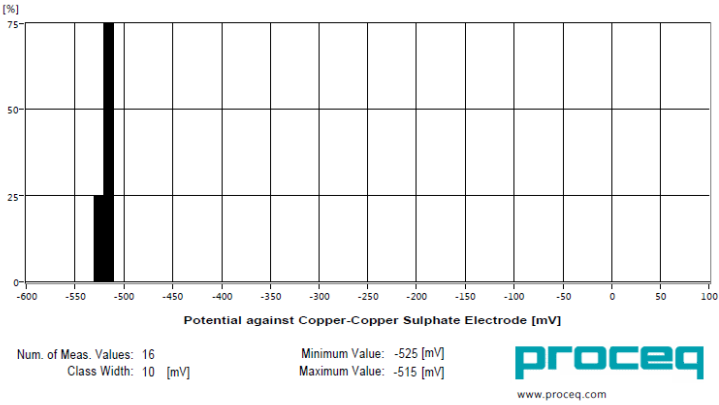
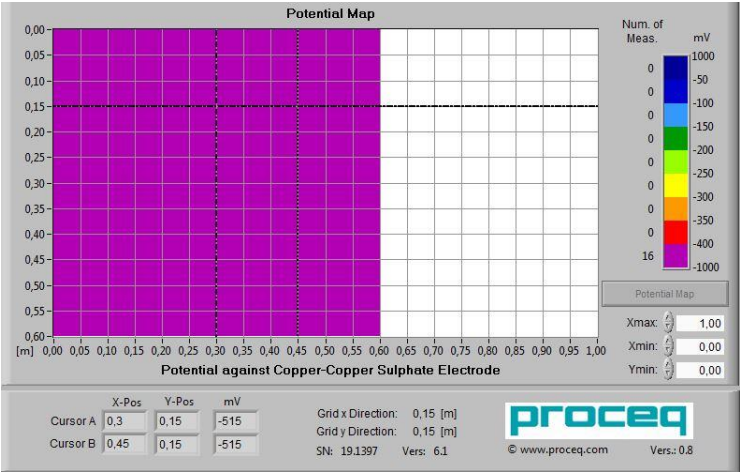




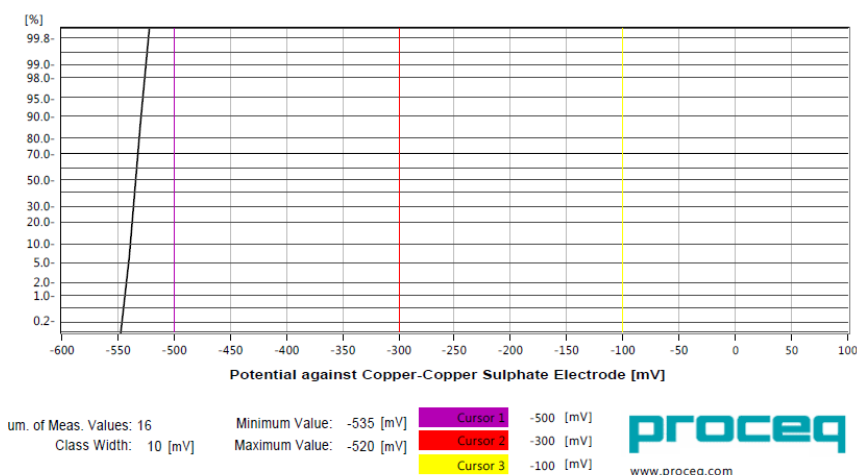
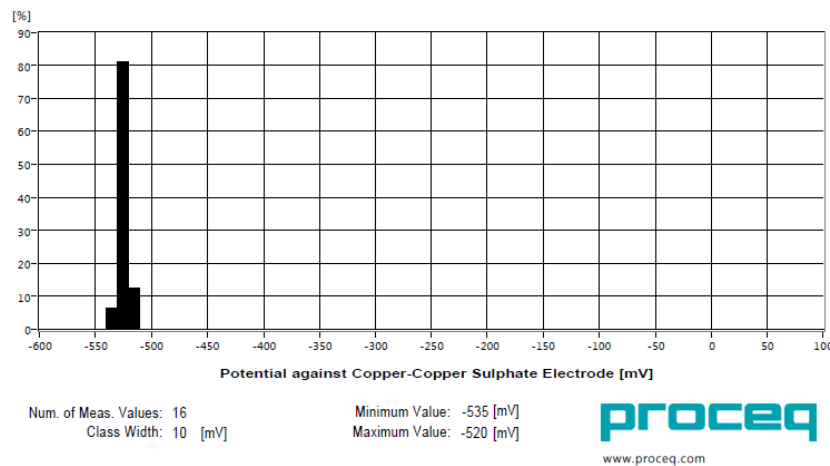
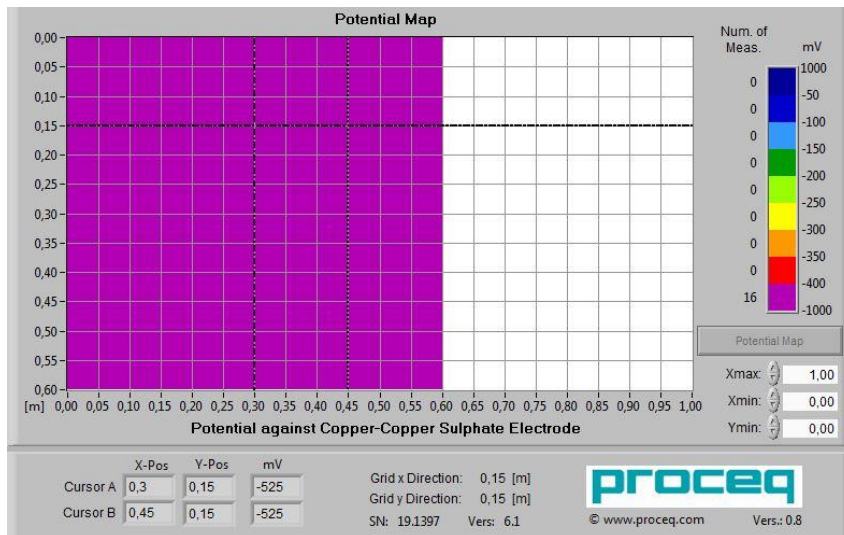
Ensayo 6:





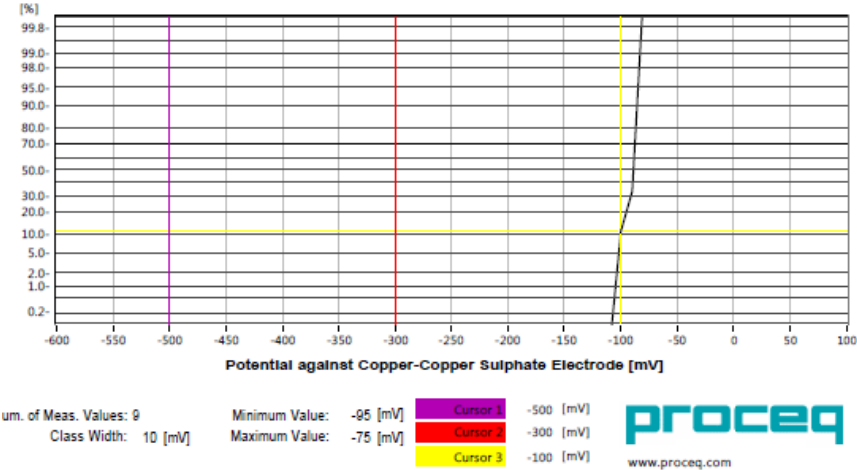
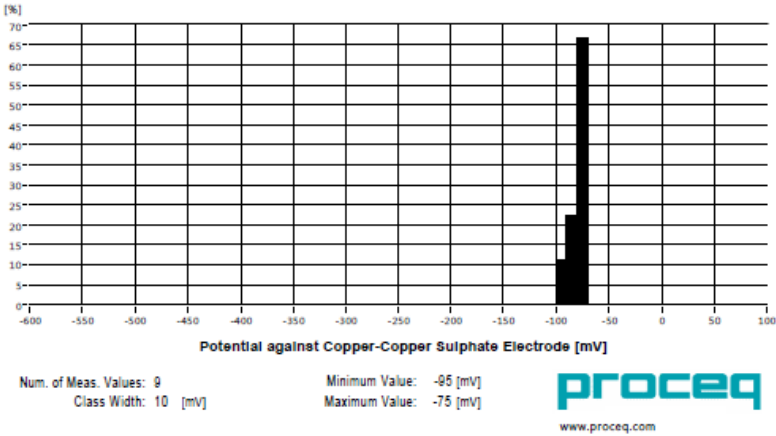
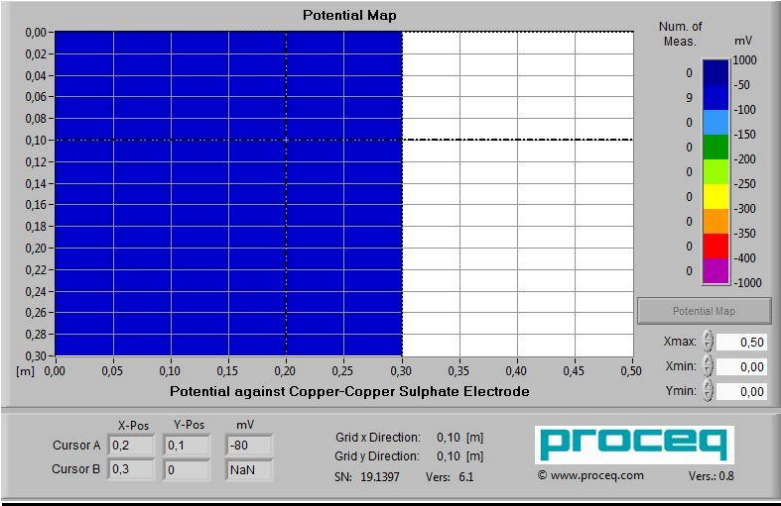


EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

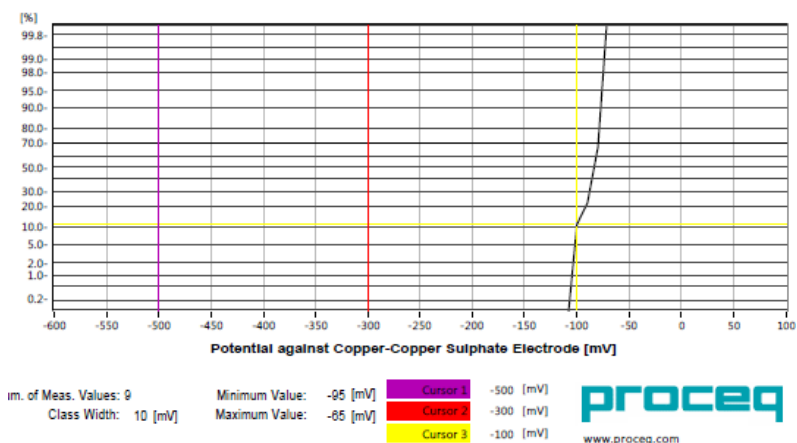
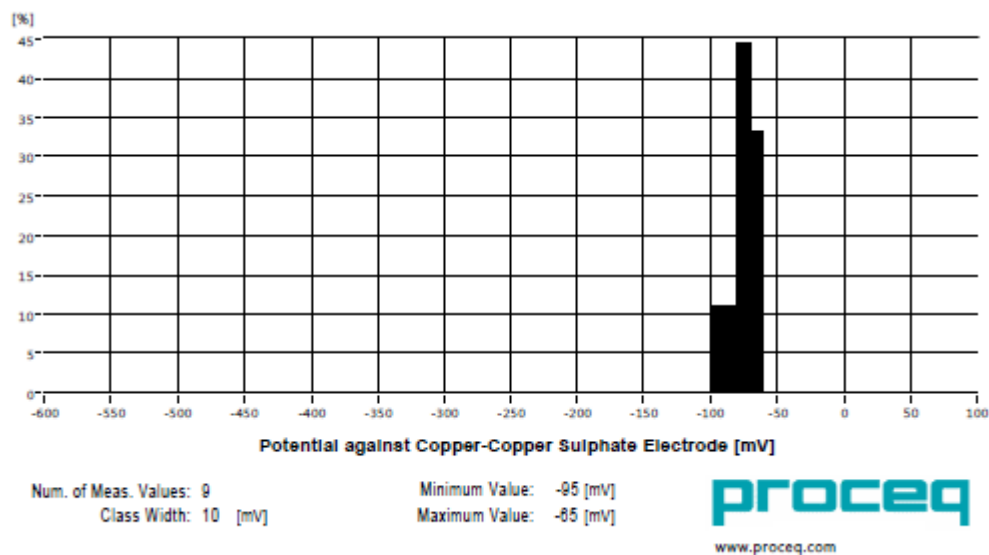
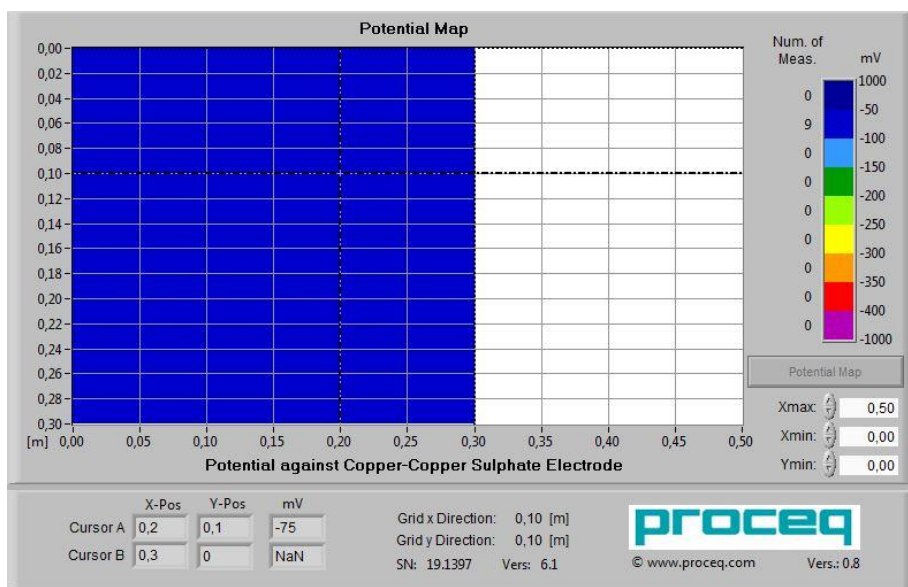


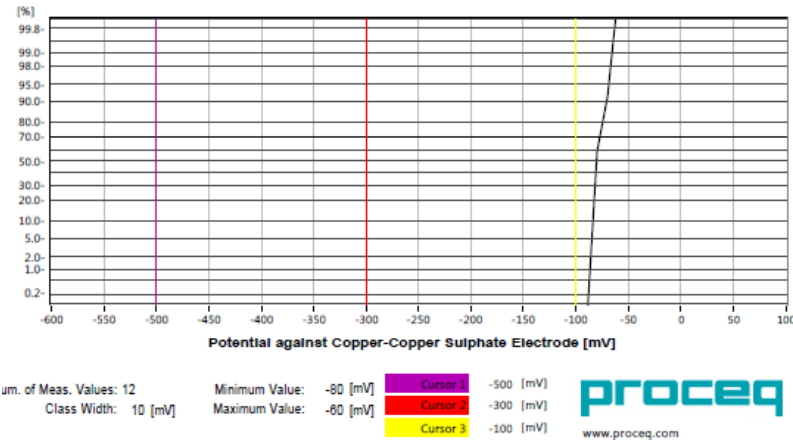
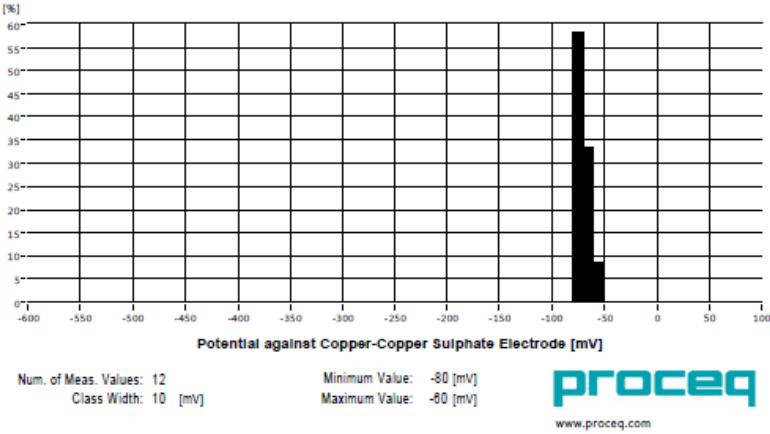
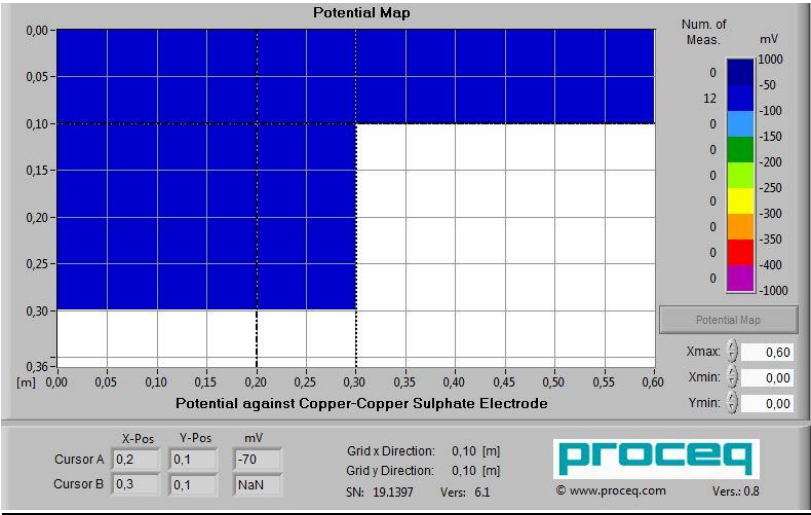
Probeta tipo Marino 2

Ensayo 1

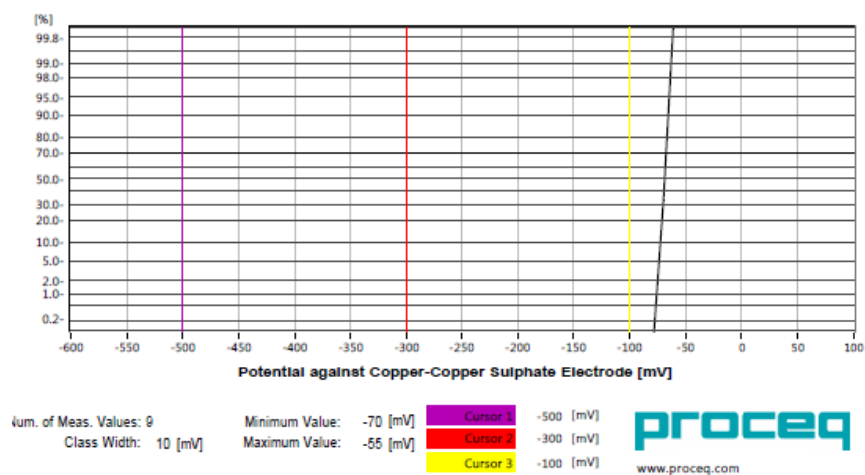
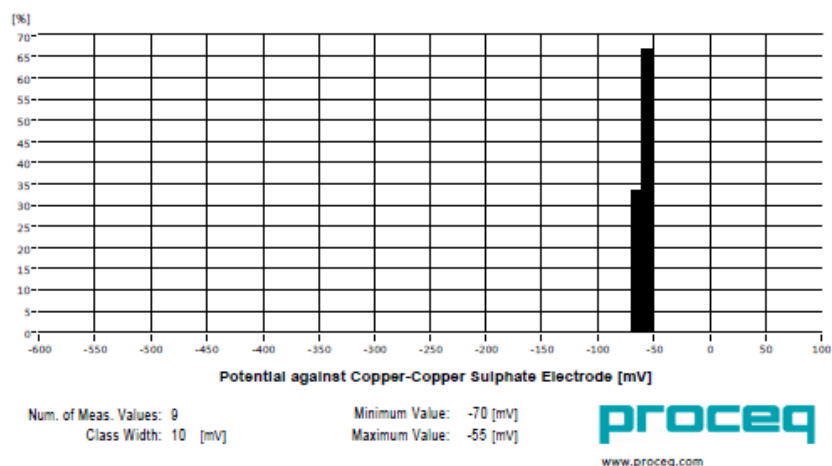
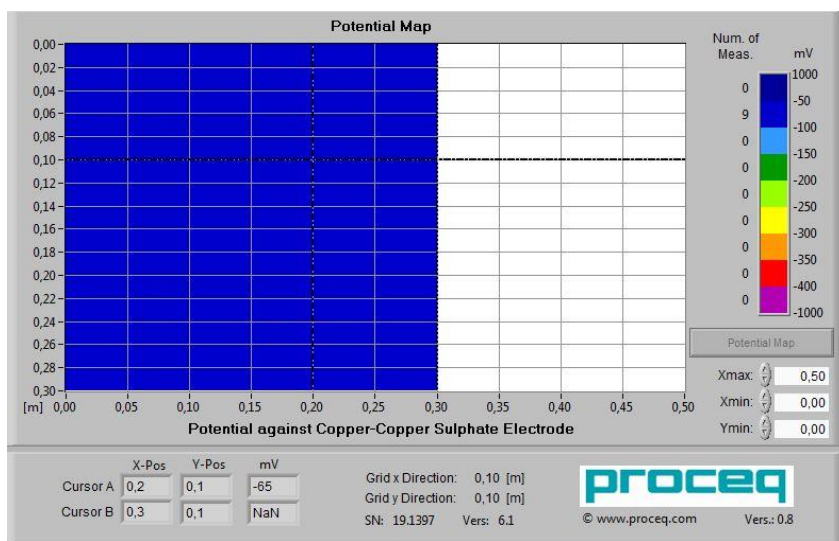


EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

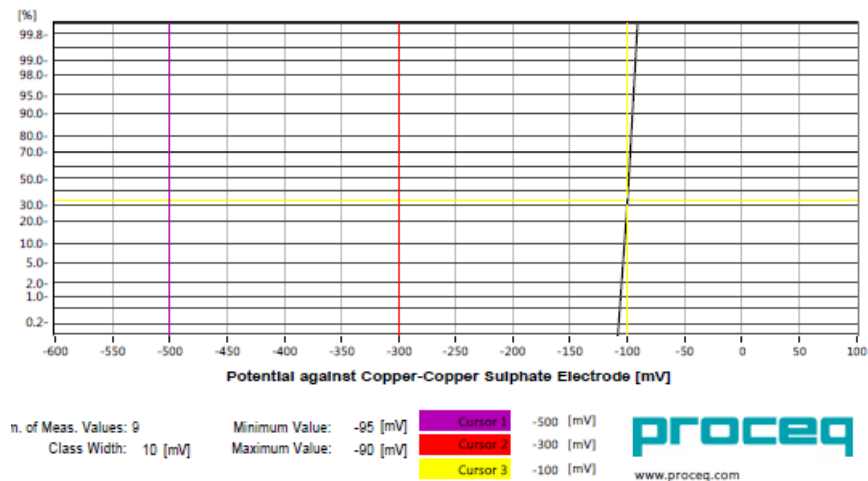
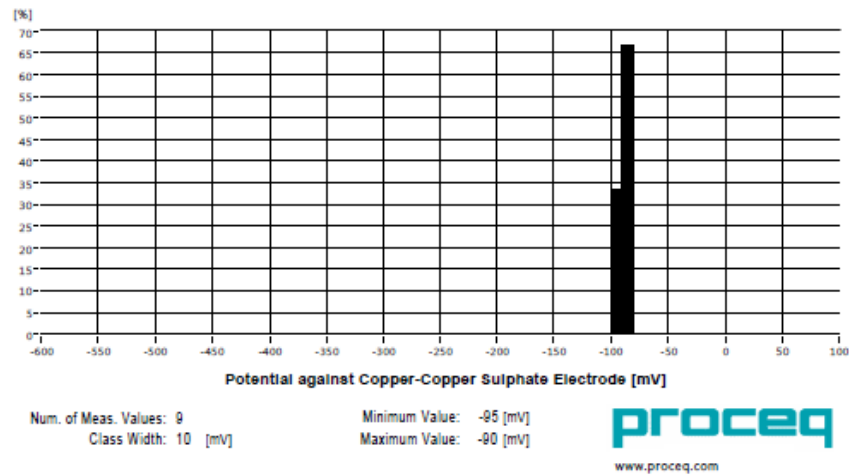
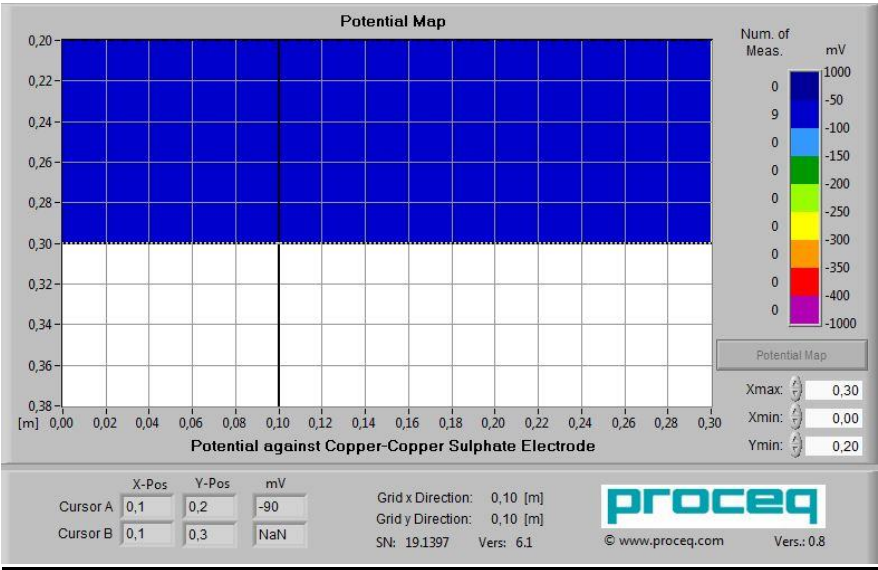




