



FIDUCOLDEX

Fiduciaria Colombiana de Comercio Exterior S. A.



FIDUCOLDEX

Fiduciaria Colombiana de Comercio Exterior S. A.

ANÁLISIS DE PATOLOGÍA DE CAMPO Y RESULTADOS DE LABORATORIO CENTRO DE CONVENCIONES

FIDUCOLDEX

**Barranquilla, 12 de septiembre de
2025**

“ESTUDIOS DE PATOLOGÍA Y DISEÑOS ESTRUCTURALES AL SISTEMA PERIMETRAL DE CONFINAMIENTO DE MATERIAL DE RELLENO DEL PREDIO DONDE SE ENCUENTRA EL CENTRO DE CONVENCIONES DE CARTAGENA (CCCI)”

ANÁLISIS DE PATOLOGÍA DE CAMPO Y RESULTADOS DE LABORATORIO

BARRANQUILA

12 DE SEPTIEMBRE DE 2025

FIDUCOLDEX

CONTENIDO

| | | |
|-------|--|-----|
| 1 | OBJETIVOS | 4 |
| 1.1 | OBJETIVO GENERAL | 4 |
| 1.2 | OBJETIVOS ESPECIFICOS | 5 |
| 2 | ANTECEDENTES Y ALCANCE | 5 |
| 3 | DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO | 6 |
| 3.1 | GENERALIDADES | 6 |
| 3.2 | ÁREA DE ESTUDIO | 6 |
| 3.3 | INSPECCIÓN VISUAL | 7 |
| 3.3.1 | SECTOR 7 | 7 |
| 3.3.2 | SECTOR 6 | 8 |
| 3.3.3 | SECTOR 5 | 11 |
| 3.3.4 | SECTOR 4 | 13 |
| 3.3.5 | SECTOR 3 | 15 |
| 3.3.6 | SECTOR 2 | 16 |
| 3.3.7 | SECTOR 1 | 18 |
| 4 | LOCALIZACIÓN DE ENSAYOS | 19 |
| 5 | NOMENCLATURA | 20 |
| 6 | SONDEOS | 23 |
| 7 | PRUEBA DE INTEGRIDAD DE PILOTES | 23 |
| 8 | EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS DE CONCRETO PARA ENSAYO DE RESISTENCIA Y DURABILIDAD | 23 |
| 9 | ESCANEÓ, LOCALIZACIÓN Y RECUBRIMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO | 44 |
| 9.1 | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ACERO DE REFUERZO | 51 |
| 9.2 | AUSCULTACIONES | 61 |
| 9.3 | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RECUBRIMIENTO | 80 |
| 10 | EXPLORACIÓN DE CIMENTACIONES | 82 |
| 11 | ENSAYOS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU) | 82 |
| 11.1 | RESULTADOS DE VPU | 88 |
| 12 | ENSAYO DE POTENCIAL DE CORROSIÓN | 92 |
| 12.1 | SECTOR 7 | 95 |
| 12.2 | SECTOR 6 | 97 |
| 12.3 | SECTOR 5 | 117 |
| 12.4 | SECTOR 4 | 123 |
| 12.5 | SECTOR 3 | 133 |
| 12.6 | SECTOR 2 | 135 |
| 12.7 | SECTOR 1 | 138 |
| 13 | ENSAYO DE CARBONATACIÓN | 144 |
| 14 | ANÁLISIS DE RESULTADO DE LABORATORIO | 159 |
| 14.1 | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN | 160 |
| 14.2 | CONTENIDO DE CEMENTO | 163 |
| 14.3 | CONTENIDO DE CLORUROS | 164 |
| 14.4 | CONTENIDO DE SULFATOS | 179 |
| 14.5 | PETROGRAFÍA | 184 |
| 15 | TIEMPO DE INICIACIÓN, PROPAGACIÓN Y VIDA ÚTIL | 195 |
| 16 | DIAGNÓSTICO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN SECTOR 2 | 200 |
| 17 | RESUMEN | 202 |
| 18 | CONCLUSIONES | 207 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 210 |
| | ANEXOS | 210 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Sectores de estudio y su extensión | 7 |
| Tabla 2. Tipo y cantidad de ensayos ejecutados..... | 19 |
| Tabla 3. Nomenclatura de ensayos | 22 |
| Tabla 4. Normativas – procedimiento de extracción de núcleos de concreto..... | 24 |
| Tabla 5. Extracciones en el sector 7 para Núcleos de resistencia | 27 |
| Tabla 6. Extracciones en el sector 6 para Núcleos de resistencia | 28 |
| Tabla 7. Extracciones en el sector 5 para Núcleos de resistencia | 31 |
| Tabla 8. Extracciones en el sector 4 para Núcleos de resistencia | 32 |
| Tabla 9. Extracciones en el sector 3 para Núcleos de resistencia | 33 |
| Tabla 10. Extracciones en el sector 2 para Núcleos de resistencia | 34 |
| Tabla 11. Extracciones en el sector 1 para Núcleos de resistencia | 35 |
| Tabla 12. Extracciones en el sector 7 para Núcleos de durabilidad..... | 36 |
| Tabla 13. Extracciones en el sector 6 para Núcleos de durabilidad..... | 37 |
| Tabla 14. Extracciones en el sector 5 para Núcleos de durabilidad..... | 40 |
| Tabla 15. Extracciones en el sector 4 para Núcleos de durabilidad..... | 41 |
| Tabla 16. Extracciones en el sector 3 para Núcleos de durabilidad..... | 42 |
| Tabla 17. Extracciones en el sector 2 para Núcleos de durabilidad..... | 43 |
| Tabla 18. Extracciones en el sector 1 para Núcleos de durabilidad..... | 44 |
| Tabla 19. Datos técnicos del ferrosaner PS 300..... | 45 |
| Tabla 20. Resultados y análisis de acero de refuerzo | 51 |
| Tabla 21. Resultados y análisis de recubrimientos en auscultaciones | 63 |
| Tabla 22. Calidad del concreto con referencia al VPU..... | 89 |
| Tabla 23. Resultados de potencial de corrosión | 141 |
| Tabla 24. Resultados de ensayos de carbonatación | 145 |
| Tabla 25. Parámetros físicos de cilindros ensayados a resistencia a compresión..... | 161 |
| Tabla 26. Resultados de contenido de cemento | 163 |
| Tabla 27. Resultados de cloruros..... | 166 |
| Tabla 28. Umbrales de cloruro para cada sector por peso de concreto..... | 169 |
| Tabla 29. Coeficientes de difusión y concentración en la superficie | 176 |
| Tabla 30. Resultados de contenidos de sulfatos agrupados por perfil | 180 |
| Tabla 31. Porcentaje de vacíos | 191 |
| Tabla 32. Descripción de grietas y microgrietas en los especímenes | 191 |
| Tabla 33. Reporte de microfotografías por sector y muestra..... | 192 |
| Tabla 34. Estimaciones de tiempo de vida útil residual por muestras | 197 |
| Tabla 35. Resumen de ensayos inspección visual, suelos, prueba de integridad y acero de refuerzo encontrado | 202 |
| Tabla 36. Resumen de resultados exploraciones en cimentación, VPU, potencial de corrosión y carbonatación | 203 |
| Tabla 37. Resúmenes resultados f'c, contenido de cemento, contenido de cloruros y sulfatos..... | 204 |
| Tabla 38. Resumen resultados petrografía, vida útil y recomendaciones | 205 |

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar integralmente el estado actual de la estructura perimetral del Centro de Convenciones “Cartagena de Indias”, mediante la ejecución de **ensayos destructivos y no destructivos**, inspecciones especializadas y levantamientos técnicos, con el fin de determinar la calidad y el nivel de deterioro de los materiales, identificar las patologías presentes y establecer insumos técnicos para

el análisis estructural, la modelación y el diseño de las medidas de reforzamiento requeridas para garantizar la estabilidad y durabilidad del sistema de confinamiento.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Documentar mediante inspección visual y fotográfica el estado de los 847,6 m lineales de la estructura perimetral.
- Ejecutar ensayos destructivos y no destructivos (carbonatación, cloruros, sulfatos, ultrasonido, corrosión, integridad de pilotes, ferroescaner y auscultaciones).
- Realizar sondeos y estudios de suelos para evaluar las condiciones de cimentación.
- Levantar la geometría y configuración del sistema estructural con la información de los apiques.
- Emitir conclusiones del estado de los sectores como insumo para diseños y reforzamientos.

2 ANTECEDENTES Y ALCANCE

El Centro de Convenciones "Cartagena de Indias" se encuentra ubicado en el barrio Getsemaní, colindante con la bahía de Cartagena. La estructura perimetral que actúa como confinamiento del material de relleno del predio ha evidenciado signos de deterioro avanzados, tales como grietas, desprendimientos del concreto, exposición y corrosión del acero de refuerzo, y en algunos sectores, socavaciones activas que comprometen la estabilidad estructural. Del sistema de confinamiento se conoce que se realizaron trabajos de tablestacado metálico reemplazado en 2022, tras el colapso de un tramo de 40 metros en el Sector 2. Este escenario llevó a la contratación de estudios especializados que incluyen inspección submarina detallada, levantamientos batimétricos y topográficos, y diagnósticos estructurales que evidencien la condición actual de los 847.6 metros lineales de estructura perimetral.

Dentro del alcance del estudio de patología y diseño estructural se incluyen las siguientes actividades:

- a) **Inspección visual y fotográfica** de los 847.59 m lineales de la estructura perimetral, identificando daños visibles y condiciones de deterioro.
- b) **Ensayos de patología estructural**, tanto destructivos como no destructivos, incluyendo:
 - ✓ Carbonatación
 - ✓ Perfil de cloruros y sulfatos
 - ✓ Ultrasonido
 - ✓ Potencial de corrosión
 - ✓ Ensayos de integridad de pilotes
 - ✓ Ferroescaner
 - ✓ Prueba de integridad de pilotes
 - ✓ Auscultaciones en sitio
 - ✓ Protección catódica tablaestacado
- c) **Sondeos** para estudios de suelos.
- d) **Modelación estructural y diseño de intervenciones estructurales** que incluye entrega de presupuesto de los trabajos de intervención.

3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

3.1 GENERALIDADES

PROYECTO: Estudio de patología de la estructura perimetral del centro de convenciones.

LOCALIZACIÓN: Centro de convenciones Cartagena de Indias, Bolívar. Coordenadas: 10°25'14"N 75°32'56"W (ver **Imagen 1**).

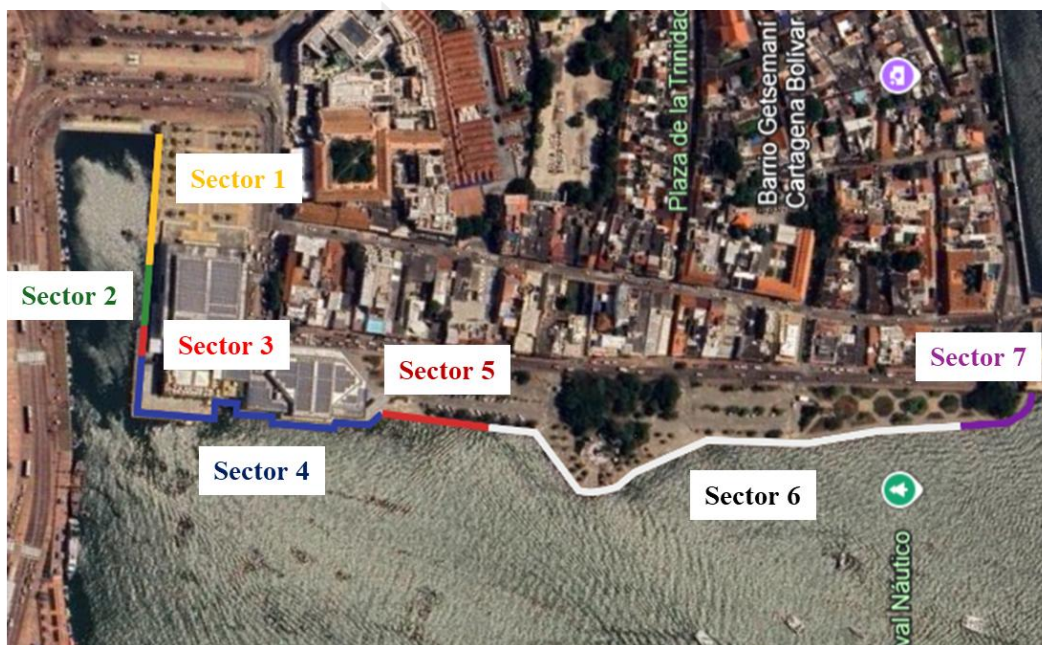


Imagen 1. Localización de la estructura perimetral.

3.2 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde al perímetro estructural del predio donde se localiza el Centro de Convenciones “Cartagena de Indias”, ubicado en el barrio Getsemaní de Cartagena, delimitado por las calles El Camellón de los Mártires, Avenida del Mercado y Calle del Arsenal. Este predio colinda directamente con el cuerpo de agua de la Bahía de las Ánimas, dentro de la Bahía de Cartagena. La estructura perimetral de confinamiento inspeccionada tiene una longitud total de **847.6 metros lineales**, dispuesta de forma continua alrededor del borde costero del predio. En dicha franja se desarrollan actividades marítimas de alta frecuencia, incluyendo tránsito de embarcaciones turísticas, transporte fluvial, actividades deportivas, dragados, y operaciones portuarias menores.

La información suministrada contiene un levantamiento batimétrico que se realizó sobre una franja marginal de **5 metros de ancho**, paralela al eje longitudinal de la estructura perimetral, tanto en el lecho marino como en la superficie terrestre adyacente, evidenciando las profundidades a lo largo de la estructura perimetral en estudio. Este entorno marítimo impone condiciones agresivas sobre los materiales que conforman la estructura debido a factores como salinidad, oleaje, organismos marinos adheridos y variaciones del nivel del mar, que favorecen el transporte de cloruros y sulfatos en la estructura de concreto.

La inspección e intervención técnica considera las diversas configuraciones estructurales, que varían por tramos según el tipo de elemento presente (cimientos poco definidos, pilotes redondos, pilotes de sección cuadrada de 40 o 70 cm, y tablestacado metálico), distribuidos a lo largo de los 7 sectores en los que ha sido segmentada la estructura para efectos de diagnóstico e intervención como se muestra en la **Imagen 1**. En la **Tabla 1**, se indican los sectores del 1 al 7 y su respectiva longitud.

Tabla 1. Sectores de estudio y su extensión

| Sectores | Extensión (m) |
|----------|---------------|
| 1 | 87 |
| 2 | 40 |
| 3 | 20 |
| 4 | 228 |
| 5 | 71 |
| 6 | 342 |
| 7 | 59.6 |

3.3 INSPECCIÓN VISUAL

Esta actividad consistió en la inspección visual de cada sector y los elementos estructurales que lo conforman. Se realizó para recopilar la información necesaria para una evaluación del estado actual de la estructura, proyectar los ensayos de caracterización posteriores para evaluar la extensión del daño, las propiedades de los materiales y emitir recomendaciones para su intervención. Revisiones posteriores permitieron identificar las estrategias de reparación por sector, así como una estimación de los costos asociados.

3.3.1 SECTOR 7

Sector 7 de la estructura perimetral del Centro de Convenciones Cartagena de Indias, comprendido entre los metros 788 y 847.6, corresponde a un sistema de contención conformado por pilotes de concreto con sección transversal cuadrada de 0.40 m x 0.40 m, dispuestos con una separación borde a borde de 0.25 m. Esta configuración estructural fue identificada a partir de la inspección visual realizada in situ y verificada con la información técnica contenida en los informes de inspección submarina y batimetría elaborados por la empresa SEBUTE.

Durante el proceso de inspección y trabajos en campo, se registraron hallazgos relacionados con la presencia de grietas y exposición de acero de refuerzo en estado avanzado de corrosión en varios elementos del sistema estructural. Se identificaron en el Sector 7 manifestaciones patológicas relevantes tales como desprendimiento de recubrimiento con exposición de agregados, pérdida de sección en varios tramos del muro y de la viga perimetral, presencia de grietas longitudinales y transversales, así como deterioro de juntas constructivas que permiten la filtración directa de agua y agentes agresivos. También se evidenció desgaste en los elementos de piedra coralina utilizados en el sistema de contención, con disgregación superficial atribuible al ambiente marino, como se muestra en la **Imagen 2** y la **Imagen 3**.

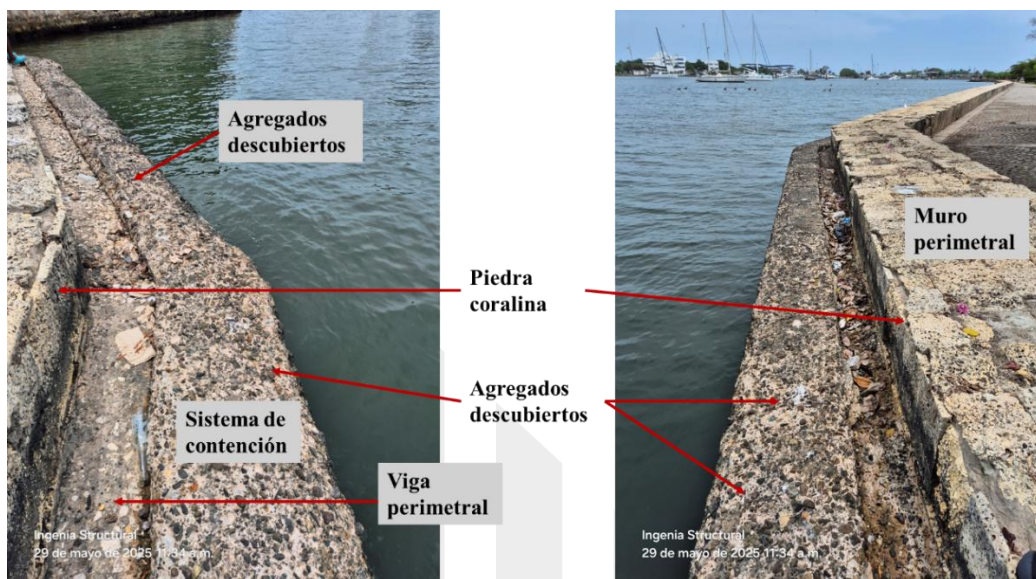


Imagen 2. Inspección visual en sector 7

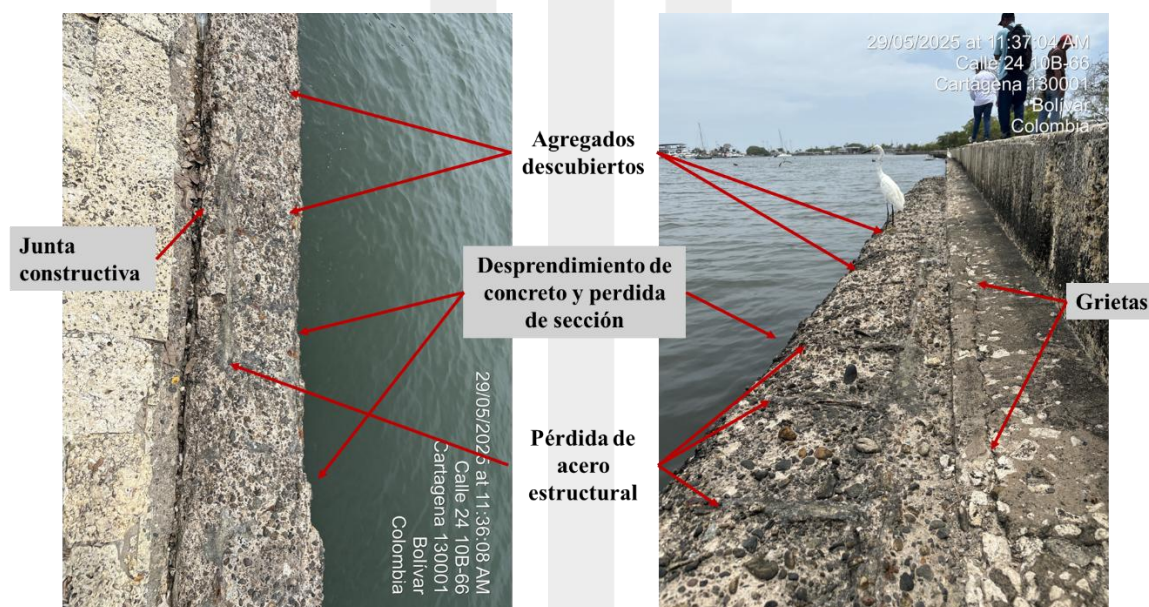


Imagen 3. Hallazgos de Inspección visual en sector 7

3.3.2 SECTOR 6

El Sector 6 de la estructura perimetral del Centro de Convenciones Cartagena de Indias comprende el tramo entre los metros 446 y 788, con una longitud aproximada de 342 metros lineales. De acuerdo a la inspección visual realizada en campo, su sistema estructural supone principalmente a un muro continuo de concreto, empleado como elemento de contención del material de relleno y expuesto directamente a la acción del medio marino.

De acuerdo con la información recopilada en los informes de inspección submarina y batimetría de SEBUTE, así como de la inspección visual, este sector presenta un estado de deterioro generalizado, evidenciándose múltiples desprendimientos de concreto, fisuración longitudinal y transversal, así

como exposición de acero de refuerzo con signos de corrosión avanzada. En algunos puntos se observan socavaciones incipientes y pérdida de material en juntas.

Durante el proceso de inspección inicial y trabajos en campo, se evidenció un estado de deterioro avanzado del muro perimetral y la viga de contención. Tal como se aprecia en la **Imagen 4** y **Imagen 5**, se identifican amplias zonas con pérdida de piedra coralina, desprendimiento de concreto y exposición de agregados, lo que conlleva una notable pérdida de sección resistente. En las mismas áreas se observaron fisuras longitudinales y transversales, así como presencia de corrosión activa en el acero de refuerzo.



Imagen 4. Inspección visual en sector 6

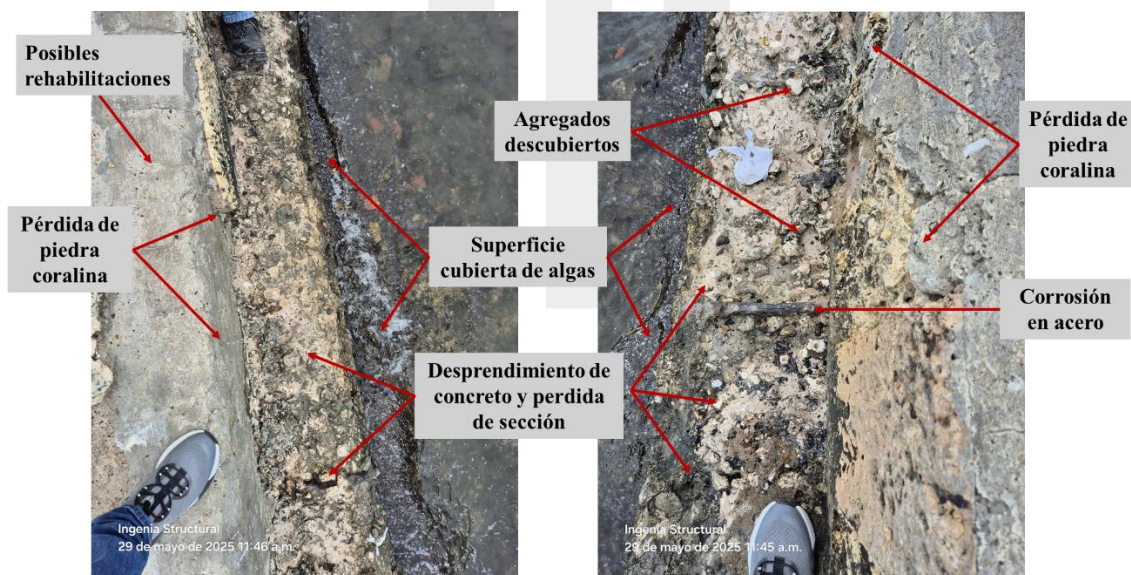


Imagen 5. Hallazgos de Inspección visual en sector 6

En la **Imagen 6** y **Imagen 7**, se destacan superficies cubiertas por algas y bioincrustaciones, especialmente en la franja sometida al régimen de mareas, condición que favorece procesos de

desintegración superficial y la formación de cavidades longitudinales en la base del muro. Estas cavidades, junto con la pérdida de material en juntas constructivas, constituyen puntos críticos de vulnerabilidad frente al ingreso de agua y cloruros. También se identifican pérdidas de sección del acero de refuerzo embebido y desprendimiento del concreto. Por su parte, en la **Imagen 6** se observan rehabilitaciones previas en la viga perimetral, sin embargo, se desconoce información o registros que sustenten dicha intervención.

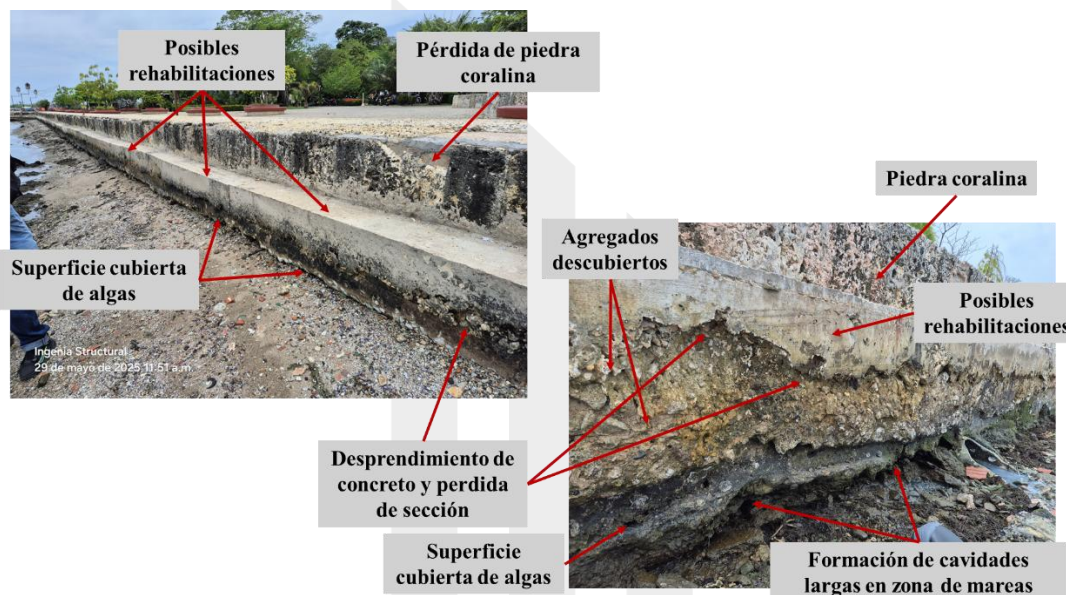


Imagen 6. Hallazgos de Inspección visual en sector 6



Imagen 7. Hallazgos de Inspección visual en sector 6

Finalmente, la **Imagen 8** revela la existencia de concretos visiblemente porosos con altos porcentajes de vacíos, junto con la presencia de tipologías constructivas distintas en un mismo tramo, lo cual

sugiere intervenciones parciales o rehabilitaciones previas que no guardaron continuidad técnica ni homogeneidad en los materiales empleados. Estas tipologías se deben al ambiente marino agresivo y que, sumadas al desgaste o desprendimientos en el sistema, confirman que el Sector 6 presenta un deterioro generalizado y acumulativo.

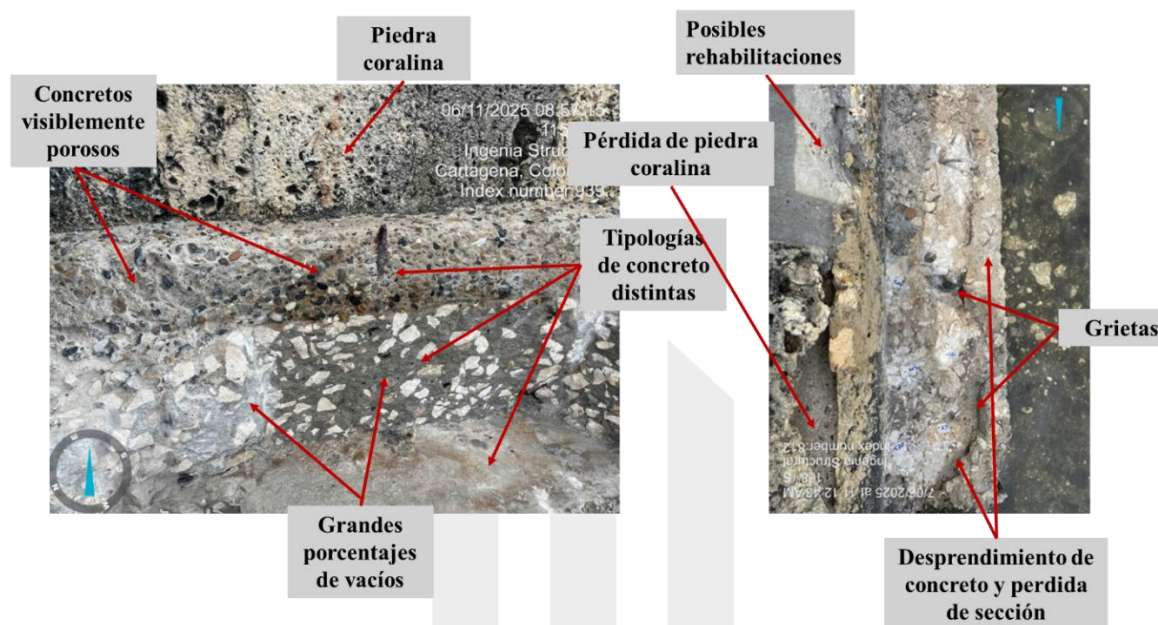


Imagen 8. Hallazgos de Inspección visual en sector 6

3.3.3 SECTOR 5

El Sector 5 de la estructura perimetral se extiende entre los metros 375 y 446, con una longitud aproximada de 71 metros lineales. Este tramo está conformado por un sistema de pilotes de concreto de sección circular, dispuestos a intervalos regulares y en su parte superior unidos mediante una viga cabezal, cuya función principal es el confinamiento del material de relleno existente y el soporte de cargas provenientes del área de parqueadero y andenes adyacentes.

De acuerdo con los resultados del informe de inspección submarina y batimetría realizado por SEBUTE S.A.S. en mayo de 2024, en este sector se evidencian grietas en la viga cabezal, desprendimientos localizados en los pilotes circulares y zonas con signos de corrosión del acero de refuerzo. Asimismo, se identificaron indicios de socavación en la base de algunos elementos, atribuibles a la acción constante del agua y mareas. Actualmente, se cuenta con grietas de hasta 10 cm de profundidad en este sector, indicando una alerta inminente.

La configuración estructural de este sector refleja una transición entre los pilotes cuadrados del Sector 4 y el muro continuo del Sector 6, por lo que cumple un papel relevante en la continuidad de la contención perimetral. Sin embargo, el deterioro documentado compromete progresivamente la capacidad de servicio de la viga cabezal.

En la **Imagen 9**, se observa la presencia de grietas en la junta constructiva y concretos visiblemente porosos, lo cual refleja pérdida de pasta del material facilitando la penetración rápida de agentes agresivos. Asimismo, en los espolones con placa vegetal y en la viga perimetral, se evidencia acumulación de organismos marinos y desprendimientos localizados. En la **Imagen 10** y **Imagen 11**, se muestran con mayor detalle la formación de cavidades generando desprendimientos en la zona

de mareas, resultado de la acción erosiva del medio marino, así como superficies cubiertas de algas que incrementan el desprendimiento del concreto y el deterioro superficial.



Imagen 9. Inspección visual en sector 5

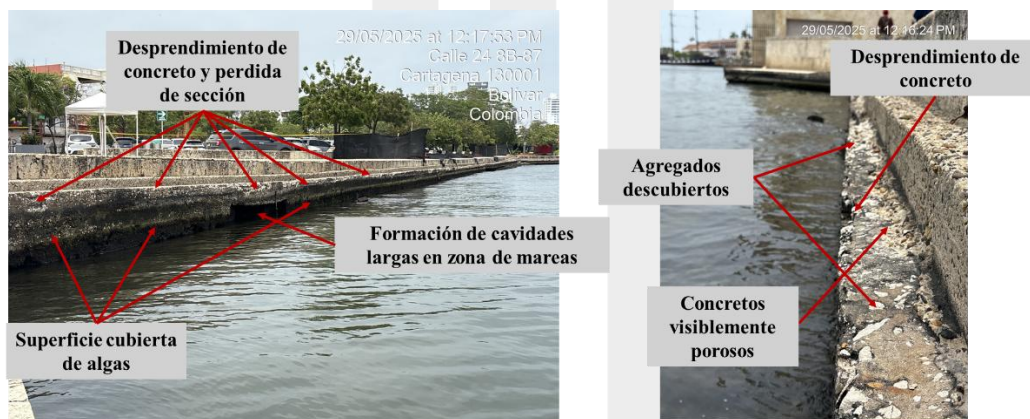


Imagen 10. Hallazgos de Inspección visual en sector 5



Imagen 11. Hallazgos de Inspección visual en sector 5

3.3.4 SECTOR 4

El Sector 4 de la estructura perimetral se encuentra comprendido entre los metros 147 y 375, con una extensión aproximada de 228 metros lineales. Este tramo corresponde a un sistema estructural conformado por pilotes de concreto de sección cuadrada de 0.70 m por lado, dispuestos con una separación de 0.15 m borde a borde, los cuales están unidos en la parte superior por una viga cabezal que funciona como elemento de amarre y confinamiento del relleno.

De acuerdo con el informe de inspección submarina y batimetría elaborado por SEBUTE S.A.S., en este sector se contabilizó un total de 283 pilotes, que soportan tanto los empujes laterales del relleno como las cargas transmitidas desde el claustro y el parqueadero. Durante la inspección se registraron grietas y desprendimientos de concreto en la viga cabezal, así como exposición de acero de refuerzo en avanzado estado de corrosión en varios pilotes en la zona del restaurante y terraza del claustro (aprox. entre los metros 154 y 174). La mayor parte de este sector está cubierto por piedra coralina, no se observa viga perimetral, pues se evidencia un gran muro de concreto en el sitio.

En este tramo no se observa gran cantidad de acero expuesto, pero sí se evidencia un deterioro superficial generalizado del concreto. En la **Imagen 12**, se aprecia la presencia de porosidad en el concreto y en la zona de contacto con el agua se detectaron cavidades longitudinales en la franja de mareas, asociadas a desprendimientos o desgaste. En la **Imagen 13**, se observa la viga perimetral y el muro cubiertos por algas y organismos marinos, además de tramos revestidos con piedra coralina que presentan pérdida parcial de material y fisuración superficial. Por último, la **Imagen 14** muestra con mayor detalle áreas de desprendimiento de concreto y pérdida de sección, dejando agregados expuestos a lo largo de la base del muro. Este comportamiento es generalizado en este sector.

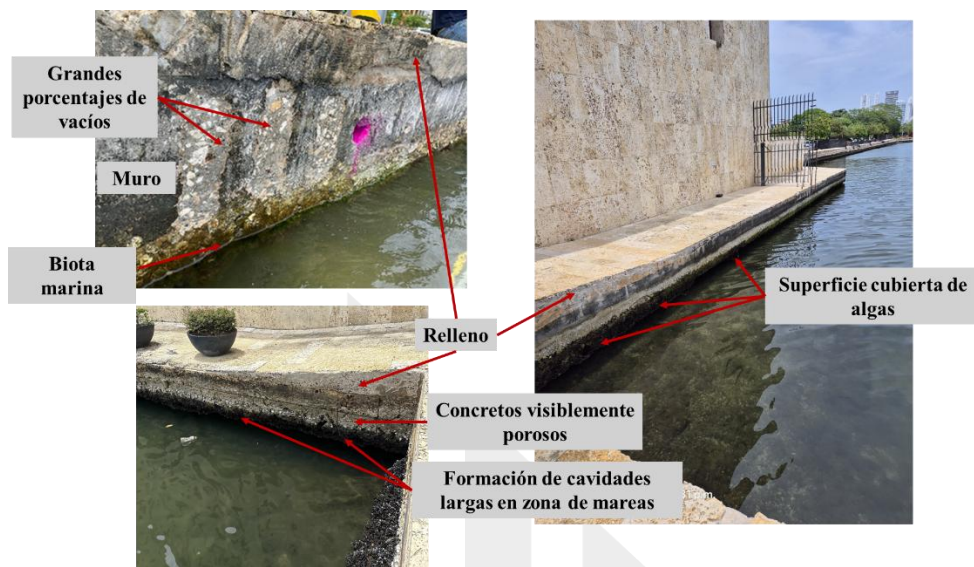


Imagen 12. Inspección visual en sector 4

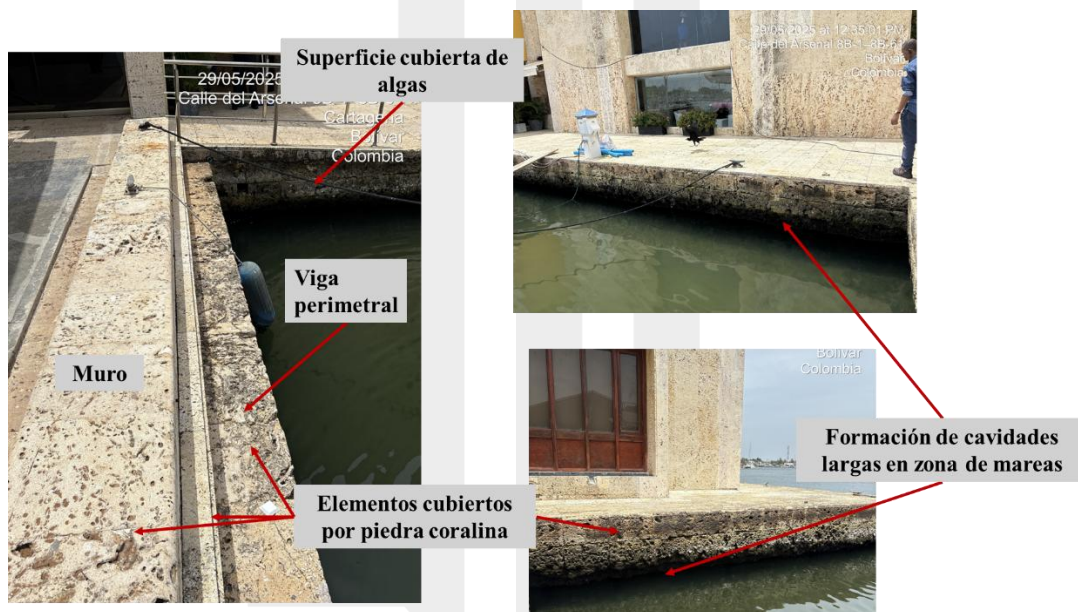


Imagen 13. Hallazgos de Inspección visual en sector 4

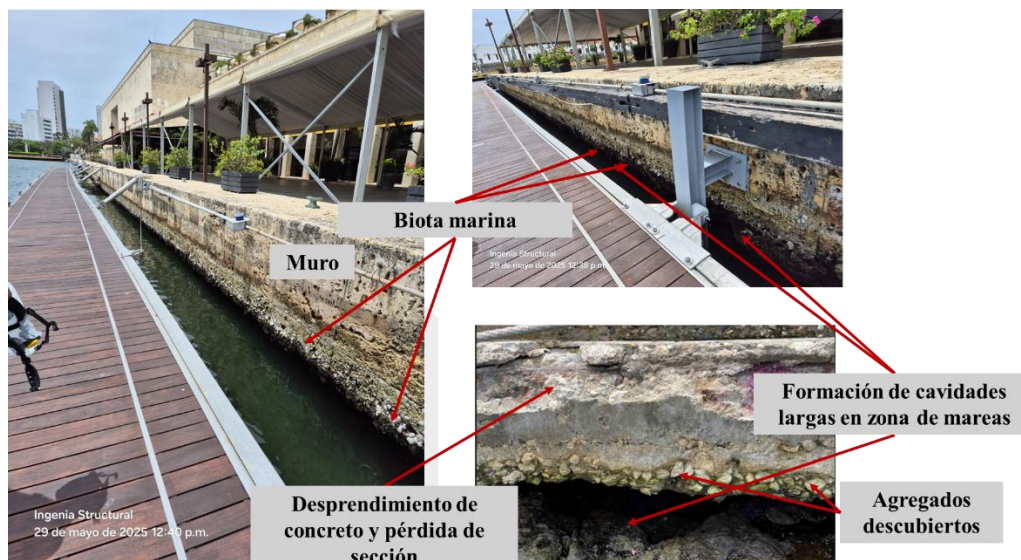


Imagen 14. Hallazgos de Inspección visual en sector 4

3.3.5 SECTOR 3

El Sector 3 de la estructura perimetral corresponde al tramo comprendido entre los metros 127 y 147, con una longitud aproximada de 20 metros lineales. De acuerdo con la información consolidada en los informes técnicos y la inspección realizada por SEBUTE S.A.S, este sector se encuentra conformado por un sistema de transición, en el que la configuración estructural no es del todo definida, pero se identifican elementos de concreto que cumplen la función de muro de contención y viga perimetral para el confinamiento del relleno.

El tramo actúa como punto intermedio entre el tablestacado metálico del Sector 2 y los pilotes cuadrados del Sector 4. Durante la inspección, se observaron estabilizadores con bolsacretos por debajo de la viga perimetral, también desprendimientos localizados de concreto, superficies con porosidad alta y vacíos significativos que evidencian el desgaste superficial.

En general, se registraron condiciones notables de deterioro que en consecuencia valoran este sector como un tramo crítico de transición. En la **Imagen 15**, se observa un muro perimetral y viga perimetral con fisuras y grietas, presencia de biota marina adherida y formación de cavidades longitudinales en la franja de mareas, asociadas al desprendimiento gradual de concreto y pérdida de sección. También se evidencia acero expuesto en varios puntos, indicador de corrosión activa y pérdida de recubrimiento. En la **Imagen 16**, se documentan áreas con grietas profundas y pérdida de concreto, dejando visibles refuerzos corroídos, además de afectaciones generalizadas en la superficie del material que muestran un concreto debilitado y altamente poroso. Asimismo, se niega la existencia de pilotes en este sector, se identificó el uso de contenciones con bolsacreto, destinadas a mitigar procesos de socavación en la base del muro.

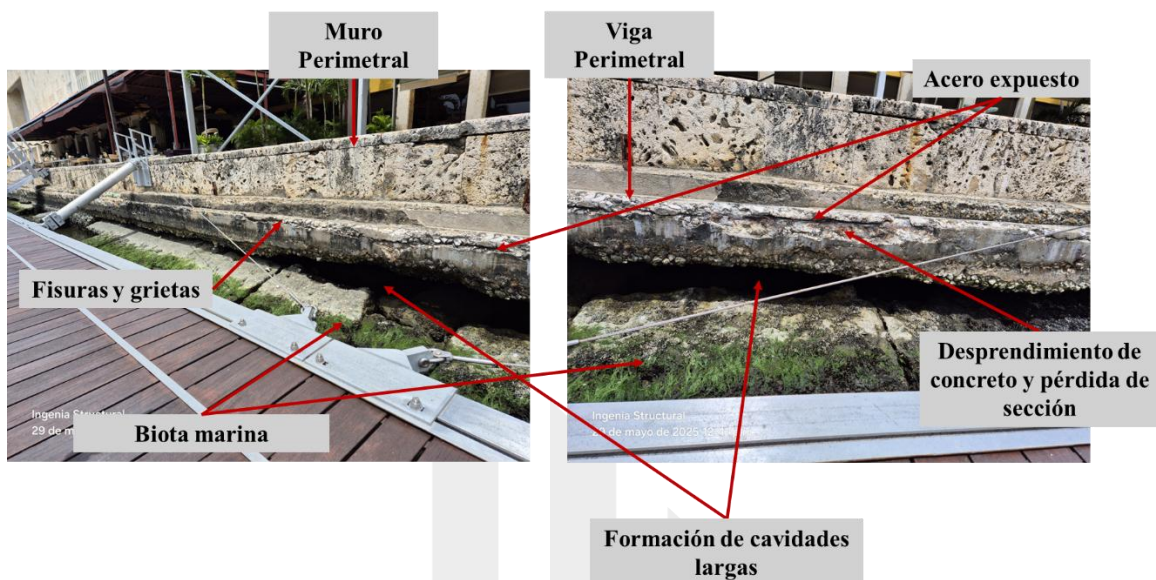


Imagen 15. Inspección visual en sector 3



Imagen 16. Hallazgos de Inspección visual en sector 3

3.3.6 SECTOR 2

El Sector 2 de la estructura perimetral se extiende entre los metros 87 y 127, con una longitud aproximada de 40 metros lineales. Este tramo está conformado por un sistema de tablestacado metálico tipo omega, hincado en el lecho marino y rematado en su parte superior con una viga cabezal, la cual actúa como elemento de unión y confinamiento del material de relleno.

De acuerdo con los informes de inspección submarina y batimetría elaborados por SEBUTE S.A.S. en mayo de 2024, este sector corresponde a la intervención más reciente del sistema, ejecutada en el año 2022 tras el colapso de un tramo de muro de carga, el cual fue reemplazado por el actual tablestacado metálico, el cual cuenta con un sistema de protección catódica. Posee una parte que no fue intervenida en dichas obras y sigue con el sistema antiguo.

En la inspección visual realizada en el Sector 2 se evidenció el contraste entre el tramo intervenido con tablestacado metálico en 2022 y las zonas contiguas con sistemas antiguos. En la **Imagen 17**, se aprecian elementos cubiertos por piedra coralina, presencia de cavidades y grietas en el concreto, lo que indica procesos de degradación en las secciones originales previas al tablestacado. Se observa acumulación de placa vegetal y diferencias constructivas que marcan la intervención reciente; de igual forma, se aprecia el tablestacado metálico con su viga perimetral superior y se observan pequeñas fisuras transversales en la viga perimetral del concreto más reciente.

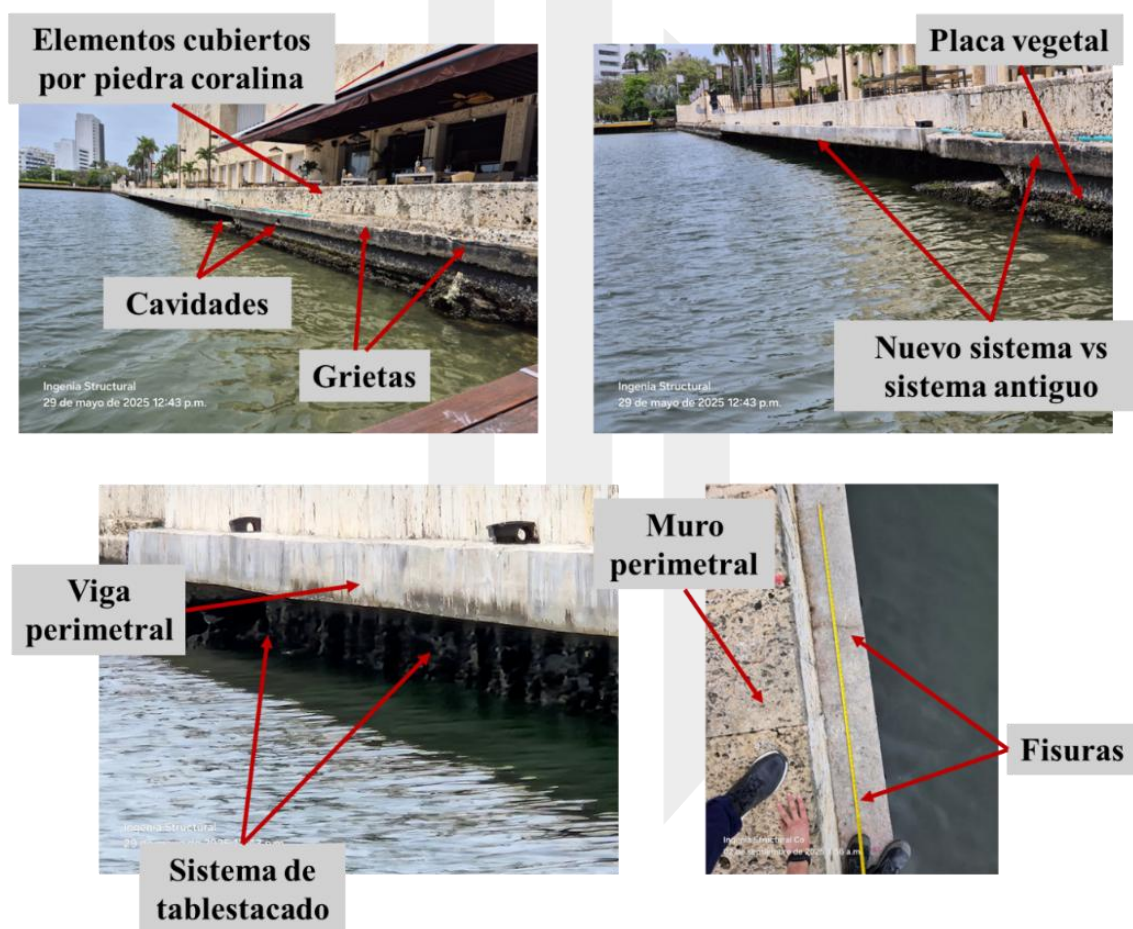


Imagen 17. Inspección visual en sector 2

De acuerdo con los informes de inspección realizados por la empresa BUZCA y los registros fotográficos asociados, se evidencia que en un tramo del sector 2, correspondiente al sistema de tablestacado instalado, no se efectuó la reconstrucción de la viga perimetral. Tal como se puede observar en la **Imagen 18**, se aprecia la implementación del sistema de tablestacas metálicas por la parte posterior de la estructura; sin embargo, la viga cabezal existente permanece con el sistema

constructivo anterior, sin intervención ni refuerzo estructural visible, lo cual indica una omisión en el proceso de rehabilitación integral del sector mencionado.



Imagen 18. Zona con tablestacado en sector 2 y viga cabezal con concreto antiguo

3.3.7 SECTOR 1

El Sector 1 de la estructura perimetral corresponde al tramo comprendido entre los metros 0 y 87, con una extensión de aproximadamente 87 metros lineales. De acuerdo con los informes de inspección, este tramo está conformado por un sistema de cimientos donde se infiere la presencia de pilotes unidos mediante una viga cabezal, sobre la cual descansa un muro de contención continuo.

Los registros de la inspección revelan que este sector presenta un deterioro extendido a lo largo de casi toda su longitud, caracterizado por fisuras longitudinales y transversales, desprendimientos de concreto, así como exposición y corrosión avanzada de aceros de refuerzo. Particularmente, en los primeros metros colindantes con el Muelle de los Pegasos, se identificaron grietas lineales marcando la disposición de los refuerzos y desprendimientos localizados en la zona de splash, lo que constituye un punto crítico de afectación.

En la inspección visual del Sector 1 se constató un deterioro generalizado de la viga perimetral. En la **Imagen 19**, se observa un concreto visiblemente poroso y recubrimientos debilitados, con presencia de desprendimientos que dejan expuestos agregados y, en algunos puntos, acero de refuerzo corroído. La superficie presenta también colonización de algas que intensifica el proceso de degradación en la franja de mareas. En la **Imagen 20**, se evidencian sectores con tipologías de concreto distintas, además de grietas longitudinales y transversales que favorecen la penetración de cloruros. Se registraron también cavidades y pérdidas de sección de considerable magnitud, generando vacíos que reducen la capacidad resistente del muro.

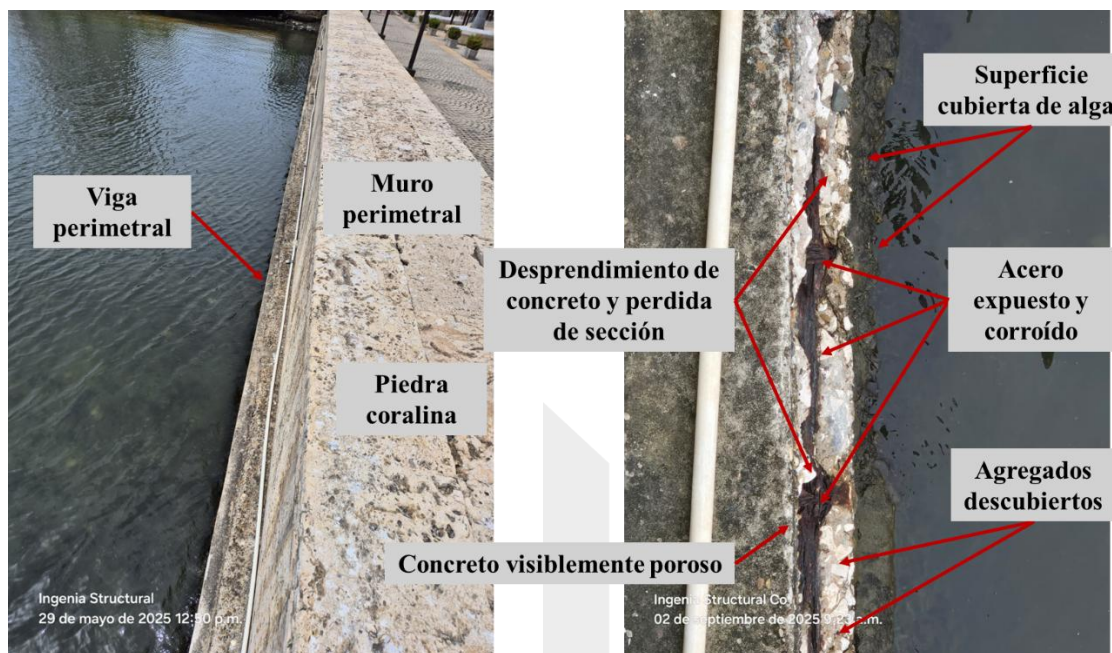


Imagen 19. Inspección visual en sector 1

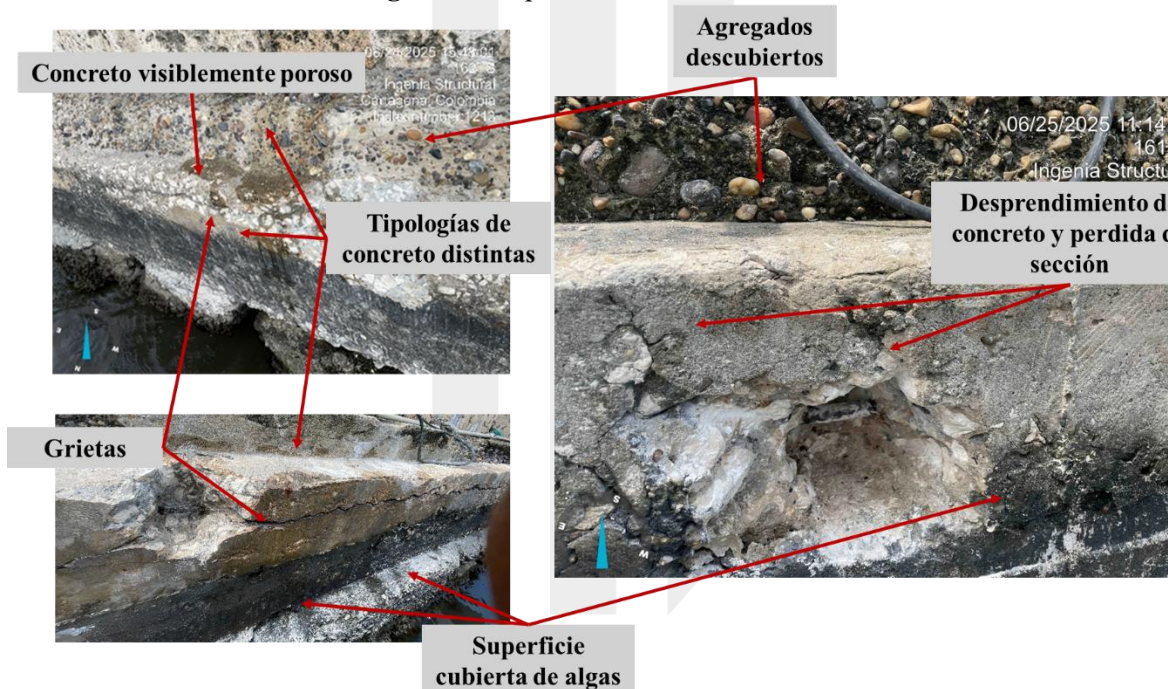


Imagen 20. Inspección visual en sector 1

4 LOCALIZACIÓN DE ENSAYOS

En la **Tabla 2** se presentan los ensayos y cantidad de los mismos, así como estudios adicionales que fueron ejecutados en cada uno de los sectores 1 al 7. La tabla incluye los ensayos destructivos y no destructivos ejecutados en los elementos estructurales que conforman cada sector.