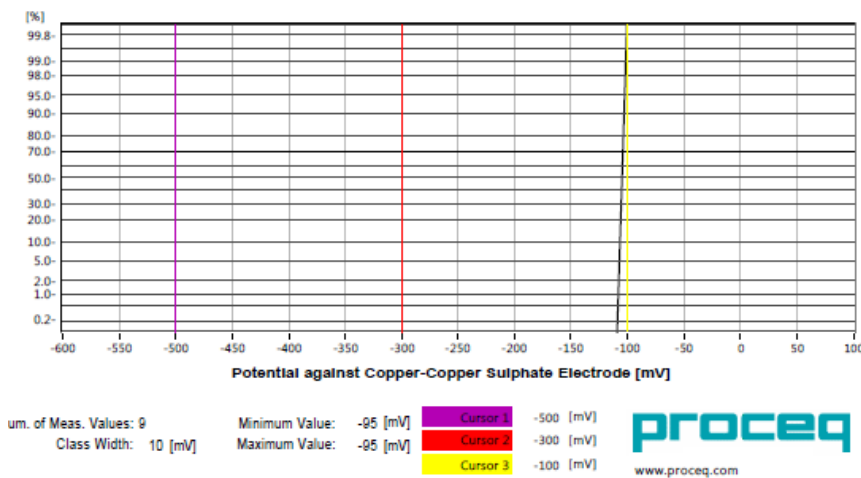
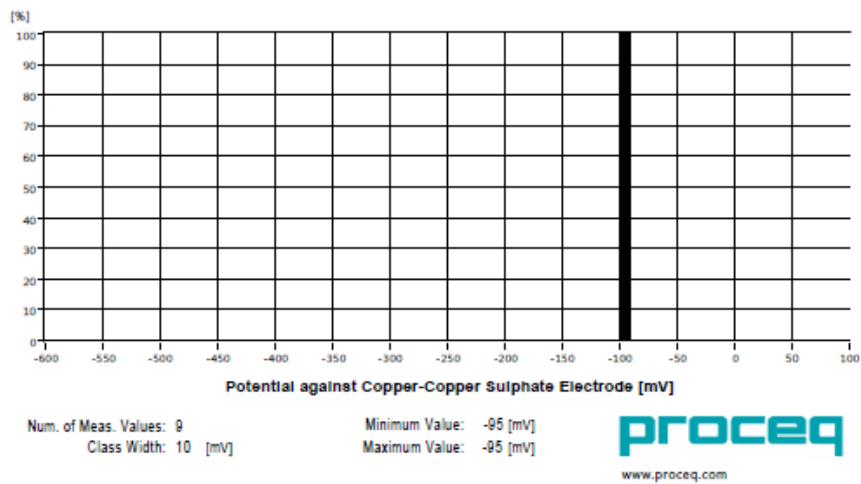
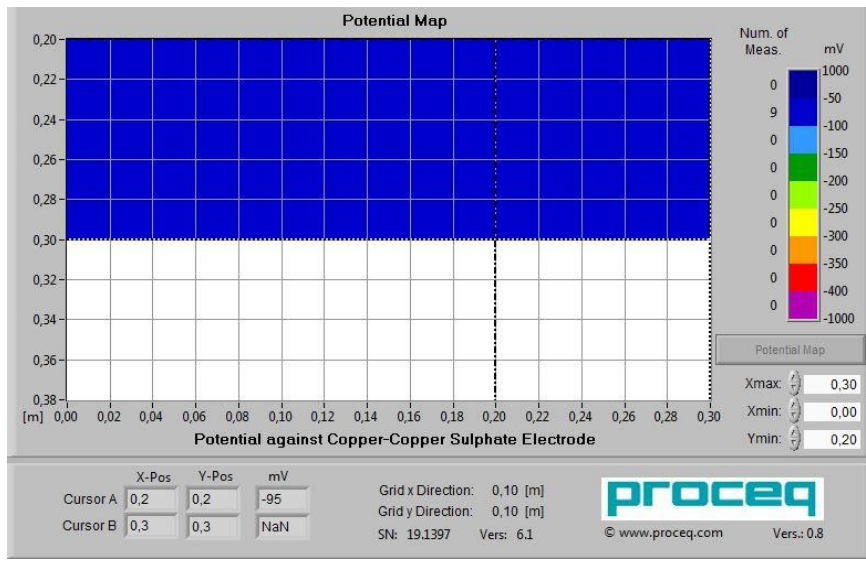
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

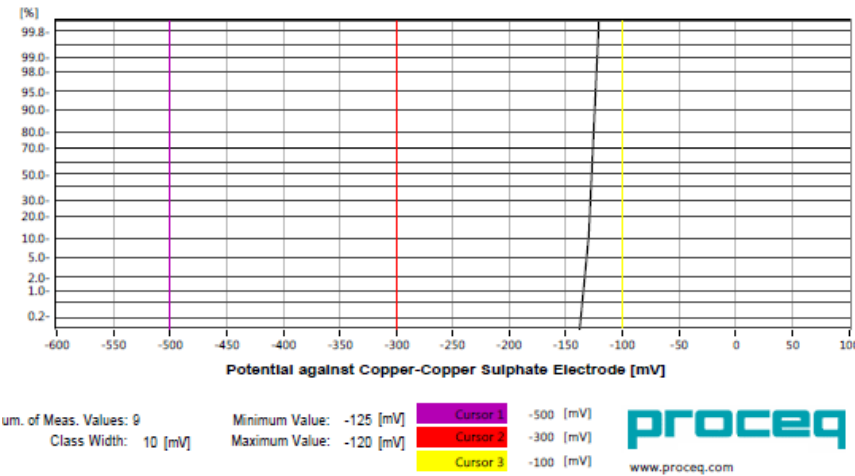
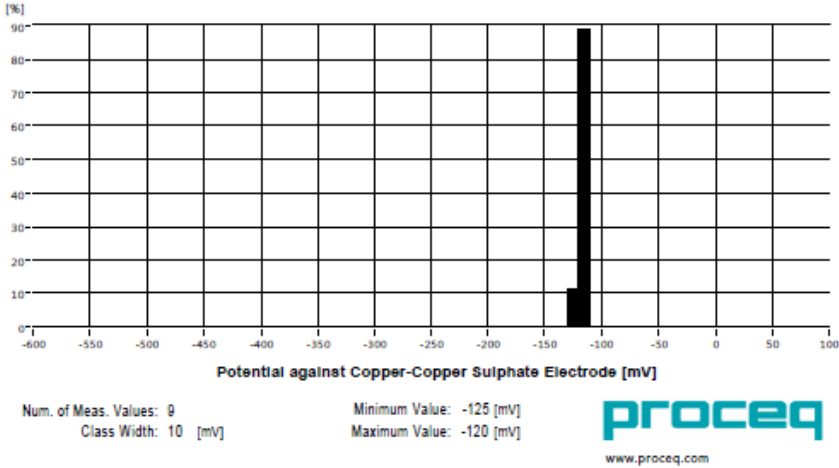
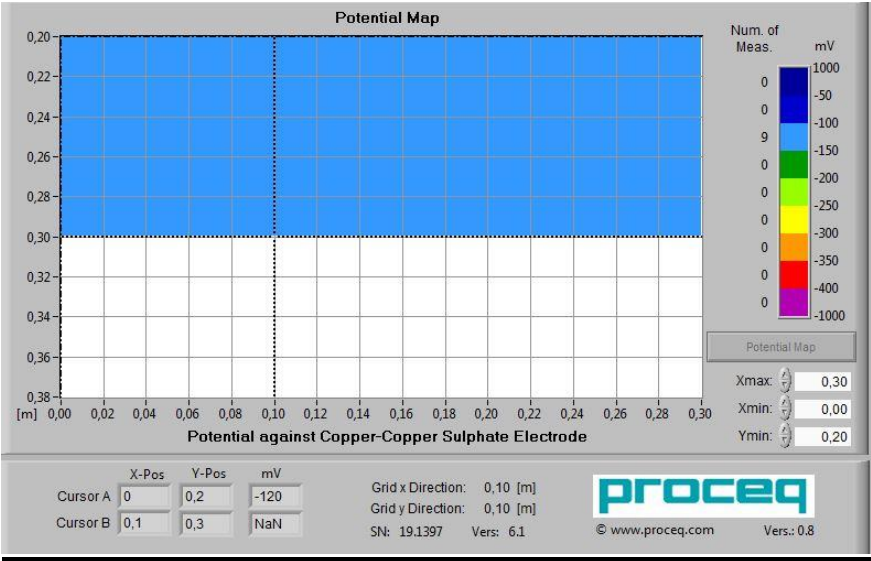


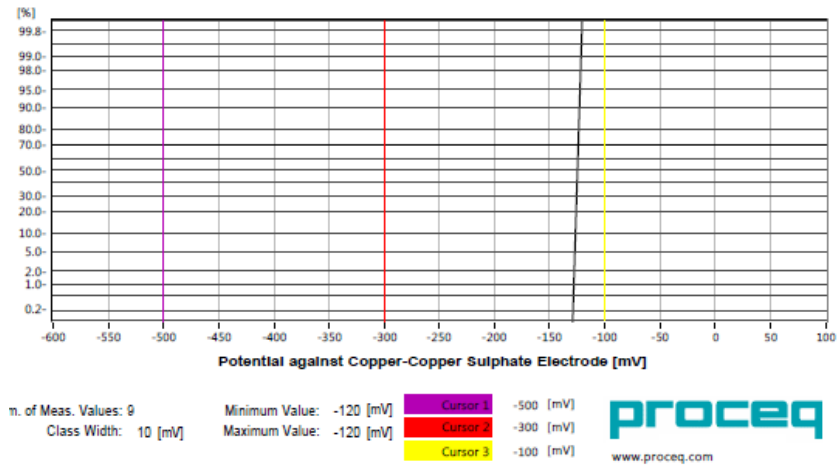
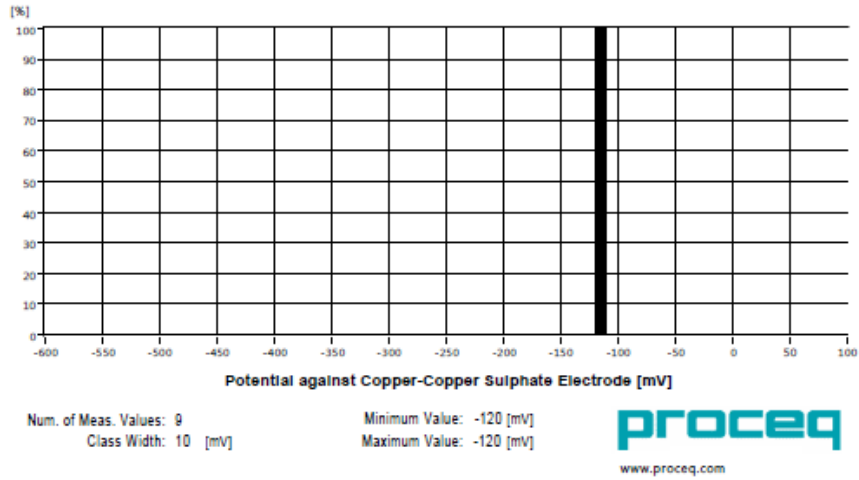
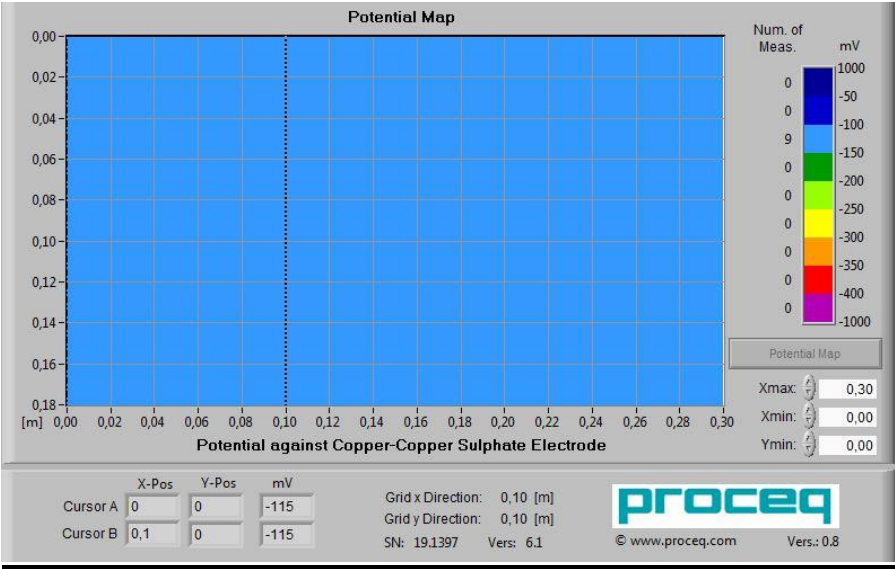
Ensayo 2



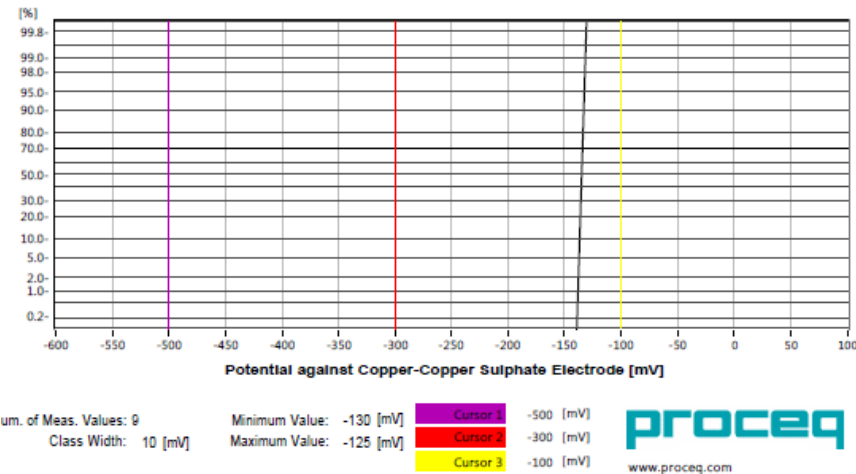
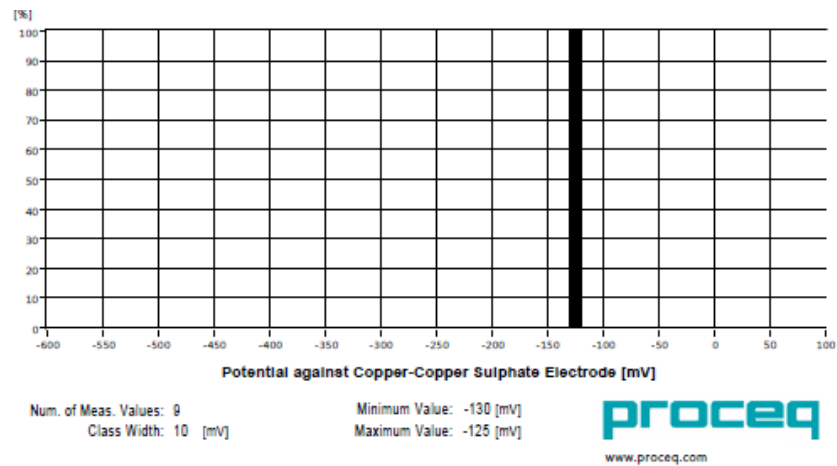
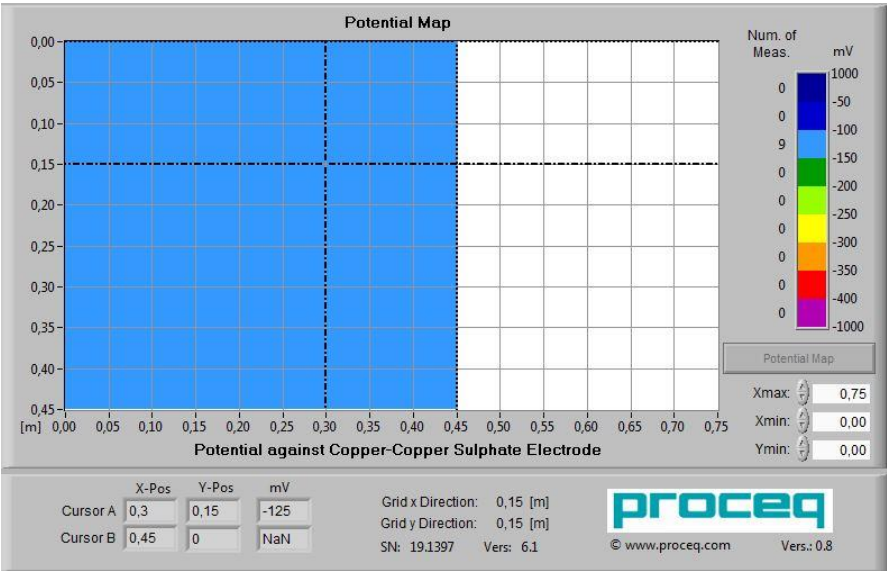
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

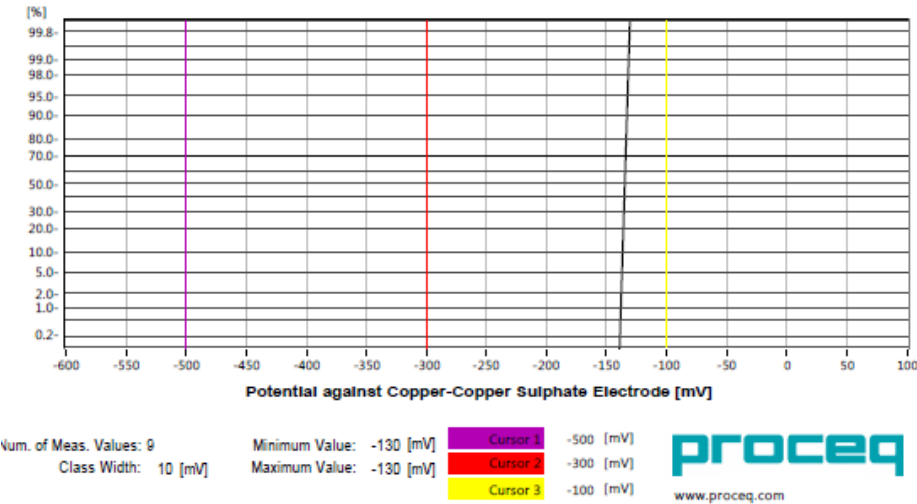
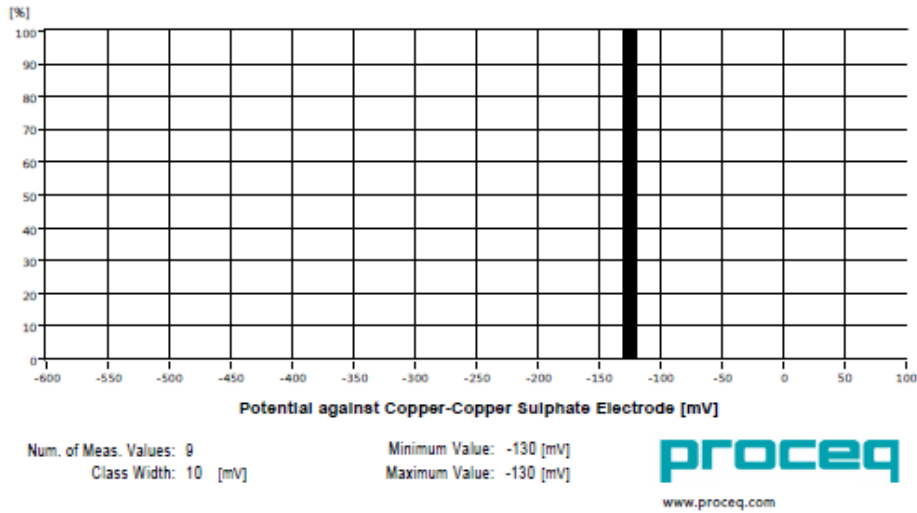
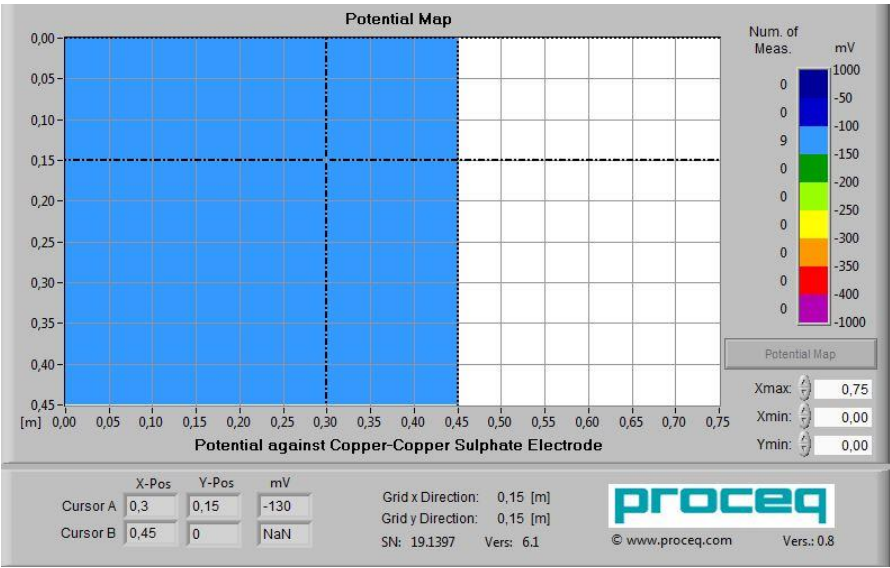


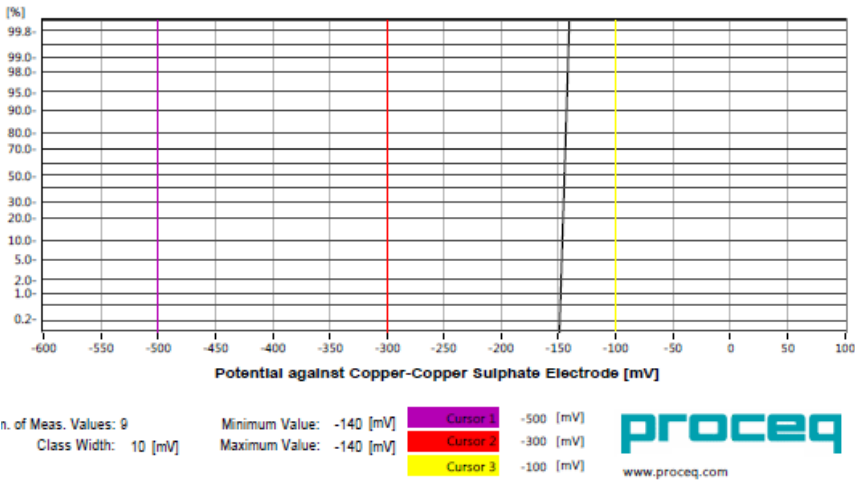
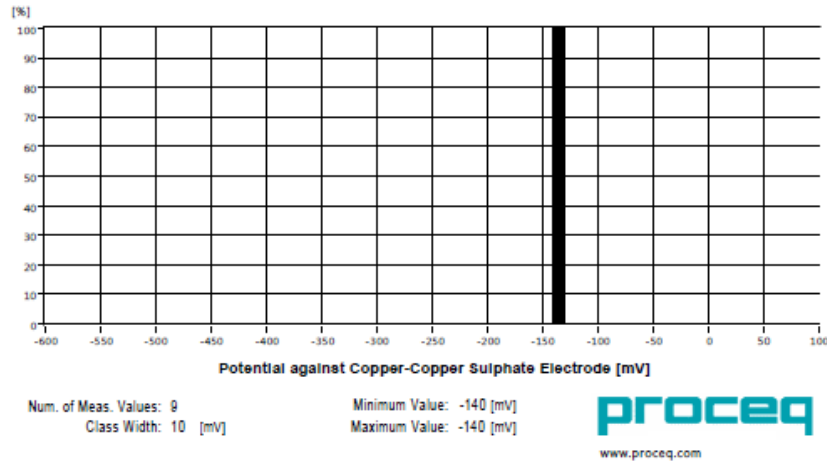
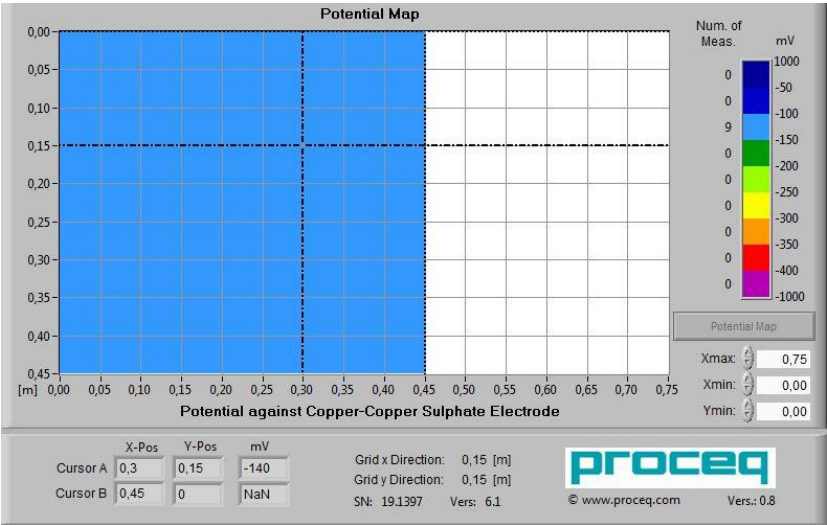




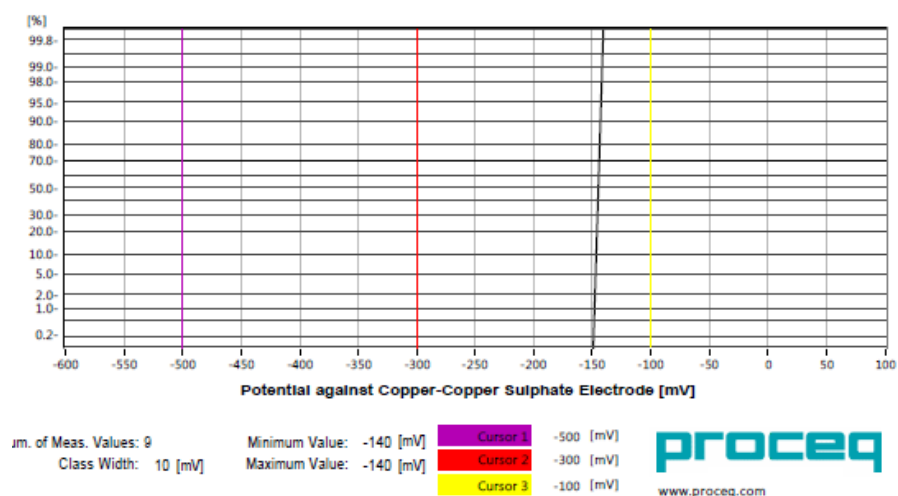
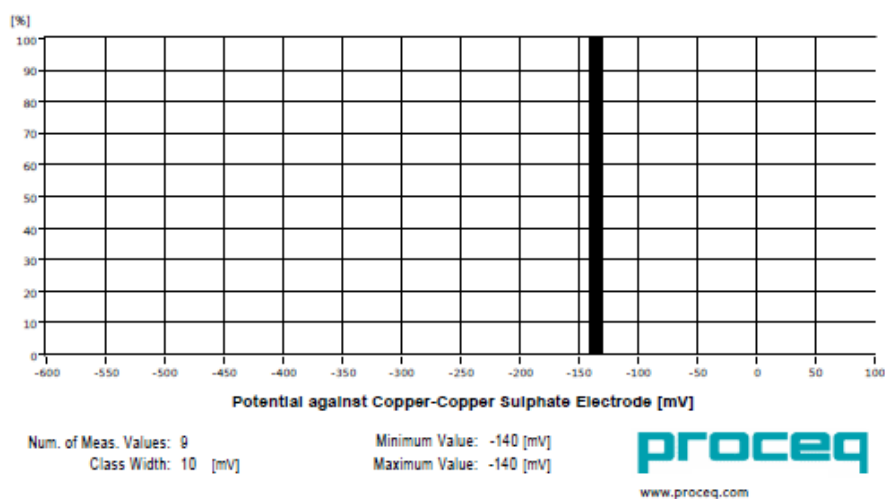
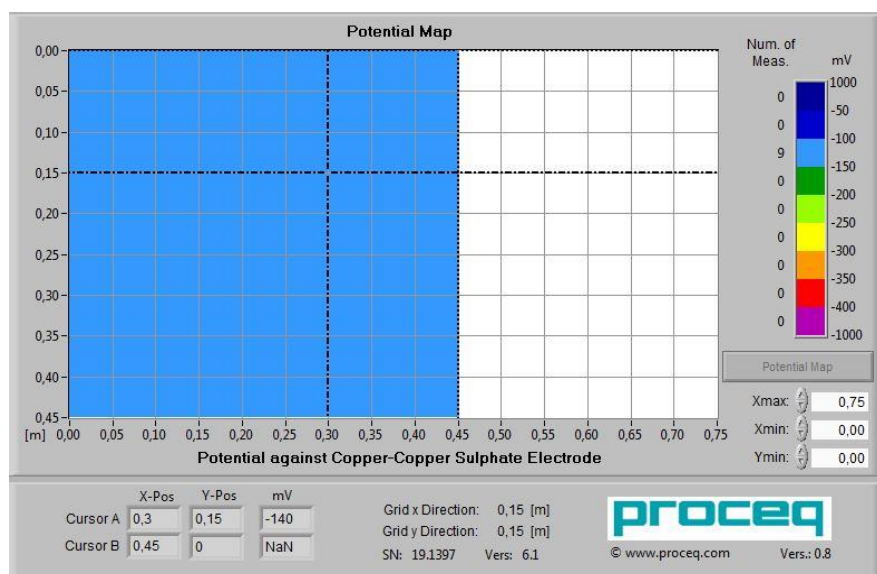
Ensayo 3:



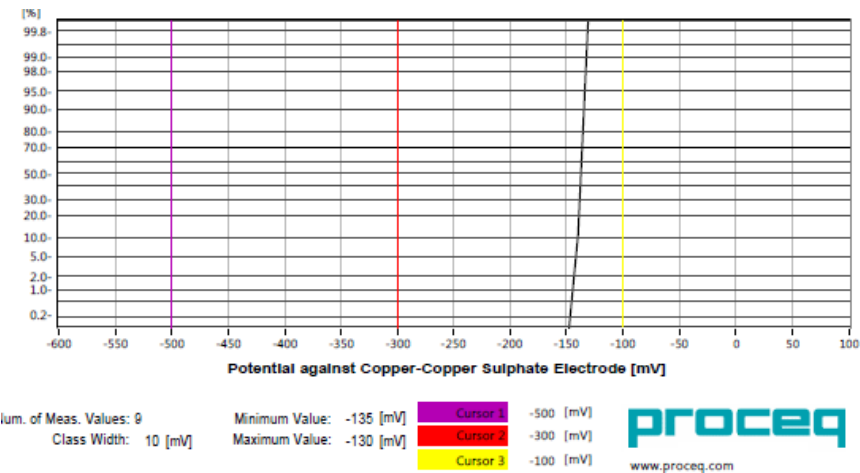
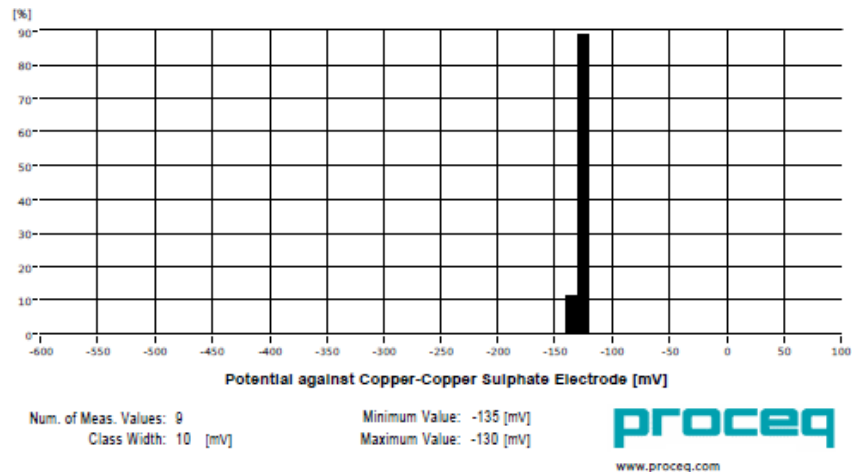
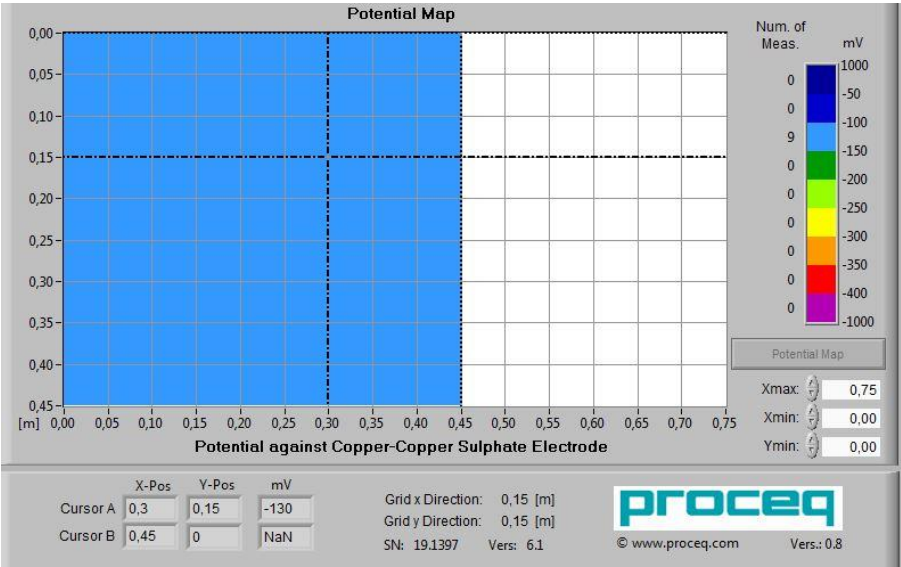




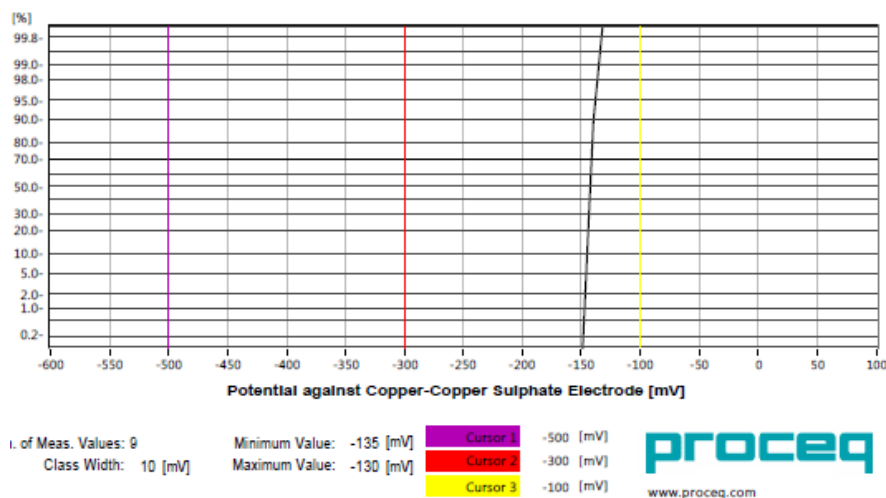
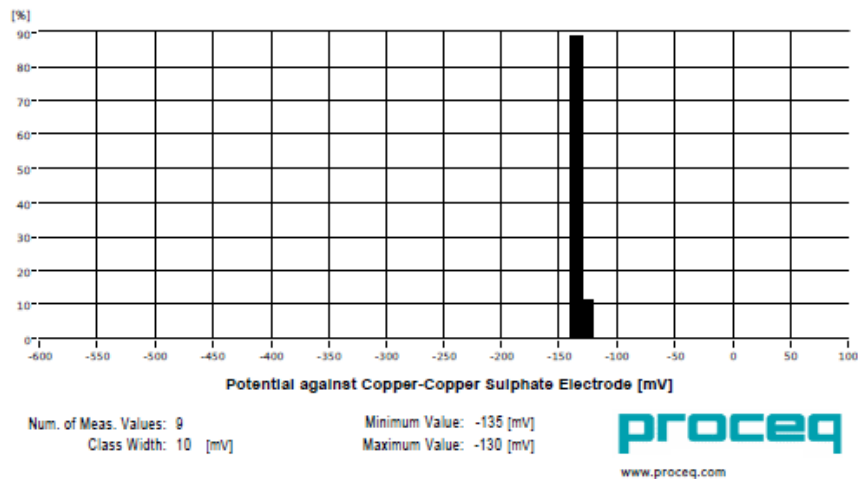
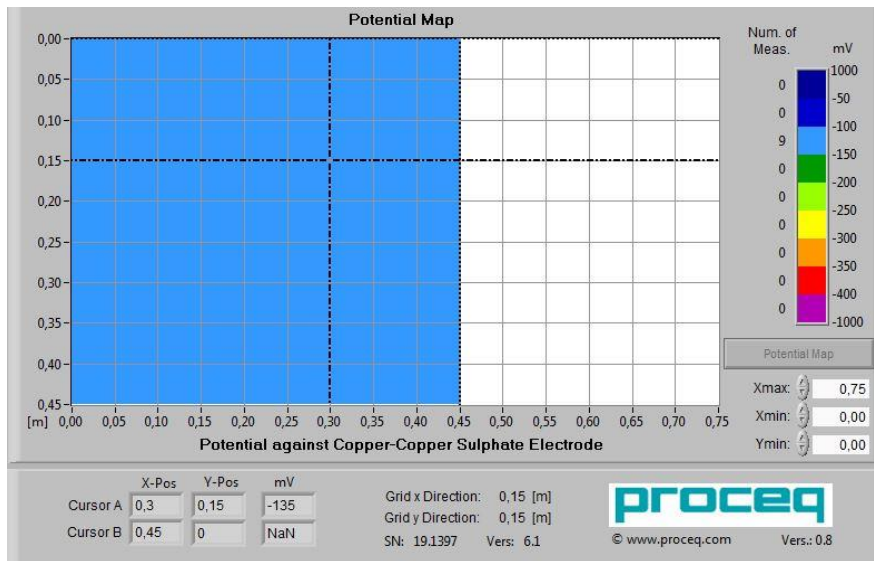
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

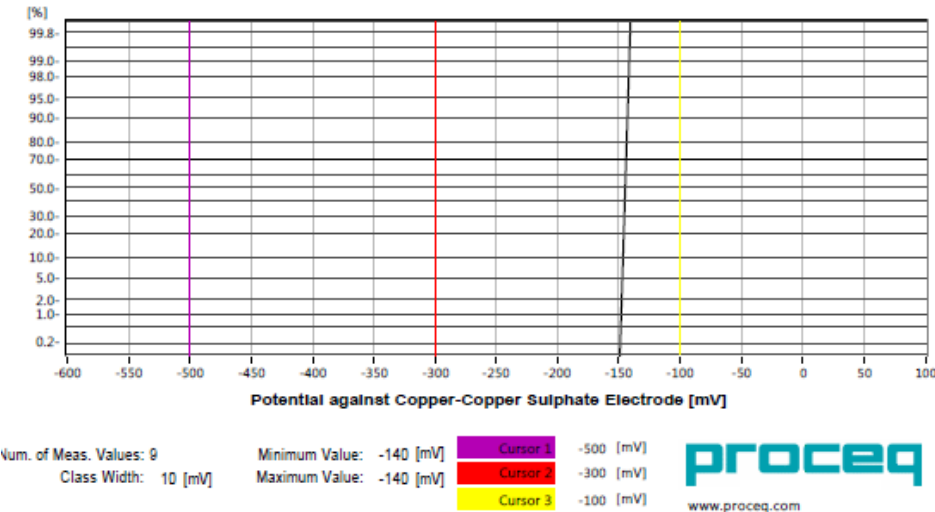
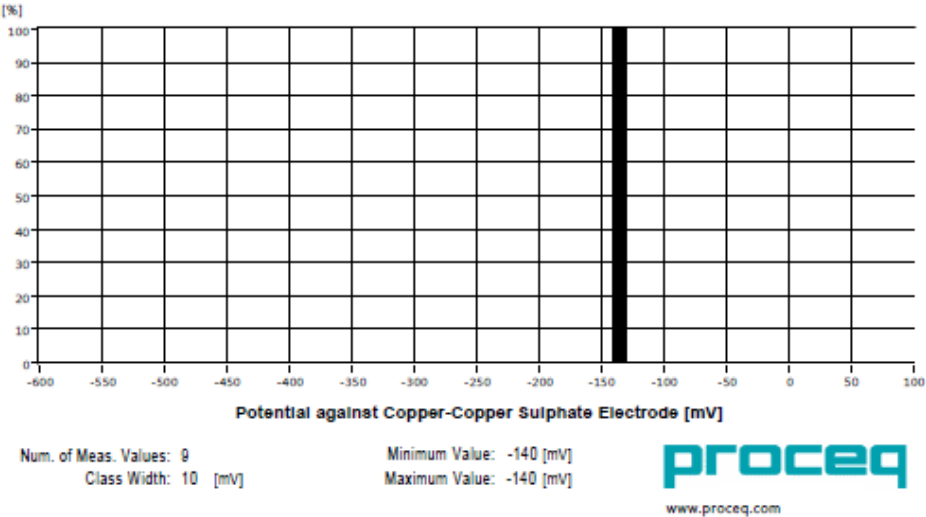
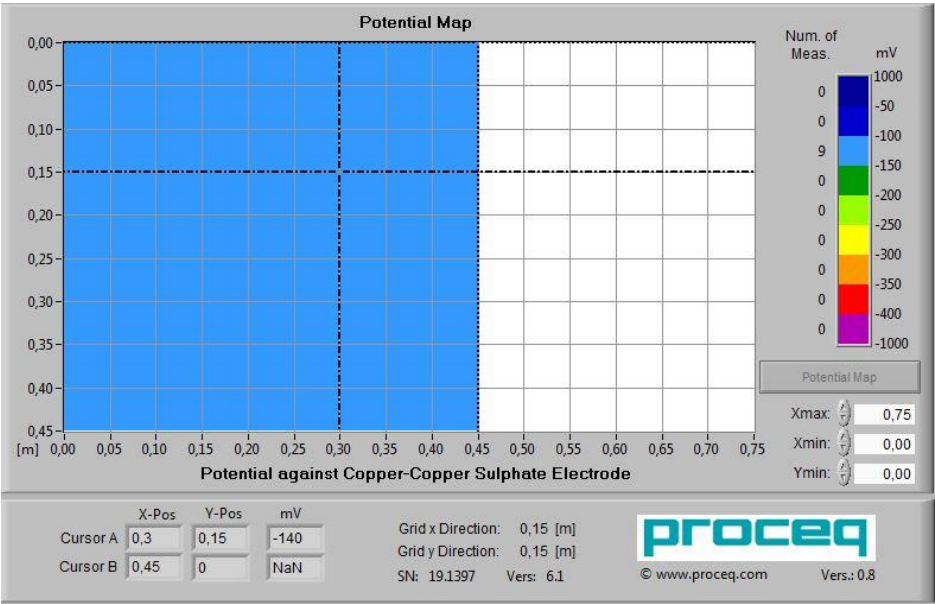


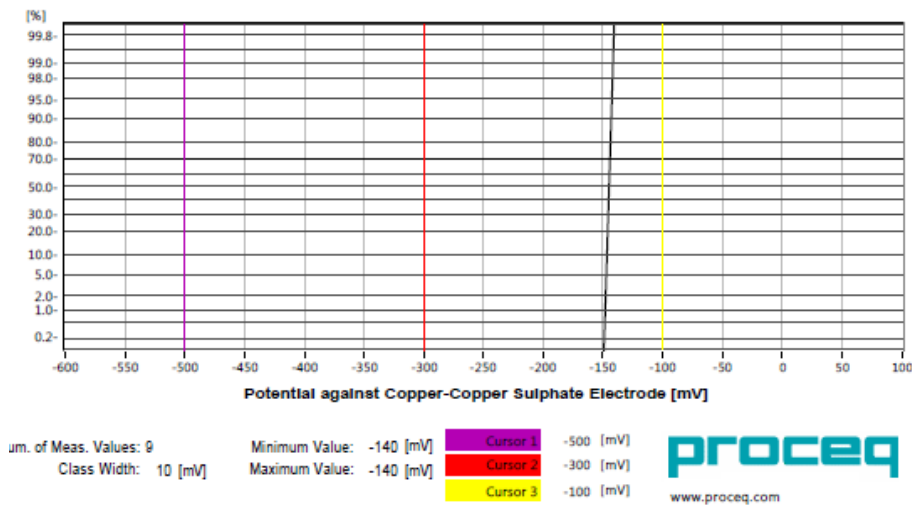
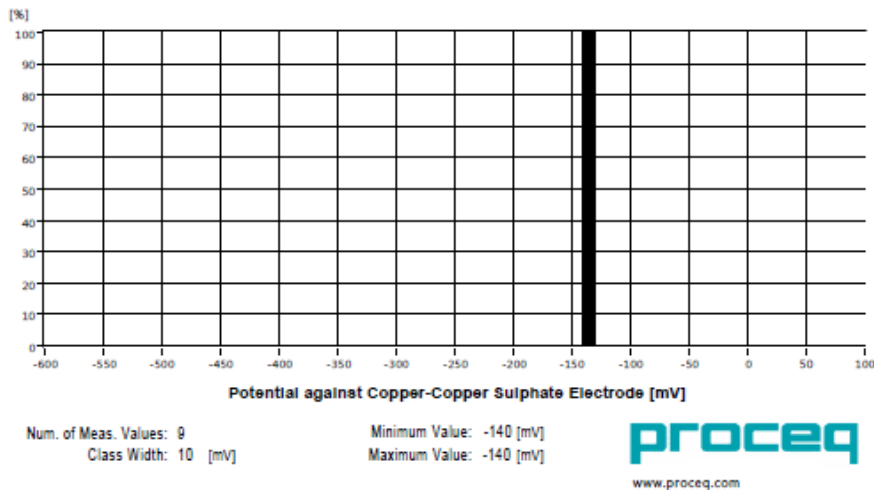
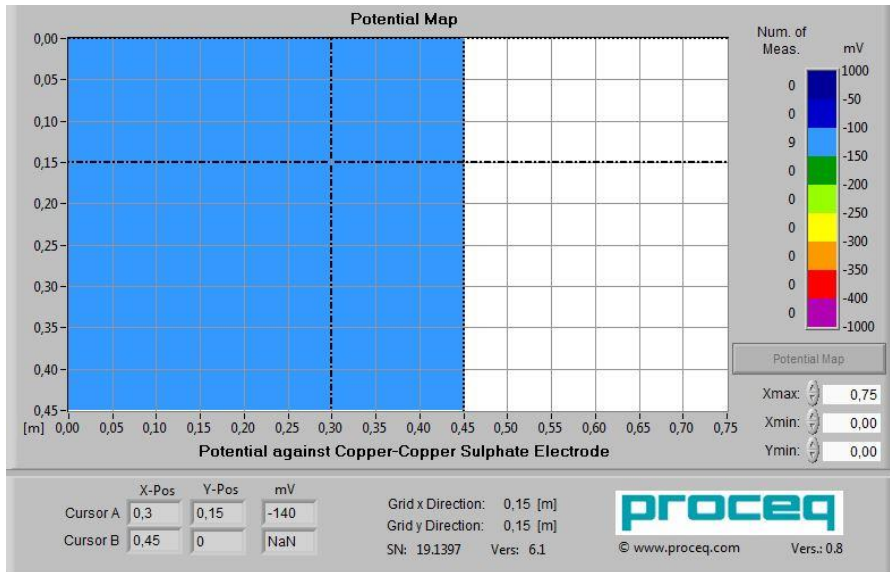
Ensayo 4:

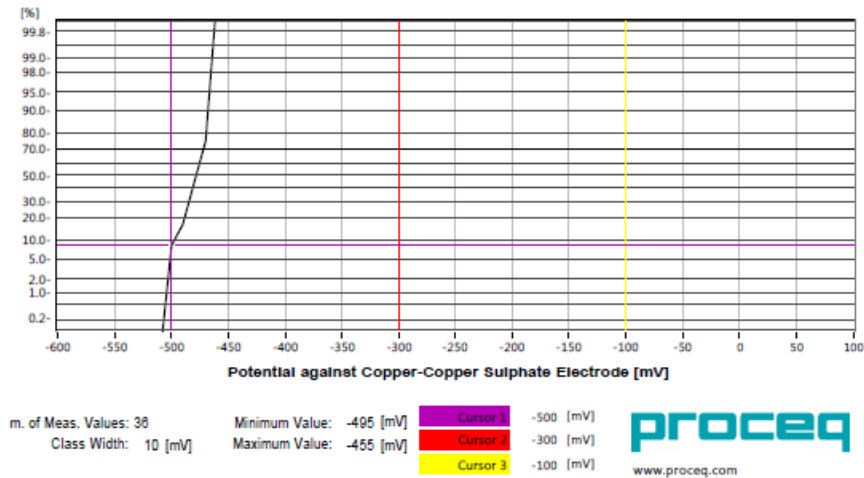
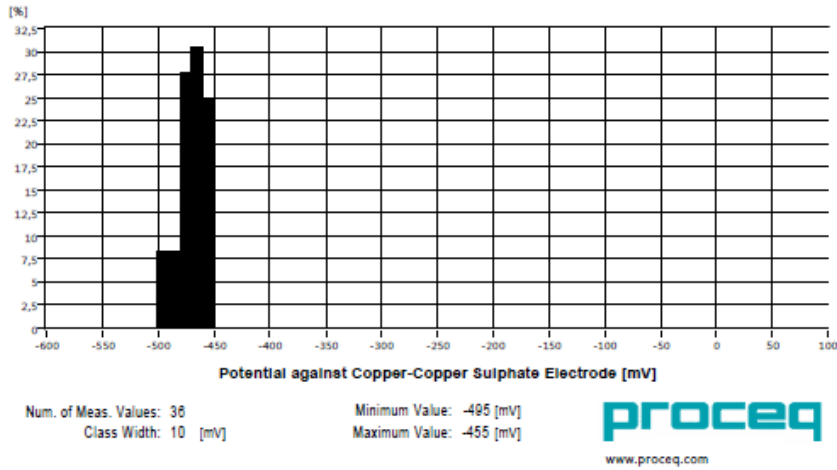
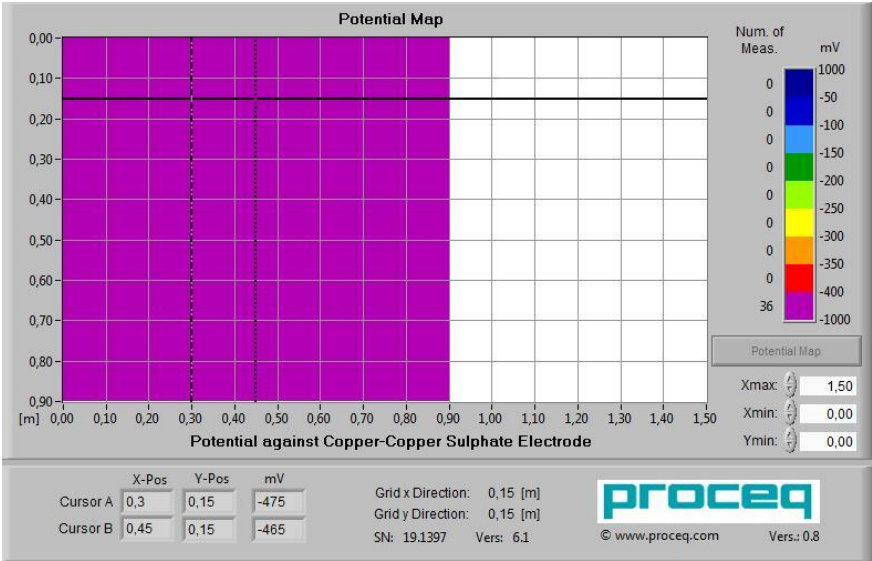


EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

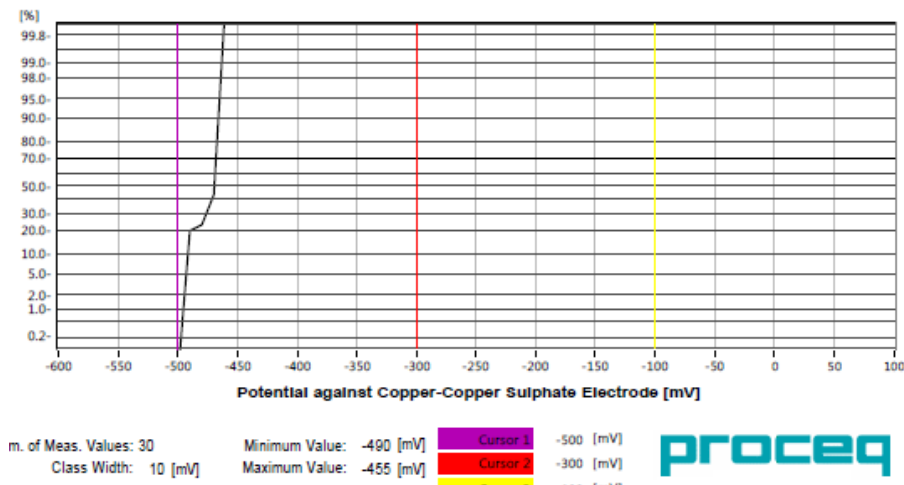
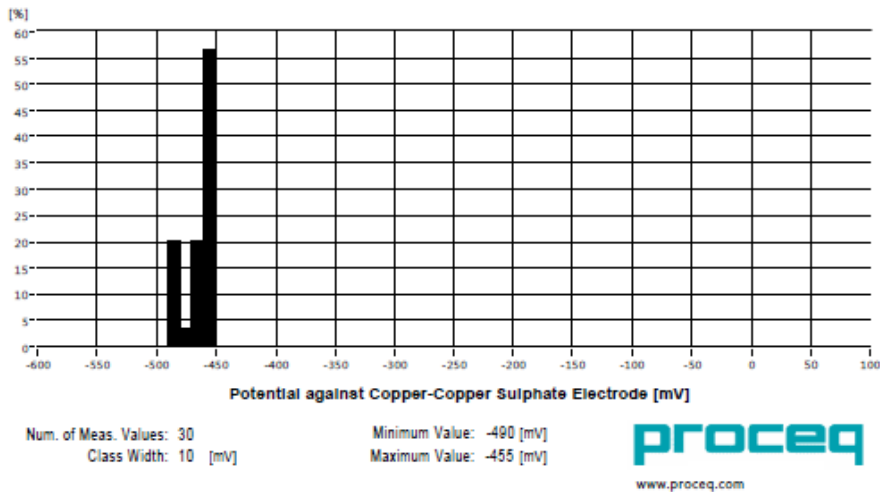
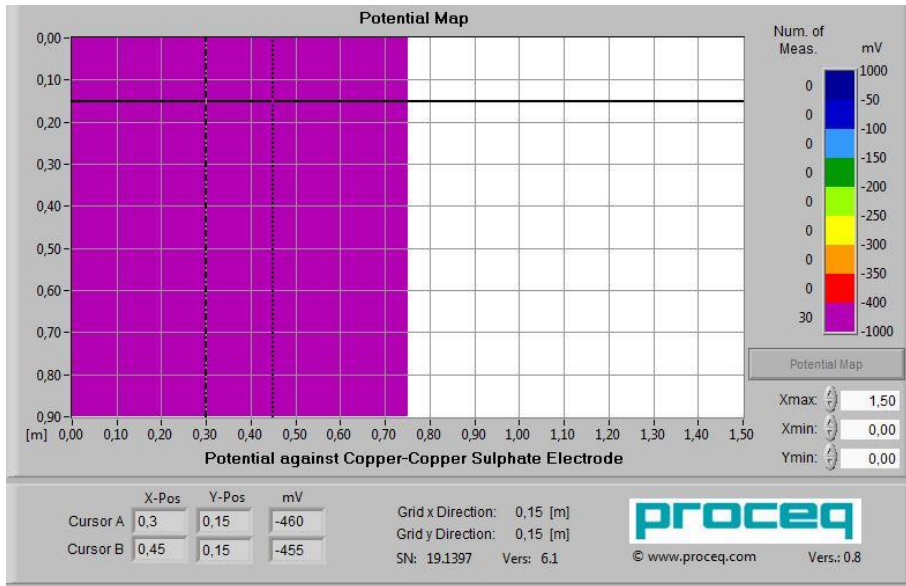