Tabla 2. Tipo y cantidad de ensayos ejecutados.

| ÍTEM | ACTIVIDAD | Cantidades Total | Sector | | | | | | |
|------|--|------------------|--------|-----|----|-----|----|----|----|
| | | Ejecutadas | S7 | S6 | S5 | S4 | S3 | S2 | S1 |
| 1 | Levantamiento fotográfico | 847 | 59 | 342 | 71 | 228 | 20 | 40 | 87 |
| 2 | extracción de núcleo 3.5" L = 18 cm para resistencia compresión. | 68 | 7 | 27 | 8 | 10 | 4 | 5 | 7 |
| 3 | extracción de núcleo 3" L = 6 cm para Ensayo durabilidad. | 62 | 6 | 26 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 4 | Ensayo de Ferros scanner (Sin trabajo en altura) | 100 | 7 | 45 | 13 | 14 | 7 | 7 | 7 |
| 5 | Ensayo de Ultrasonido para determinación calidad concreto. | 40 | 4 | 12 | 4 | 8 | 4 | 4 | 4 |
| 6 | Ensayo de Potencial de corrosión (área 0.4 m2). | 45 | 2 | 19 | 6 | 9 | 2 | 3 | 4 |
| 7 | Ensayo de Carbonatación. | 40 | 2 | 16 | 3 | 8 | 3 | 4 | 4 |
| 8 | Ensayo de auscultación para identificación de Refuerzo. | 56 | 4 | 24 | 4 | 9 | 5 | 4 | 6 |
| 9 | Apique cimentación | 10 | 1 | 5 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | Sondeos de 18 m profundidad-estudio de suelos | 4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | Ensayo de Integridad de Pilotes sobre viga Cabezal | 10 | 2 | 4 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 |

Posterior a la ejecución de las pruebas de campo no destructivas y obtención de los núcleos de muestreo, se realiza el análisis de los datos obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio de las muestras y finalmente, se emiten conclusiones particulares y generales de la estructura en cada sector.

5 NOMENCLATURA

Para el presente proyecto, se adopta un sistema estandarizado de nomenclatura destinado a la identificación, codificación y trazabilidad de cada ensayo ejecutado dentro del perímetro del Centro de Convenciones Cartagena de Indias. Esta nomenclatura permite diferenciar de forma precisa cada tipo de ensayo realizado, su localización según el sector y el número secuencial correspondiente.

La estructura de la nomenclatura responde al siguiente formato:

[TIPO DE ENSAYO] + [NÚMERO DEL SECTOR] + [ID PROGRESIVO DEL ENSAYO]

- **TIPO DE ENSAYO:** Abreviatura que identifica el procedimiento realizado:
 - **NR:** Extracción de núcleos para resistencia.

- **ND:** Extracción de núcleos para durabilidad (Posee una subdivisión).
- **FS:** Ensayo de ferroescaner.
- **UL:** Ensayo de velocidad de pulso ultrasonico.
- **PC:** Ensayo de potencial de corrosión.
- **CB:** Ensayo de carbonatación.
- **AU:** Auscultación de acero de refuerzo.
- **AP:** Apique en cimentación.
- **PIT:** Prueba de integridad de pilotes.
- **SONDEOS:** Sondeos de caracterización de suelos.
- **NÚMERO DEL SECTOR:** Indica el sector donde se ejecutó el ensayo, conforme a la división establecida en siete sectores diferenciados por configuración estructural y ubicación.
- **ID PROGRESIVO DEL ENSAYO:** Corresponde al número identificador progresivo dentro del sector correspondiente, el cual incrementa conforme se ejecutan los ensayos en dicha zona.

Ejemplo: El código **PC71** corresponde al primer ensayo de potencial de corrosión realizado en el Sector 7.

Adicionalmente, para los **núcleos de concreto** para **ensayos de durabilidad (ND)**, los cuales se subdividen entre diferentes tipos de ensayos específicos, se adopta el siguiente formato adicional:

ND + [NÚMERO DEL SECTOR] + [ID DE NÚCLEO] + [-] + [SUBDIVISIÓN] + [ID PROGRESIVO DEL ENSAYO]

Donde:

- **SUBDIVISIÓN:** Identifica el tipo de ensayo aplicado al núcleo:
 - **PC:** Perfil de cloruros.
 - **PS:** Perfil de sulfatos.
 - **RA:** Petrografía.
 - **CC:** Contenido de cemento.

Ejemplo:

- **ND46-PC2:** Núcleo de durabilidad número 6, extraído en el Sector 4, destinado a perfil de cloruros, siendo esta la segunda muestra de este tipo en el sector.

Esta codificación permite un control minucioso sobre la trazabilidad de cada muestra y ensayo, facilitando su gestión documental y operativa en campo y laboratorio.

Tabla 3. Nomenclatura de ensayos

| Ferrosan (FS) | | | Núcleo resistencia (NR) | | | Núcleo durabilidad (ND) | | | Potencial de corrosión (PC) | | | Auscultación refuerzo (AU) | | | | | | | |
|---------------|--------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|--------|--------------------|----------------------------|--------|--------------|-------|----|-------|--|--|
| ID | Sector | Nomenclatura | ID | Sector | Nomenclatura | ID | Sector | Nomenclatura | ID | Sector | Nomenclatura | ID | Sector | Nomenclatura | | | | | |
| 1 | S7 | FS71 | 1 | S7 | NR71 | 31 | S6 | ND625 | 1 | S7 | PC71 | 12 | S6 | AU68 | | | | | |
| 2 | | FS72 | 2 | | NR72 | 32 | | ND626 | 2 | | PC72 | 13 | | AU69 | | | | | |
| 3 | | FS73 | 3 | | NR73 | 33 | | ND51 | 3 | | PC61 | 14 | | AU610 | | | | | |
| 4 | | FS74 | 4 | | NR74 | 34 | | ND52 | 4 | | PC62 | 15 | | AU611 | | | | | |
| 5 | | FS75 | 5 | | NR75 | 35 | | ND53 | 5 | | PC63 | 16 | | AU612 | | | | | |
| 6 | | FS76 | 6 | | NR76 | 36 | | ND54 | 6 | | PC64 | 17 | | AU613 | | | | | |
| 7 | | FS77 | 7 | | NR77 | 37 | | ND55 | 7 | | PC65 | 18 | | AU614 | | | | | |
| 8 | S6 | FS61 | 8 | S6 | NR61 | 38 | S5 | ND56 | 8 | S6 | PC66 | 19 | S5 | AU615 | | | | | |
| 9 | | FS62 | 9 | | NR62 | 39 | | ND41 | 9 | | PC67 | 20 | | AU616 | | | | | |
| 10 | | FS63 | 10 | | NR63 | 40 | | ND42 | 10 | | PC68 | 21 | | AU617 | | | | | |
| 11 | | FS64 | 11 | | NR64 | 41 | | ND43 | 11 | | PC69 | 22 | | AU618 | | | | | |
| 12 | | FS65 | 12 | | NR65 | 42 | | ND44 | 12 | | PC610 | 23 | | AU619 | | | | | |
| 13 | | FS66 | 13 | | NR66 | 43 | | ND45 | 13 | | PC611 | 24 | | AU620 | | | | | |
| 14 | | FS67 | 14 | | NR67 | 44 | | ND46 | 14 | | PC612 | 25 | | AU621 | | | | | |
| 15 | | FS68 | 15 | | NR68 | 45 | | ND31 | 15 | | PC613 | 26 | | AU622 | | | | | |
| 16 | | FS69 | 16 | | NR69 | 46 | | ND32 | 16 | | PC614 | 27 | | AU623 | | | | | |
| 17 | | FS610 | 17 | | NR610 | 47 | | ND33 | 17 | | PC615 | 28 | | AU624 | | | | | |
| 18 | | FS611 | 18 | | NR611 | 48 | | ND34 | 18 | | PC616 | 29 | | AU625 | | | | | |
| 19 | | FS612 | 19 | | NR612 | 49 | | ND35 | 19 | | PC617 | 30 | | AU626 | | | | | |
| 20 | | FS613 | 20 | | NR613 | 50 | | ND36 | 20 | | PC618 | 31 | | AU627 | | | | | |
| 21 | | FS614 | 21 | | NR614 | 51 | | ND21 | 21 | | PC619 | 32 | | AU628 | | | | | |
| 22 | | FS615 | 22 | | NR615 | 52 | | ND22 | 22 | | PC51 | 33 | | AU629 | | | | | |
| 23 | | FS616 | 23 | | NR616 | 53 | | ND23 | 23 | | PC52 | 34 | | AU630 | | | | | |
| 24 | | FS617 | 24 | | NR617 | 54 | | ND24 | 24 | | PC53 | 35 | | AU631 | | | | | |
| 25 | | FS618 | 25 | | NR618 | 55 | | ND25 | 25 | | PC54 | 36 | | AU632 | | | | | |
| 26 | | FS619 | 26 | | NR619 | 56 | | ND26 | 26 | | PC55 | 37 | | AU633 | | | | | |
| 27 | | FS620 | 27 | | NR620 | 57 | | ND11 | 27 | | PC56 | 38 | | AU634 | | | | | |
| 28 | | FS621 | 28 | | NR621 | 58 | | ND12 | 28 | | PC41 | 39 | | AU635 | | | | | |
| 29 | | FS622 | 29 | | NR622 | 59 | | ND13 | 29 | | PC42 | 40 | | AU636 | | | | | |
| 30 | | FS623 | 30 | | NR623 | 60 | | ND14 | 30 | | PC43 | 41 | | AU637 | | | | | |
| 31 | | FS624 | 31 | | NR624 | 61 | | ND15 | 31 | | PC44 | 42 | | AU638 | | | | | |
| 32 | | FS625 | 32 | | NR625 | 62 | | ND16 | 32 | | PC45 | 43 | | AU639 | | | | | |
| 33 | | FS626 | 33 | | Ultrasonido (UL) | | | | | | 33 | S4 | | PC46 | 44 | S3 | AU633 | | |
| 34 | | FS627 | 34 | | NR627 | ID | | Sector | Nomenclatura | | 34 | | | PC47 | 45 | | AU634 | | |
| 35 | | FS628 | 35 | | NR51 | 1 | | S7 | UL71 | | 35 | | | PC48 | 46 | | AU635 | | |
| 36 | | FS629 | 36 | | NR52 | 2 | | | UL72 | | 36 | | | PC49 | 47 | | AU636 | | |
| 37 | | FS630 | 37 | | NR53 | 3 | | | UL73 | | 37 | PC31 | | 48 | AU637 | | | | |
| 38 | | FS631 | 38 | | NR54 | 4 | | | UL74 | | 38 | PC32 | | 49 | AU638 | | | | |
| 39 | | FS632 | 39 | | NR55 | 5 | | S6 | UL61 | | 39 | PC21 | | 50 | AU639 | | | | |
| 40 | | FS633 | 40 | | NR56 | 6 | | | UL62 | | 40 | PC22 | | 51 | AU640 | | | | |
| 41 | | FS634 | 41 | | NR57 | 7 | | | UL63 | | 41 | PC23 | | 52 | AU641 | | | | |
| 42 | | FS635 | 42 | | NR58 | 8 | | | UL64 | | 42 | PC11 | | 53 | AU642 | | | | |
| 43 | | FS636 | 43 | | NR41 | 9 | | S6 | UL65 | | 43 | PC12 | | 54 | AU643 | | | | |
| 44 | | FS637 | 44 | | NR42 | 10 | | | UL66 | | 44 | PC13 | | 55 | AU644 | | | | |
| 45 | | FS638 | 45 | | NR43 | 11 | | | UL67 | | 45 | PC14 | | 56 | AU645 | | | | |
| 46 | | FS639 | 46 | | NR44 | 12 | | | UL68 | | Carbonatación (CB) | | | | | | | | |
| 47 | | FS640 | 47 | | NR45 | 13 | | UL69 | ID | | Sector | Nomenclatura | | | | | | | |
| 48 | | FS641 | 48 | | NR46 | 14 | | UL610 | 1 | | S7 | CB71 | | | | | | | |
| 49 | | FS642 | 49 | | NR47 | 15 | | UL611 | 2 | | | CB72 | | | | | | | |
| 50 | | FS643 | 50 | | NR48 | 16 | | UL612 | 3 | | | CB61 | | | | | | | |
| 51 | | FS644 | 51 | | NR49 | 17 | | UL51 | 4 | | | CB62 | | | | | | | |
| 52 | | FS645 | 52 | | NR410 | 18 | | UL52 | 5 | | S5 | CB63 | | | | | | | |
| 53 | FS51 | 53 | NR31 | 19 | UL53 | 6 | CB64 | | | | | | | | | | | | |
| 54 | FS52 | 54 | NR32 | 20 | UL54 | 7 | CB65 | | | | | | | | | | | | |
| 55 | FS53 | 55 | NR33 | 21 | UL41 | 8 | CB66 | | | | | | | | | | | | |
| 56 | FS54 | 56 | NR34 | 22 | UL42 | 9 | S6 | CB67 | | | | | | | | | | | |
| 57 | FS55 | 57 | NR21 | 23 | UL43 | 10 | | CB68 | | | | | | | | | | | |
| 58 | FS56 | 58 | NR22 | 24 | UL44 | 11 | | CB69 | | | | | | | | | | | |
| 59 | FS57 | 59 | NR23 | 25 | UL45 | 12 | | CB610 | | | | | | | | | | | |
| 60 | FS58 | 60 | NR24 | 26 | UL46 | 13 | S4 | CB611 | | | | | | | | | | | |
| 61 | FS59 | 61 | NR25 | 27 | UL47 | 14 | | CB612 | | | | | | | | | | | |
| 62 | FS510 | 62 | NR11 | 28 | UL48 | 15 | | CB613 | | | | | | | | | | | |
| 63 | FS511 | 63 | NR12 | 29 | UL31 | 16 | | CB614 | | | | | | | | | | | |
| 64 | FS512 | 64 | NR13 | 30 | UL32 | 17 | S3 | CB615 | | | | | | | | | | | |
| 65 | FS513 | 65 | NR14 | 31 | UL33 | 18 | | CB616 | | | | | | | | | | | |
| 66 | FS41 | 66 | NR15 | 32 | UL34 | 19 | | S5 | CB51 | | | | | | | | | | |
| 67 | FS42 | 67 | NR16 | 33 | UL21 | 20 | | | CB52 | | | | | | | | | | |
| 68 | FS43 | 68 | NR17 | 34 | UL22 | 21 | CB53 | | | | | | | | | | | | |
| 69 | FS44 | Núcleo durabilidad (ND) | | | 35 | UL23 | 22 | | CB41 | | | | | | | | | | |
| 70 | FS45 | ID | Sector | Nomenclatura | 36 | UL24 | 23 | CB42 | | | | | | | | | | | |
| 71 | FS46 | 1 | S7 | ND71 | 37 | S1 | UL11 | 24 | CB43 | | | | | | | | | | |
| 72 | FS47 | 2 | | ND72 | 38 | | UL12 | 25 | CB44 | | | | | | | | | | |
| 73 | FS48 | 3 | | ND73 | 39 | | UL13 | 26 | CB45 | | | | | | | | | | |
| 74 | FS49 | 4 | | ND74 | 40 | | UL14 | 27 | CB46 | | | | | | | | | | |
| 75 | FS410 | 5 | Apique en Cimentación (AP) | | | 28 | S6 | CB47 | | | | | | | | | | | |
| 76 | FS411 | 6 | ID | Sector | Nomenclatura | 29 | | CB48 | | | | | | | | | | | |
| 77 | FS412 | 7 | ND61 | 1 | S7 | AP71 | | 30 | CB31 | | | | | | | | | | |
| 78 | FS413 | 8 | ND62 | 2 | | AP61 | | 31 | CB32 | | | | | | | | | | |
| 79 | FS414 | 9 | ND63 | 3 | | AP62 | 32 | CB33 | | | | | | | | | | | |
| 80 | FS31 | 10 | ND64 | 4 | | AP63 | 33 | S2 | CB21 | | | | | | | | | | |
| 81 | FS32 | 11 | ND65 | 5 | AP64 | 34 | CB22 | | | | | | | | | | | | |
| 82 | FS33 | 12 | ND66 | 6 | AP65 | 35 | CB23 | | | | | | | | | | | | |
| 83 | FS34 | 13 | ND67 | 7 | AP51 | 36 | CB24 | | | | | | | | | | | | |
| 84 | FS35 | 14 | ND68 | 8 | AP52 | 37 | S5 | CB11 | | | | | | | | | | | |
| 85 | FS36 | 15 | ND69 | 9 | S4 | AP41 | | 38 | CB12 | | | | | | | | | | |
| 86 | FS37 | 16 | ND610 | 10 | S1 | AP11 | | 39 | CB13 | | | | | | | | | | |
| 87 | FS21 | 17 | ND611 | Prueba de Integridad de Pilotes (PIT) | | | | 40 | CB14 | | | | | | | | | | |
| 88 | FS22 | 18 | ND612 | ID | Sector | Nomenclatura | Auscultación refuerzo (AU) | | | | | | | | | | | | |
| 89 | FS23 | 19 | ND613 | 1 | S7 | PIT71 | ID | Sector | Nomenclatura | | | | | | | | | | |
| 90 | FS24 | 20 | ND614 | 2 | | PIT72 | 1 | S7 | AU71 | | | | | | | | | | |
| 91 | FS25 | 21 | ND615 | 3 | | PIT61 | 2 | | AU72 | | | | | | | | | | |
| 92 | FS26 | 22 | ND616 | 4 | | PIT62 | 3 | | AU73 | | | | | | | | | | |
| 93 | FS27 | 23 | ND617 | 5 | PIT63 | 4 | AU74 | | | | | | | | | | | | |
| 94 | FS11 | 24 | ND618 | 6 | S6 | PIT64 | 5 | S6 | AU61 | | | | | | | | | | |
| 95 | FS12 | 25 | ND619 | 7 | | PIT51 | 6 | | AU62 | | | | | | | | | | |
| 96 | FS13 | 26 | ND620 | 8 | | PIT41 | 7 | | AU63 | | | | | | | | | | |
| 97 | FS14 | 27 | ND621 | 9 | | S4 | PIT42 | | 8 | AU64 | | | | | | | | | |
| 98 | FS15 | 28 | ND622 | 10 | | PIT43 | 9 | AU65 | | | | | | | | | | | |
| 99 | FS16 | 29 | ND623 | Potencial de corrosión (PC) | | | 10 | AU66 | | | | | | | | | | | |
| 100 | FS17 | 30 | ND624 | ID | Sector | Nomenclatura | 11 | AU67 | | | | | | | | | | | |

6 SONDEOS

Los resultados de los sondeos son presentados en el informe de estudio estructural.

7 PRUEBA DE INTEGRIDAD DE PILOTES

Los resultados de las pruebas de integridad de pilotes son presentados en el informe de estudio estructural.

8 EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS DE CONCRETO PARA ENSAYO DE RESISTENCIA Y DURABILIDAD

Se empleó Ferroskan PS300 de Hilti® (ver **Imagen 21**) para la localización de las barras de acero de refuerzo en los elementos estructurales y determinar los puntos donde se realizaron las extracciones de los núcleos. La extracción de muestras se realizó con el sistema de perforación de diamante compacto DD 160 de Hilti® (ver **Imagen 22**), que facilita la rapidez y seguridad en la toma de núcleos (ver **Imagen 27** a la **Imagen 30**). Los núcleos fueron adecuadamente protegidos y sellados para preservar el contenido de humedad representativo de la estructura en el momento del muestreo. Se realizaron igualmente las reparaciones de los orificios de núcleo con un material de reparación de base cementicia de fraguado rápido (Mapegrout T60, como se aprecia en **Imagen 23**). Las probetas serán enviadas a laboratorio para ejecución de los ensayos respectivos.



Imagen 21. Ferroskan PS300 de Hilti



Imagen 22. Extractor DD 160 de Hilti®



Imagen 23. Mortero de reparación

A continuación, en la **Tabla 4**, se listan las normativas utilizadas para el muestreo, preparación y selección de los sitios de extracción de muestras de concreto a emplear en los diferentes ensayos de caracterización, así como para definir el protocolo de extracción.

Tabla 4. Normativas – procedimiento de extracción de núcleos de concreto.

| Nombre del ensayo | Normativa |
|---|-----------------|
| Examen y muestreo de concreto endurecido en construcciones | ASTM C 823 |
| Método de prueba para obtener y probar núcleos perforados de concreto | ASTM C42 / C42M |

A continuación, en la **Imagen 24** se resumen los datos de caracterización y ubicación de cada uno de los núcleos extraídos, los puntos de color amarillo corresponden a los núcleos destinados para ensayos de durabilidad (ND) y los de color verde, hacen referencia a los ubicados para resistencia (NR).



Imagen 24. Ubicación de núcleos extraídos y tipo de ensayo a realizar en los distintos sectores

Los núcleos en su mayoría fueron extraídos en la viga cabezal de los sectores, de manera horizontal y vertical, dependiendo de la facilidad de acceso para realizar la extracción. Es importante destacar, que algunos de los núcleos extraídos se fracturaban al intentar sacarlos, por lo que quedaron especímenes con tamaños inferiores a los 18 cm. A continuación, se observan las evidencias fotográficas desde **Imagen 25** a la **Imagen 30**.

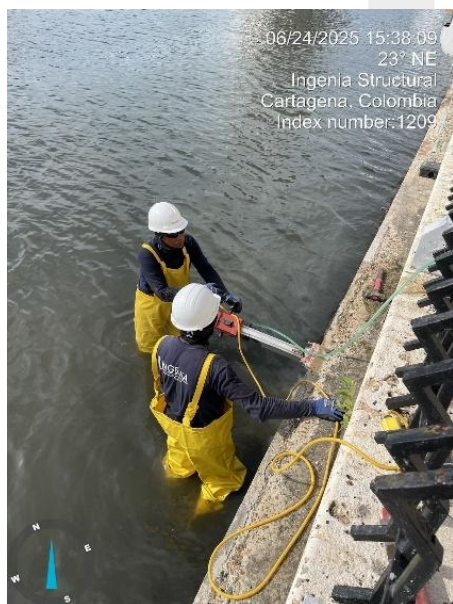


Imagen 25. Extracciones en sector 1



Imagen 26. Extracciones en sector 2



Imagen 27. Extracción de núcleos en cara lateral de la viga, sector 2



Imagen 28. Extracción de núcleos en cara superior de la viga, sector 7



Imagen 29. Núcleo para pruebas de durabilidad.

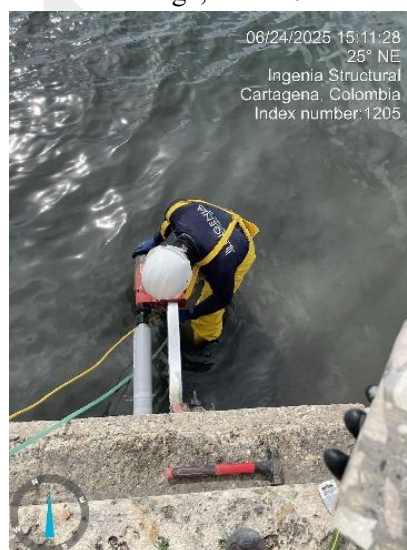


Imagen 30. Extracción de núcleos en cara lateral.



Imagen 31. Mediciones en sector 1

Se realiza el registro de cada uno de los núcleos extraídos por sector para ensayos de resistencia marcados (ver **Tabla 5** a la **Tabla 11**) siguiendo la nomenclatura anteriormente explicada en el capítulo de **NOMENCLATURA**.

Tabla 5. Extracciones en el sector 7 para Núcleos de resistencia








| SECTOR 7 | | |
|---|--|--|
|  <p>Imagen 32. Núcleo extraído NR71</p> |  <p>Imagen 33. Núcleo extraído NR72</p> |  <p>Imagen 34. Núcleo extraído NR73</p> |
|  <p>Imagen 35. Núcleo extraído NR74</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído NR75</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído NR76</p> |
|  <p>Imagen 13. Núcleo extraído NR77</p> | | |

Tabla 6. Extracciones en el sector 6 para Núcleos de resistencia

SECTOR 6



Imagen 36. Núcleo extraído NR61



Imagen 37. Núcleo extraído NR62



Imagen 38. Núcleo extraído NR63



Imagen 39. Núcleo extraído NR64



Imagen 13. Núcleo extraído NR75



Imagen 13. Núcleo extraído NR76



Imagen 40. Núcleo extraído NR67



Imagen 41. Núcleo extraído NR68



Imagen 42. Núcleo extraído NR69



Imagen 43. Núcleo extraído NR610



Imagen 44. Núcleo extraído NR611



Imagen 45. Núcleo extraído NR612



Imagen 46. Núcleo extraído NR613



Imagen 47. Núcleo extraído NR614



Imagen 48. Núcleo extraído NR615



Imagen 49. Núcleo extraído NR616



Imagen 50. Núcleo extraído NR617



Imagen 51. Núcleo extraído NR618



Imagen 52. Núcleo extraído NR619



Imagen 53. Núcleo extraído NR620



Imagen 54. Núcleo extraído NR621



Imagen 55. Núcleo extraído NR622



Imagen 56. Núcleo extraído NR623



Imagen 57. Núcleo extraído NR624



Imagen 58. Núcleo extraído NR625



Imagen 59. Núcleo extraído NR626



Imagen 60. Núcleo extraído NR627

Tabla 7. Extracciones en el sector 5 para Núcleos de resistencia

SECTOR 5



Imagen 61. Núcleo extraído NR51

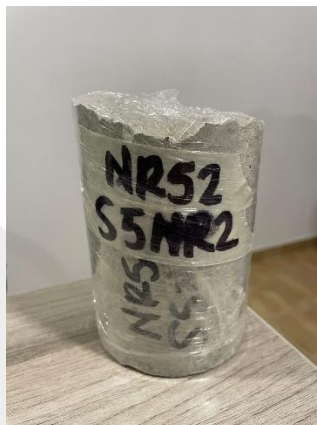


Imagen 62. Núcleo extraído NR52

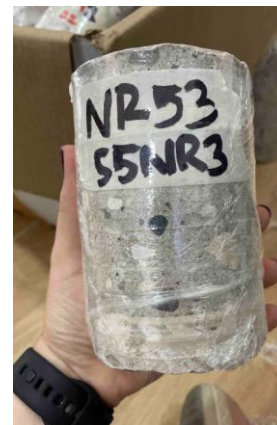


Imagen 63. Núcleo extraído NR53



Imagen 64. Núcleo extraído NR54

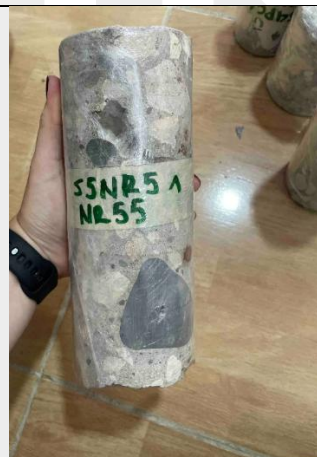


Imagen 13. Núcleo extraído NR55



Imagen 13. Núcleo extraído NR56



Imagen 65. Núcleo extraído NR57

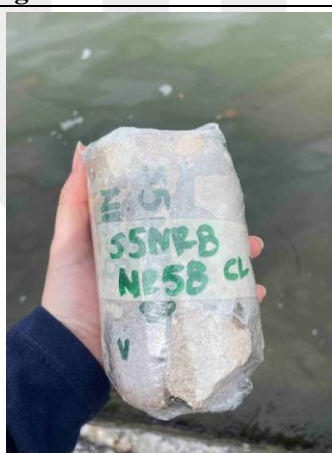


Imagen 66. Núcleo extraído NR58

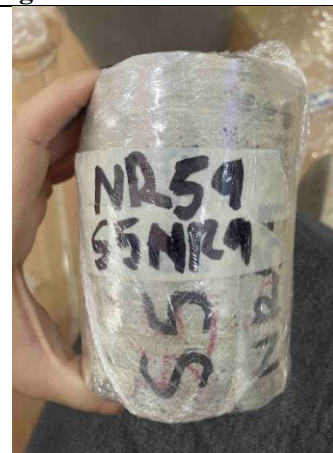


Imagen 67. Núcleo extraído NR59

Tabla 8. Extracciones en el sector 4 para Núcleos de resistencia

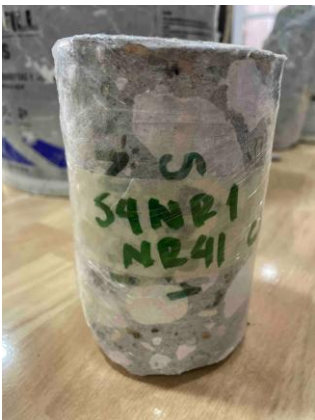





| SECTOR 4 | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Imagen 68. Núcleo extraído NR41 | Imagen 69. Núcleo extraído NR42 | Imagen 70. Núcleo extraído NR43 |
|  |  |  |
| Imagen 71. Núcleo extraído NR44 | Imagen 13. Núcleo extraído NR45 | Imagen 13. Núcleo extraído NR46 |
|  |  |  |
| Imagen 72. Núcleo extraído NR47 | Imagen 73. Núcleo extraído NR48 | Imagen 74. Núcleo extraído NR49 |



Imagen 75. Núcleo extraído NR10

Tabla 9. Extracciones en el sector 3 para Núcleos de resistencia

SECTOR 3



Imagen 76. Núcleo extraído NR31



Imagen 77. Núcleo extraído NR32

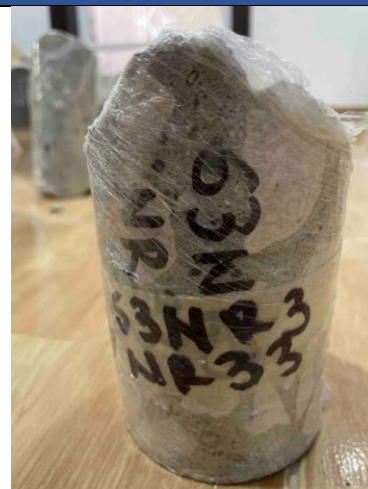


Imagen 78. Núcleo extraído NR33



Imagen 79. Núcleo extraído NR54

Tabla 10. Extracciones en el sector 2 para Núcleos de resistencia

SECTOR 2

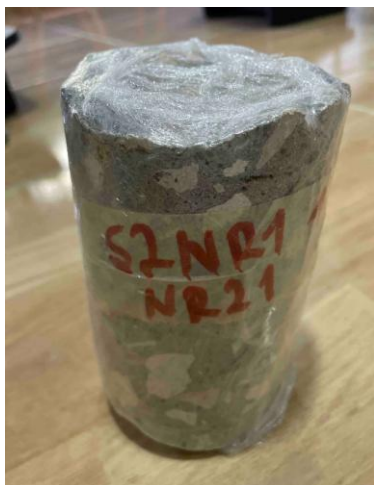


Imagen 80. Núcleo extraído NR21

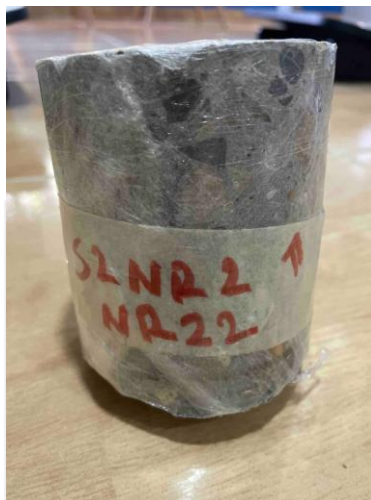


Imagen 81. Núcleo extraído NR22



Imagen 82. Núcleo extraído NR23



Imagen 83. Núcleo extraído NR24



Imagen 84. Núcleo extraído NR21

Tabla 11. Extracciones en el sector 1 para Núcleos de resistencia

SECTOR 1



Imagen 85. Núcleo extraído NR11

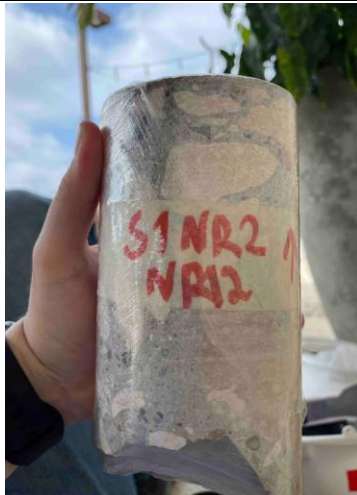


Imagen 86. Núcleo extraído NR12



Imagen 87. Núcleo extraído NR73

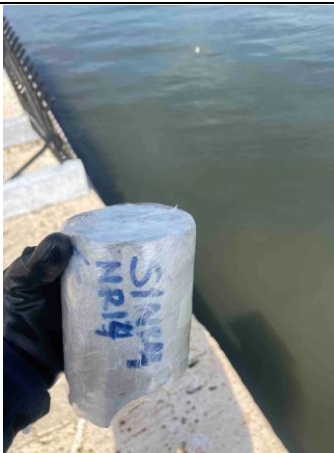


Imagen 88. Núcleo extraído NR14



Imagen 13. Núcleo extraído NR15



Imagen 13. Núcleo extraído NR76



Imagen 13. Núcleo extraído NR77

De la misma forma, se realiza el registro de cada uno de los núcleos extraídos por sector para ensayos de durabilidad (ver **Tabla 5** a la **Tabla 11**) marcados siguiendo la nomenclatura explicada en el capítulo de **NOMENCLATURA**.

Tabla 12. Extracciones en el sector 7 para Núcleos de durabilidad













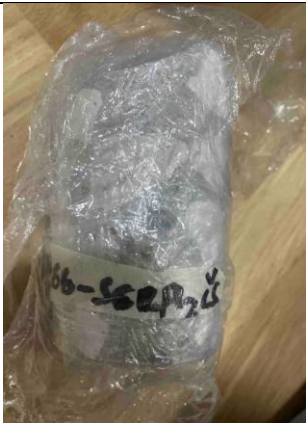


| SECTOR 7 | | |
|---|---|---|
|  <p>Imagen 89. Núcleo extraído ND71-PS1</p> |  <p>Imagen 90. Núcleo extraído ND72-PC1</p> |  <p>Imagen 91. Núcleo extraído ND73-CC1</p> |
|  <p>Imagen 92. Núcleo extraído ND74-RA1</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND75-PC2</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND76-PS2</p> |

Tabla 13. Extracciones en el sector 6 para Núcleos de durabilidad

| SECTOR 6 | | |
|--|--|--|
|  <p>Imagen 93. Núcleo extraído ND61-PC1</p> |  <p>Imagen 94. Núcleo extraído ND62-RA1</p> |  <p>Imagen 95. Núcleo extraído ND63-CC1</p> |
|  <p>Imagen 96. Núcleo extraído ND64-PC2</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND65-PC3</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND66-PS1</p> |
|  <p>Imagen 97. Núcleo extraído ND67-CC2</p> |  <p>Imagen 98. Núcleo extraído ND68-RA2</p> |  <p>Imagen 99. Núcleo extraído ND69-CC3</p> |

| | | |
|---|--|--|
| <p>Imagen 97. Núcleo extraído ND67-RA2</p> | <p>Imagen 98. Núcleo extraído ND68-CC2</p> | <p>Imagen 99. Núcleo extraído ND69- RA3</p> |
|  <p>Imagen 100. Núcleo extraído ND610- CC3</p> |  <p>Imagen 101. Núcleo extraído ND611- PC4</p> |  <p>Imagen 102. Núcleo extraído ND612- PC5</p> |
|  <p>Imagen 103. Núcleo extraído ND613- CC4</p> |  <p>Imagen 104. Núcleo extraído ND614- CC5</p> |  <p>Imagen 105. Núcleo extraído ND615- RA4</p> |
|  <p>Imagen 106. Núcleo extraído ND16- PC6</p> |  <p>Imagen 107. Núcleo extraído ND617- PC7</p> |  <p>Imagen 108. Núcleo extraído ND618- CC6</p> |



Imagen 109. Núcleo extraído
ND619- PC8



Imagen 110. Núcleo extraído
ND620- PC9



Imagen 111. Núcleo extraído
NR621- OC10



Imagen 112. Núcleo extraído
ND622- PC11



Imagen 113. Núcleo extraído
ND623- RA5



Imagen 114. Núcleo extraído
ND624- PC12

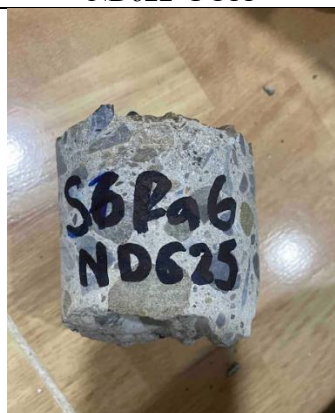


Imagen 115. Núcleo extraído
NR625- RA6



Imagen 116. Núcleo extraído
ND626- PS2

Tabla 14. Extracciones en el sector 5 para Núcleos de durabilidad

| SECTOR 5 | | |
|---|--|--|
|  <p>Imagen 117. Núcleo extraído ND51-PC1</p> |  <p>Imagen 118. Núcleo extraído ND52-RA1</p> |  <p>Imagen 119. Núcleo extraído ND53-CC1</p> |
|  <p>Imagen 120. Núcleo extraído ND54-PS1</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND55-PC2</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND76-PS2</p> |

Tabla 15. Extracciones en el sector 4 para Núcleos de durabilidad

| SECTOR 4 | | |
|---|--|--|
|  <p>Imagen 121. Núcleo extraído ND41-PC1</p> |  <p>Imagen 122. Núcleo extraído ND42-PS1</p> |  <p>Imagen 123. Núcleo extraído ND43-PC2</p> |
|  <p>Imagen 124. Núcleo extraído ND44-RA1</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND45-CC1</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND76-PS2</p> |

Tabla 16. Extracciones en el sector 3 para Núcleos de durabilidad


| SECTOR 3 | | |
|---|---|--|
|  <p>Imagen 125. Núcleo extraído ND31-PC1</p> |  <p>Imagen 126. Núcleo extraído ND32-PS1</p> |  <p>Imagen 127. Núcleo extraído ND33-CC1</p> |
|  <p>Imagen 128. Núcleo extraído ND34-RA1</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND35-PC2</p> |  <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND36-PS2</p> |

Tabla 17. Extracciones en el sector 2 para Núcleos de durabilidad

| SECTOR 2 | | |
|--|--|--|
|  |  |  |
|  |  |  |
| <p>Imagen 129. Núcleo extraído ND21-PC1</p> | <p>Imagen 130. Núcleo extraído ND22-CC1</p> | <p>Imagen 131. Núcleo extraído ND23- PS1</p> |
| <p>Imagen 132. Núcleo extraído ND24-RA1</p> | <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND25-PC2</p> | <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND26-PS2</p> |

Tabla 18. Extracciones en el sector 1 para Núcleos de durabilidad

| SECTOR 1 | | |
|--|--|--|
|  |  |  |
| <p>Imagen 133. Núcleo extraído ND11-PS1</p> | <p>Imagen 134. Núcleo extraído ND12-PC1</p> | <p>Imagen 135. Núcleo extraído ND13- RA1</p> |
|  |  |  |
| <p>Imagen 136. Núcleo extraído ND14-PC2</p> | <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND15-PS2</p> | <p>Imagen 13. Núcleo extraído ND16-CC1</p> |

9 ESCANEO, LOCALIZACIÓN Y RECUBRIMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO

El análisis de la configuración del acero de refuerzo existente en los elementos estructurales en estudio se realizó mediante el FerroScan PS300 de Hilti® (ver **Imagen 21**), el cual tiene la capacidad de detectar la profundidad y diámetro de las barras de acero, dependiendo de la metodología de análisis escogida. En la

Tabla 19 se presenta los datos técnicos del equipo de medición.

Tabla 19.Datos técnicos del ferrosaner PS 300

| | |
|--|---------------------------|
| Rango máx. de detección para localización de objetos | 200 mm ¹ |
| Precisión de localización | 1% +/-3mm mm ² |
| Distancia mínima entre dos objetos próximos | 30 mm |
| Memoria de datos (escáner) | 200 escaneos |
| Rango de temperatura de funcionamiento | -10 - 50 °C |

El equipo FerroScan PS300 tiene tres formas de analizar las estructuras y la escogencia de cada una de ellas depende del tipo de información que se desee obtener. A continuación, se describen los métodos de análisis del dispositivo:

- i. **QuickScan (FQ):** Este tipo de escaneo se realiza de forma lineal con el objetivo de determinar la existencia de acero de refuerzo, el espesor de recubrimiento y el espaciamiento entre las barras. Las barras de refuerzo detectadas son las orientadas en sentido perpendicular al movimiento del equipo.
- ii. **Imagescan (FS):** En este tipo de escaneo se realiza un análisis compuesto de ocho (8) *QuickScans* de 60 cm de longitud, siguiendo una cuadrícula de referencia. Al procesar estos datos de forma conjunta el equipo determina el diámetro de las barras de acero y el recubrimiento de estas. Posteriormente, a través de análisis computacional se puede determinar el espaciamiento entre los refuerzos.
- iii. **BlockScan (FB):** Este tipo de escaneo está compuesto por una matriz 3x3 de *ImageScans*, es decir, nueve (9) cuadrículas realizadas de forma consecutiva en un orden predeterminado. Los datos resultantes luego de realizar un análisis son los mismos generados por un *ImageScan*, pero en un área mucho mayor.

Para la evaluación del acero de refuerzo presente en la estructura perimetral del centro de convenciones se emplea el análisis tipo *QuickScan*, debido a que son elementos lineales continuos. En ellos se midió la separación del acero de refuerzo embebido, el recubrimiento y el diámetro del acero. Se realizaron 100 ensayos, a continuación, se presenta la ubicación de estos en las distintas zonas (ver **Imagen 137**) y evidencias del ensayo (ver desde **Imagen 140** a la **Imagen 142**).



Imagen 137. Ubicación de evaluación de elementos con ferro escáner en los distintos sectores



Imagen 138. Mediciones en sector 7



Imagen 139. Mediciones de en sector 7 sobre muro

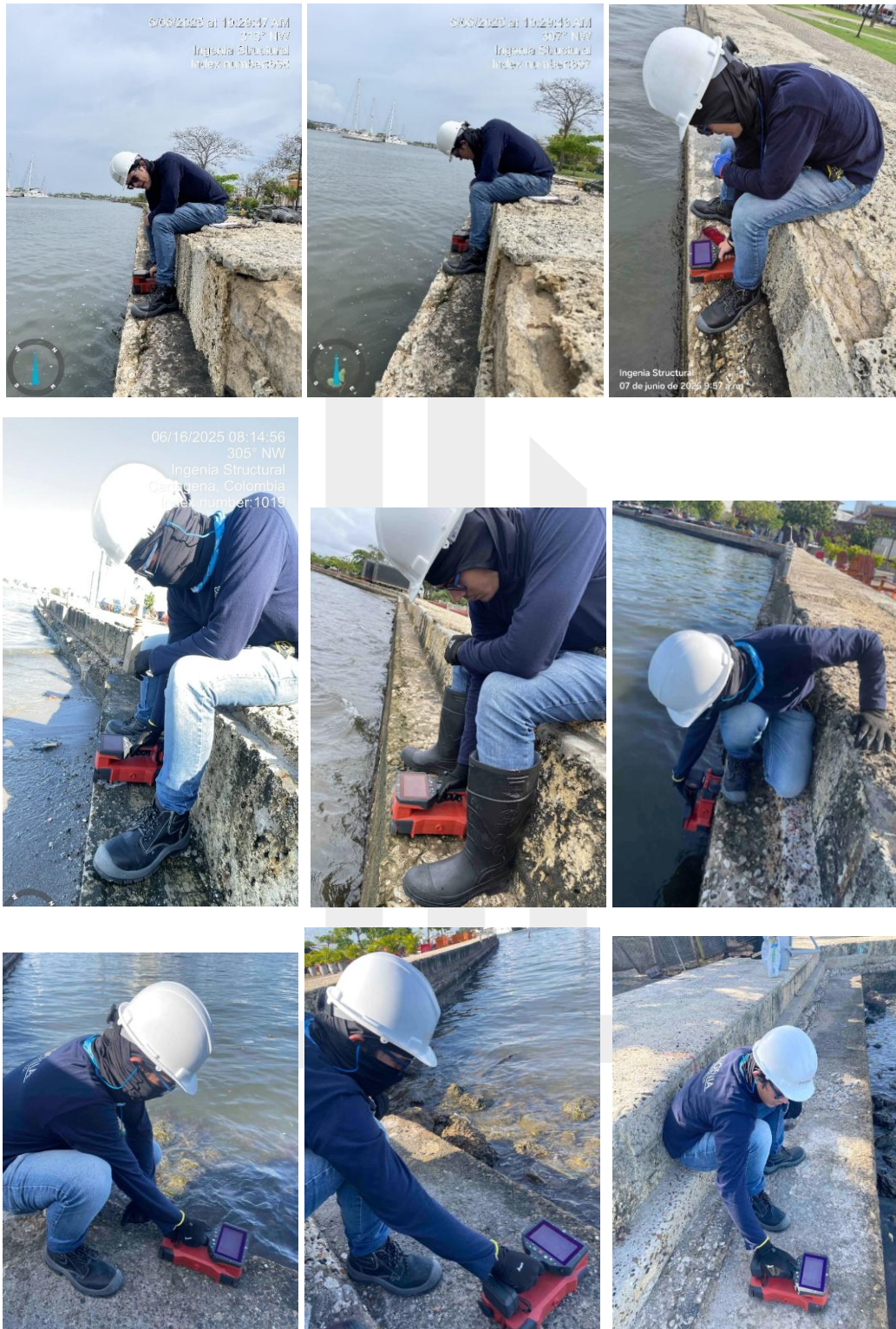


Imagen 140. Mediciones en sector 6

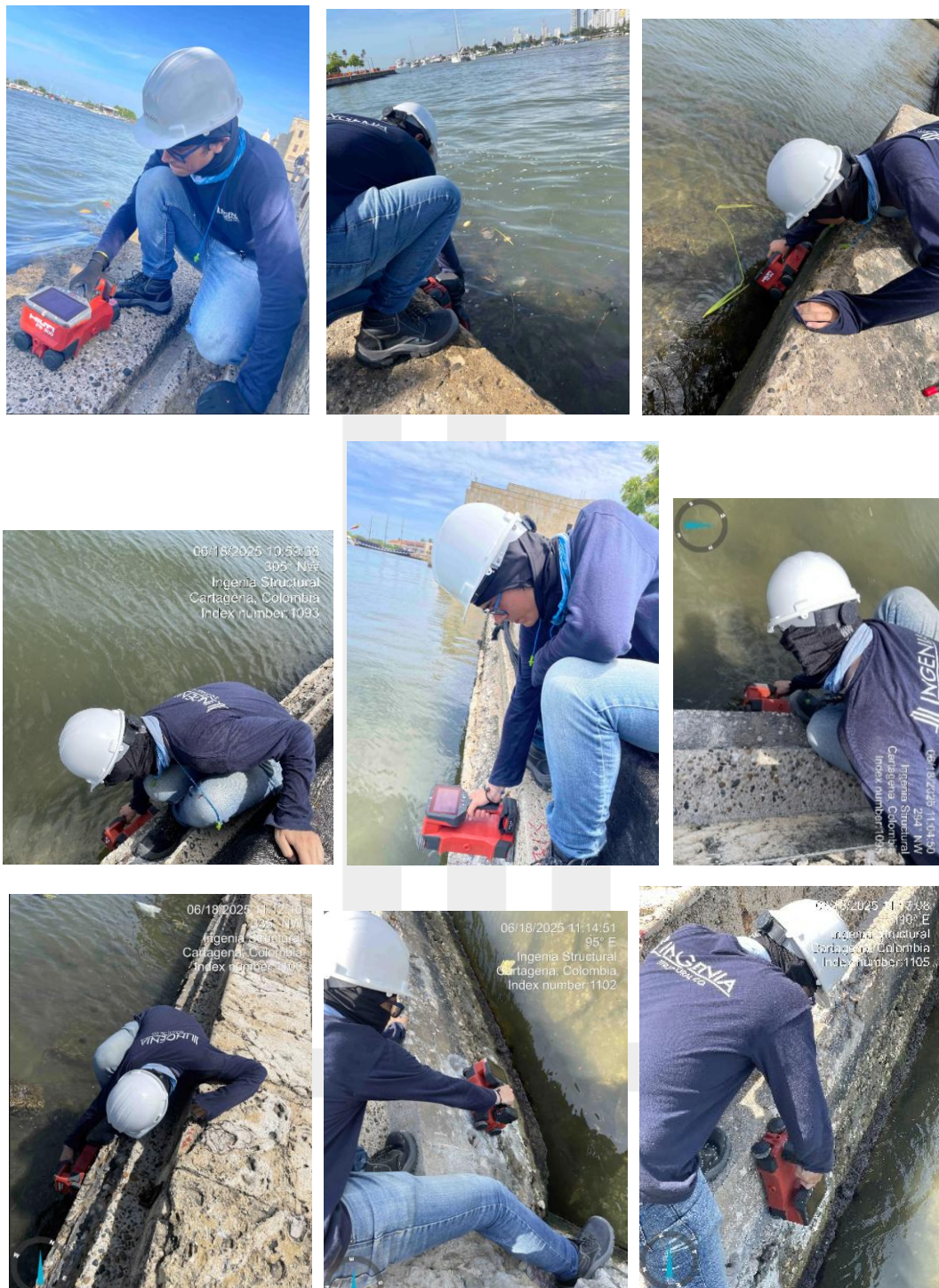


Imagen 141. Mediciones en sector 5



Imagen 142. Mediciones en sector 4



Imagen 143. Mediciones en sector 3

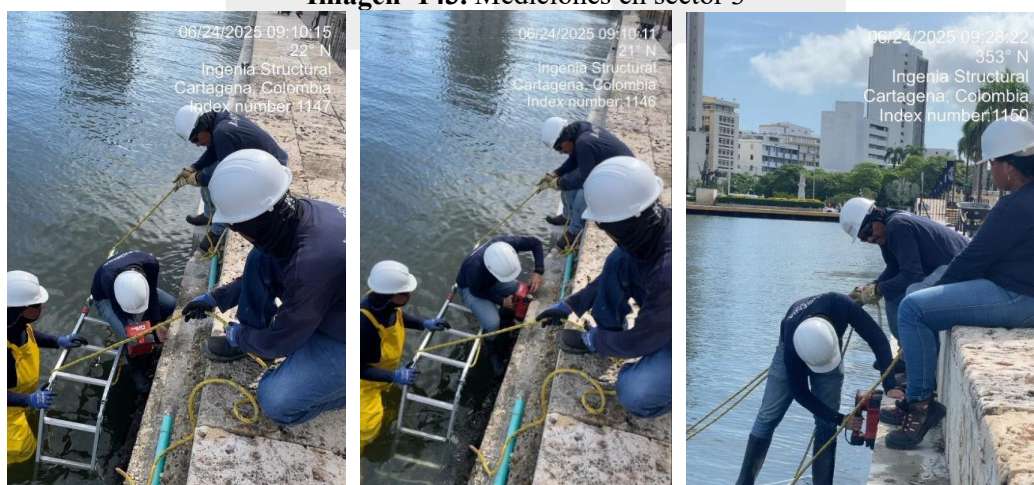
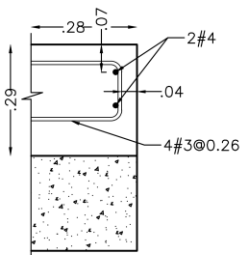
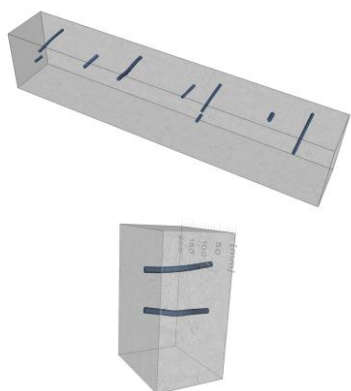
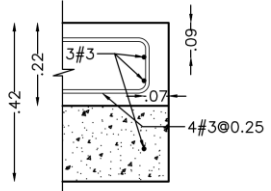
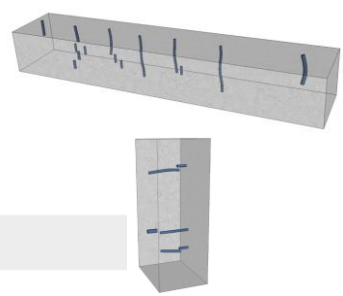
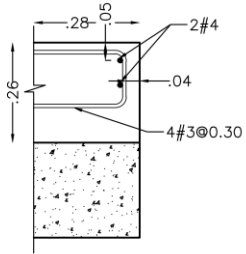
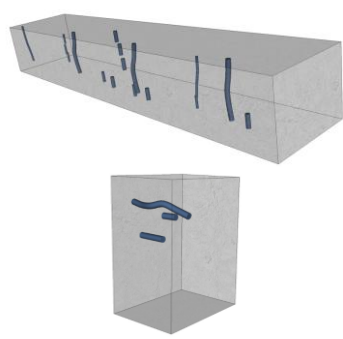


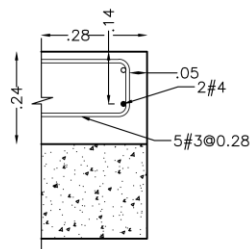
Imagen 144. Mediciones en el sector 2

9.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ACERO DE REFUERZO

En **Tabla 20.** se muestran los resultados típicos de un escaneo, que incluye la medición del recubrimiento, la estimación del espaciamiento y diámetro del acero de refuerzo. En el caso de estudio del centro de convenciones, se realizaron escaneos sobre la viga cabezal en zonas donde fuese posible su ejecución, es decir, en superficies planas que permitieran un correcto uso del equipo, por lo que los resultados corresponden a las zonas donde se tomaron los datos. Para detalles del reporte de ensayos, ver **ANEXOS.**

Tabla 20. Resultados y análisis de acero de refuerzo

| SECTOR I | |
|--|--|
| Sección | Vista 3D |
|  <p>DETALLE V-S 28 x 29 Esc. 1:20</p> <p>Figura 1. Detalle de Viga Superior (FS11 y FS12)</p> |  <p>Figura 2. Vista 3D de acero de Viga (FS11 y FS12)</p> |
|  <p>DETALLE V-I b x 42 Esc. 1:20</p> <p>Figura 3. Detalle de Viga Inferior (FS13 y FS14)</p> |  <p>Figura 4. Vista 3D de acero de Viga (FS13 y FS14)</p> |
|  <p>DETALLE V-S 28 x 26 Esc. 1:20</p> <p>Figura 5. Detalle de Viga Superior (FS15 y FS16)</p> |  <p>Figura 6. Vista 3D de acero de Viga (FS15 y FS16)</p> |



DETALLE V-S 28 x 24

Esc. 1:20

Figura 7. Detalle de Viga Superior (FS17 y FS18)

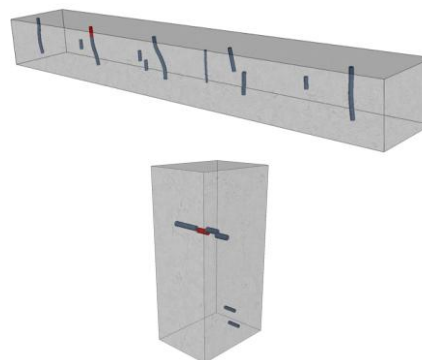
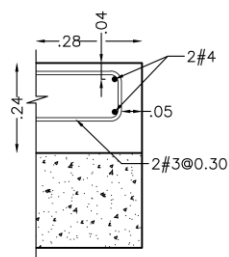


Figura 8. Vista 3D de acero de Viga (FS17 y FS18)

SECTOR2

Sección



DETALLE V 28 x 24

Esc. 1:20

Figura 9. Detalle de Viga Superior (FS21 y FS22)

Vista 3D

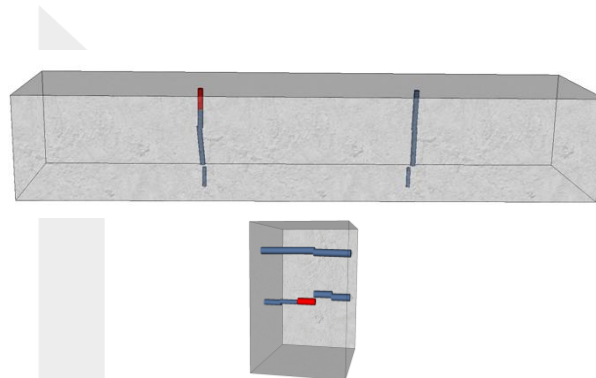
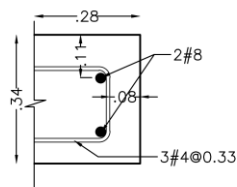