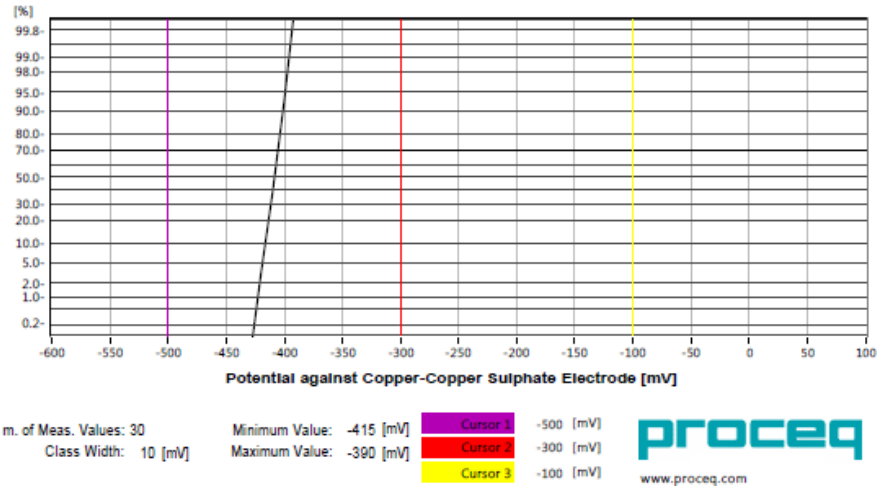
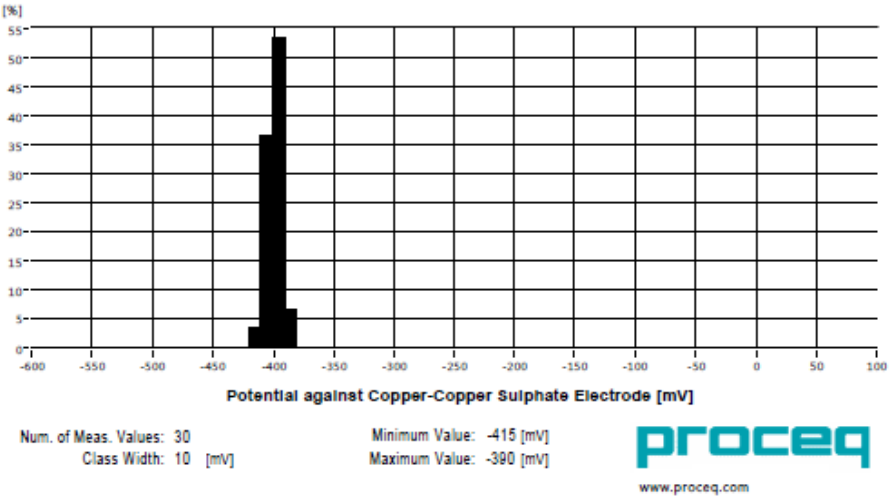
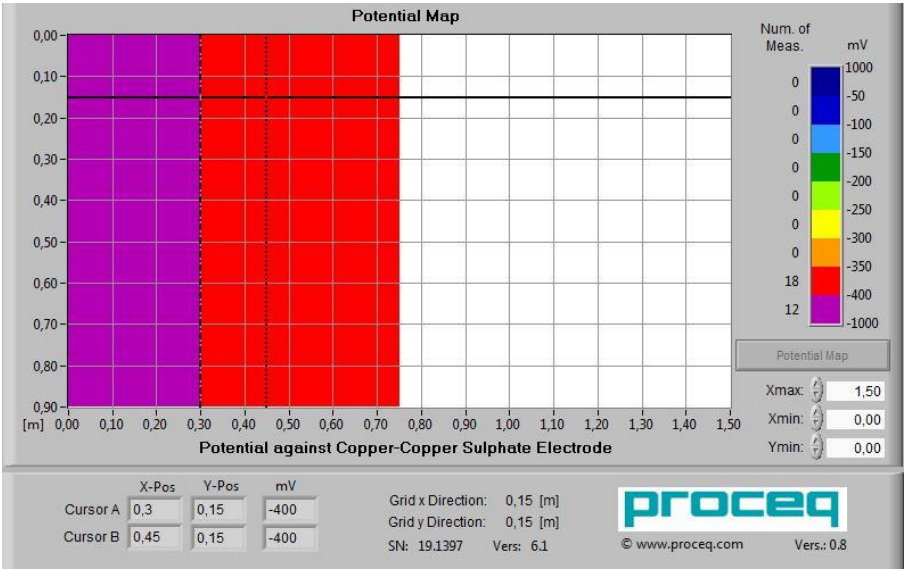




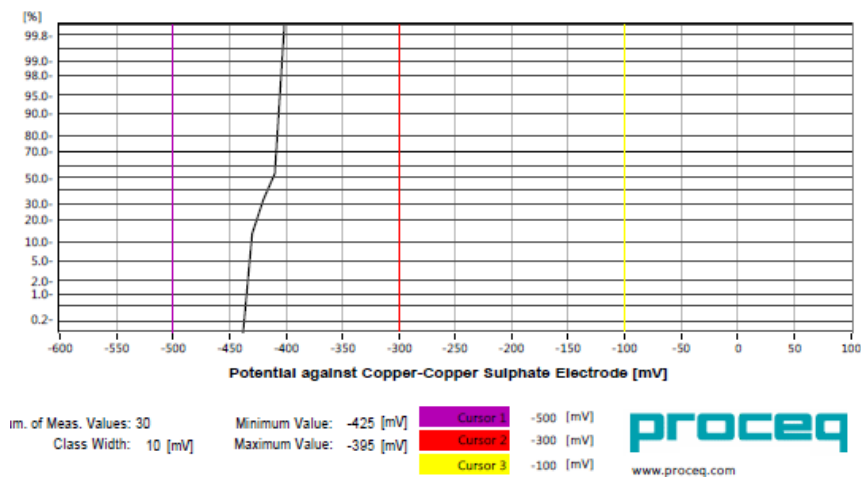
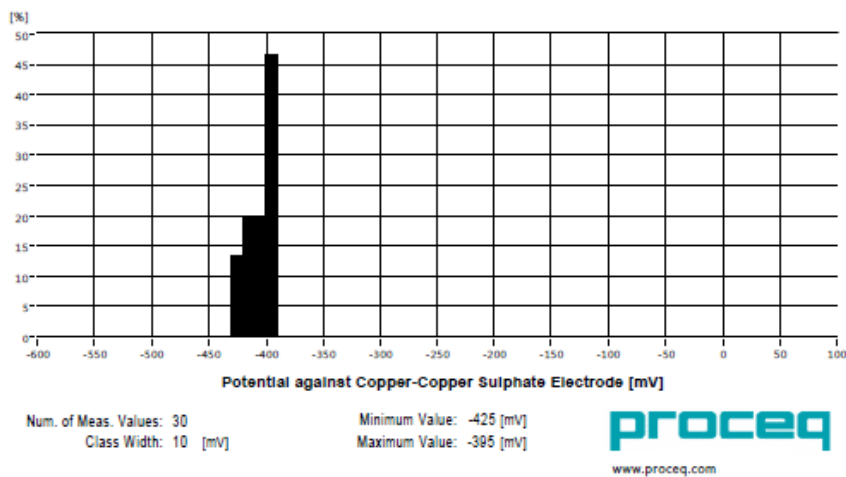
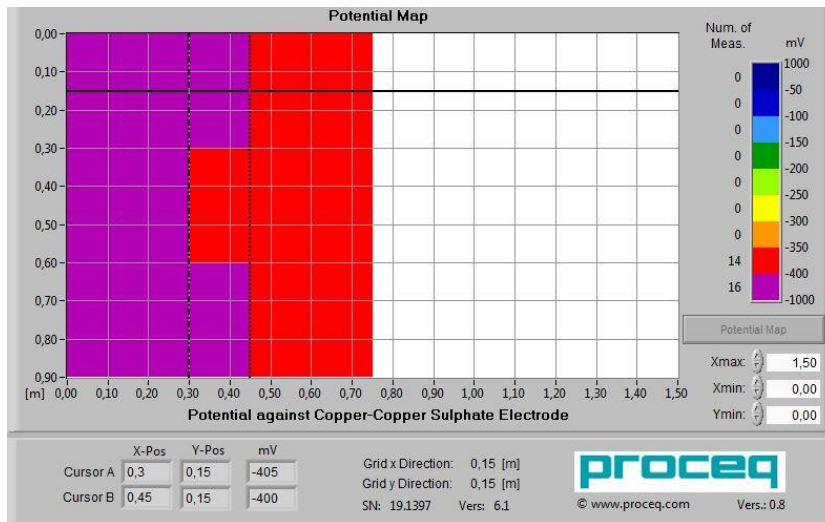


EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

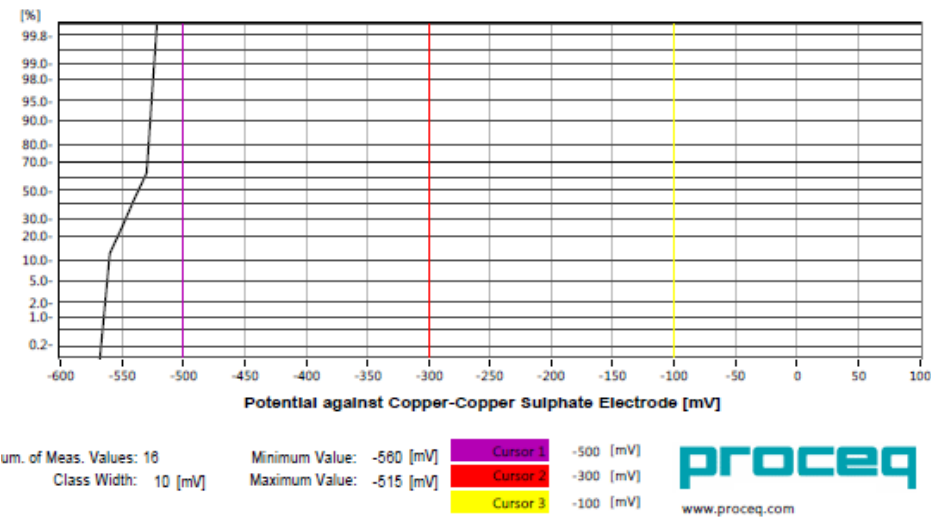
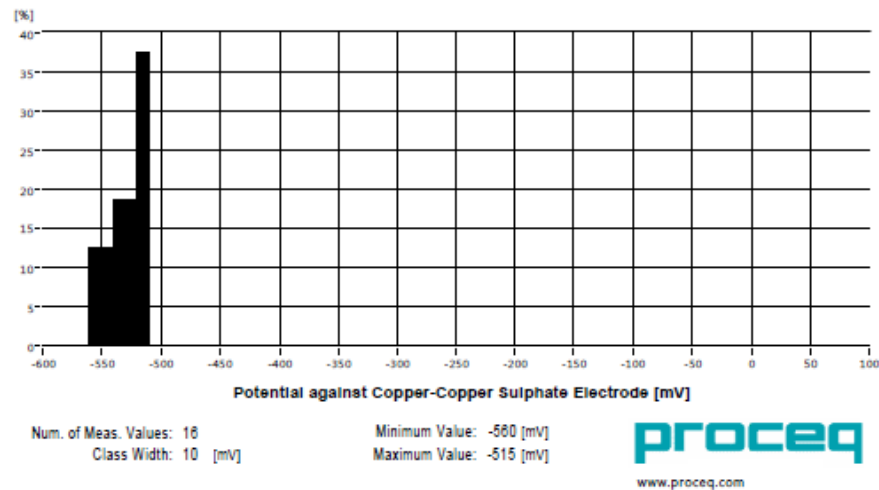
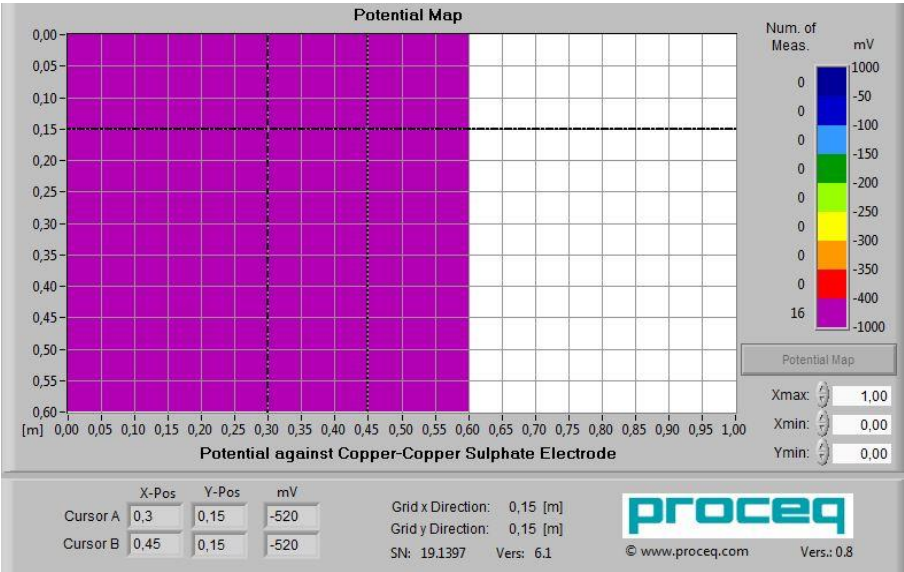




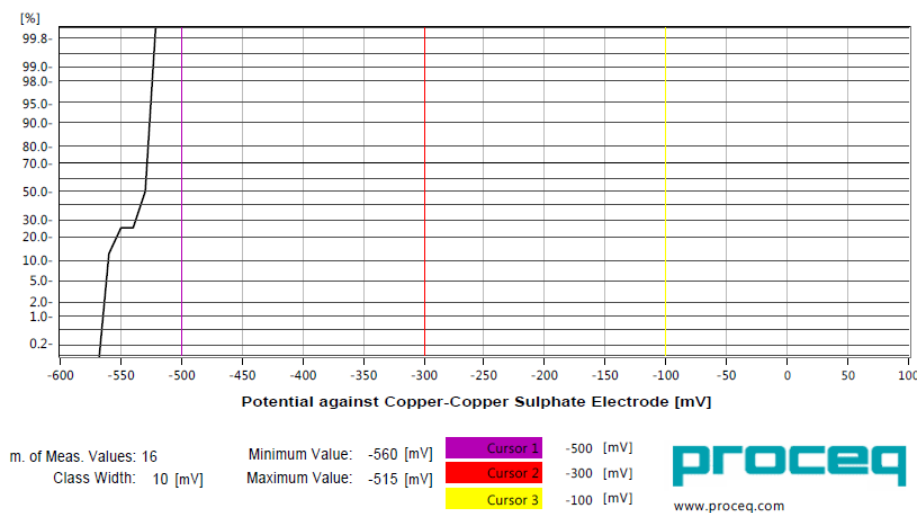
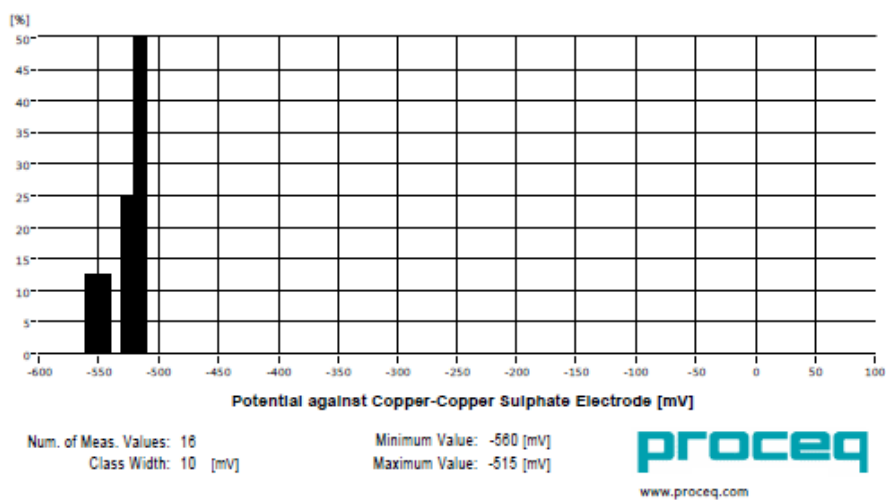
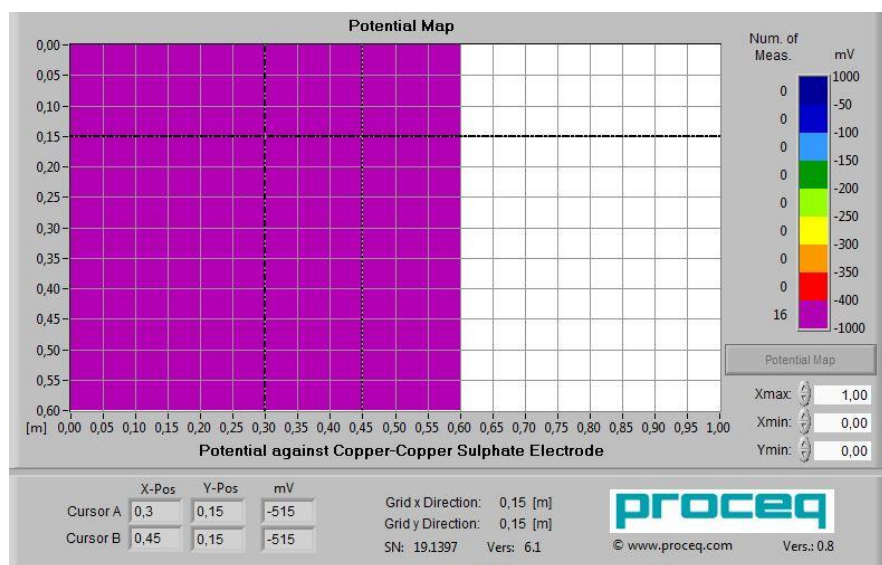
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

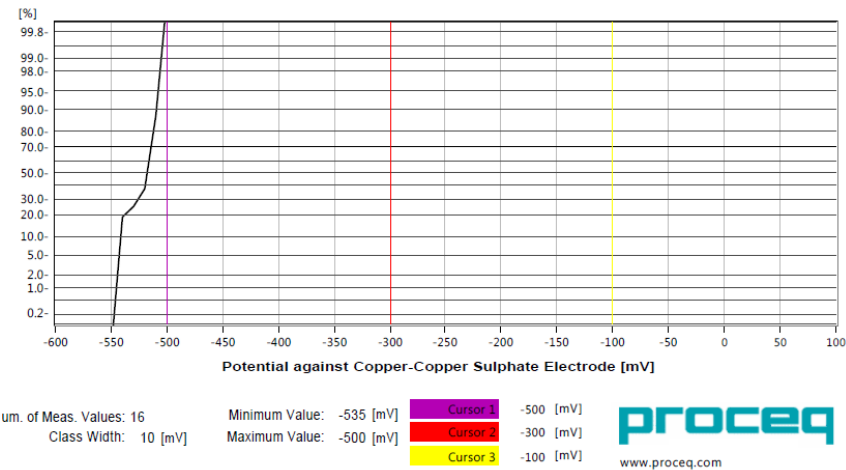
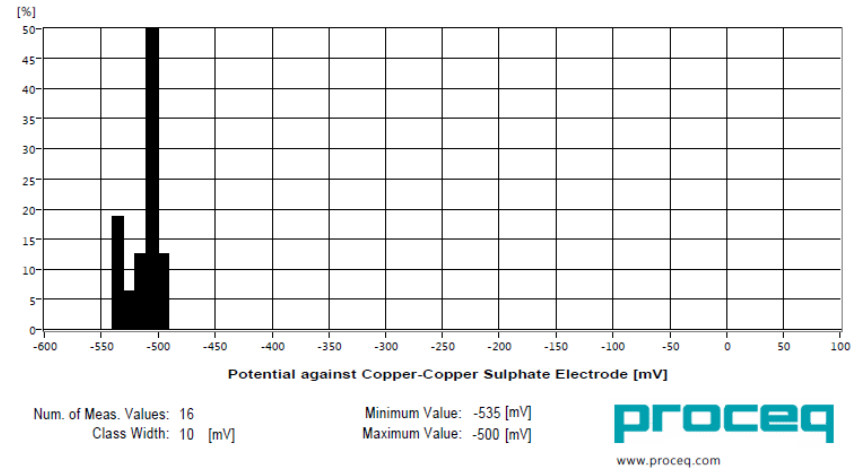
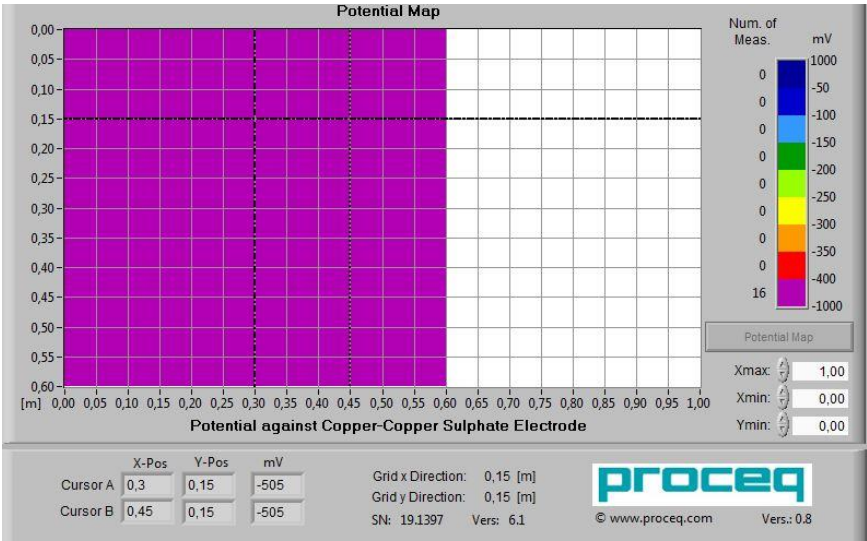


Ensayo 6:

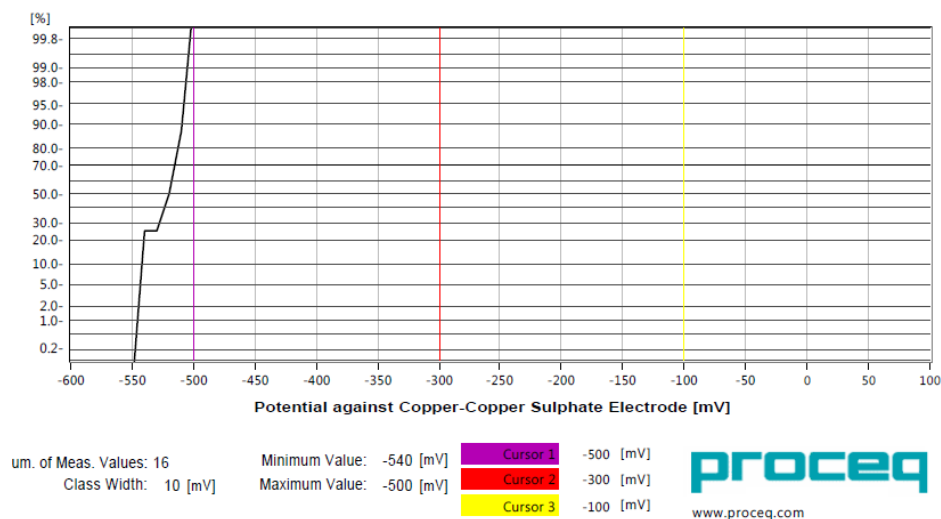
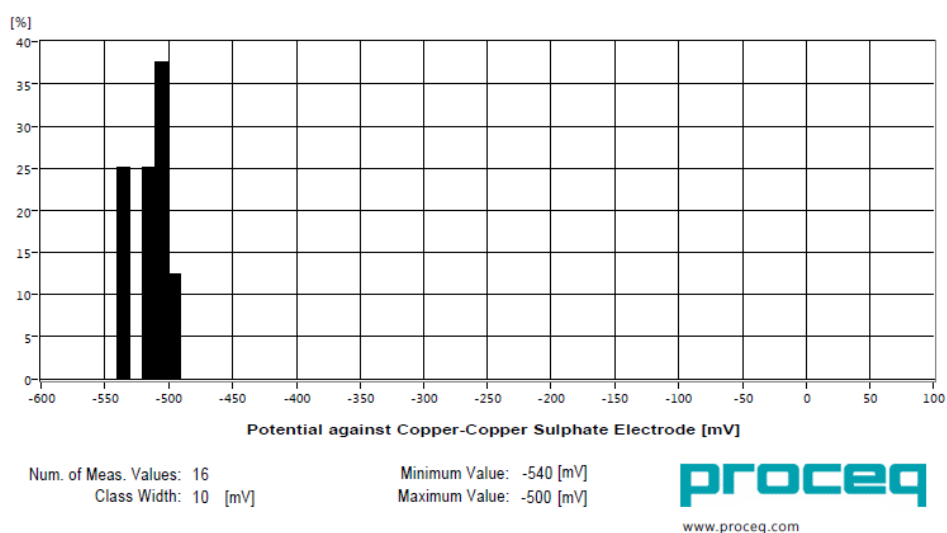
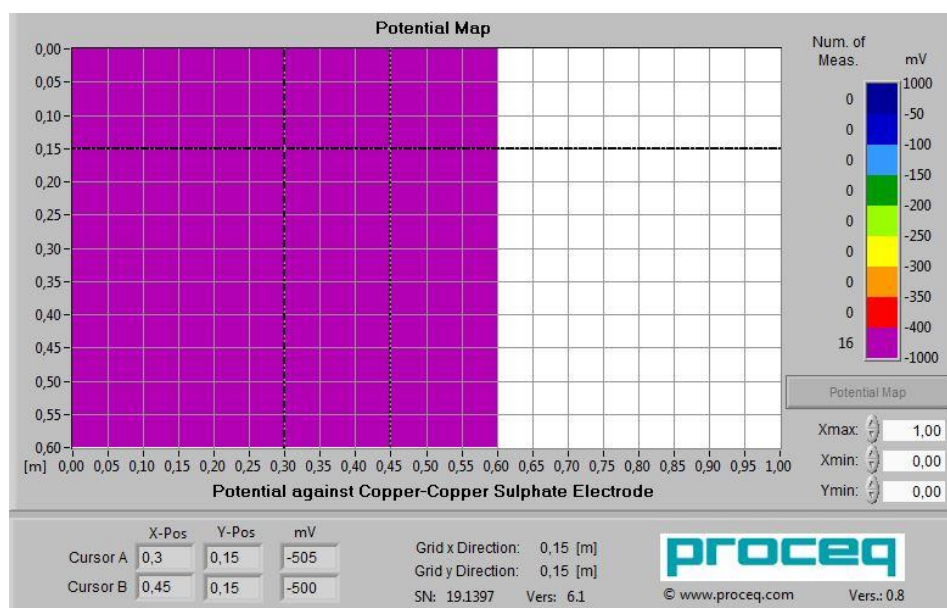


EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL



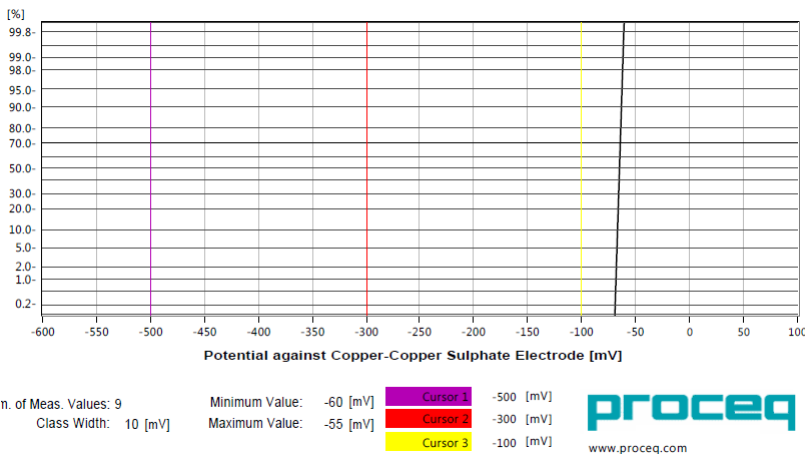
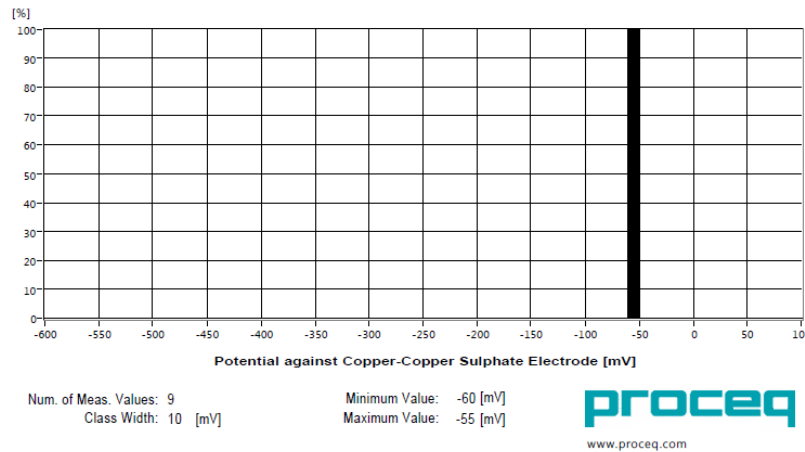
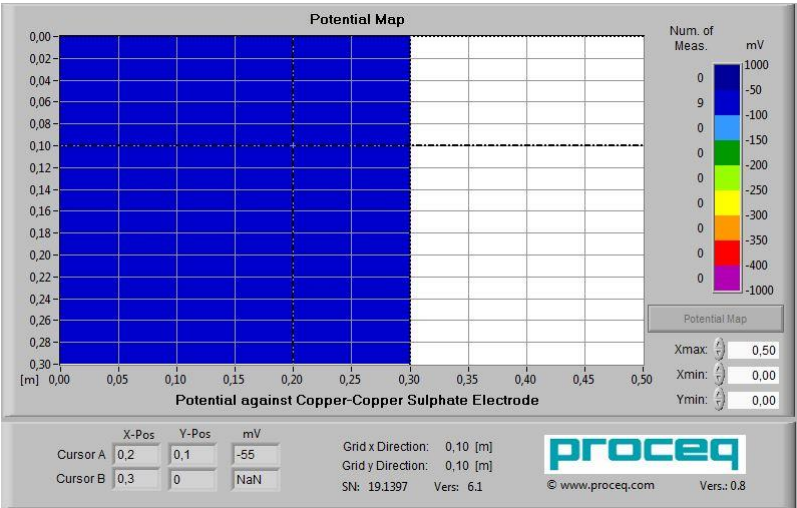


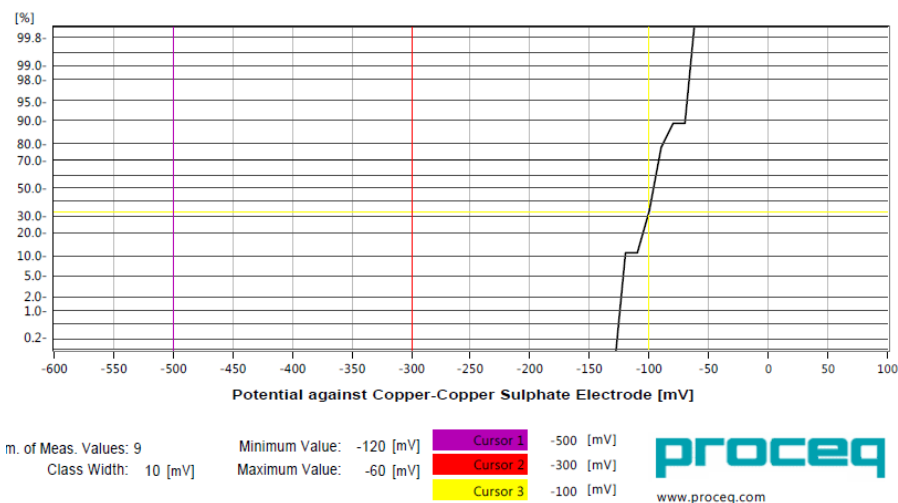
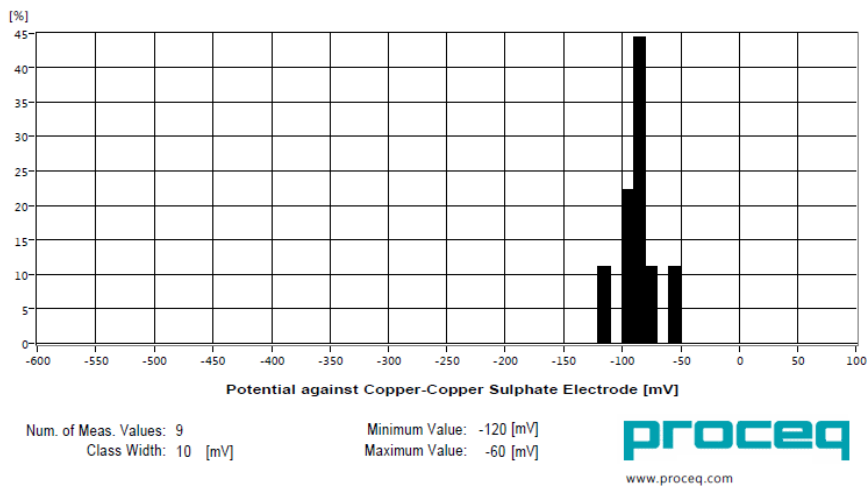
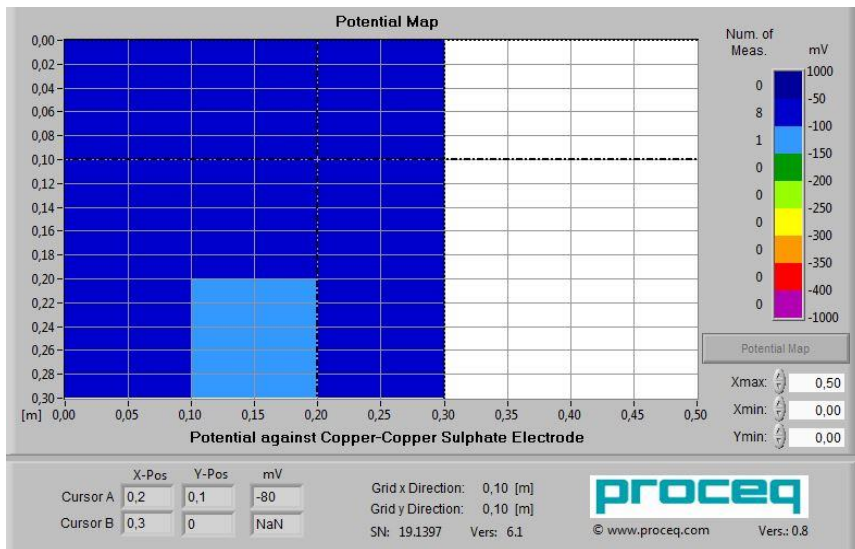
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

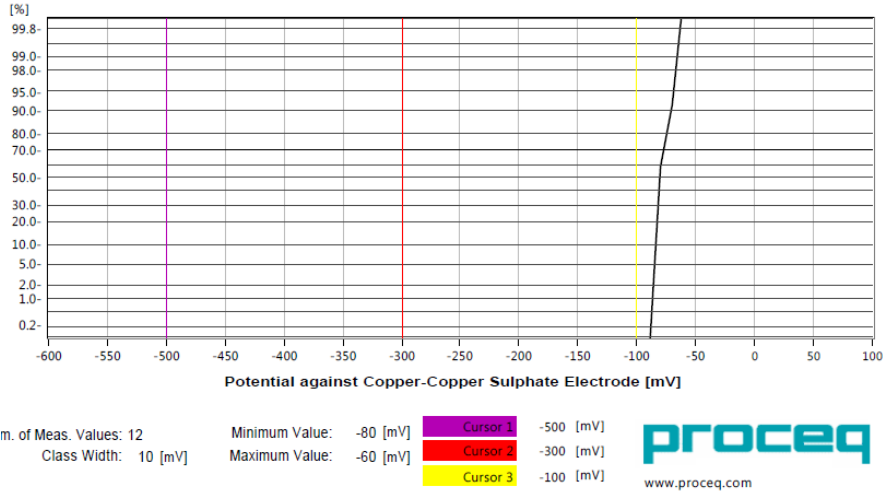
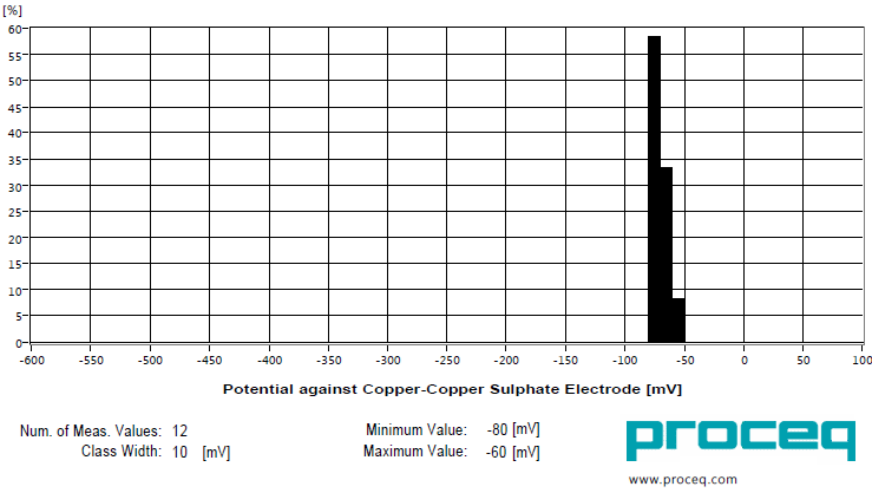
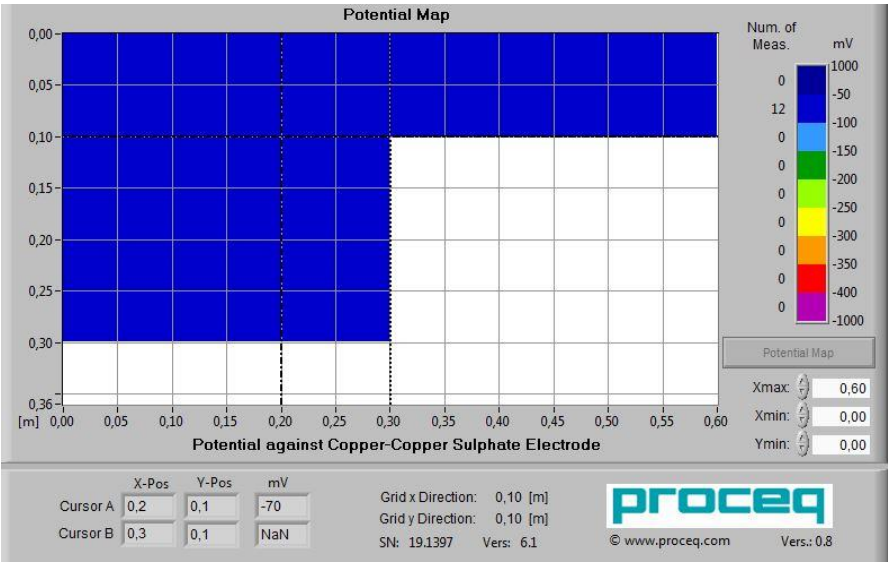


Probeta tipo PCM

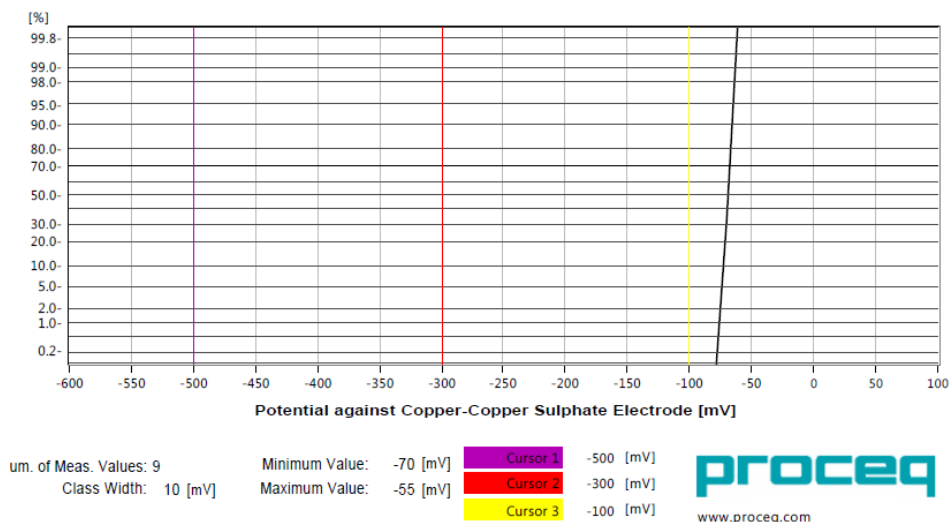
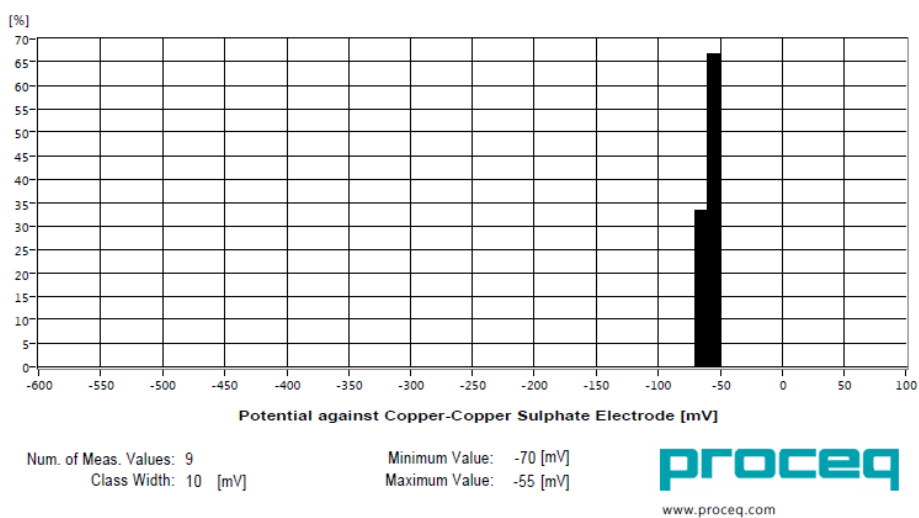
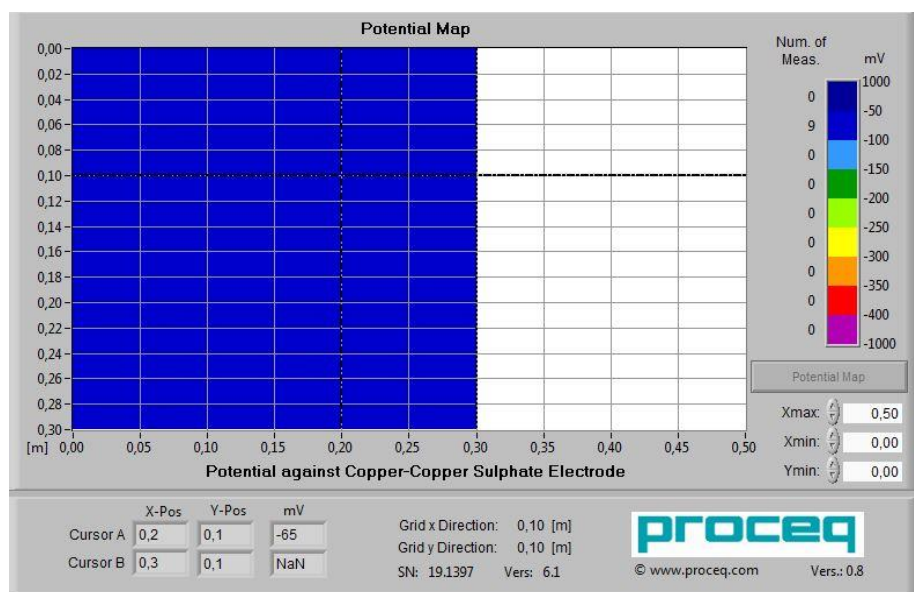
Ensayo 1:



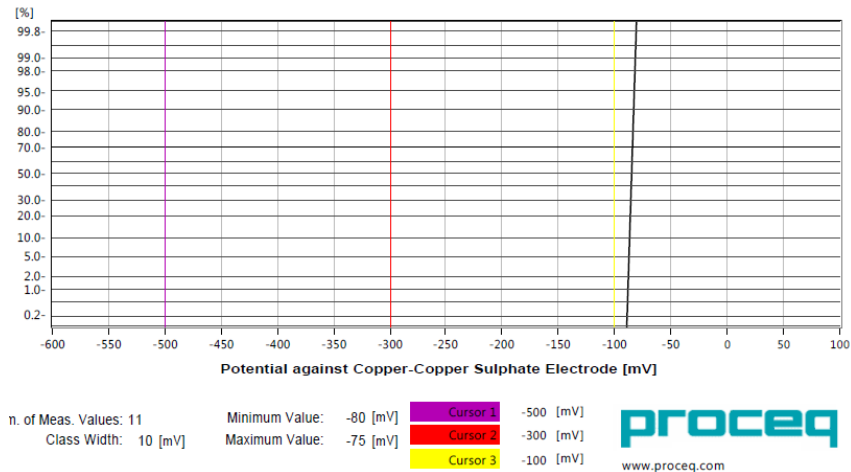
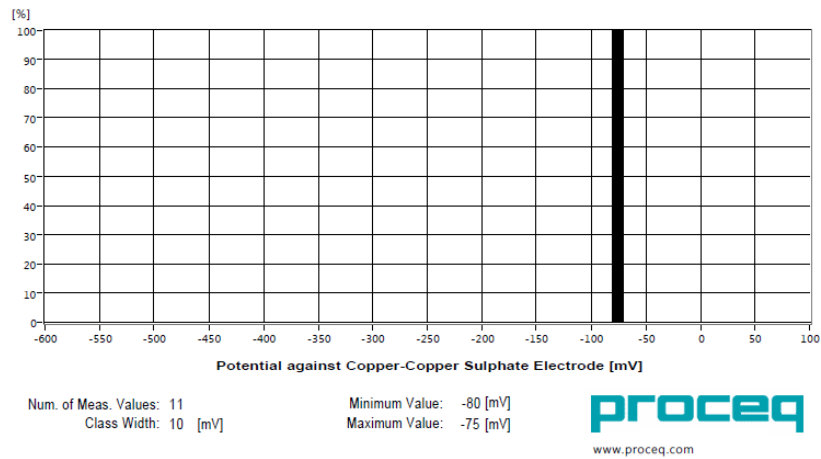
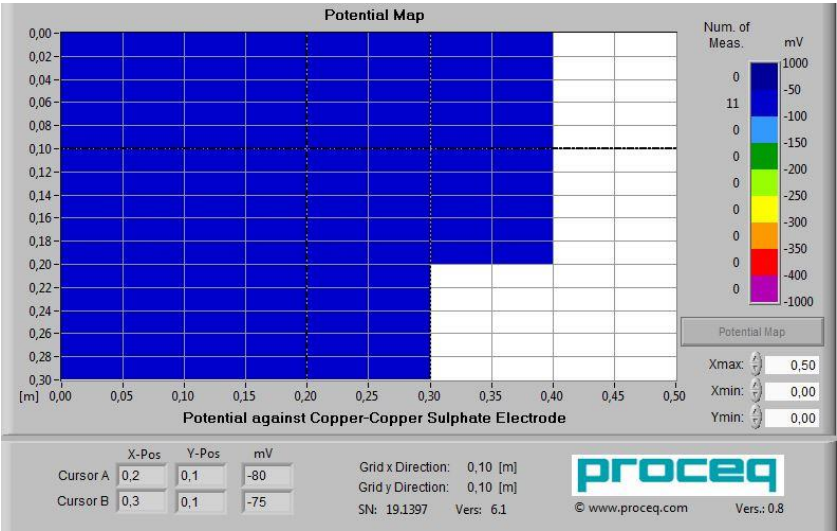




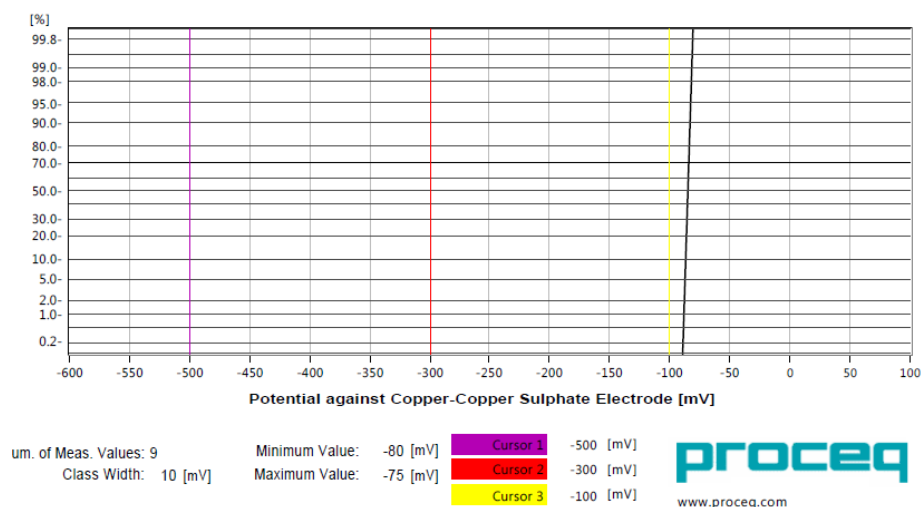
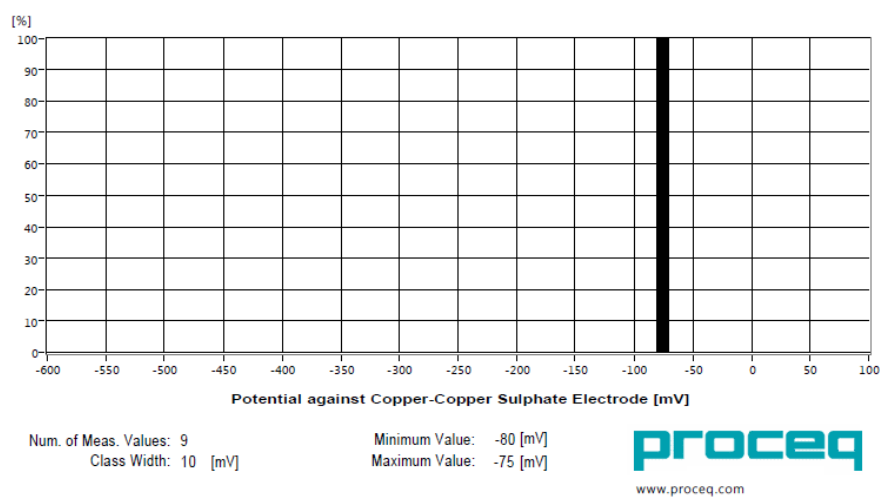
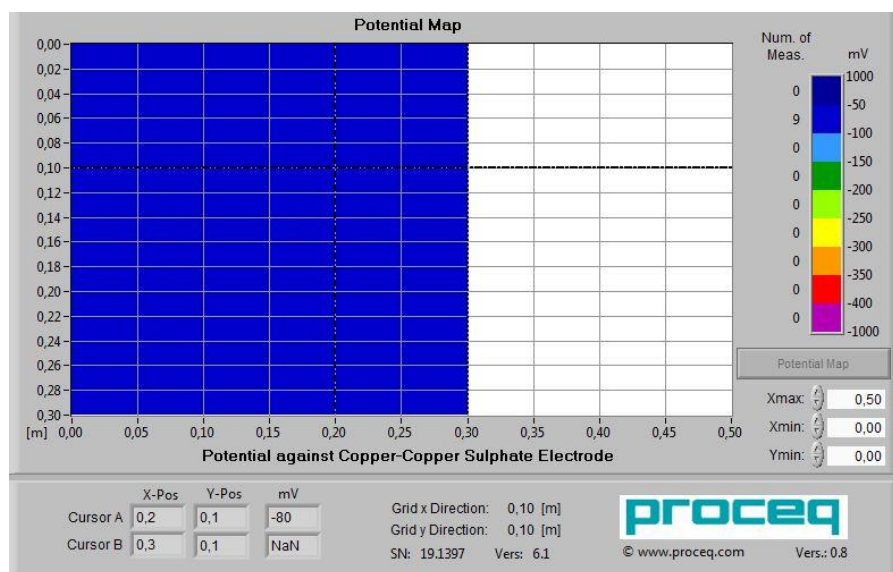
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