Figura 10. Vista 3D de acero de Viga (FS21 y FS22)



DETALLE V 28 x 34

Esc. 1:20

Figura 11. Detalle de Viga Superior (FS23 y FS24)

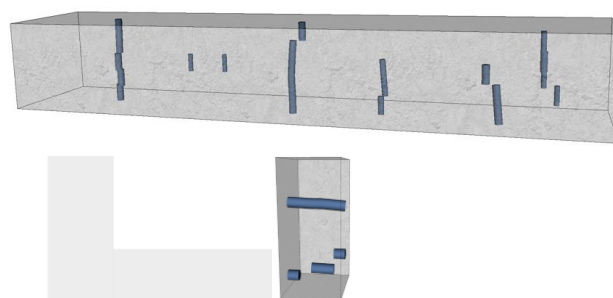
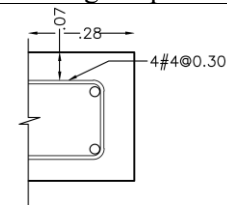


Figura 12. Vista 3D de acero de Viga (FS23 y FS24)



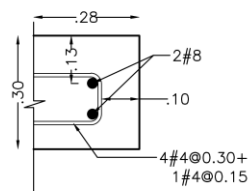
DETALLE V 28 x h

Esc. 1:20

Figura 13. Detalle de Viga Superior (FS25)



Figura 14. Vista 3D de acero de Viga (FS25)



DETALLE V 28 x 30

Esc. 1:20

Figura 15. Detalle de Viga Superior (FS26 y FS27)

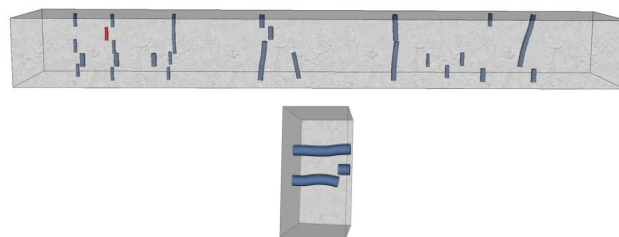
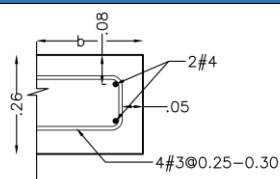


Figura 16. Vista 3D de acero de Viga (FS26 y FS27)

SECTOR3

Sección



DETALLE V-S b x 26

Esc. 1:20

Figura 17. Detalle de Viga Superior (FS31 y FS32)

Vista 3D

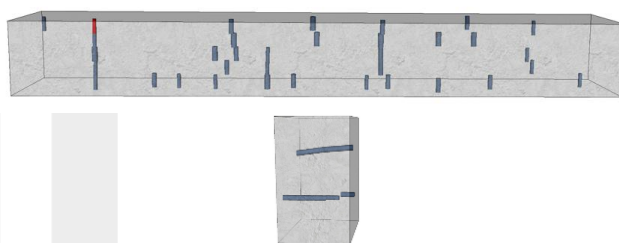
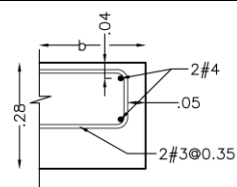


Figura 18. Vista 3D de acero de Viga (FS31 y FS32)



DETALLE V-S b x 28

Esc. 1:20

Figura 19. Detalle de Viga Superior (FS33 y FS34)

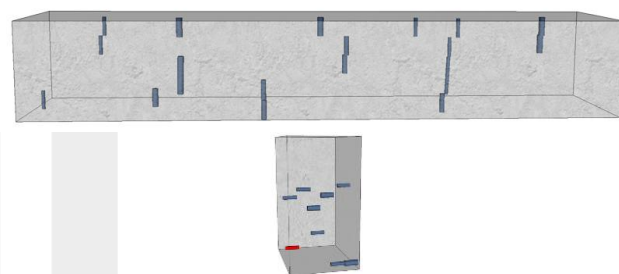
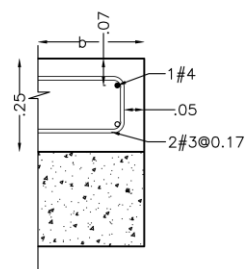


Figura 20. Vista 3D de acero de Viga (FS33 y FS34)



DETALLE V-S b x 25

Esc. 1:20

Figura 21. Detalle de Viga Superior (FS36 y FS37)

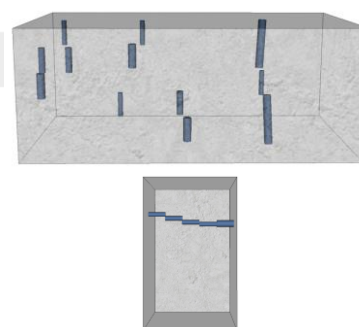
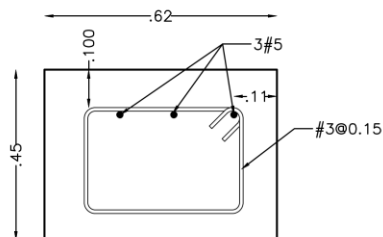


Figura 22. Vista 3D de acero de Viga (FS36 y FS37)

SECTOR5

Sección

Vista 3D



DETALLE V-C 62 x 45

Esc. 1:20

Figura 23. Detalle de Viga Superior (FS51 y FS52)

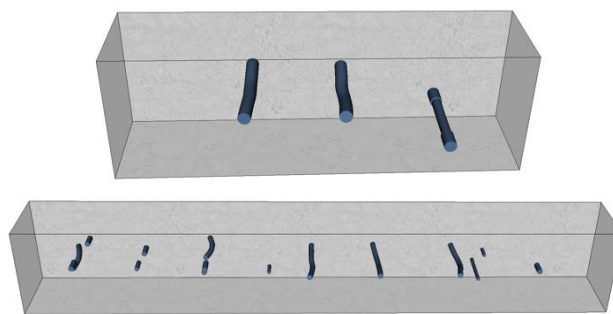
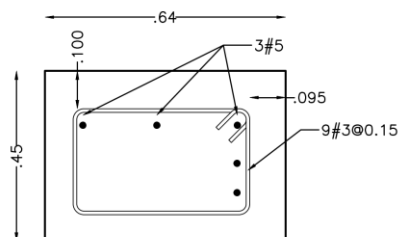


Figura 24. Vista 3D de acero de Viga (FS51 y FS52)



DETALLE V-C 62 x 45

Esc. 1:20

Figura 25. Detalle de Viga Superior (FS53, FS54 y FS55)

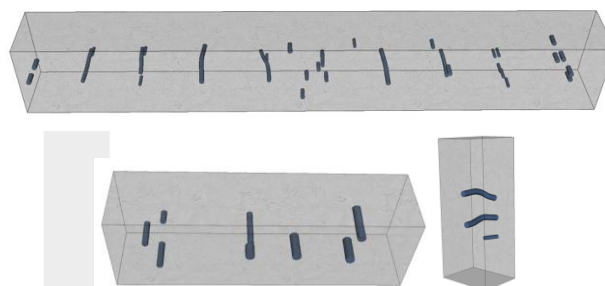
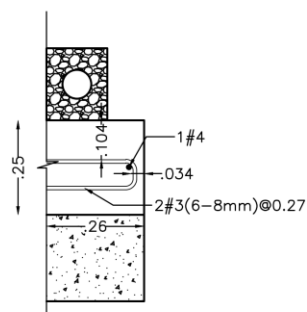


Figura 26. Vista 3D de acero de Viga (FS53, FS54 y FS55)



DETALLE V-S 26 x 25

Esc. 1:20

Figura 27. Detalle de Viga Superior (FS56 y FS57)

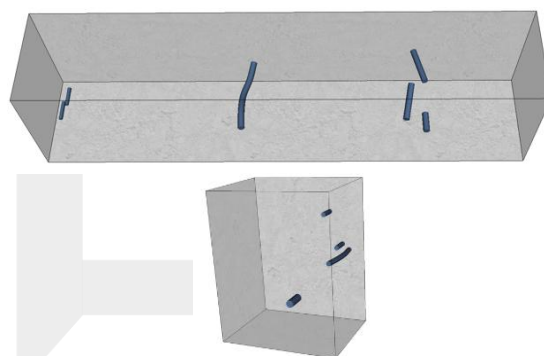
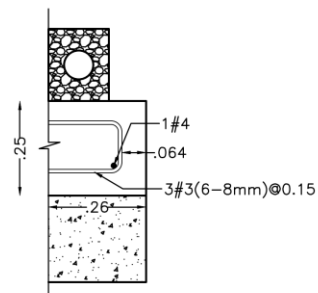


Figura 28. Vista 3D de acero de Viga (FS56 y FS57)



DETALLE V-S 26 x 25

Esc. 1:20

Figura 29. Detalle de Viga Superior (FS58 y FS59)

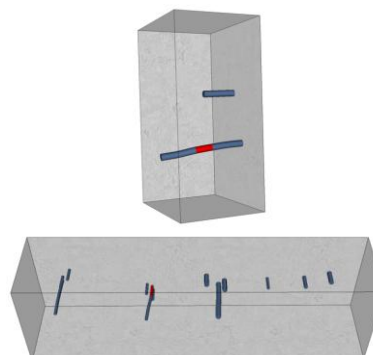
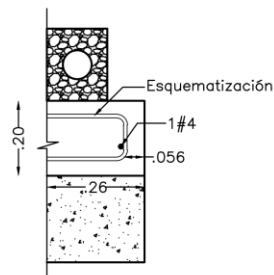


Figura 30. Vista 3D de acero de Viga (FS58 y FS59)



DETALLE V-S 26 x 20

Esc. 1:20

Figura 31. Detalle de Viga Superior (FS510 y FS511)

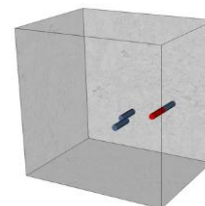
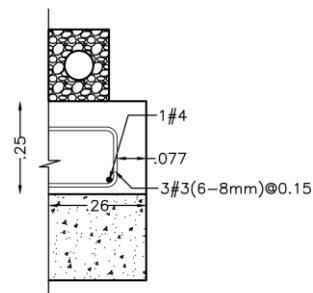


Figura 32. Vista 3D de acero de Viga (FS510 y FS511)



DETALLE V-S 26 x 25

Esc. 1:20

Figura 33. Detalle de Viga Superior (FS512 y FS513)

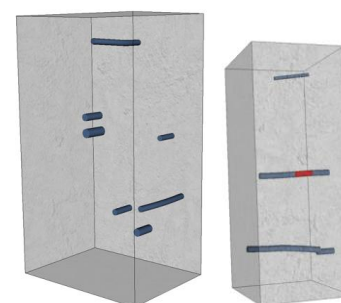
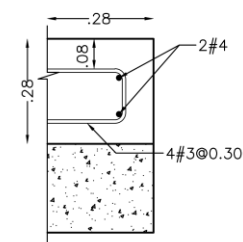


Figura 34. Vista 3D de acero de Viga (FS512 y FS513)

SECTOR 6

Sección



DETALLE V-S 28 x 28

Esc. 1:20

Figura 35. Detalle de Viga Superior (FS61 y FS62)

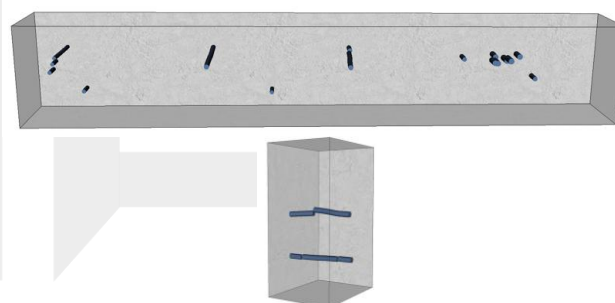
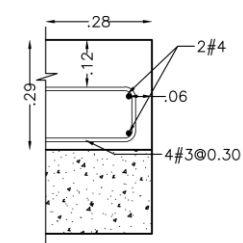


Figura 36. Vista 3D de acero de Viga (FS61 y FS62)



DETALLE V-S 28 x 29

Esc. 1:20

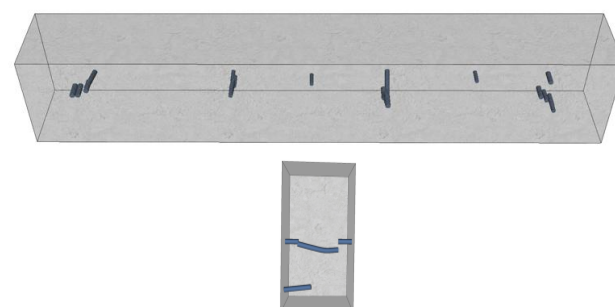
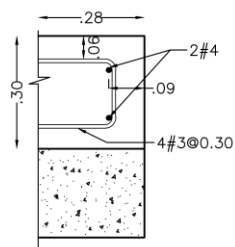


Figura 38. Vista 3D de acero de Viga (FS63 y FS64)

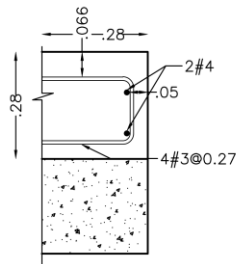
Figura 37. Detalle de Viga Superior (FS63 y FS64)



DETALLE V-S 28 x 30

Esc. 1:20

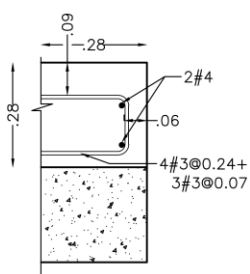
Figura 39. Detalle de Viga Superior (FS65 y FS66)



DETALLE V-S 28 x 30

Esc. 1:20

Figura 41. Detalle de Viga Superior (FS67 y FS68)



DETALLE V-S 28 x 30

Esc. 1:20

Figura 43. Detalle de Viga Superior (FS69 y FS610)

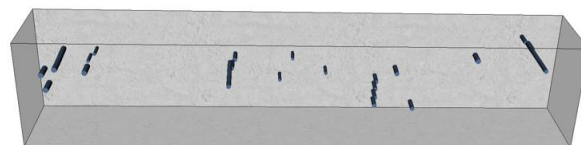


Figura 40. Vista 3D de acero de Viga (FS65 y FS66)

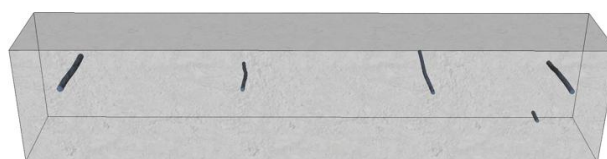


Figura 42. Vista 3D de acero de Viga (FS67 y FS68)

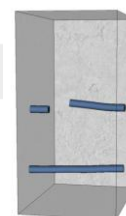
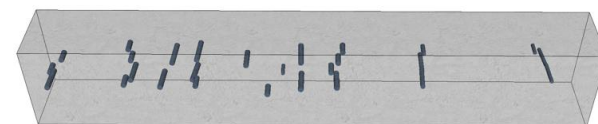
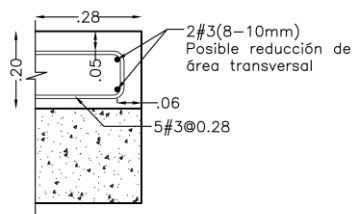


Figura 44. Vista 3D de acero de Viga (FS69 y FS610)



DETALLE V-S 28 x 20

Esc. 1:20

Figura 45. Detalle de Viga Superior (FS611 y FS612)

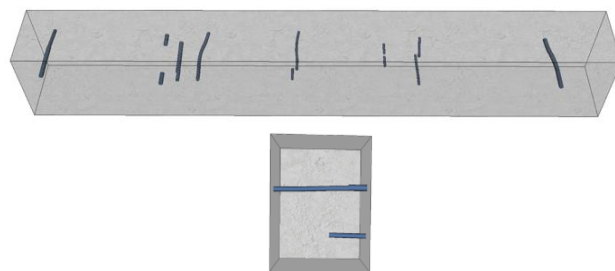
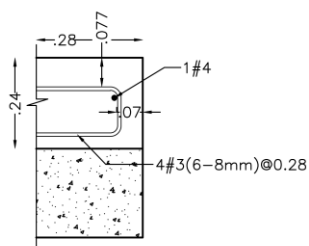


Figura 46. Vista 3D de acero de Viga (FS611 y FS612)



DETALLE V-S 28 x 24

Esc. 1:20

Figura 47. Detalle de Viga Superior (FS613 y FS614)

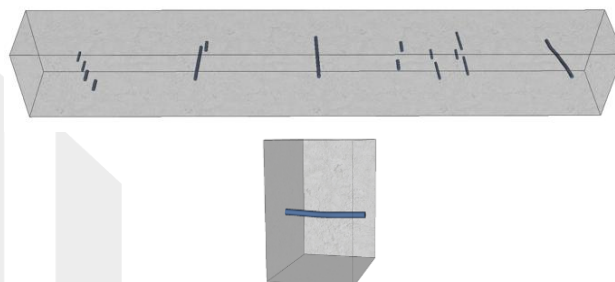
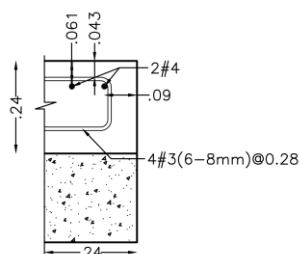


Figura 48. Vista 3D de acero de Viga (FS613 y FS614)



DETALLE V-S 28 x 24

Esc. 1:20

Figura 49. Detalle de Viga Superior (FS615 y FS616)

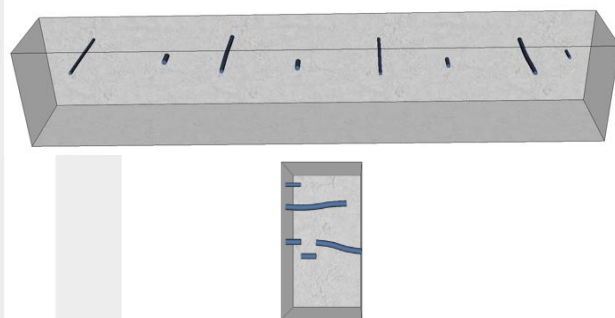
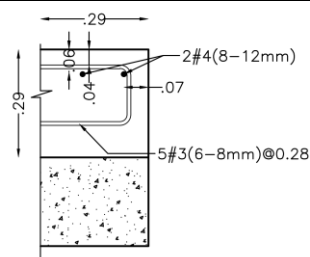


Figura 50. Vista 3D de acero de Viga (FS615 y FS616)



DETALLE V-S 28 x 29

Esc. 1:20

Figura 51. Detalle de Viga Superior (FS617 y FS618)

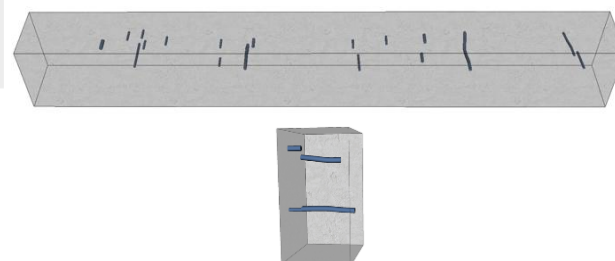
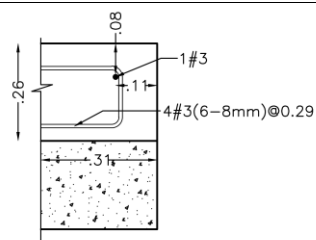


Figura 52. Vista 3D de acero de Viga (FS617 y FS618)



DETALLE V-S 28 x 26

Esc. 1:20

Figura 53. Detalle de Viga Superior (FS619 y FS620)

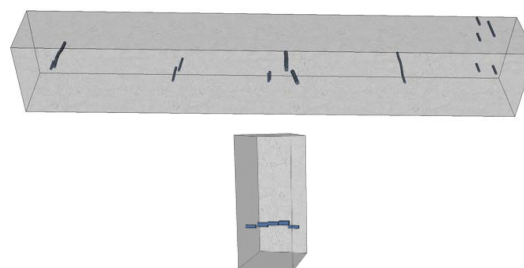
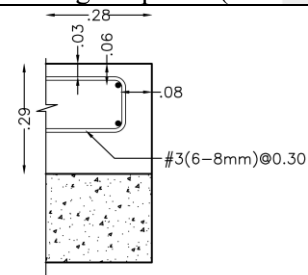


Figura 54. Vista 3D de acero de Viga (FS619 y FS620)



DETALLE V-S 28 x 30

Esc. 1:20

Figura 55. Detalle de Viga Superior (FS621 y FS622)

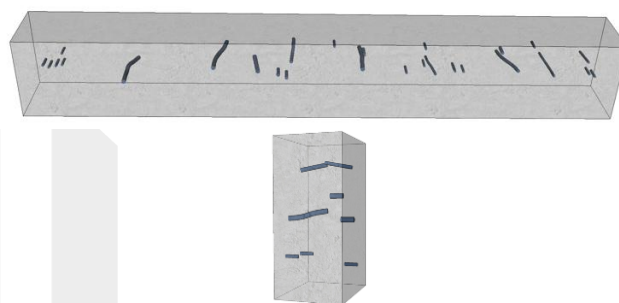
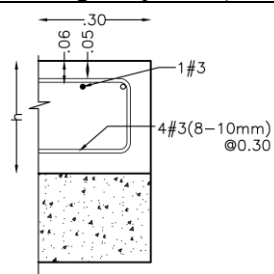


Figura 56. Vista 3D de acero de Viga (FS621 y FS622)



DETALLE V-S 30 x h

Esc. 1:20

Figura 57. Detalle de Viga Superior (FS623 y FS624)

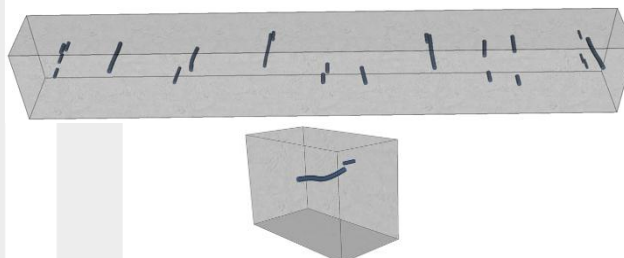
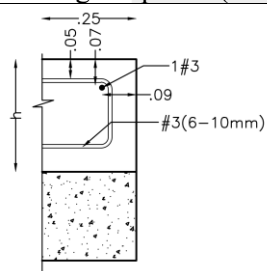


Figura 58. Vista 3D de acero de Viga (FS623 y FS624)



DETALLE V-S 25 x h

Esc. 1:20

Figura 59. Detalle de Viga Superior (FS625 y FS626)

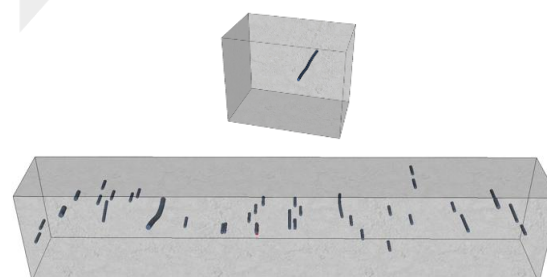
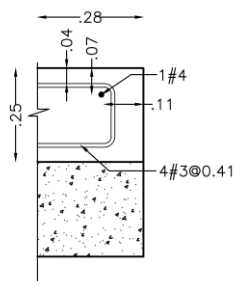


Figura 60. Vista 3D de acero de Viga (FS625 y FS626)



DETALLE V-S 28 x 25

Esc. 1:20

Figura 61. Detalle de Viga Superior (FS627 y FS628)

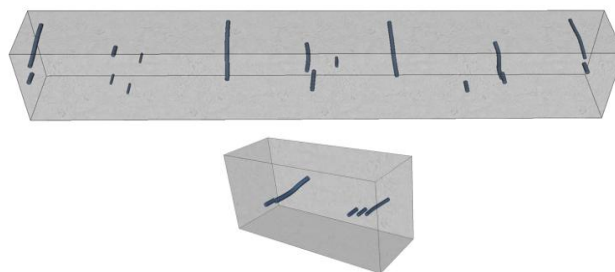
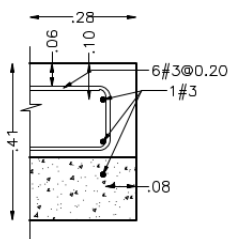


Figura 62. Vista 3D de acero de Viga (FS627 y FS628)



DETALLE V-S 28 x 41

Esc. 1:20

Figura 63. Detalle de Viga Superior (FS629 y FS630)

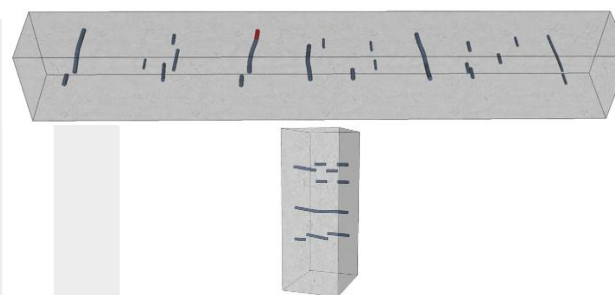
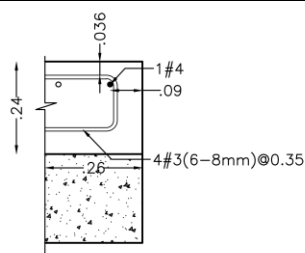


Figura 64. Vista 3D de acero de Viga (FS629 y FS630)



DETALLE V-S 26 x 24

Esc. 1:20

Figura 65. Detalle de Viga Superior (FS631 y FS632)

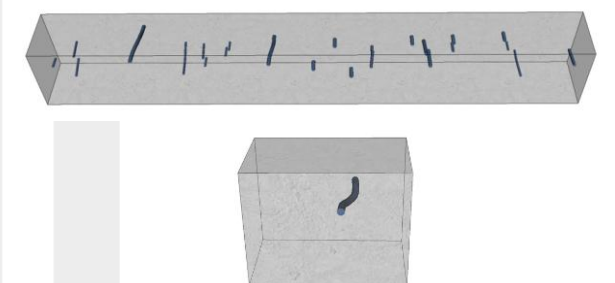
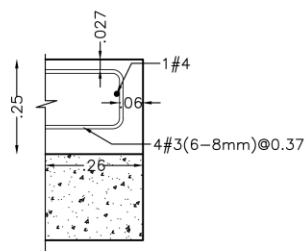


Figura 66. Vista 3D de acero de Viga (FS631 y FS632)



DETALLE V-S 26 x 25

Esc. 1:20

Figura 67. Detalle de Viga Superior (FS633 y FS634)

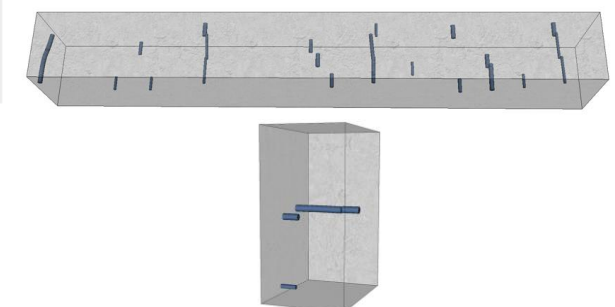
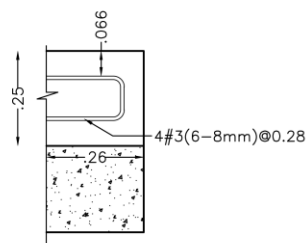


Figura 68. Vista 3D de acero de Viga (FS633 y FS634)



DETALLE V-S 26 x 25

Esc. 1:20

Figura 69. Detalle de Viga Superior (FS635 y FS636)

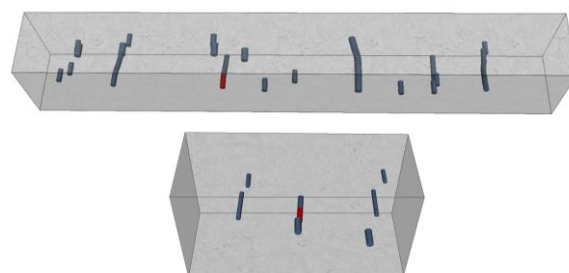
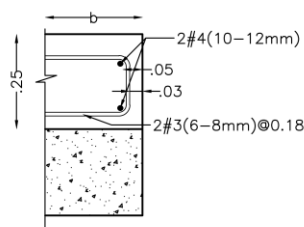