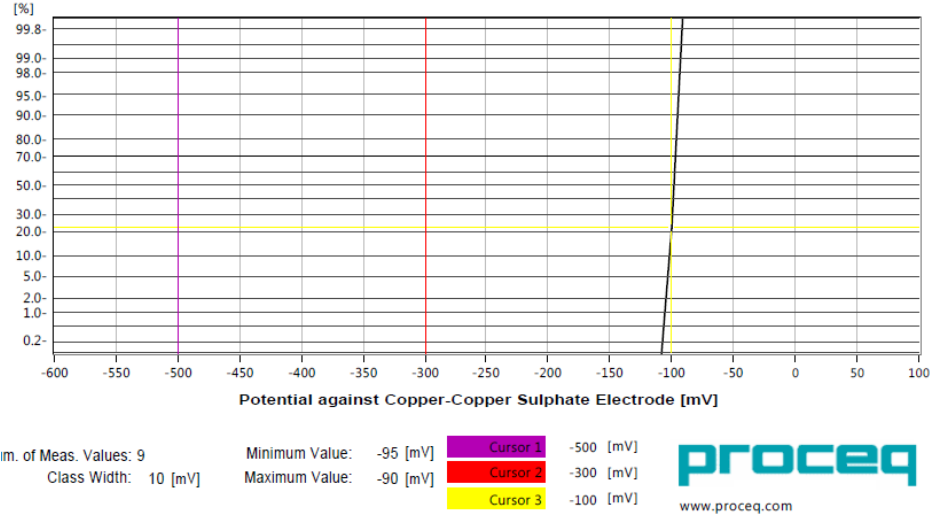
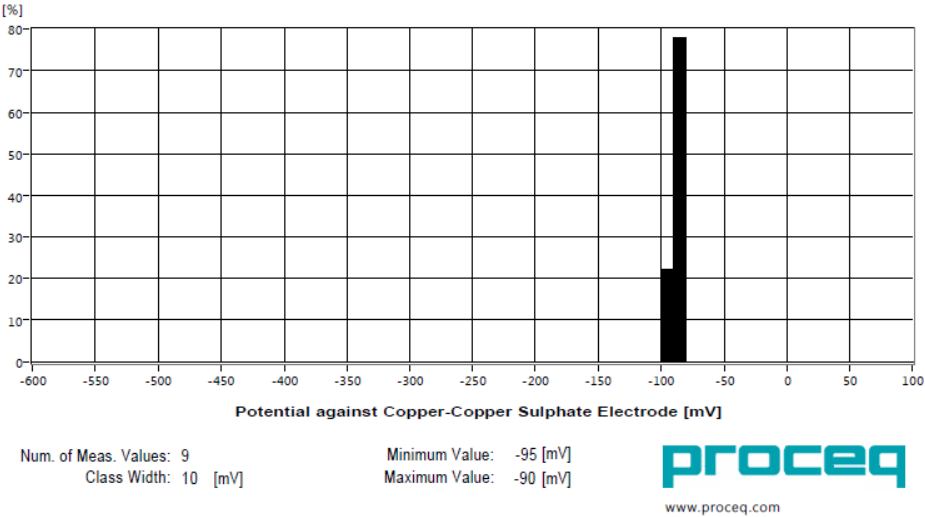
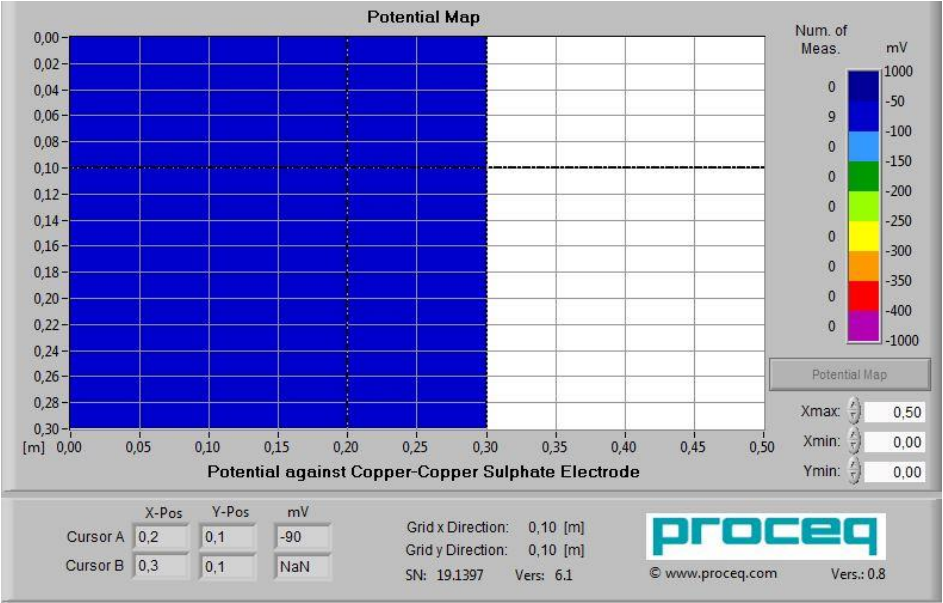


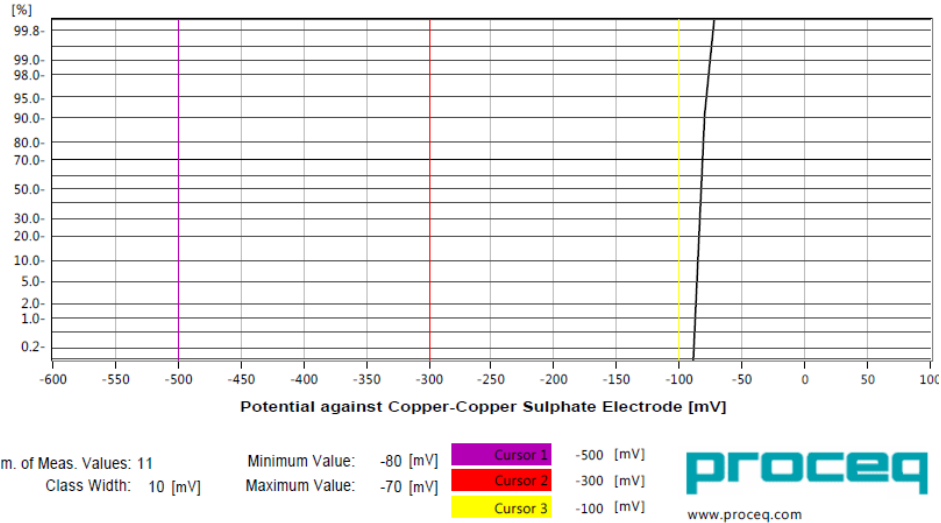
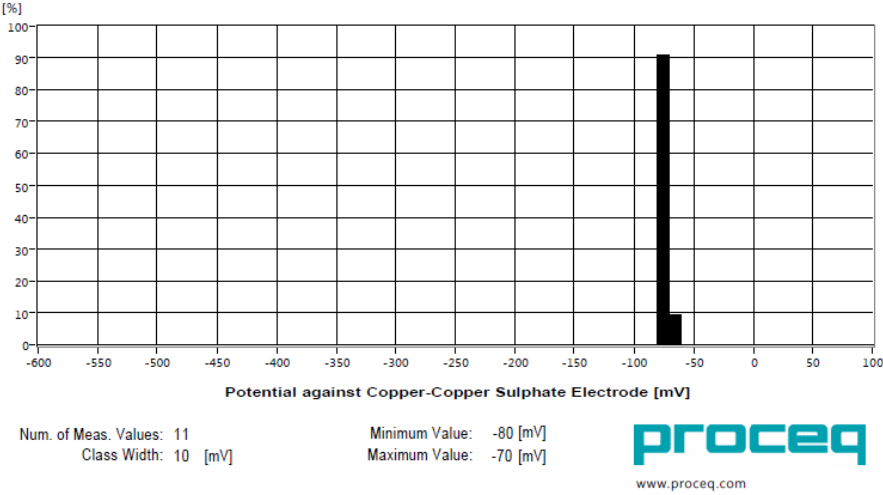
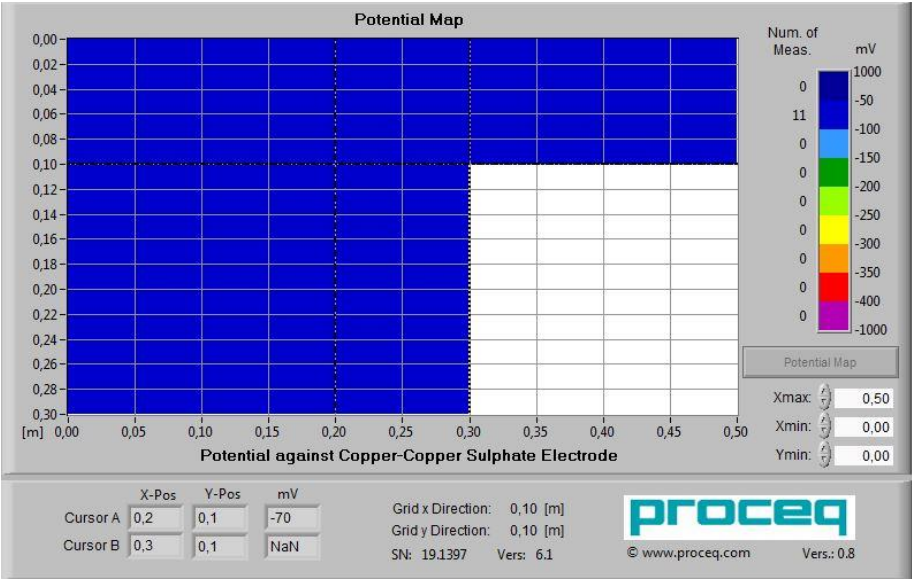
Ensayo 2:



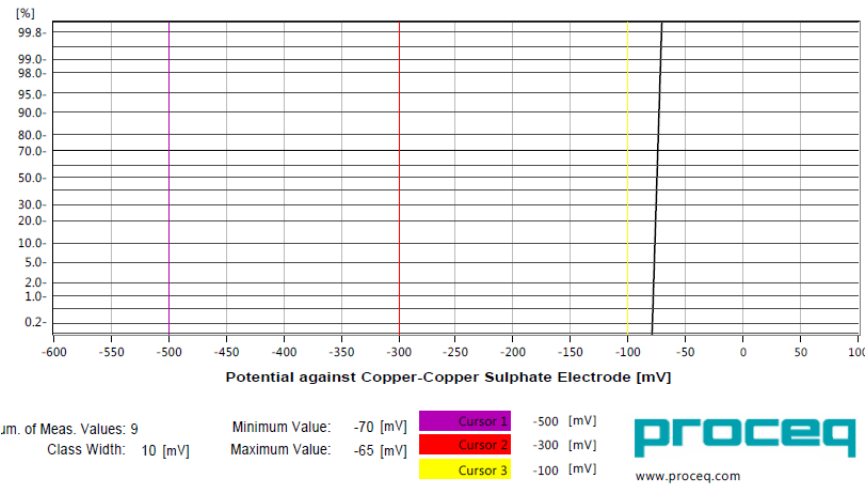
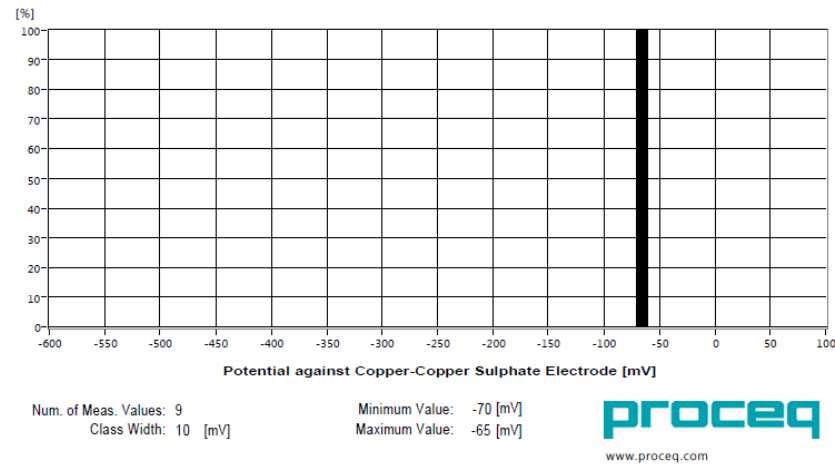
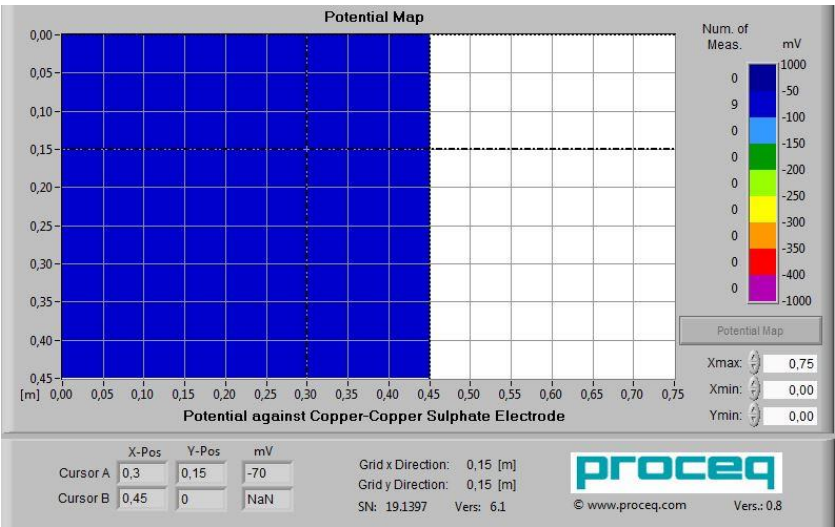
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL



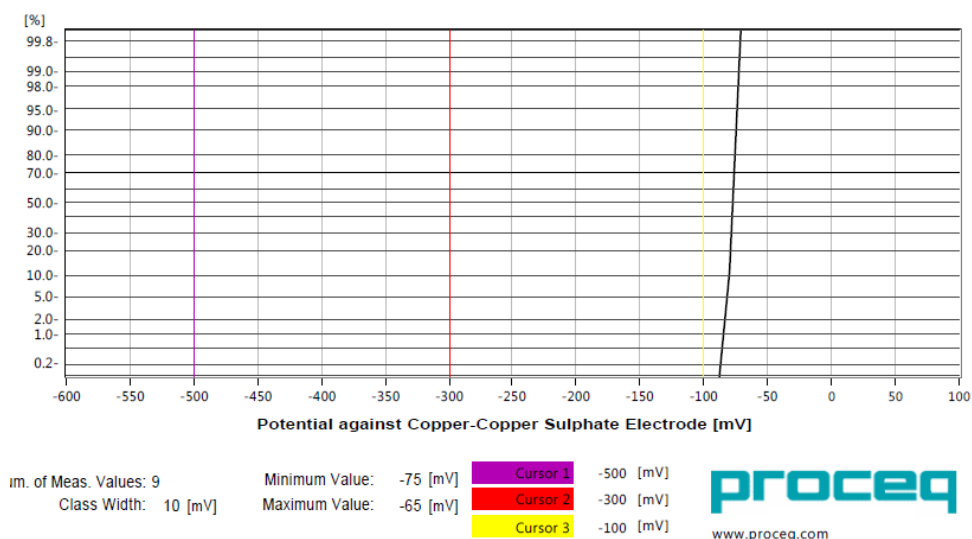
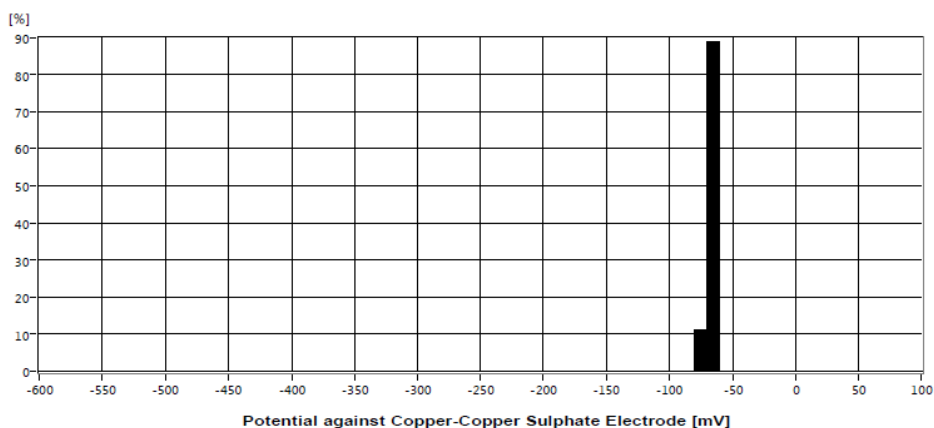
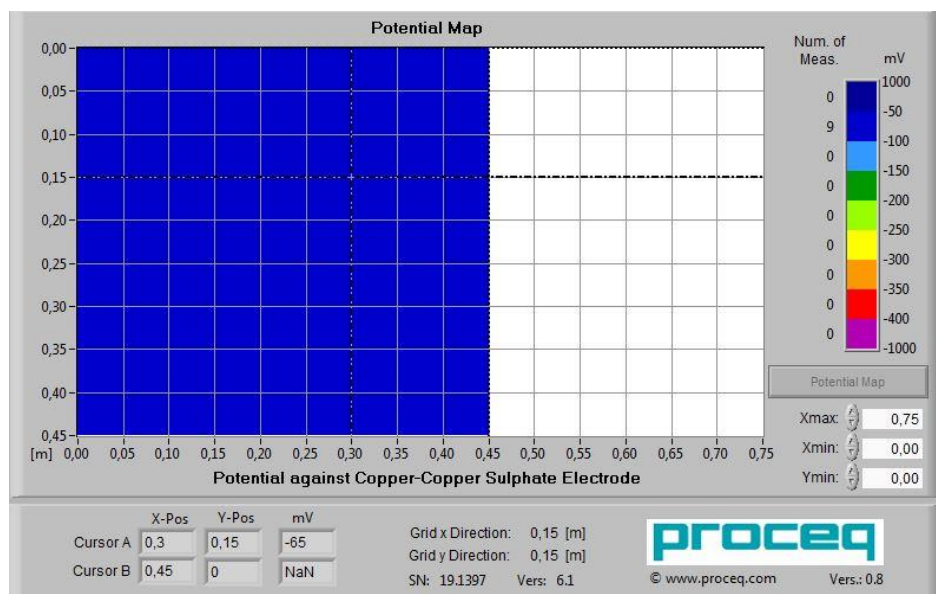


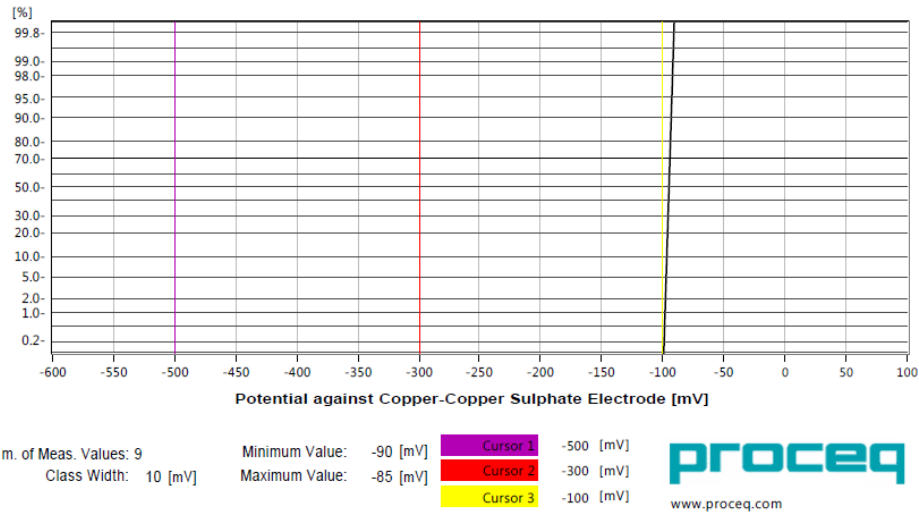
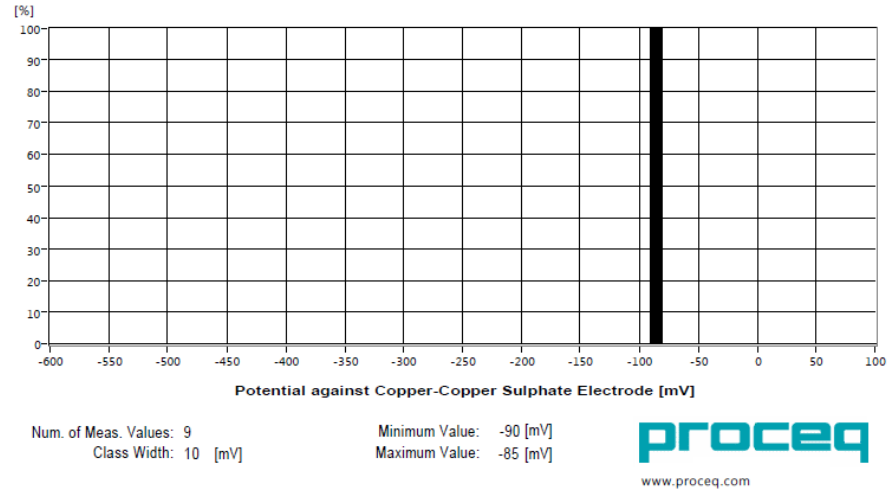
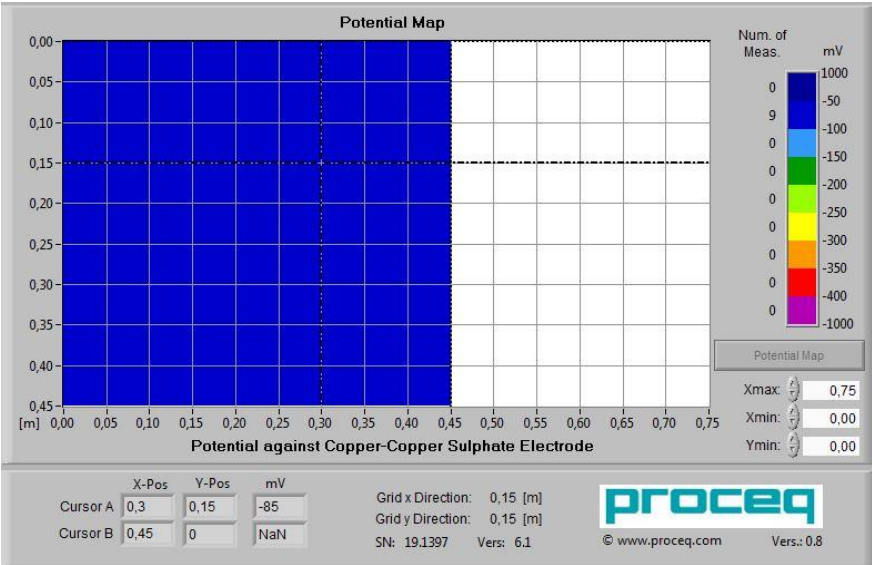


Ensayo 3:

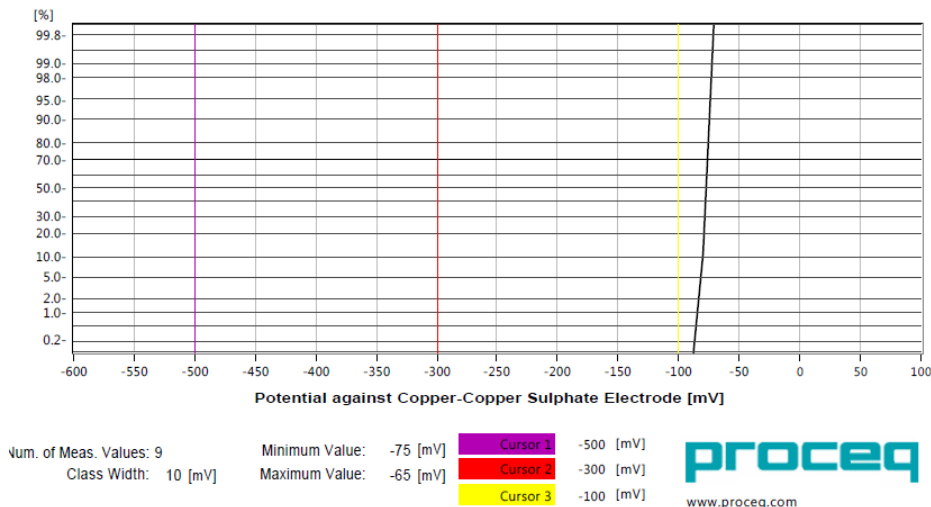
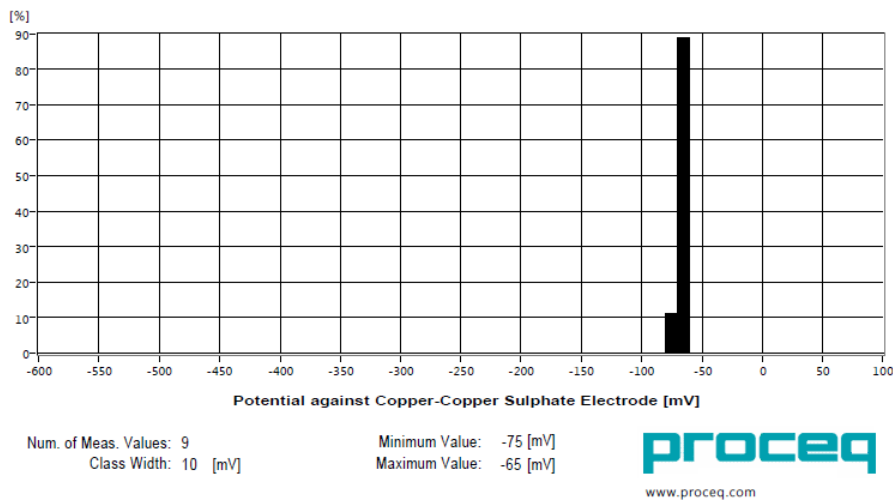
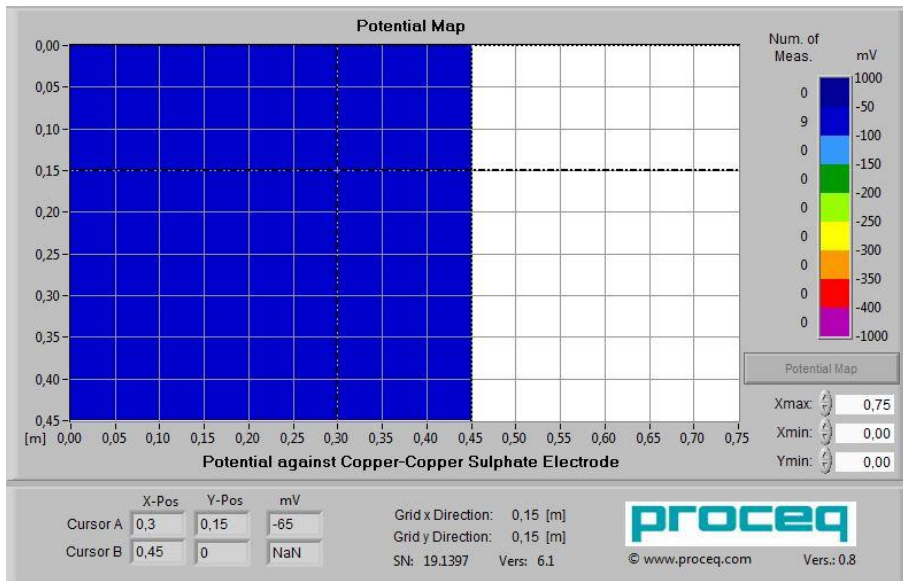


EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

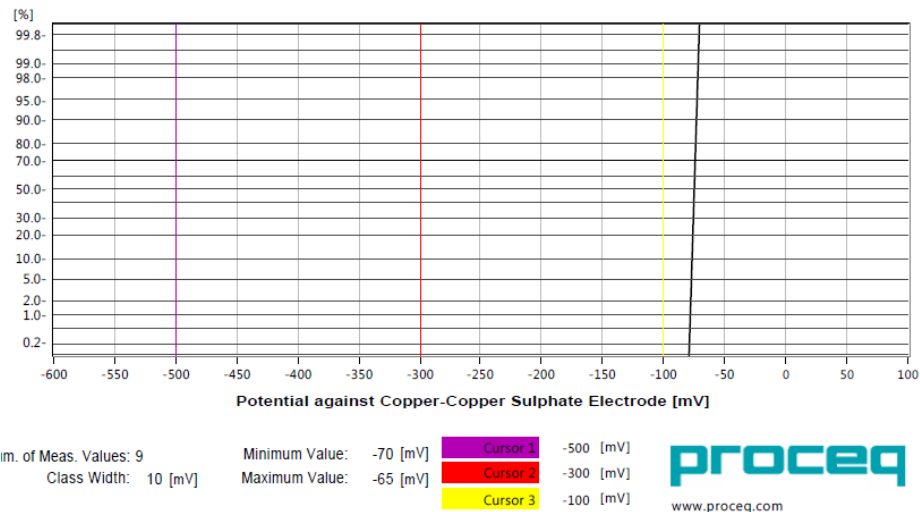
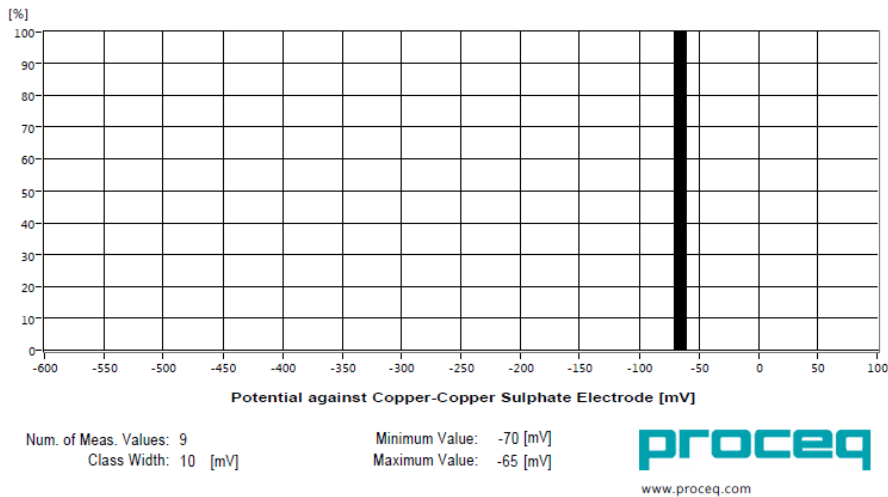
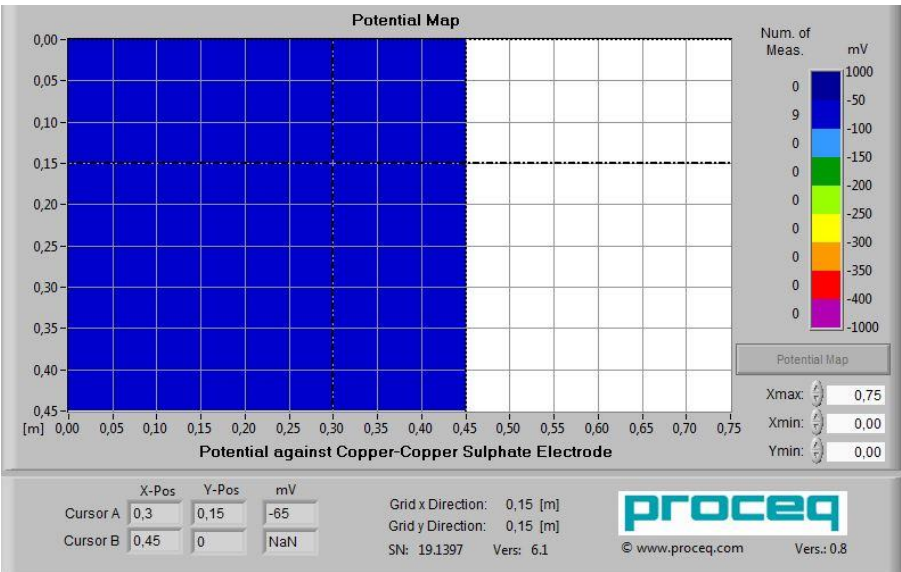




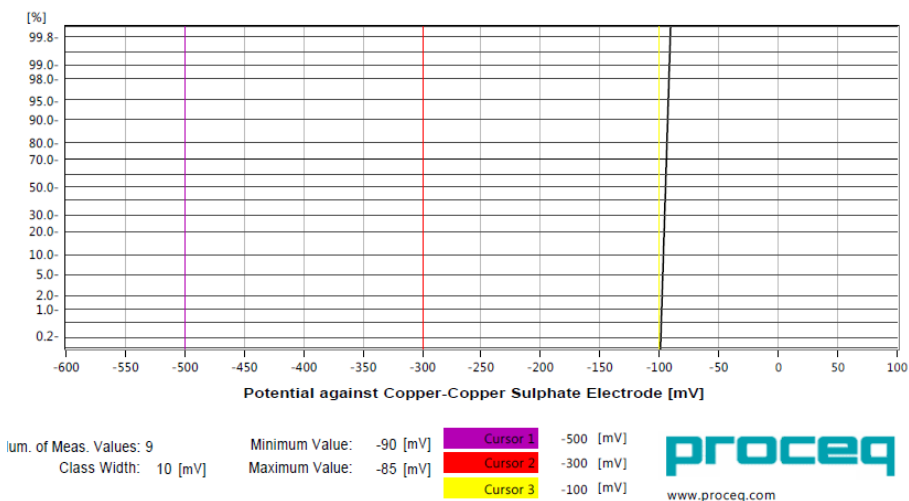
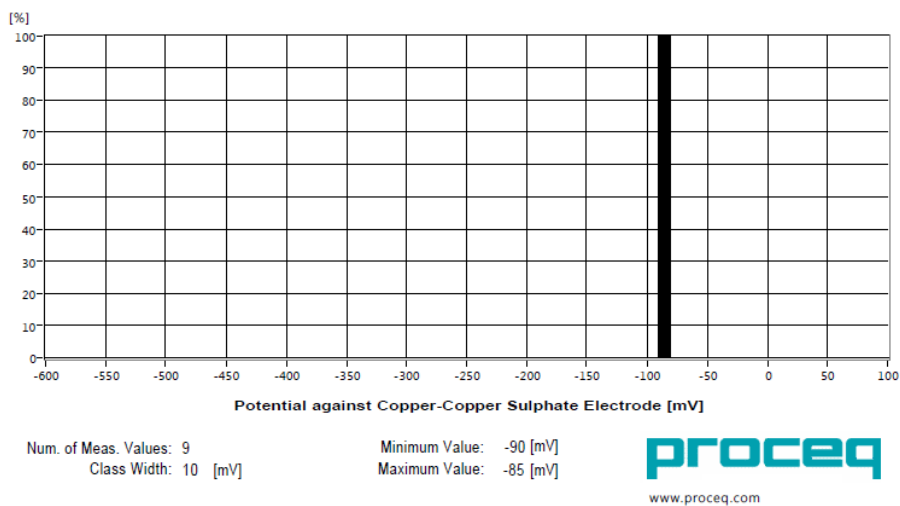
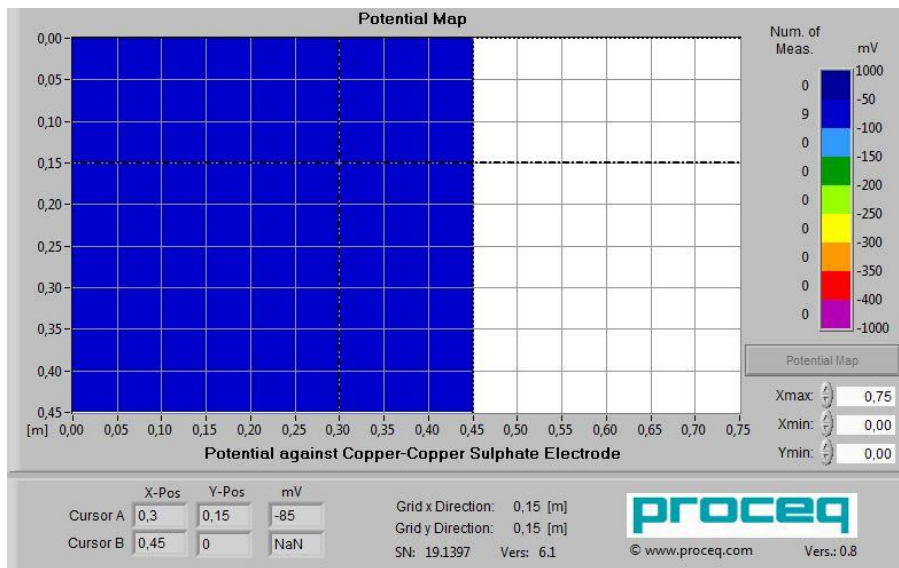
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

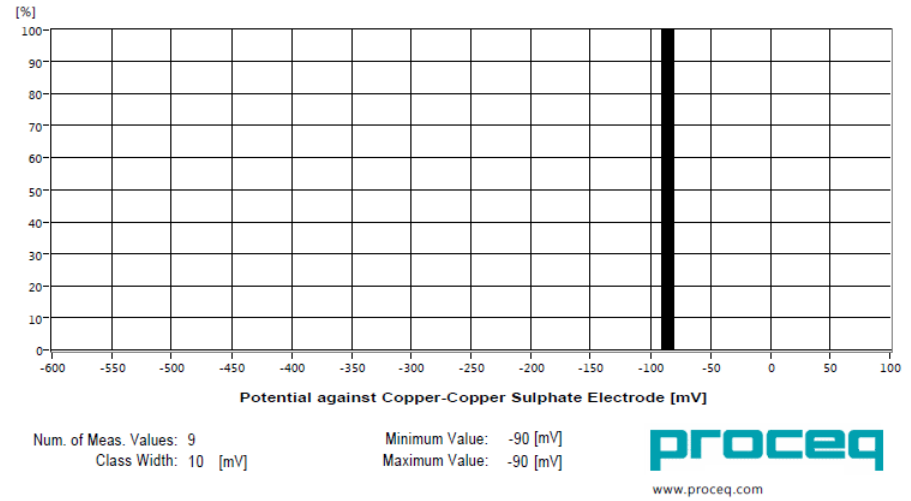
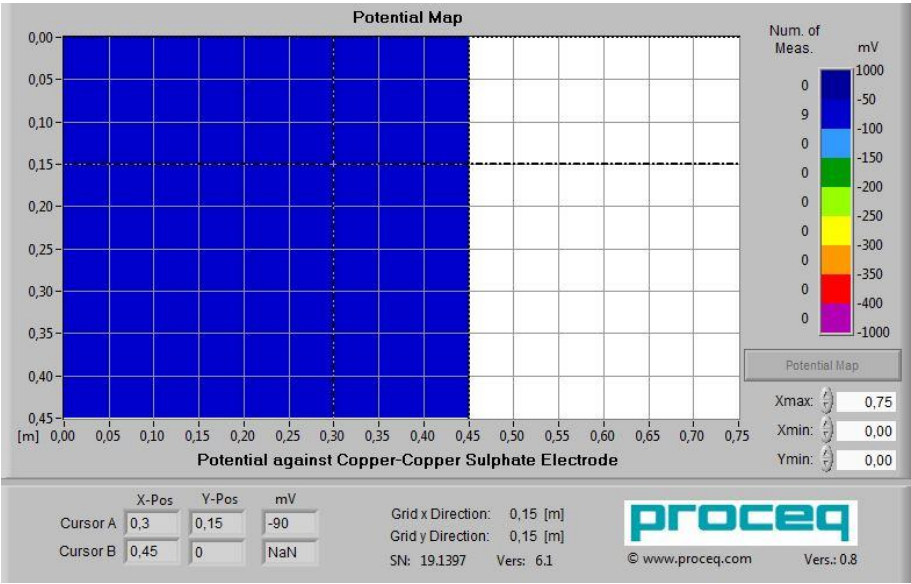


Ensayo 4:

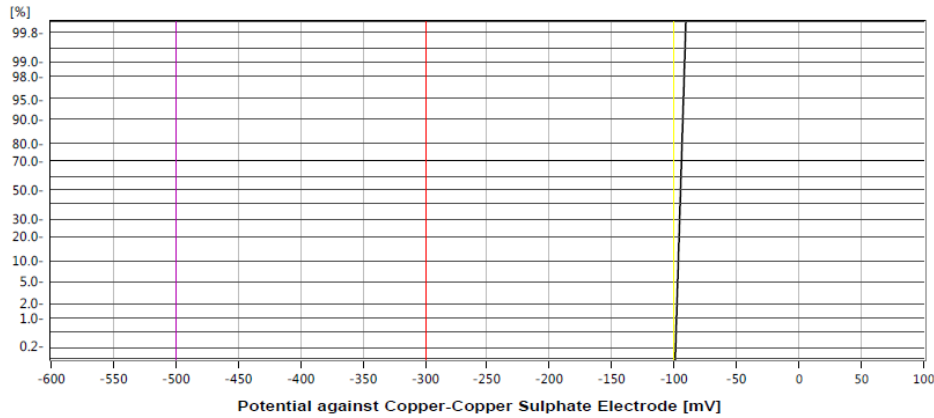


EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL





EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

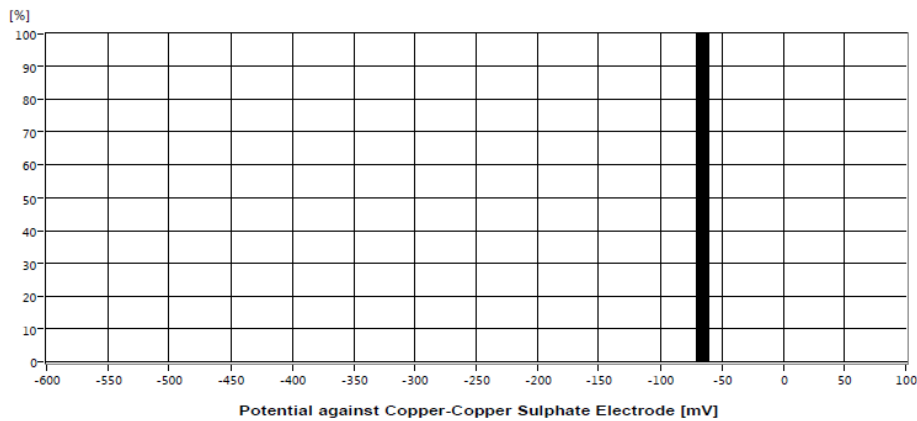
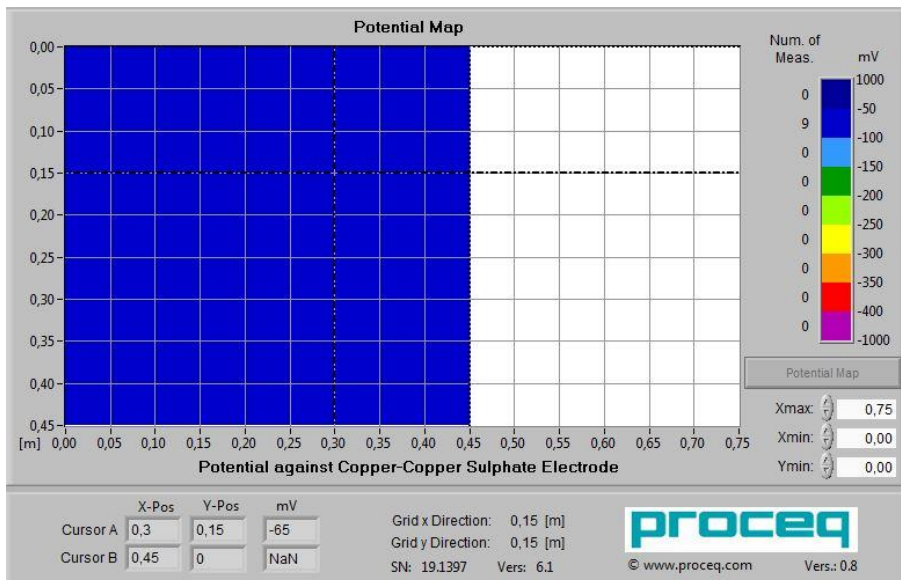


Num. of Meas. Values: 9
Class Width: 10 [mV]

Minimum Value: -90 [mV]
Maximum Value: -90 [mV]

Cursor 1: -500 [mV]
Cursor 2: -300 [mV]
Cursor 3: -100 [mV]

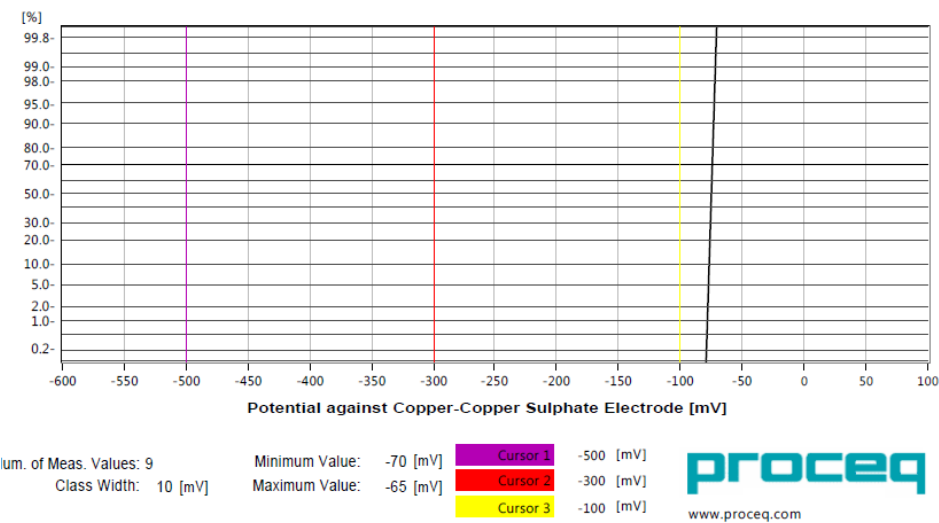
proceq
www.proceq.com



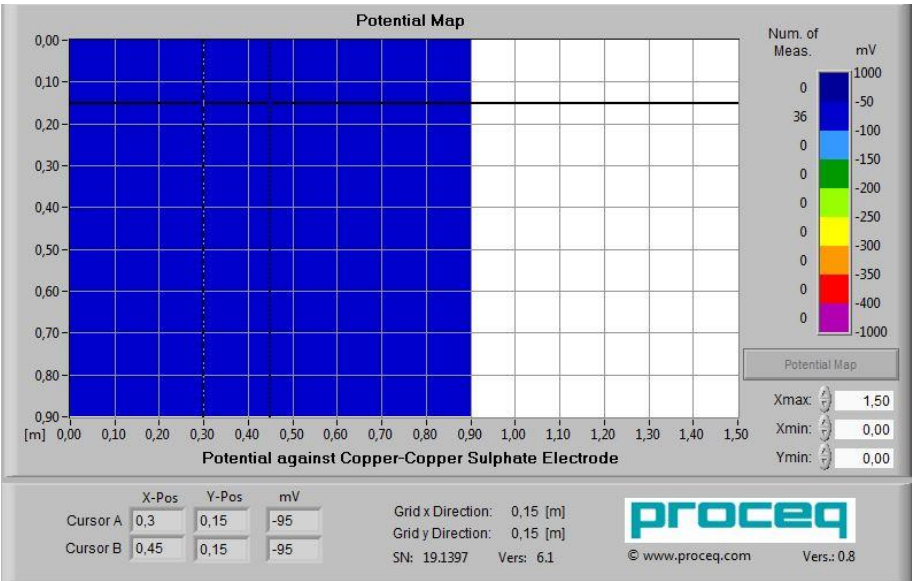
Num. of Meas. Values: 9
Class Width: 10 [mV]

Minimum Value: -70 [mV]
Maximum Value: -65 [mV]

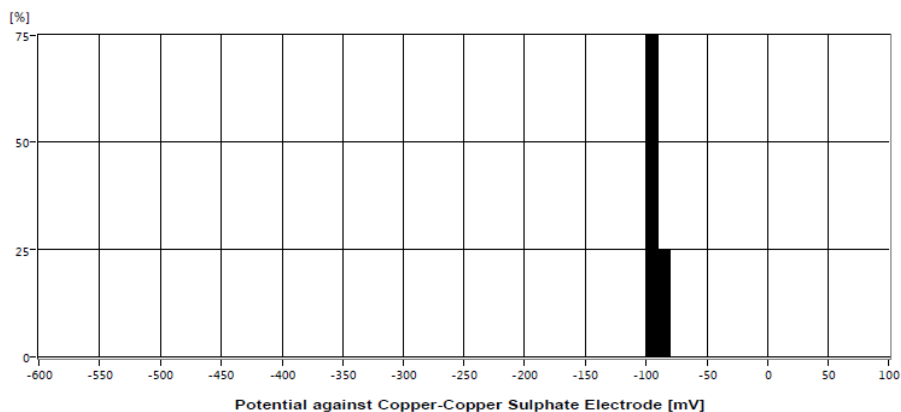
proceq
www.proceq.com



Ensayo 5:



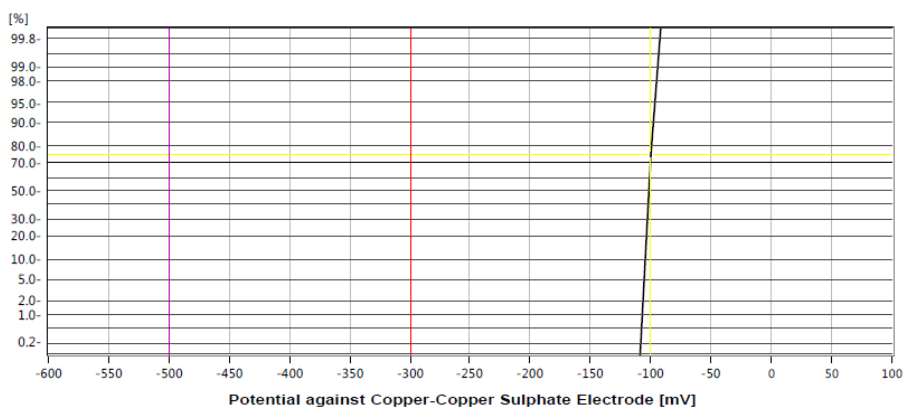
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL



Num. of Meas. Values: 36
Class Width: 10 [mV]

Minimum Value: -100 [mV]
Maximum Value: -90 [mV]

proceq
www.proceq.com

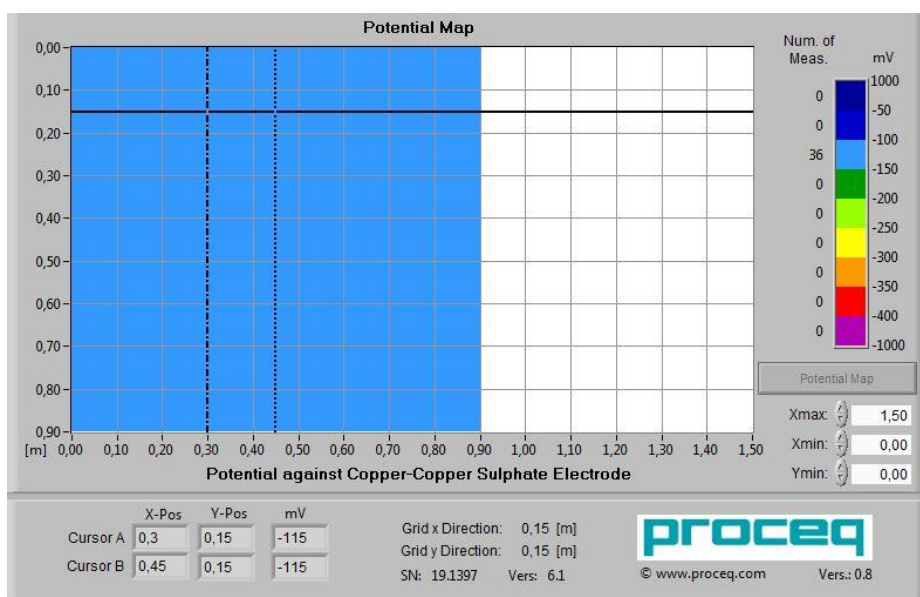


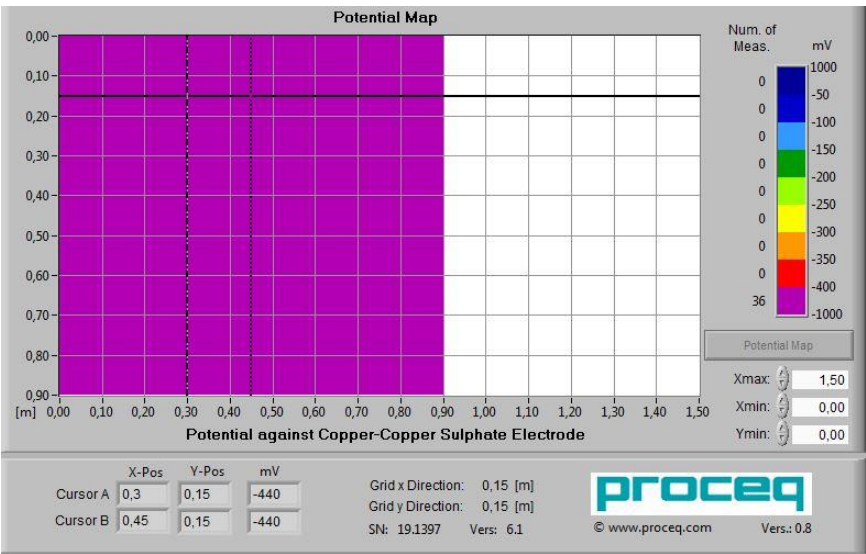
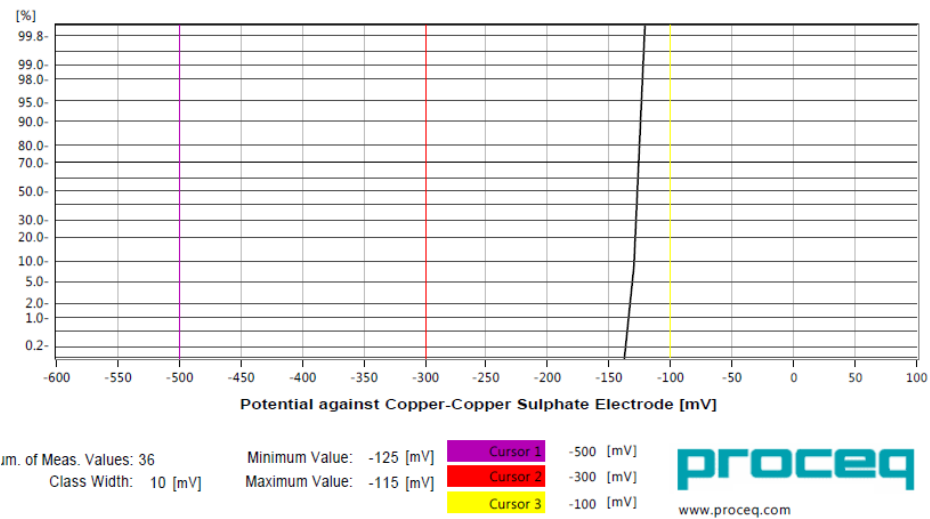
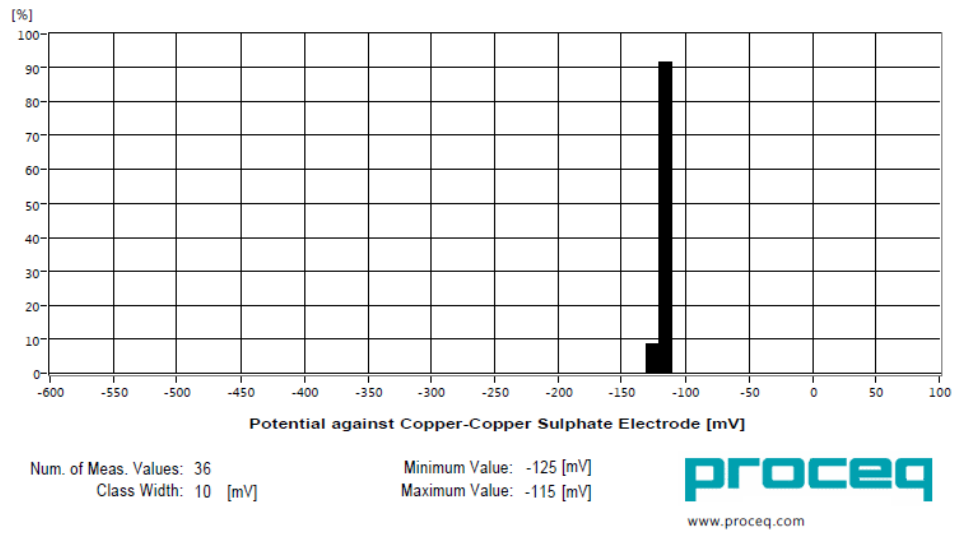
Num. of Meas. Values: 36
Class Width: 10 [mV]