Figura 70. Vista 3D de acero de Viga (FS635 y FS636)



DETALLE V-S b x 25

Esc. 1:20

Figura 71. Detalle de Viga Superior (FS637 y FS638)

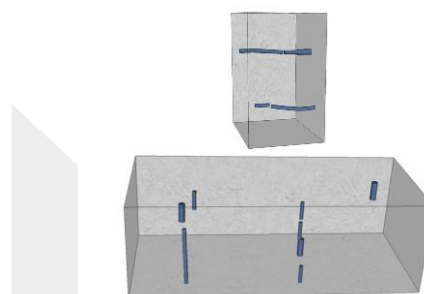
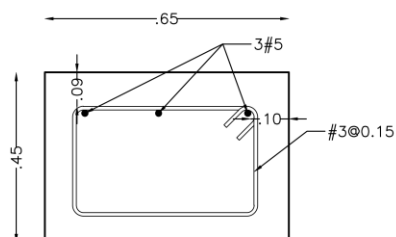


Figura 72. Vista 3D de acero de Viga (FS637 y FS638)



DETALLE V-C 65 x 45

Esc. 1:20

Figura 73. Detalle de Viga Superior (FS639 y FS640)

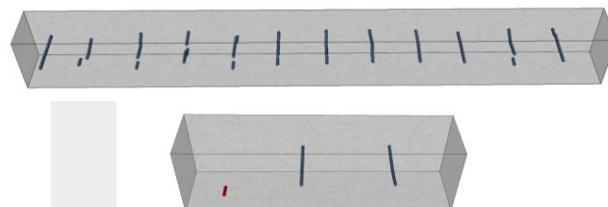
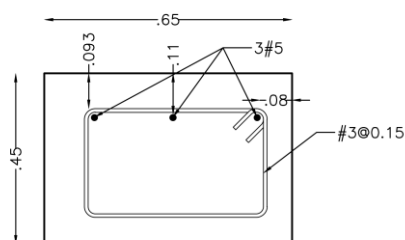


Figura 74. Vista 3D de acero de Viga (FS639 y FS640)



DETALLE V-C 65 x 45

Esc. 1:20

Figura 75. Detalle de Viga Superior (FS641 y FS642)

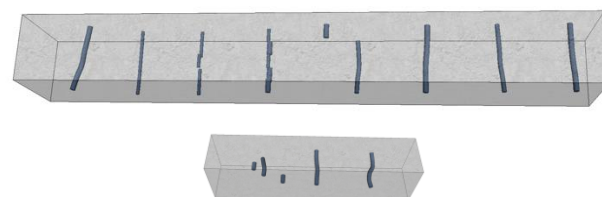
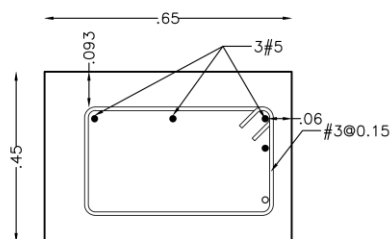


Figura 76. Vista 3D de acero de Viga (FS641 y FS642)



DETALLE V-C 65 x 45

Esc. 1:20

Figura 77. Detalle de Viga Superior (FS643, FS644 y FS645)

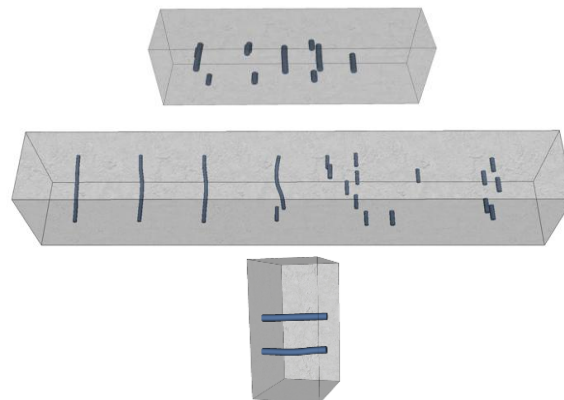
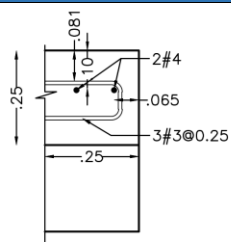


Figura 78. Vista 3D de acero de Viga (FS643, FS644 y FS645)

SECTOR7

Sección



DETALLE V-S 26 x 25

Esc. 1:20

Figura 79. Detalle de Viga Superior (FS71, FS72)

Vista 3D

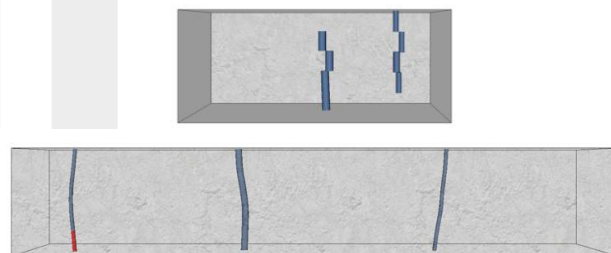
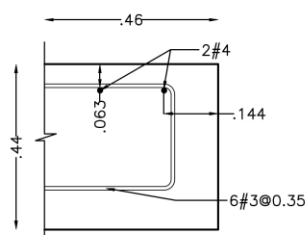


Figura 80. Vista 3D de acero de Viga (FS71, FS72)



DETALLE V-S 26 x 25

Esc. 1:20

Figura 81. Detalle de Viga Superior (FS77, FS78)

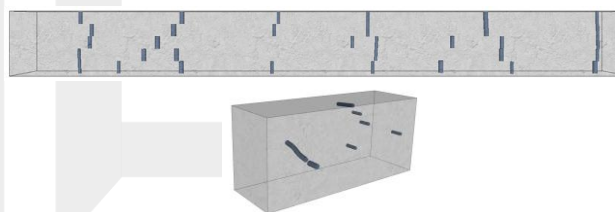


Figura 82. Vista 3D de acero de Viga (FS77, FS78)

9.2 AUSCULTACIONES

La inspección en sitio mediante auscultación es requerida en la verificación del estado de elementos estructurales de concreto reforzado. Este procedimiento que consistió en la apertura de surcos superficiales y localizados, con el fin de exponer visualmente el acero de refuerzo, permitió revisar su configuración, el estado de corrosión y recubrimiento. Para la ejecución de las auscultaciones se emplearon herramientas eléctricas manuales como una pulidora angular de 4½ pulgadas marca D-WALL® (ver **Imagen 145**) y un martillo demoledor marca BOSCH® (ver **Imagen 146**), permitiendo una intervención precisa y controlada sobre el elemento inspeccionado. Posteriormente

a la apertura, se efectuó la limpieza del área con cepillo manual, soplado, y posterior registro fotográfico de los hallazgos.

Una vez concluido el levantamiento visual, se procedió al sellado de las regatas mediante la aplicación de mortero de reparación tipo Mapegrout T60® (ver **Imagen 23**), asegurando el reemplazo del recubrimiento de concreto con materiales compatibles.



Imagen 145. Pulidora D-Wall



Imagen 146. Martillo demoledor BOSH

Se realizaron auscultaciones en los elementos estructurales con el fin de identificar la separación, recubrimiento y tipo de refuerzo. En la **Imagen 147** se ubican las 56 auscultaciones realizadas. Las evidencias se registran desde la **Imagen 148** a la **Imagen 233**



Imagen 147. Ubicación de auscultaciones en los distintos sectores

En la **Imagen 147** se presentan los resultados de las auscultaciones realizadas, indicando el valor del recubrimiento medido. Para la organización de los datos se empleó una nomenclatura compuesta por guiones, que discrimina el recubrimiento obtenido en milímetros [mm], el elemento intervenido y la cara evaluada.

En cuanto al elemento intervenido, se adoptaron las siguientes denominaciones:

- **VC:** Viga de Contención, correspondiente al sistema de contención adicional identificado en algunos sectores.
- **VP:** Viga Pasarela.
- **V:** Viga Superior o perimetral, donde se concentró la mayoría de los ensayos.

Respecto a la cara del elemento, la nomenclatura utilizada fue:

- **CL:** Cara Lateral.
- **CS:** Cara Superior.

Tabla 21 se presentan los resultados de las auscultaciones realizadas, indicando el valor del recubrimiento medido. Para la organización de los datos se empleó una nomenclatura compuesta por guiones, que discrimina el recubrimiento obtenido en milímetros [mm], el elemento intervenido y la cara evaluada.



En cuanto al elemento intervenido, se adoptaron las siguientes denominaciones:

- **VC:** Viga de Contención, correspondiente al sistema de contención adicional identificado en algunos sectores.
- **VP:** Viga Pasarela.
- **V:** Viga Superior o perimetral, donde se concentró la mayoría de los ensayos.

Respecto a la cara del elemento, la nomenclatura utilizada fue:

- **CL:** Cara Lateral.
- **CS:** Cara Superior.

Tabla 21. Resultados y análisis de recubrimientos en auscultaciones

| SECTOR 7 | |
|---|--|
| AU71 | |
|  <p>Imagen 148. Registro de recubrimiento cara lateral</p> <p>100-VC-CL</p> |  <p>Imagen 149. Registro de recubrimiento cara superior</p> <p>70-VC-CS</p> |
| AU72 | |







| | |
|--|--|
|  <p>Imagen 150. Registro de diámetro de barra</p> |  <p>Imagen 151. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 110-VP-CS | |
| AU73 | |
|  <p>Imagen 152. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 153. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 100-VC-CL | 165-VC-CS |
| AU74 | |
|  <p>Imagen 154. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 155. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 50-VC-CL | 10-VC-CS |
| SECTOR 6 | |
| AU61 | |



Imagen 156. Registro de recubrimiento cara superior

70-VC-CS

AU62



Imagen 157. Registro de diámetro de barra



Imagen 158. Registro de recubrimiento cara superior

80-V-CS

AU63-1



Imagen 159. Registro de recubrimiento cara lateral

80-V-CL



Imagen 160. Registro de recubrimiento y diámetro de barra cara superior

20-V-CS

AU63-2



Imagen 161. Registro de recubrimiento cara lateral

90-V-CL



Imagen 162. Registro de recubrimiento cara superior

75-V-CS

AU64



Imagen 163. Registro de diámetro de barra

40-V-CS



Imagen 164. Registro de recubrimiento cara superior

AU65



Imagen 165. Registro de diámetro de barra



Imagen 166. Registro de recubrimiento cara superior

40-V-CS






| AU66 | |
|--|---|
|  <p>Imagen 167. Registro de recubrimiento cara lateral y diámetro de barra</p> | |
| 60-V-CL | |
| AU67 | |
|  <p>Imagen 168. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 169. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 60-V-CL | 65-V-CS |
| AU68 | |
|  <p>Imagen 170. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 171. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 65-V-CL | 75-V-CS |
| AU69 | |



Imagen 172. Registro de recubrimiento cara lateral
45-V-CL



Imagen 173. Registro de diámetro de barra
0-V-CL

AU610



Imagen 174. Registro de recubrimiento cara lateral
70-V-CL



Imagen 175. Registro de recubrimiento cara superior
50-V-CS

AU611














Imagen 176. Registro de recubrimiento cara lateral
50-V-CL



Imagen 177. Registro diámetro de barra
75-V-CS

AU612

| | |
|--|--|
|  <p>Imagen 178. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 179. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 90-V-CL | 100-V-CS |
| AU613 | |
|  <p>Imagen 180. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 181. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 105-V-CL | 120-V-CS |
| AU614 | |
|  <p>Imagen 182. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 183. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 165-V-CL | 160-V-CS |
| AU615 | |

| | |
|--|---|
|  <p>Imagen 184. Registro de recubrimiento cara lateral 75-V-CL</p> |  <p>Imagen 185. Registro de recubrimiento cara superior 0-V-CS</p> |
| AU616 | |
|  <p>Imagen 186. Registro de recubrimiento cara lateral 20-V-CL</p> |  <p>Imagen 187. Registro de recubrimiento cara superior 10-V-CS</p> |
| AU617 | |
|  <p>Imagen 188. Registro de recubrimiento cara lateral 200-VI-CL</p> | |
| AU618 | |







| | |
|---|--|
|  <p>Imagen 189. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 190. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 75-VC-CL | 110-VC-CS |
| AU619 | |
|  <p>Imagen 191. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 192. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 110-VC-CL | 110-VC-CS |
| AU620 | |
|  <p>Imagen 193. Registro de diámetro de barra</p> |  <p>Imagen 194. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 100-V-CS | |
| SECTOR 5 | |
| AU51 | |



Imagen 195. Registro de diámetro de barra



Imagen 196. Registro de recubrimiento cara superior

130-VC-CS

AU2



Imagen 197. Registro de diámetro de barra







Imagen 198. Registro de recubrimiento cara superior

130-VC-CS

AU3



Imagen 199. Registro de recubrimiento y diámetro de barra

| 0-V-CL | 0-V-CS |
|---|---|
| AU54 | |
|  | |
| Imagen 200. Registro de recubrimiento | |
| 0-V-CL | 0-V-CS |
| SECTOR 4 | |
| AU41 | |
|  |  |
| Imagen 201. Registro de recubrimiento cara lateral | Imagen 202. Registro de diámetro de barra |
| 125-V-CL | |
| AU42 | |
|  | |


| | |
|---|---|
| Imagen 203. Registro de recubrimiento cara lateral | |
| 125-V-CL | |
| AU43 | |
|  <p>Imagen 204. Registro de diámetro de barra transversal</p> |  <p>Imagen 205. Registro de diámetro de barra longitudinal</p> |
| AU44 | |
|  <p>Imagen 206. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 207. Registro de diámetro de barra</p> |
| 115-V-CL | |
| AU45 | |
|  <p>Imagen 208. Registro de diámetro de barra</p> |  <p>Imagen 209. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 70-V-CS | |
| AU46 | |



Imagen 210. Registro de recubrimiento cara lateral

0-V-CL

AU47



Imagen 211. Registro de recubrimiento cara lateral

0-V-CL

AU48

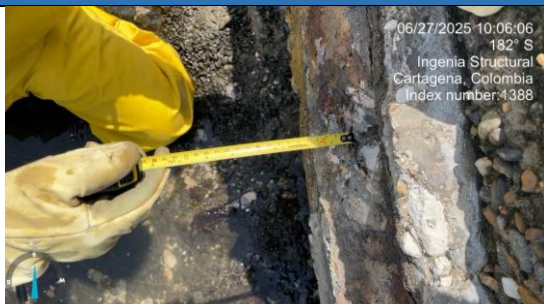


Imagen 212. Registro de recubrimiento cara lateral



Imagen 213. Registro de diámetro de barra

40-V-CL

AU49

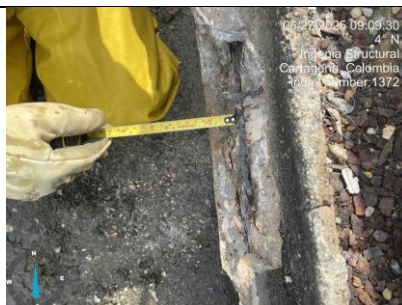


Imagen 214. Registro de recubrimiento cara lateral

35-V-CL

SECTOR 3

AU31



Imagen 215. Registro de recubrimiento cara lateral

30-V-CL

AU32

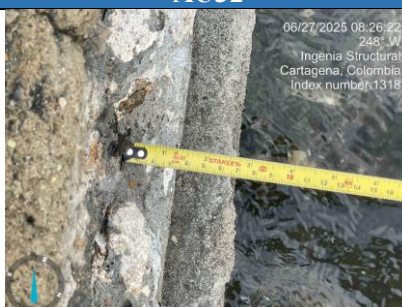


Imagen 216. Registro de recubrimiento cara lateral

30-V-CL

AU33



Imagen 217. Registro de recubrimiento cara lateral y diámetro de barra

20-V-CL

AU34





| | |
|--|--|
|  <p>Imagen 218. Registro de recubrimiento cara lateral</p> | |
| 40-V-CL | |
| AU35 | |
|  <p>Imagen 219. Registro de recubrimiento cara lateral</p> | |
| 45-V-CL | |
| SECTOR 2 | |
| AU21 | |
|  <p>Imagen 220. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 221. Registro de recubrimiento cara superior</p> |
| 90-V-CL | 115-V-CS |
| AU22 | |



Imagen 222. Registro de recubrimiento cara superior

50-V-CS

AU23



Imagen 223. Registro de recubrimiento cara superior






100-V-CS

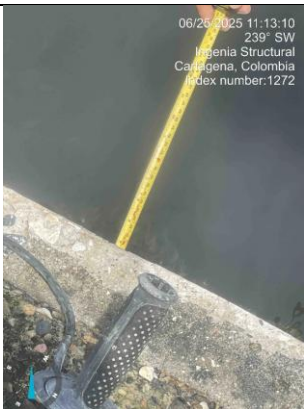



AU23



Imagen 224. Registro de diámetro de barra

SECTOR 1

| AU12 | |
|--|---|
|  <p>06/23/2025 10:15:33 121 SE Ingenia Structural Cartagena, Colombia Index number: 1253</p> <p>Imagen 225. Registro de recubrimiento cara lateral</p> <p>50-V-CL</p> |  <p>06/23/2025 10:15:25 136 SE Ingenia Structural Cartagena, Colombia Index number: 1251</p> <p>Imagen 226. Registro de recubrimiento cara superior</p> <p>35-V-CS</p> |
| AU13 | |
|  <p>06/26/2025 10:25:26 201 S Ingenia Structural Cartagena, Colombia Index number: 1263</p> <p>Imagen 227. Registro de recubrimiento cara lateral</p> <p>90-V-CL</p> | |
| AU14 | |
|  <p>Imagen 228. Registro de recubrimiento cara lateral</p> <p>75-V-CL</p> |  <p>06/26/2025 10:45:45 245 N Ingenia Structural Cartagena, Colombia Index number: 1268</p> <p>Imagen 229. Registro de diámetro de barra</p> |
| AU15 | |

| | |
|---|--|
|  <p>Imagen 230. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 231. Registro de auscultación</p> |
| 90-V-CL | |
| AU16 | |
|  <p>Imagen 232. Registro de recubrimiento cara lateral</p> |  <p>Imagen 233. Registro de auscultación</p> |
| 80-V-CL | |

9.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RECUBRIMIENTO

A partir de los ensayos de ferro scanner y auscultaciones se obtuvo información sobre el recubrimiento medido en cada punto del elemento estructural analizado y se graficó la información según el tipo de ensayo y según el sector medido, tal como se muestra en la **Figura 83** y **Figura 84**

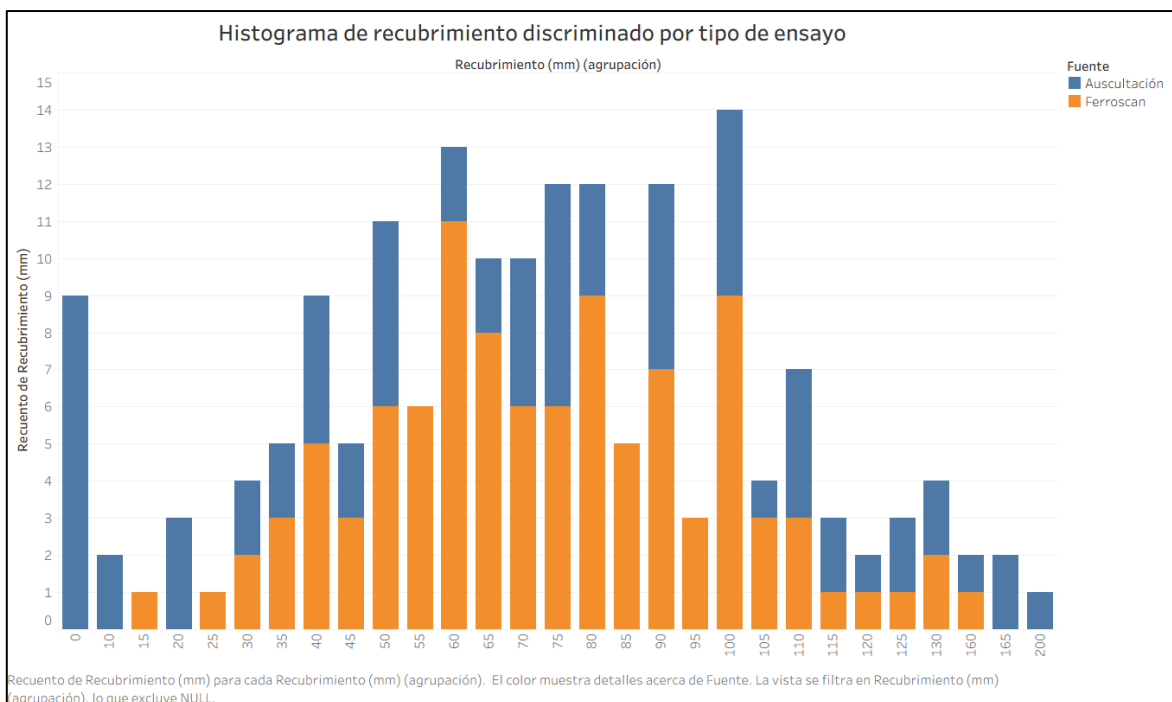


Figura 83. Histograma de recubrimiento medido según ensayo

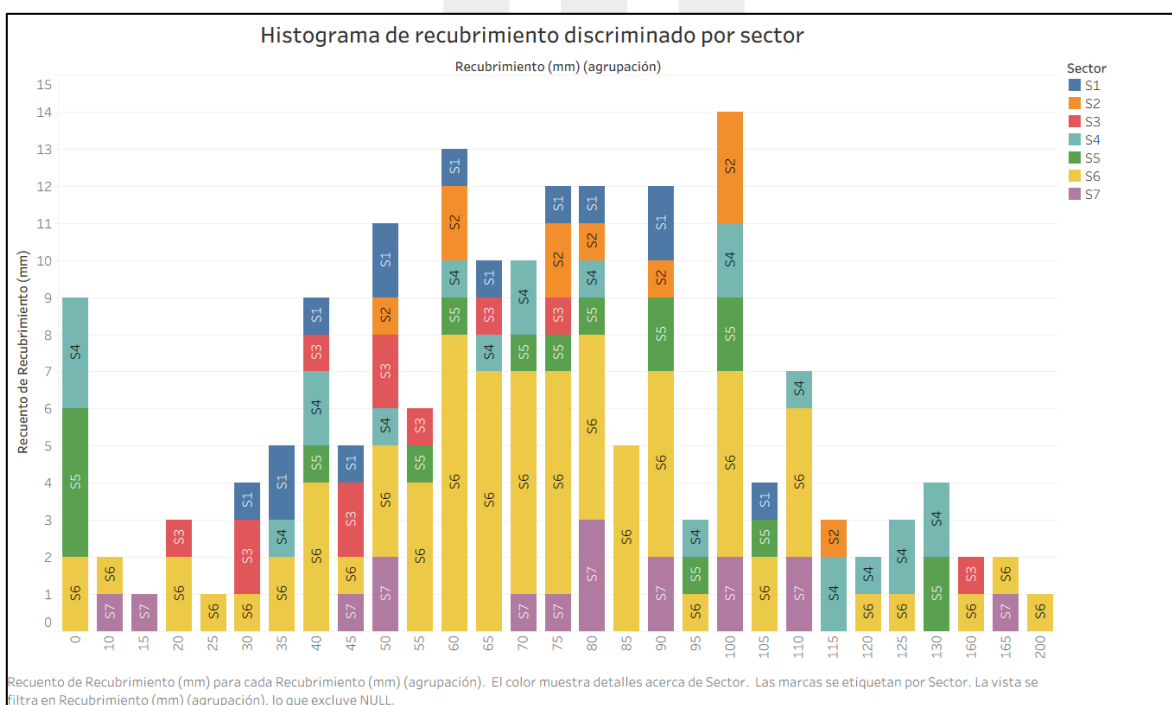
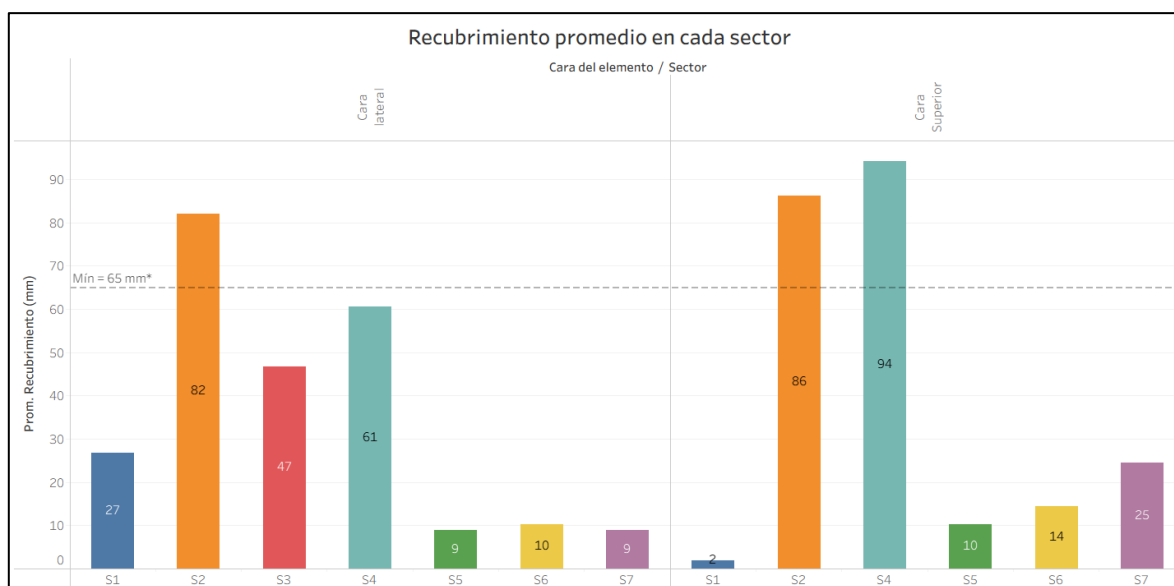


Figura 84. Histograma de recubrimiento medido discretizado por sector

De los histogramas se infiere que la media de los datos es de aproximadamente 75 mm. No obstante, es importante precisar que los ensayos se realizaron únicamente en zonas sin presencia de acero de refuerzo expuesto. Por tal motivo, además de las auscultaciones y mediciones con ferroskan, se consideraron puntos equivalentes con recubrimiento 0 mm, tomando como referencia la información

consignada en el capítulo de INSPECCIÓN VISUAL, con el fin de evitar sesgos derivados de la selección de las zonas ensayadas.

Para un análisis más detallado, los datos fueron discretizados por cara del elemento ensayado, con el objetivo de identificar el recubrimiento más crítico, correspondiente a la cara expuesta al mar. Esta discretización del recubrimiento medio, clasificada por cara del elemento y por sector, se presenta en la **Figura 85**.



*Según la normativa NSR10 Capítulo C.7.7.6.

Figura 85. Gráfico de barras de recubrimiento medio discretizado por cara del elemento y por sector

Con base en el gráfico, se determina que únicamente los sectores 2 y 4 cumplen con un recubrimiento mínimo superior a 65 mm en la cara superior de los elementos analizados. En cuanto a la cara lateral, el cumplimiento se observa únicamente en el sector 2. En los demás sectores, los recubrimientos se encuentran significativamente por debajo de lo exigido normativamente, lo cual podría estar asociado al ataque de sulfatos o a procesos de erosión del concreto, ocasionando la pérdida de recubrimiento en la matriz. Esta información resulta fundamental para el cálculo de la vida útil de la estructura, que será estimado en secciones posteriores del informe.

10 EXPLORACIÓN DE CIMENTACIONES

Los resultados de la exploración mediante apiques de cimentación son presentados en el informe de estudio estructural.

11 ENSAYOS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)

El ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) es un parámetro que permite determinar la calidad del concreto evitando la ejecución de ensayos destructivos. El equipo utilizado para llevar a cabo el ensayo fue el Pundit® PL-200 de Proceq (ver **Imagen 234**), el cual es un instrumento que permite determinar la velocidad de propagación de los impulsos de las vibraciones longitudinales ultrasónicas que pasan a través del concreto. Cabe destacar que tanto el procedimiento como el equipo cumplen con lo estandarizado en la normativa ASTM-C597 – 16.