Minimum Value: -100 [mV]
Maximum Value: -90 [mV]

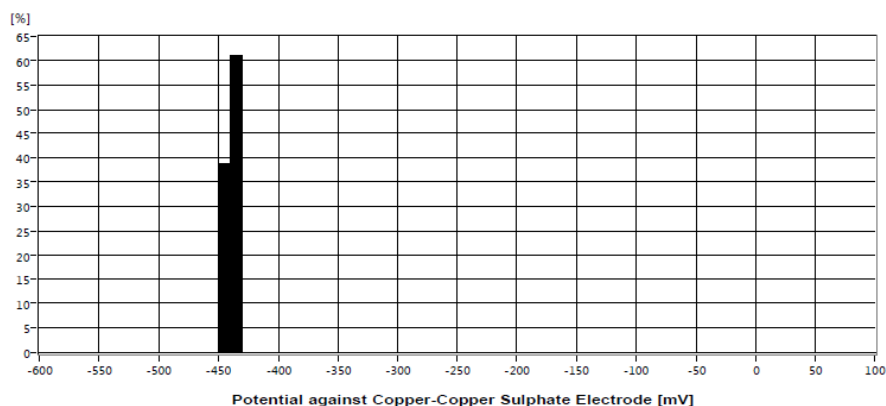
Cursor 1: -500 [mV]
Cursor 2: -300 [mV]
Cursor 3: -100 [mV]

proceq
www.proceq.com





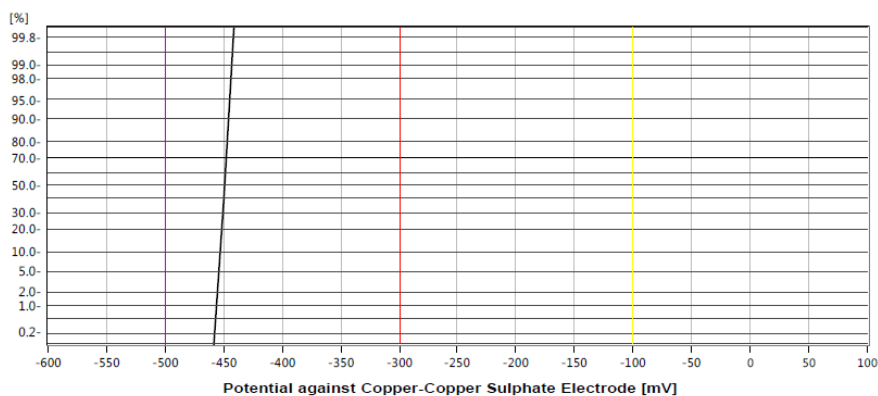
EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL



Num. of Meas. Values: 36
Class Width: 10 [mV]

Minimum Value: -450 [mV]
Maximum Value: -440 [mV]

proceq
www.proceq.com

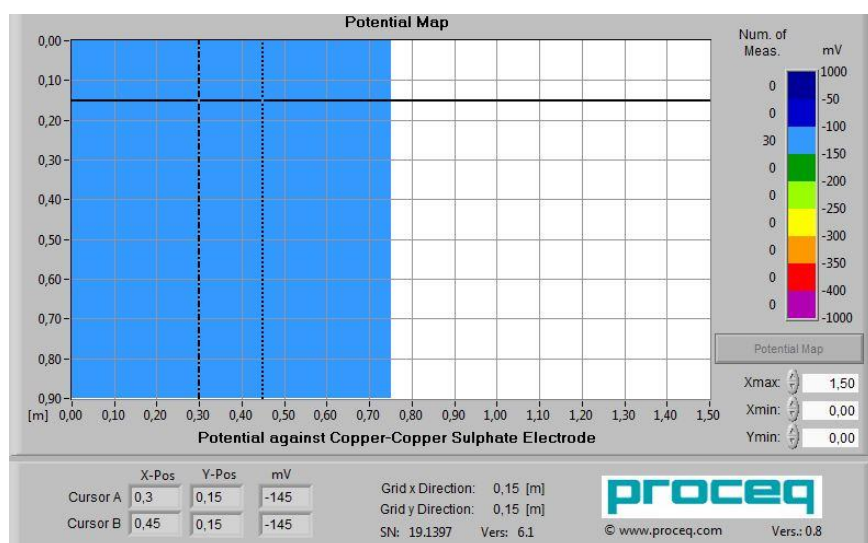


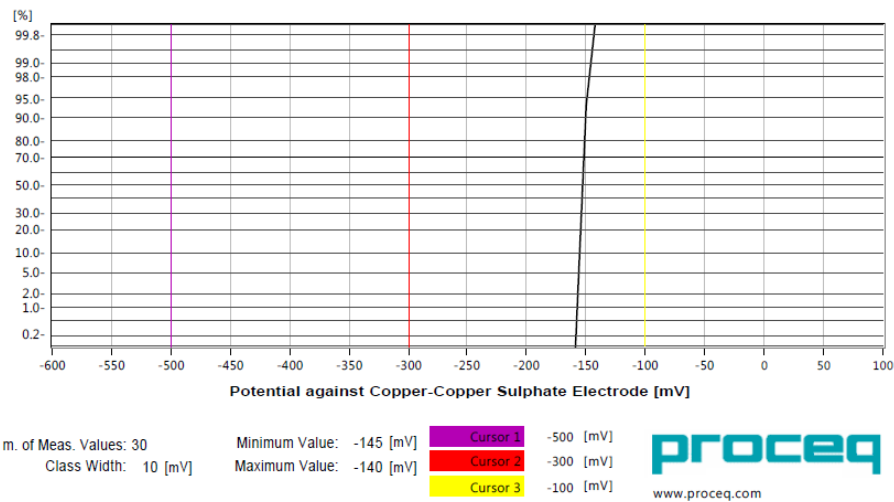
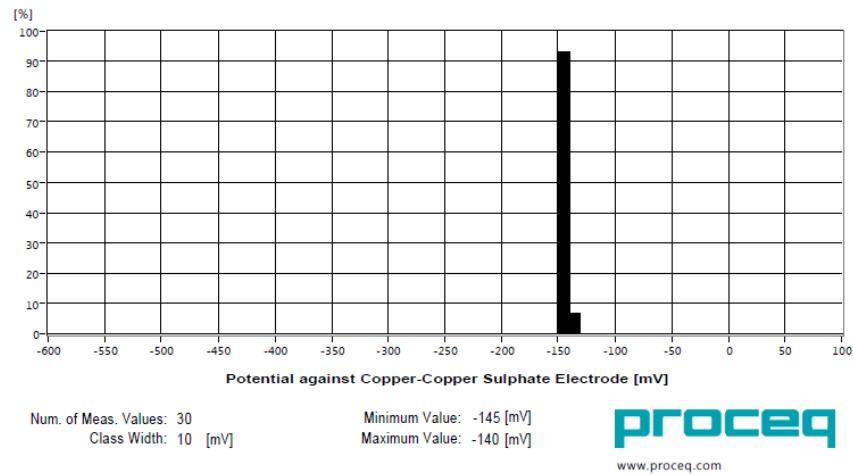
um. of Meas. Values: 36
Class Width: 10 [mV]

Minimum Value: -450 [mV]
Maximum Value: -440 [mV]

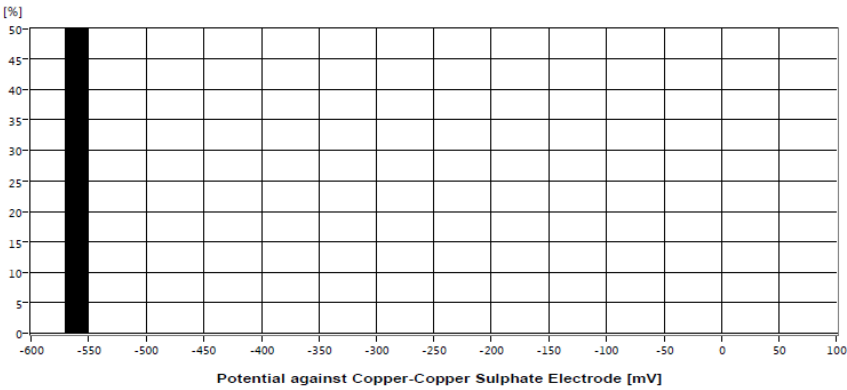
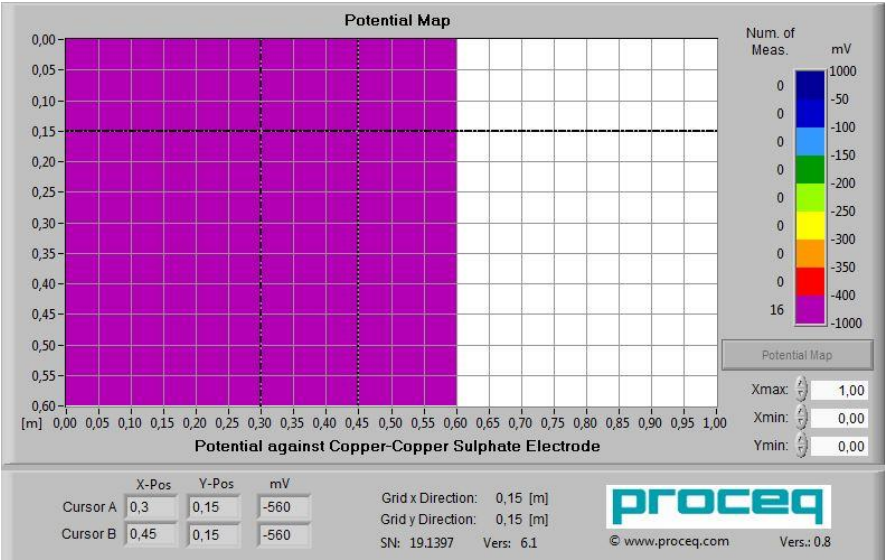
Cursor 1: -500 [mV]
Cursor 2: -300 [mV]
Cursor 3: -100 [mV]

proceq
www.proceq.com





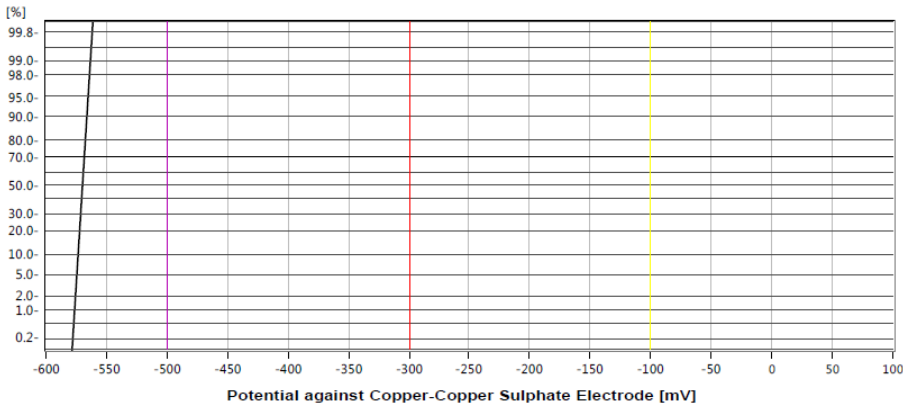
Ensayo 6:



Num. of Meas. Values: 16
Class Width: 10 [mV]

Minimum Value: -570 [mV]
Maximum Value: -555 [mV]

proceq
www.proceq.com

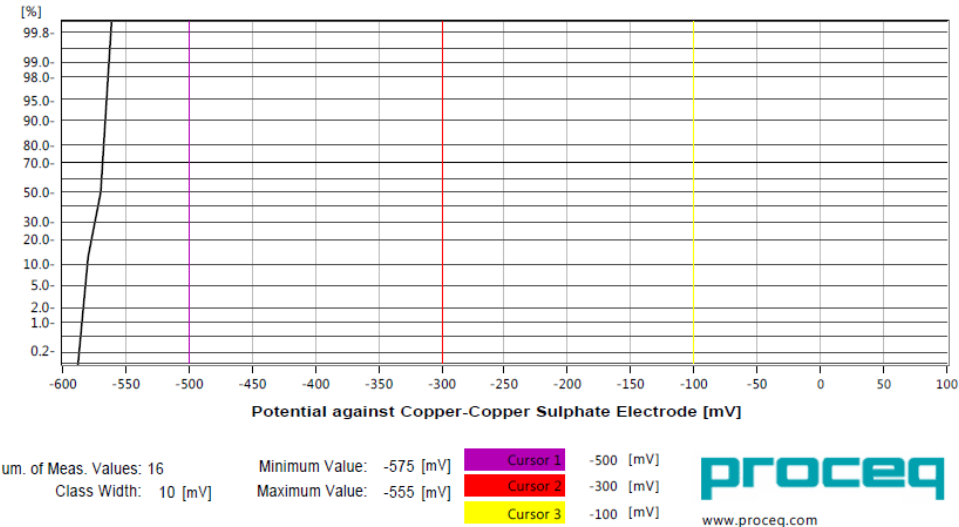
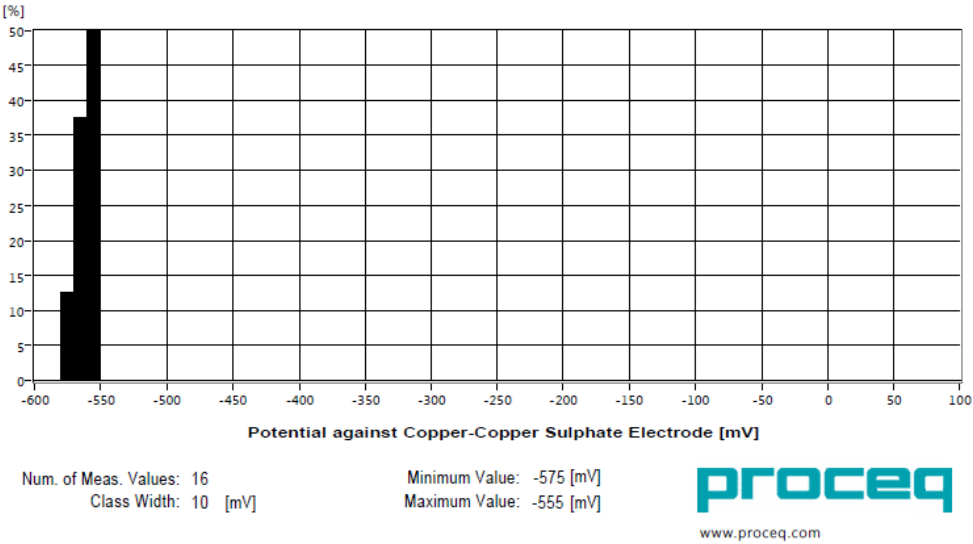
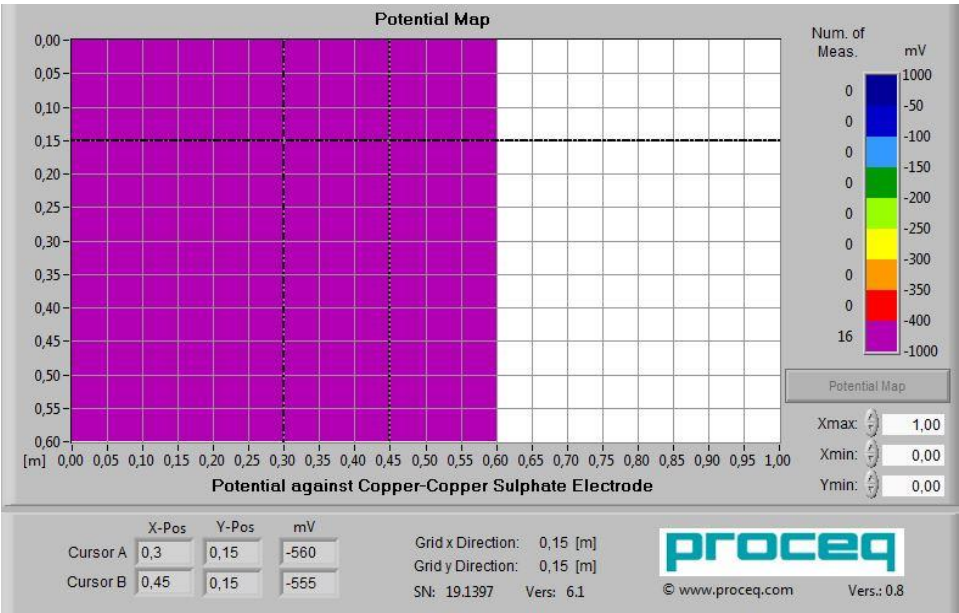


um. of Meas. Values: 16
Class Width: 10 [mV]

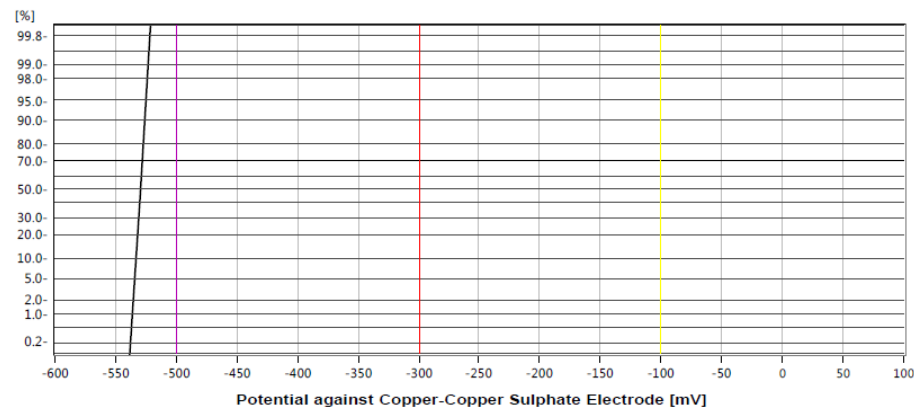
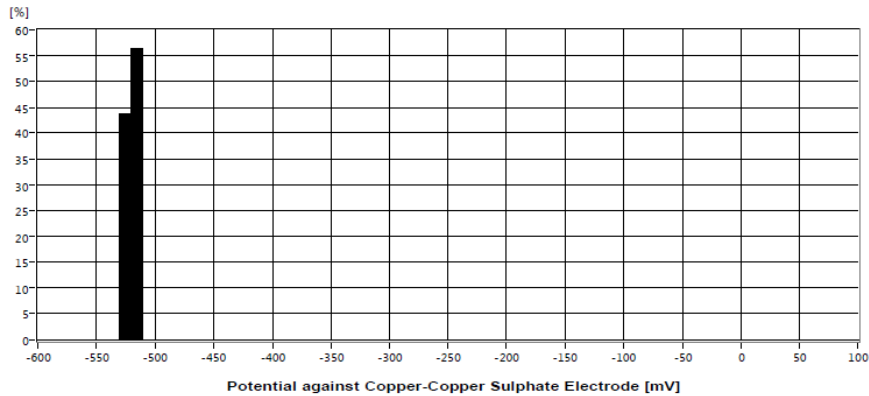
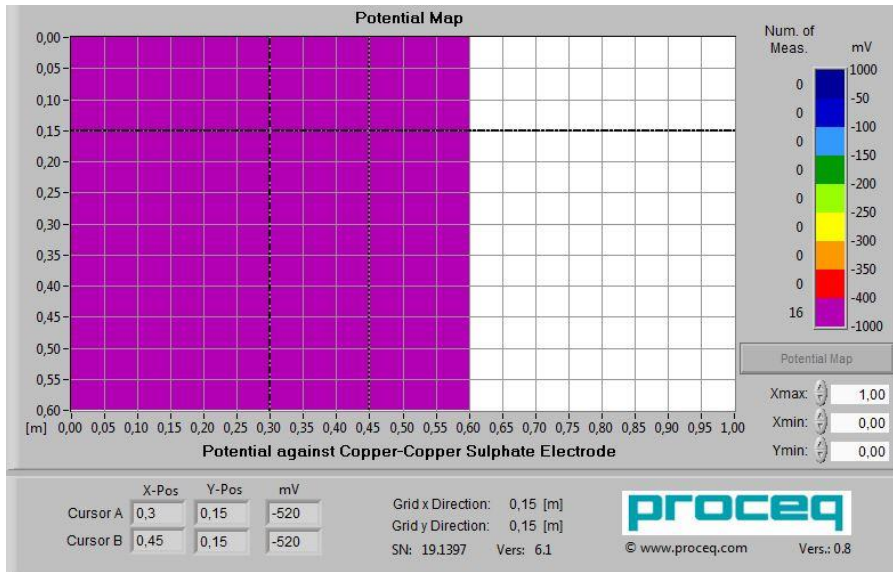
Minimum Value: -570 [mV]
Maximum Value: -555 [mV]

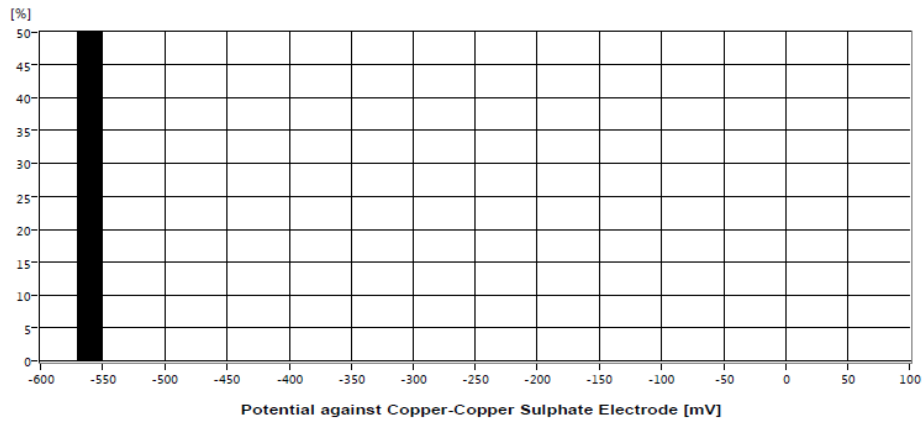
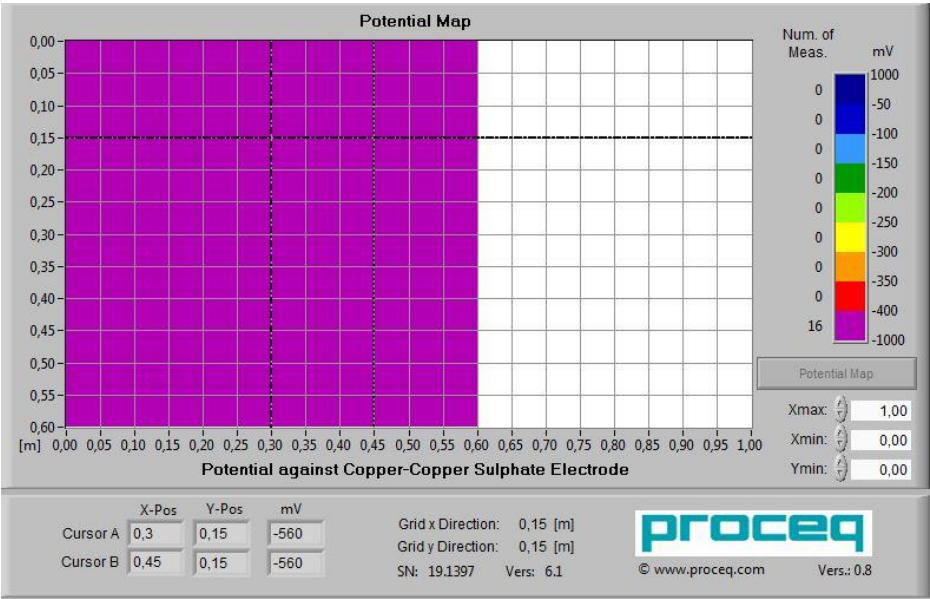
Cursor 1 -500 [mV]
Cursor 2 -300 [mV]
Cursor 3 -100 [mV]

proceq
www.proceq.com



EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN POR MEDIO DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO POTENCIAL

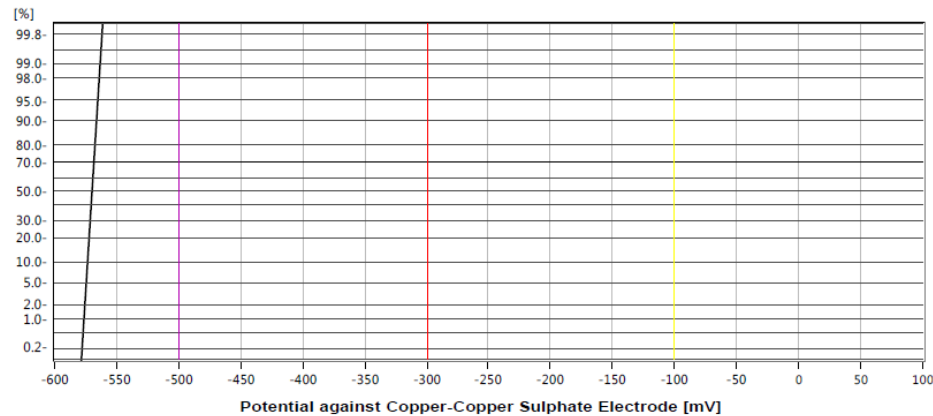




Num. of Meas. Values: 16
Class Width: 10 [mV]

Minimum Value: -570 [mV]
Maximum Value: -560 [mV]

proceq
www.proceq.com



Num. of Meas. Values: 16
Class Width: 10 [mV]

Minimum Value: -570 [mV]
Maximum Value: -560 [mV]

Cursor 1	-500 [mV]
Cursor 2	-300 [mV]
Cursor 3	-100 [mV]

proceq
www.proceq.com