Imagen 234. *Pundit® PL-200 de Proceq*

El equipo utilizado tiene la capacidad de desarrollar una gran variedad de metodologías de ensayo. Este está compuesto por tres elementos fundamentales: (i) La pantalla táctil, donde se configuran los parámetros del ensayo, y se da inicio y finalización a la transmisión de la onda; (ii) una pareja de transductores de 54kHz, los cuales sirven para transmitir y recibir el pulso; y (iii) dos cables BNC de 1.5 m para enviar el pulso del equipo al transmisor y del receptor al equipo nuevamente. Es importante tener en cuenta que la dimensión del elemento, la temperatura y nivel de humedad de la superficie son los parámetros externos que se deben tener en cuenta para la correcta ejecución del ensayo. En términos generales, el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico se puede clasificar de la siguiente manera:

- i. **Transmisión Directa:** Consiste en localizar los transductores uno en frente del otro con el elemento de interés directamente en el medio. Este tipo de transmisión proporciona un ensayo de mayor sensibilidad, una onda bien definida y facilita la medición de la distancia entre transductores. Siempre que sea posible se debe optar por esta alternativa.
- ii. **Transmisión Semidirecta:** Es un método utilizado cuando por algún motivo no se puede realizar una medición directa (e.g. una viga perimetral en la cual solo son visibles dos caras adyacentes). En esta opción los transductores se ubicarían de tal forma que, si proyecta una línea recta desde la cara de los transductores hacia la superficie del elemento, la línea que proyecta uno cruce de forma perpendicular la línea que proyecta el otro. La distancia que se debe tomar como parámetro de entrada será la línea diagonal directa que se forma entre ellos y se calcula a través del teorema de Pitágoras.
- iii. **Transmisión Indirecta:** Esta opción consiste en ubicar un transductor con respecto al otro de forma paralela y apoyándose sobre la superficie del elemento. La distancia a utilizar es la línea recta entre el centro de cada transductor. Este tipo de transmisión es la menos preferida porque la onda viaja a través del concreto superficial y se asume que este es representativo para la masa de concreto central del elemento. Por otro lado, la asunción de que la distancia entre transductores es de centro a centro no es del todo correcta. Sin embargo, esta técnica es la preferida para la estimación de profundidades de grietas en elementos estructurales y pavimentos.

En la **Figura 86** se presenta un esquema de los tipos de medición de VPU (las letras T y R representan al transmisor y receptor, respectivamente). La línea roja representa el trayecto del pulso ultrasónico para cada caso particular, que es equivalente a la distancia entre transductores.

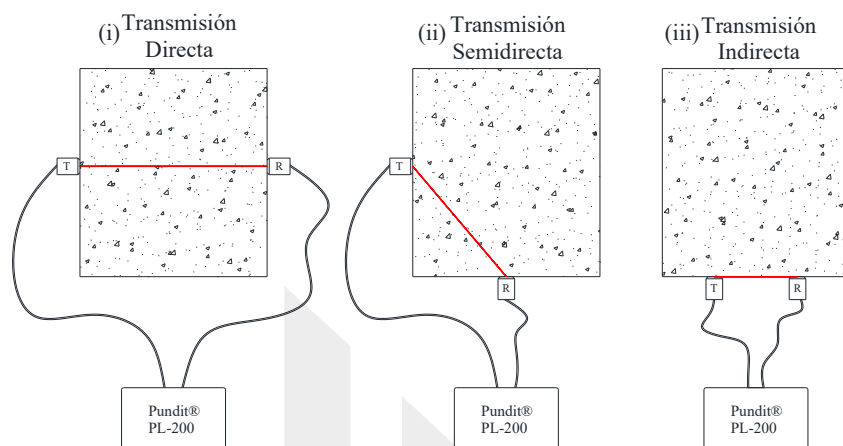


Figura 86. Métodos de transmisión de pulsos ultrasónicos

Se realizaron 40 ensayos de ultrasonidos ubicados en los distintos sectores. (ver **Imagen 235** e **Imagen 236**), cada toma de datos se realizó en zonas que permitieran la correcta realización de este, es decir, en zonas donde el elemento estructural tuviera un acabado regular.



Imagen 235. Ubicación de ensayos de ultrasonidos



Imagen 236. Ultrasonidos en sector 4

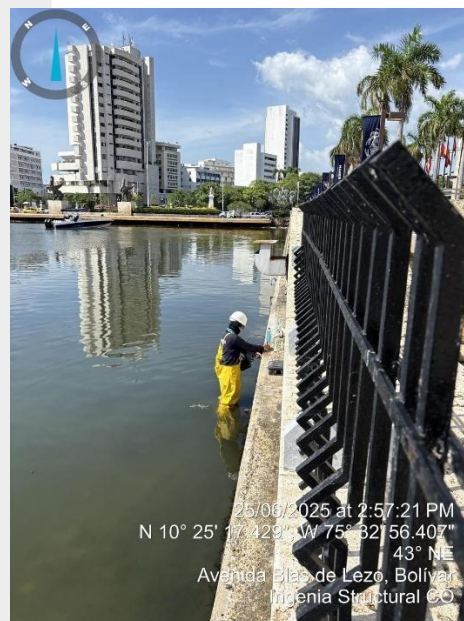
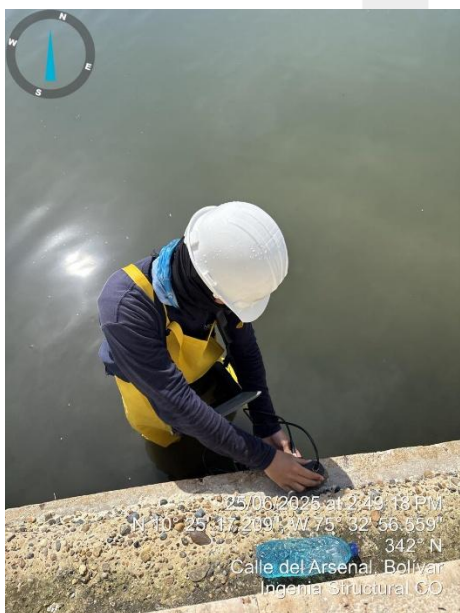


Imagen 237. Ultrasonidos en sector 1



Imagen 238. Ultrasonidos en sector 2

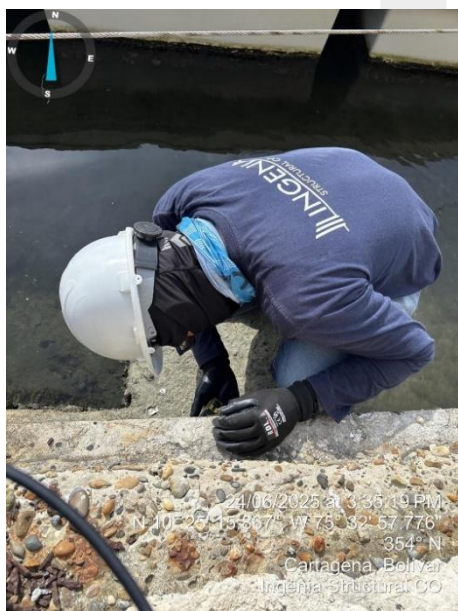


Imagen 239. Ultrasonidos en sector 3



Imagen 240. Ultrasonidos en sector 4



Imagen 241. Ultrasonidos en sector 5

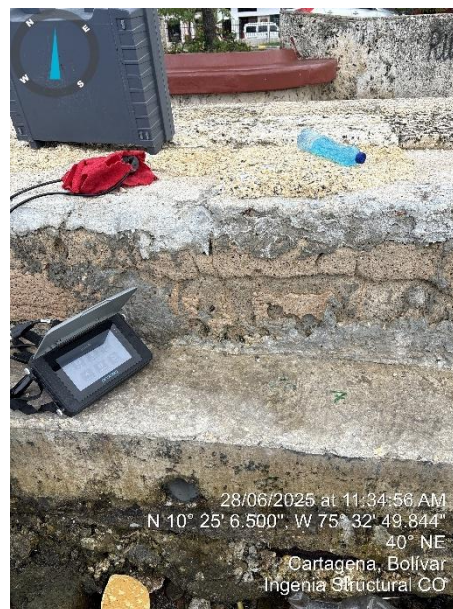
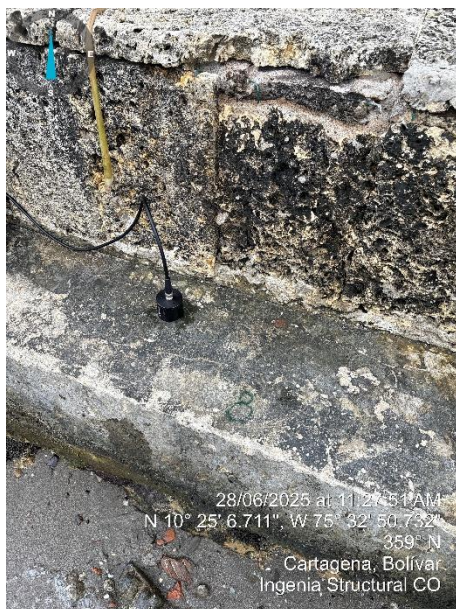


Imagen 242. Ultrasonidos en sector 6



Imagen 243. Ultrasonidos en sector 7

11.1 RESULTADOS DE VPU

Los resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se realizaron en cada uno de los puntos mencionados en la **Imagen 235** mayormente con el método de medición semidirecta debido a la configuración del elemento evaluado, (Ver **Figura 86**). En cada ensayo se tomaban cinco mediciones, por lo que cada resultado expuesto corresponde al promedio de estos datos.

En la **Figura 87** se presenta un resultado arrojado por el Pundit® PL-200 de Proceq; en el punto de medición, S1UL3.5. En esta figura se puede observar la velocidad medida (2471 m/s) en la cuarta

columna de la tabla, mientras que en la quinta columna se presenta la distancia entre transductores (0.156 m). En color azul se muestra la gráfica del pulso capturada por el equipo. Gráficos como este (i.e, **Figura 87**) correspondientes a todas las mediciones se encontrarán adjuntos en **ANEXOS**.

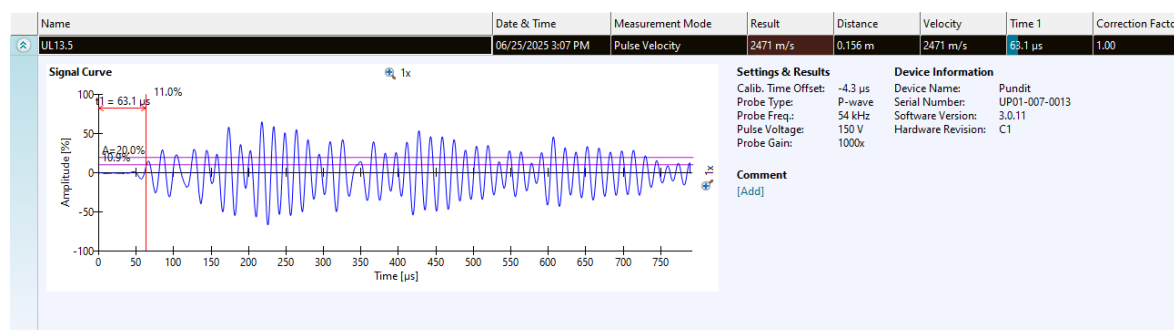


Figura 87 Resultado de VPU arrojado por el Pundit® PL-200 de Proceq. UL13.5 – Sector 1, ensayo 3 medición 5

Con el objetivo de tener una evaluación cualitativa de la calidad del concreto del recubrimiento, se utiliza un criterio de clasificación que depende del resultado de la VPU. Esta clasificación es recomendada por The National Research Council of Canada que presenta Saint-Pierre et. Al (2016). Según este estudio, la calidad del concreto se puede clasificar entre Excelente, Bueno, Cuestionable, Pobre y Muy Pobre dependiendo del valor de la velocidad de pulso ultrasónico medida. En la **Tabla 22** se muestran los rangos de valores que corresponde a cada una de las clasificaciones.

Tabla 22. Calidad del concreto con referencia al VPU

| UPV [m/s] | Calidad |
|-------------|--------------|
| > 4500 | Excelente |
| 3600 – 4500 | Bueno |
| 3000 – 3600 | Cuestionable |
| 2100 – 3000 | Pobre |
| < 2100 | Muy pobre |

A continuación, se presenta el resumen estadístico de los datos de velocidad de pulso ultrasónico obtenido para cada uno de los puntos de medición considerados a lo largo de la estructura de soporte y clasificados según la calidad de concreto, tal como se muestra en la Figura 88.

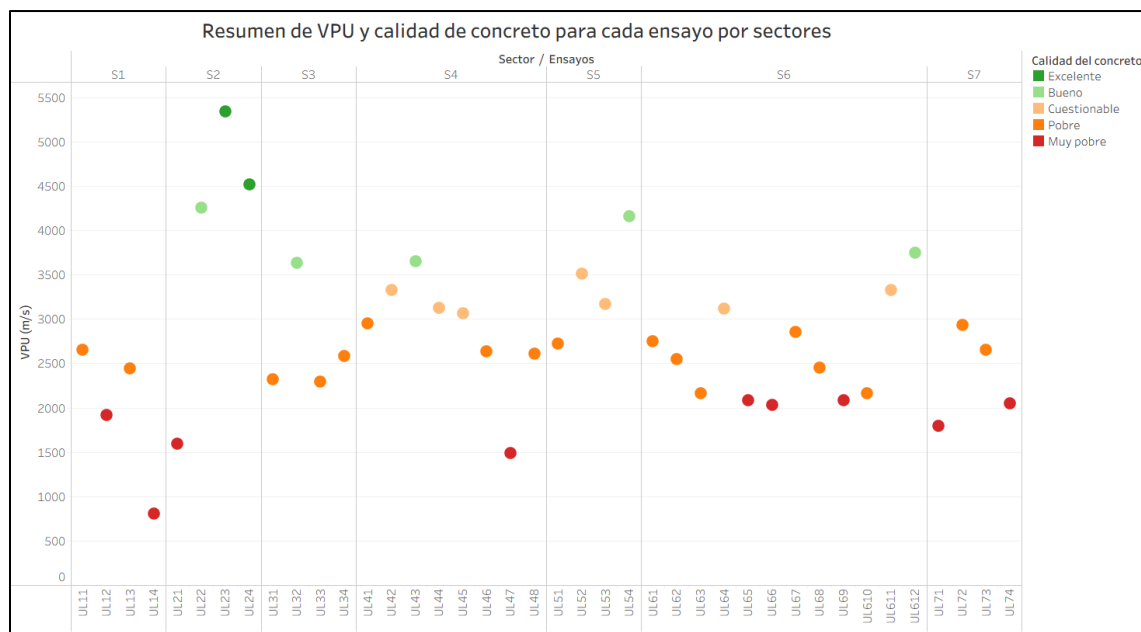


Figura 88. Resultado de VPU arrojado por el Pundit® PL-200 de Proceq

El gráfico de puntos muestra los valores del VPU promedio para cada ensayo realizado, discretizado por sectores (S1 a S7) y por la calidad de concreto. Para la mayoría de los sectores, los datos reportados corresponden con calidades de concreto cuestionable, pobre y muy pobre. Únicamente en el sector 2 se registran calidades excelentes del concreto, y por lo menos uno de los datos reportados de los en los sectores alcanzan a registrar una medición con calidad buena.

Además del gráfico de puntos, se organizó la información en un histograma de frecuencias en el cual se muestra con el color la calidad del concreto y la etiqueta indica el sector de donde se obtuvo la medición tal como se muestra en la Figura 89.

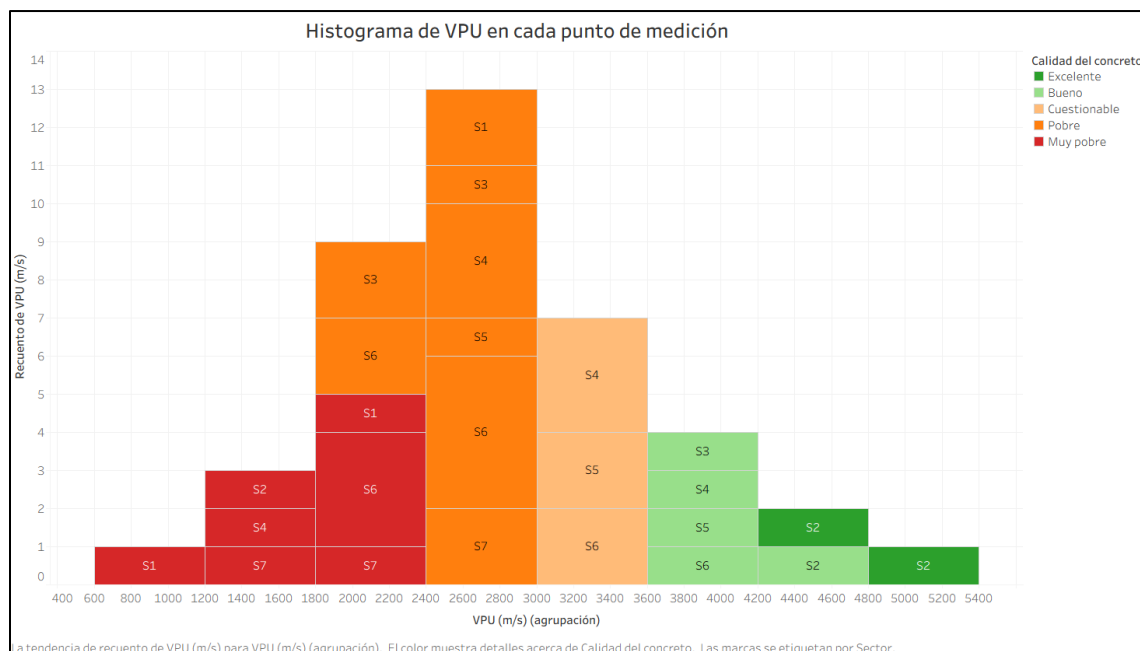


Figura 89 Resultado de VPU arrojado por el Pundit® PL-200 de Proceq

El histograma presenta un rango de los valores de medición de VPU de 4500 m/s que comprende datos entre los 1000 m/s y los 5500 m/s. Sin embargo, los datos se concentran en los intervalos de 1000 – 3600 m/s, es decir, calidades entre cuestionable y muy pobre, lo que refleja el estado de deterioro del concreto de recubrimiento en el elemento viga cabezal.

En la Figura 90 se agrupó el recuento de ensayos con el detalle de la calidad de concreto para cada sector, con el fin de evidenciar el estado proyectado de cada una de las zonas estudiadas.

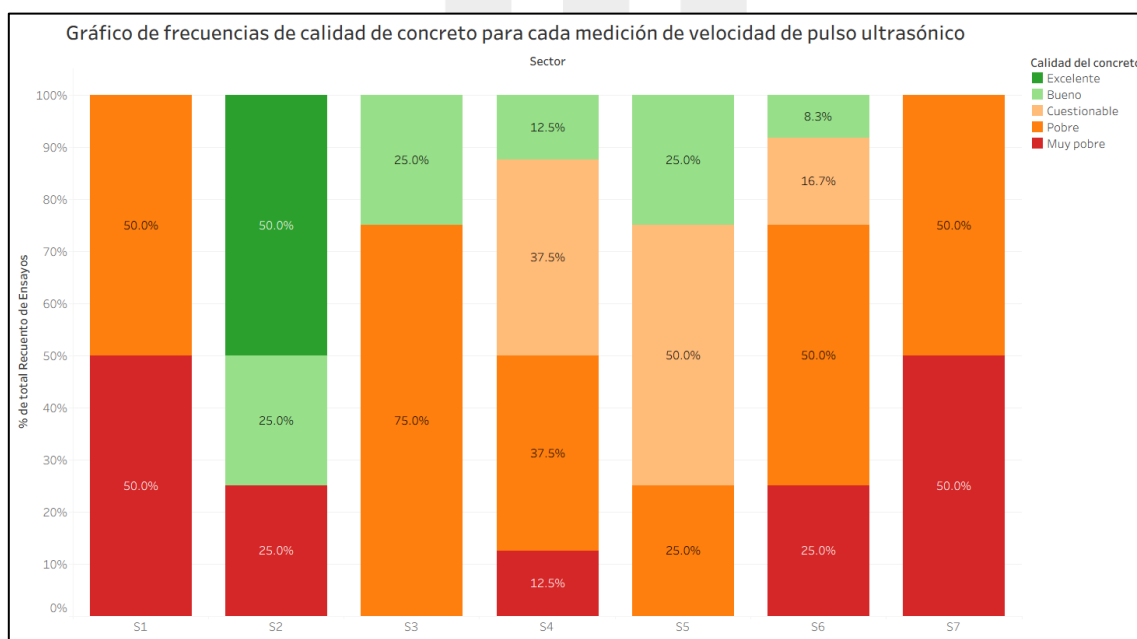


Figura 90 Resultado de VPU reportado por el Pundit® PL-200 de Proceq.

En la gráfica se evidencia que en los sectores 1 y 7 la calidad del concreto es pobre o muy pobre. En el sector 6 la calidad es mayormente pobre, seguida de muy pobre, cuestionable y un pequeño porcentaje buena. En el sector 5 se obtuvieron calidades entre buenas y pobres, teniendo un mayor peso las cuestionables, debido a que se evaluó la calidad del concreto del elemento de contención. En el sector 4 se obtuvieron mayormente calidades entre cuestionables y pobres. El sector 3 presentó que la mayoría de los puntos evaluados tienen una calidad pobre. Finalmente, el sector 2, es la zona que mejor se encuentra en términos de calidad, presentando datos excelentes y buenos, el dato que presenta calidad muy pobre, corresponde a una pequeña zona del sector 2 que no fue reconstruida.

12 ENSAYO DE POTENCIAL DE CORROSIÓN

La evaluación de los potenciales de media celda se realizó de acuerdo con la norma ASTM C876 con el fin de monitorear el estado del acero de refuerzo embebido en los elementos estructurales de las bodegas en las zonas cercanas al acero emergiendo de los mismos y detectar anomalías asociadas con la presencia de corrosión del acero de refuerzo. Para ejecutar este ensayo se empleó un voltímetro de alta impedancia marca MC Miller ® (ver) y un electrodo de referencia de cobre – sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) (ver) calibrado previo a la realización de los ensayos. Las mediciones de potencial de corrosión o potencial de media celda se utilizan para determinar la probabilidad de corrosión presente en estructuras de concreto reforzado y emplea una instrumentación y configuración como la que se muestra en la **Figura 91**. En general es de importancia establecer zonas donde los potenciales del acero cambian a valores más negativos, indicando que se incrementa la probabilidad de daño por corrosión o viceversa. Se utiliza el Ferroskann (ver **Imagen 21**) para ubicar barra de acero de refuerzo y luego, se procede a descubrir el concreto para hacer visible la barra mediante el taladro percutor (ver **Imagen 146**), por último, las reparaciones se realizan con mortero de reparación, ver **Imagen 23**.

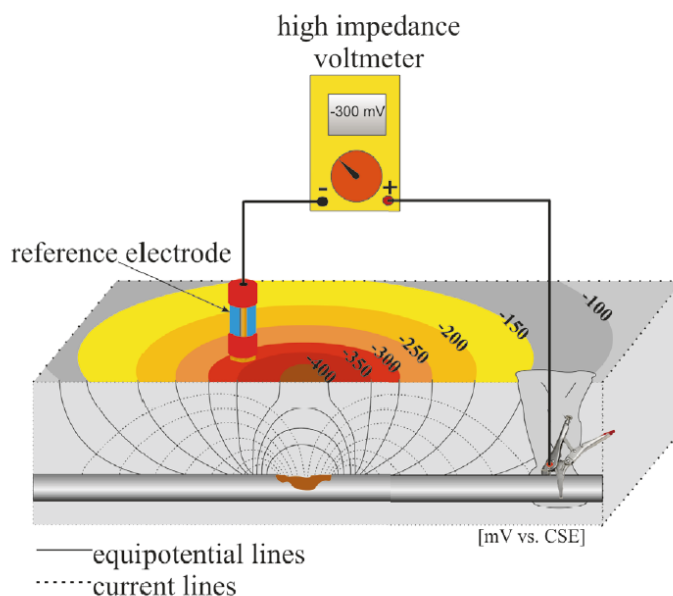


Figura 91. Configuración del ensayo de potencial de corrosión [1]



Imagen 244. Voltímetro MC Miller



Imagen 245. Electrodo de sulfato de cobre

Para determinar la actividad de corrosión en el acero de refuerzo, la norma ASTM C-876 interpreta los datos recopilados sobre las estructuras de concreto reforzado. La norma define la probabilidad de presencia de corrosión de la siguiente manera:

- i. Si los potenciales medidos sobre un área son numéricamente mayores (dirección positiva) a $-0,20\text{ V}$ (-200 mv) respecto a un electrodo de cobre-sulfato de cobre (CSE), existe una probabilidad superior al 90% de que no existe corrosión presente en el acero de refuerzo en esa área en el momento de la medición.
- ii. Si los potenciales sobre un área están en el rango de $-0,20\text{ V}$ (-200 mv) a $-0,35\text{ V}$ (-350 mv) CSE, la actividad de corrosión del acero de refuerzo en esa área es incierta.
- iii. Si los potenciales sobre un área son numéricamente menores (dirección negativa) que $-0,35\text{ V}$ (-350 mv) CSE, hay una probabilidad mayor de 90% de que ocurra corrosión de acero de refuerzo en esa área en el momento de la medición.

Debe tenerse en cuenta que esta norma es aplicable a concreto expuesto a la atmósfera, húmedo y seco. El método de ensayo de potencial de media celda consta de los siguientes pasos y fue ejecutado en diversas zonas de la estructura para tener un panorama general del estado del acero de refuerzo:

- i. Identificar la ubicación de la armadura (Ferro Scanner PS 300 HILTI), hacer una conexión con el acero de refuerzo embebido (se verifica si existe alguna discontinuidad entre los aceros) y se determina el espesor de recubrimiento para cada caso específico.
- ii. Trazar una cuadrícula que coincida con la posición del acero de refuerzo. Para la mayoría de las vigas la cuadrícula tenía 20 cm espaciamiento horizontal) y entre 18-20 centímetros de espaciamiento vertical, abarcando áreas de las vigas. En el resto, sus espaciamientos eran de 10 cm de forma horizontal.
- iii. Preparar la superficie de concreto, humedeciendo con agua las zonas donde se tomarán las mediciones. En caso de que el concreto esté carbonatado, se debe considerar para interpretación de los resultados.
- iv. Tomar las lecturas de potenciales colocando la punta del electrodo de referencia en contacto con la superficie de concreto en las intersecciones de la cuadrícula trazada y procesar los resultados.

A continuación, la ubicación de los 45 ensayos realizados en la **Imagen 246**.



Imagen 246. Ubicación de ensayos de potencial de corrosión

A continuación, se presentan las mediciones y resultados obtenidos en cada uno de los puntos evaluados mediante ensayos de potenciales de corrosión. Cada resultado se acompaña de su respectivo análisis técnico y representación gráfica del gradiente de potenciales medido en campo. Estos datos permiten identificar el estado de corrosión del refuerzo en las distintas zonas inspeccionadas.

12.1 SECTOR 7

PC71

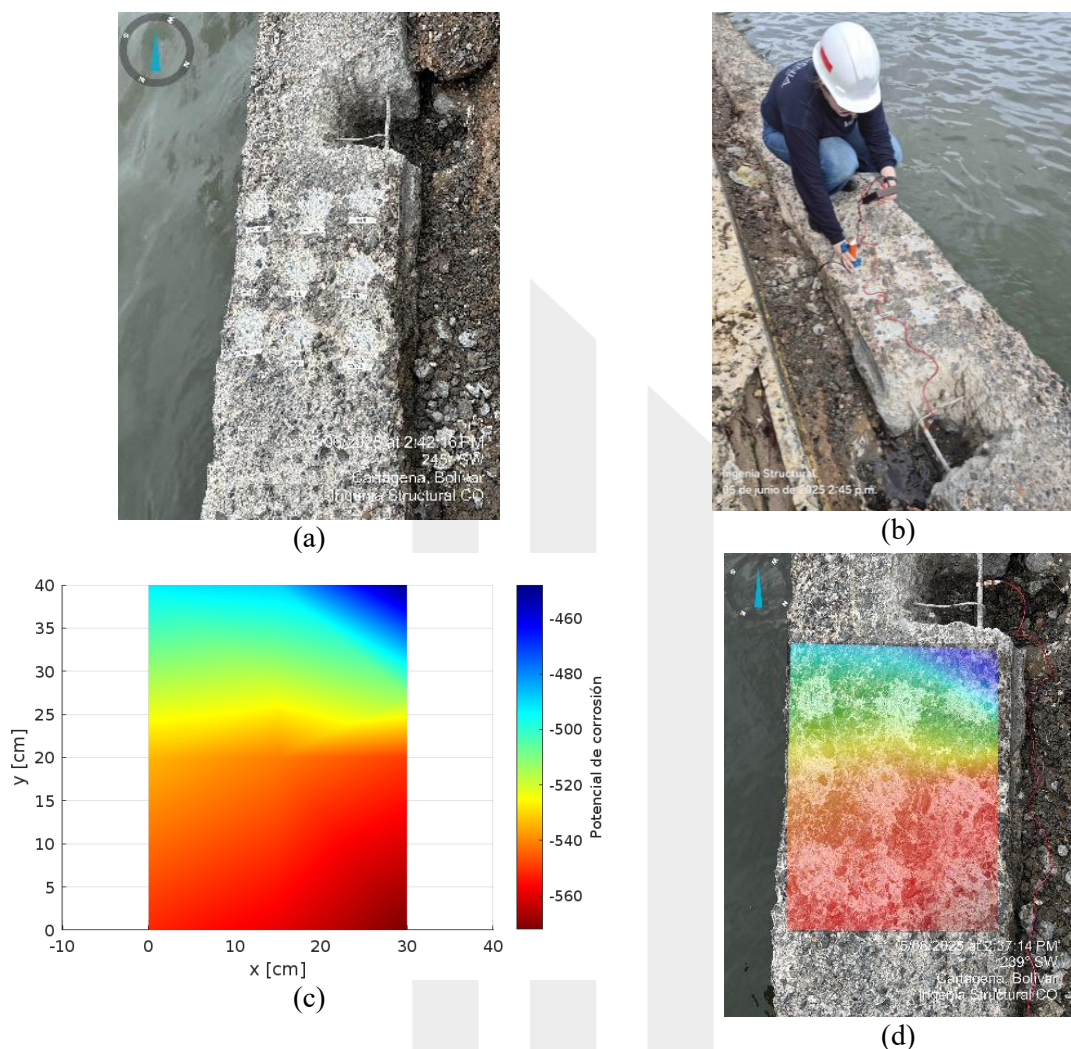


Figura 92. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC71

El mapa de colores evidencia un gradiente de potenciales que varía desde aproximadamente -460 mV hasta -560 mV frente al electrodo de referencia. El patrón predominante de colores cálidos (rojo intenso) en la zona inferior del mapa indica valores inferiores a -540 mV. Según la referencia normativa, estos valores se ubican por debajo de -350 mV, lo que indica con una probabilidad superior al 90% la presencia de procesos activos de corrosión en el acero de refuerzo. El mapa de colores confirma que la mayor concentración de potenciales bajos se localiza en las áreas inferiores del elemento evaluado, clasificando el área como crítica en cuanto a riesgo de corrosión.

PC72

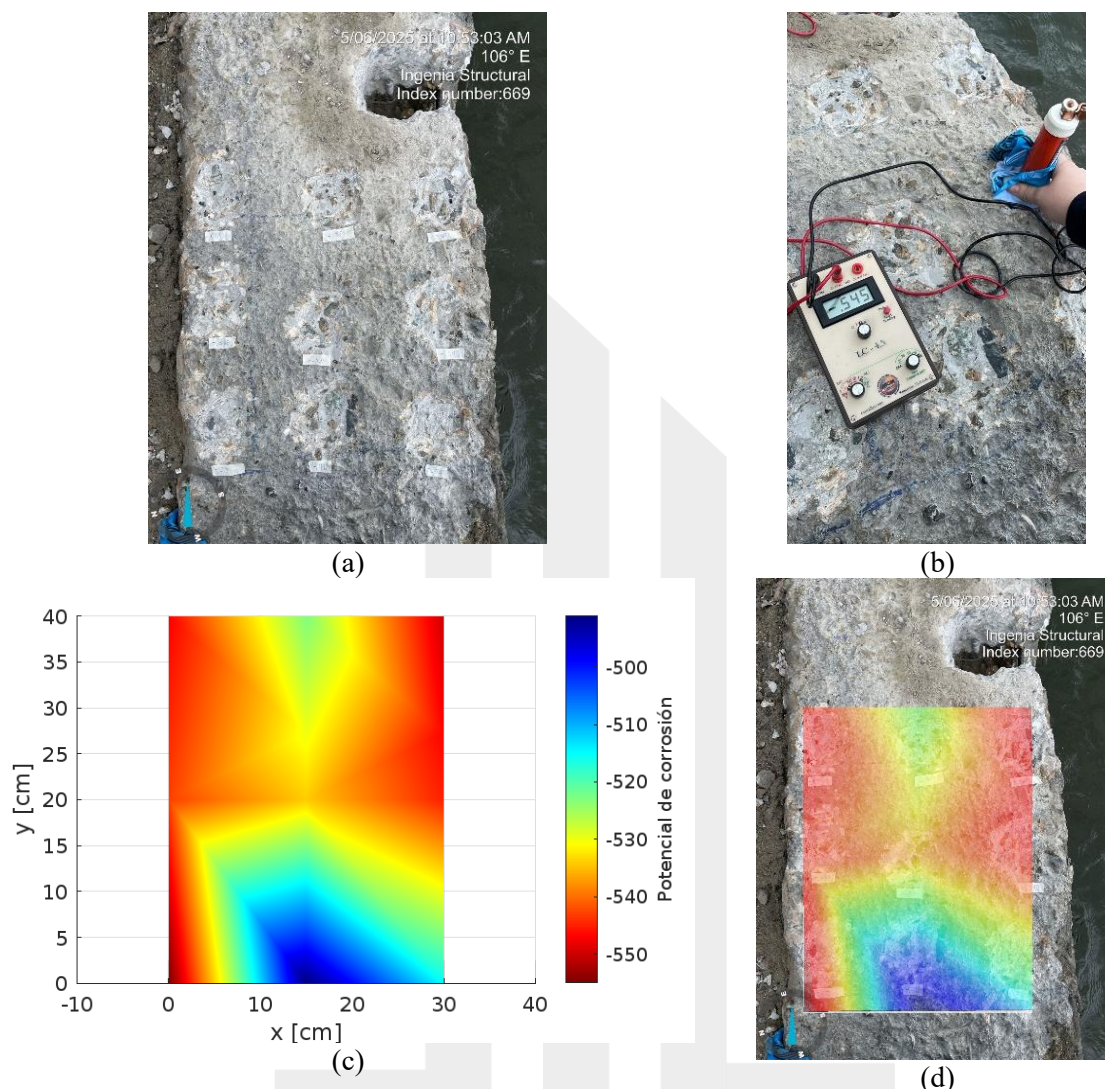


Figura 93. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC72

El resultado del ensayo PC72 muestra potenciales de corrosión entre -500 mV y -550 mV (ver **Figura 93**) respecto al electrodo CSE. Este patrón indica una probabilidad superior al 90% de corrosión activa del acero de refuerzo en la mayor parte del área evaluada. La zona superior - central del mapa presenta los valores más negativos, confirmando un estado avanzado de deterioro en ese sector específico.

12.2 SECTOR 6

PC61

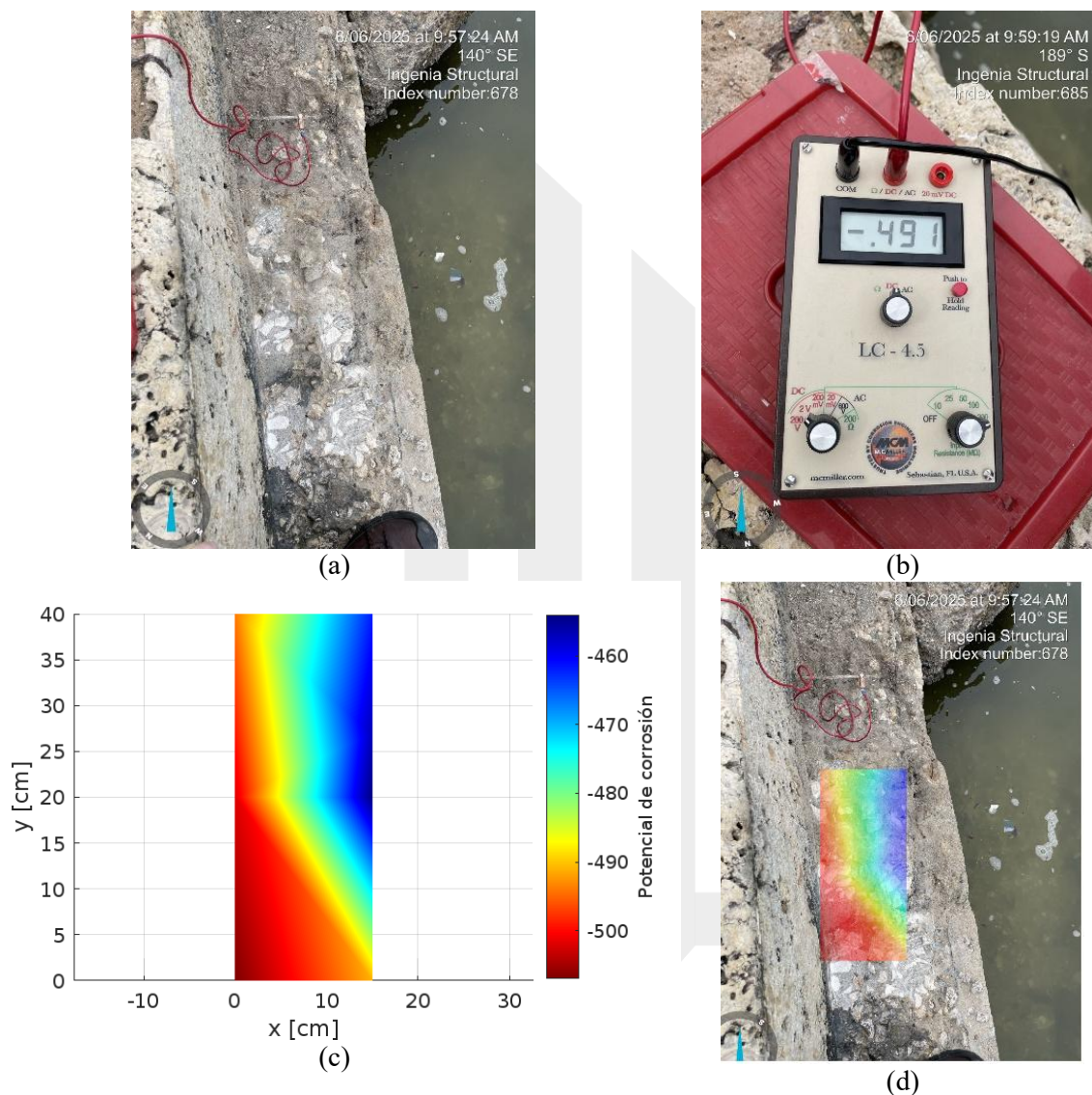


Figura 94. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC61

El mapa del ensayo PC61 muestra potenciales de corrosión entre -460 mV y -500 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores reflejan una alta probabilidad de corrosión activa en el acero de refuerzo, especialmente en la mitad inferior del área medida, donde predominan potenciales más negativos. La porción superior muestra valores menos negativos, pero aún dentro del rango crítico.

PC62

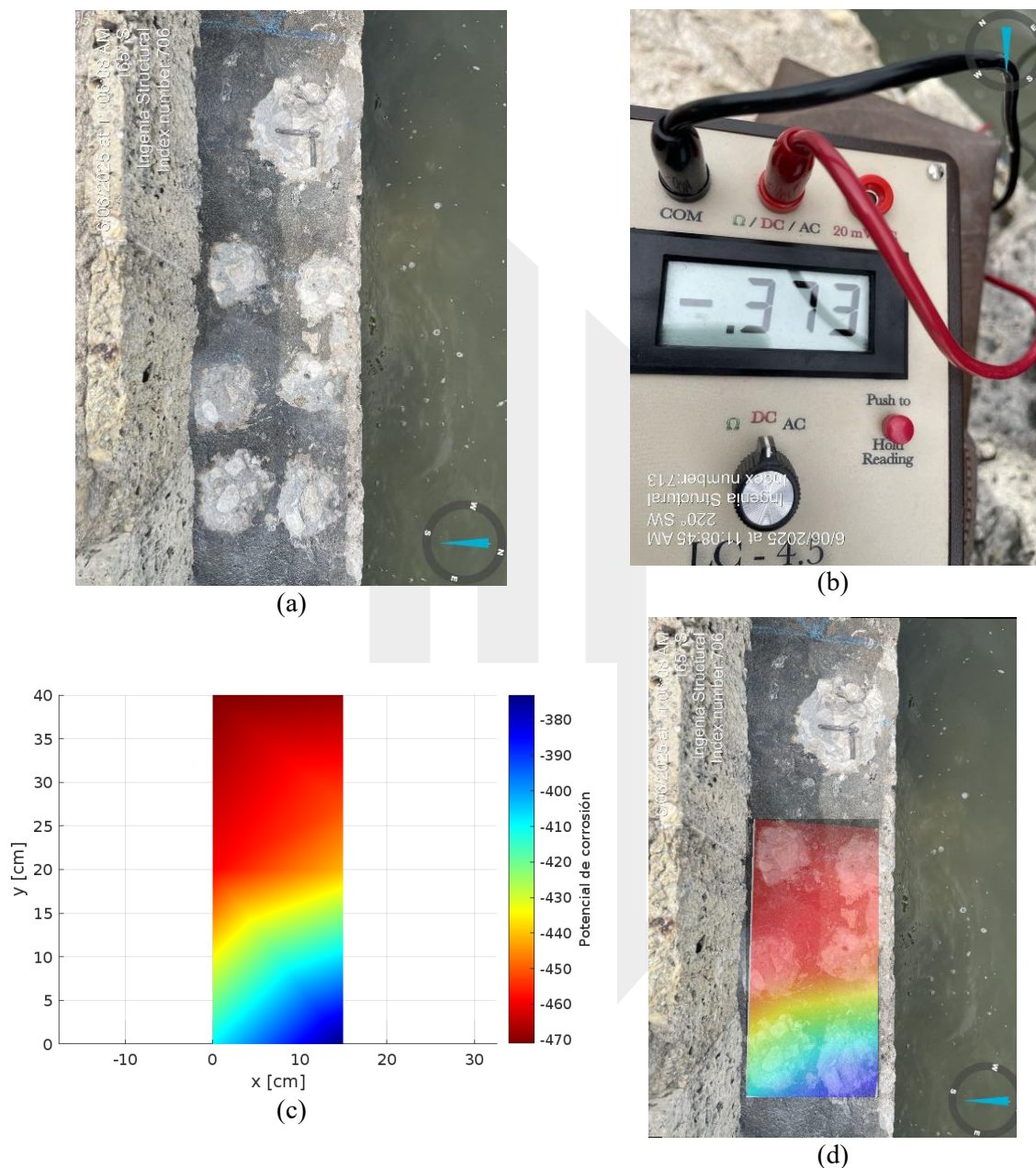


Figura 95. Ubicación y resultados de potencial de corrosión C662

El ensayo PC62 muestra potenciales de corrosión entre -380 mV y -470 mV respecto al electrodo CSE. Conforme a la referencia ASTM C876, los valores predominantes se ubican por debajo de -350 mV, indicando una probabilidad mayor al 90% de presencia de corrosión activa del acero de refuerzo. La zona superior concentra los valores más negativos, evidenciando un área crítica con mayor riesgo de deterioro.

PC63

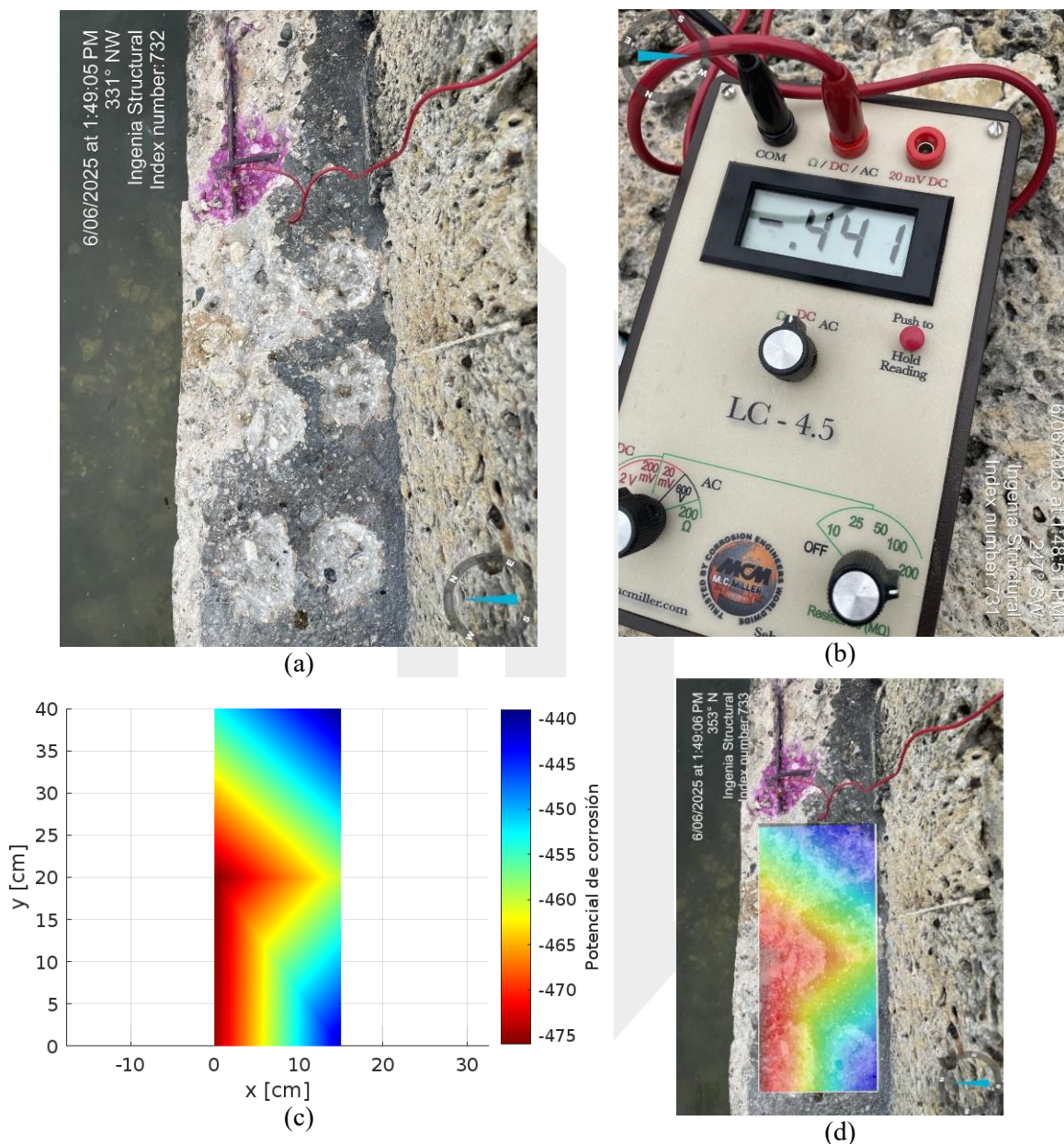


Figura 96. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC63

En el resultado del ensayo PC63 (ver **Figura 96**) se observan potenciales de corrosión en el rango de -440 mV a -475 mV frente al electrodo CSE, valores que indican una condición severa de corrosión activa según la norma ASTM C876. El sector medio y la parte inferior del área evaluada concentran los valores más negativos, lo que sugiere un avance significativo del deterioro del acero de refuerzo en estas zonas.

PC64

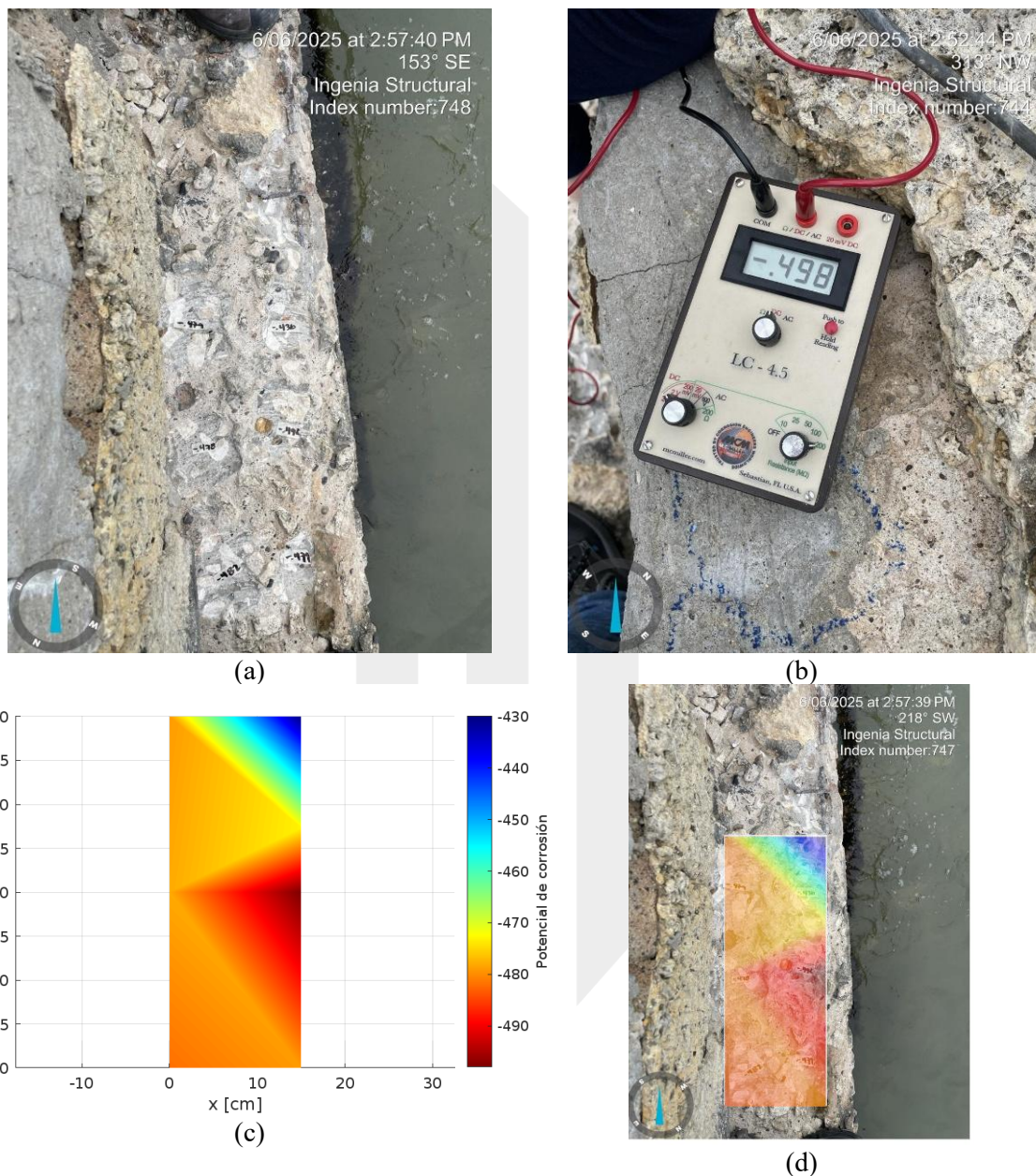


Figura 97. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC64

El ensayo PC64 muestra potenciales de corrosión que oscilan entre -430 mV y -490 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores, ubicados claramente por debajo de -350 mV, indican un alto riesgo de corrosión activa en el acero de refuerzo, conforme a la ASTM C876. El mapa resalta un deterioro

más severo en la mitad inferior derecha del área inspeccionada, donde predominan los potenciales más negativos.

PC65

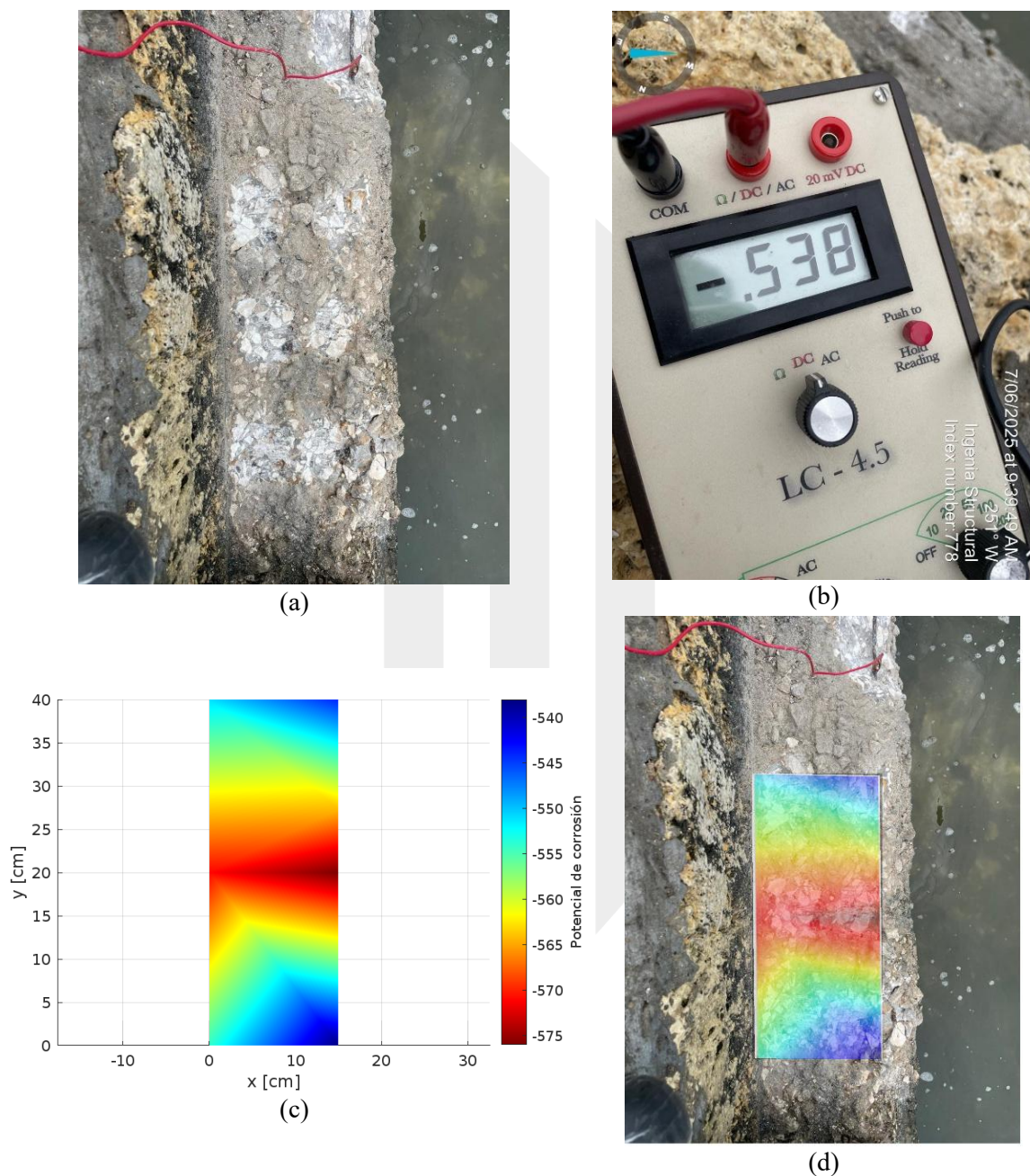


Figura 98. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC65

En el ensayo PC65 los potenciales registrados se encuentran entre -540 mV y -575 mV frente al electrodo CSE, valores significativamente inferiores a -350 mV. De acuerdo con la ASTM C876, esta

condición confirma una probabilidad superior al 90% de corrosión activa en el refuerzo. La zona central e inferior presenta los potenciales más negativos, lo que identifica estas áreas como las más afectadas dentro del elemento evaluado.

PC66

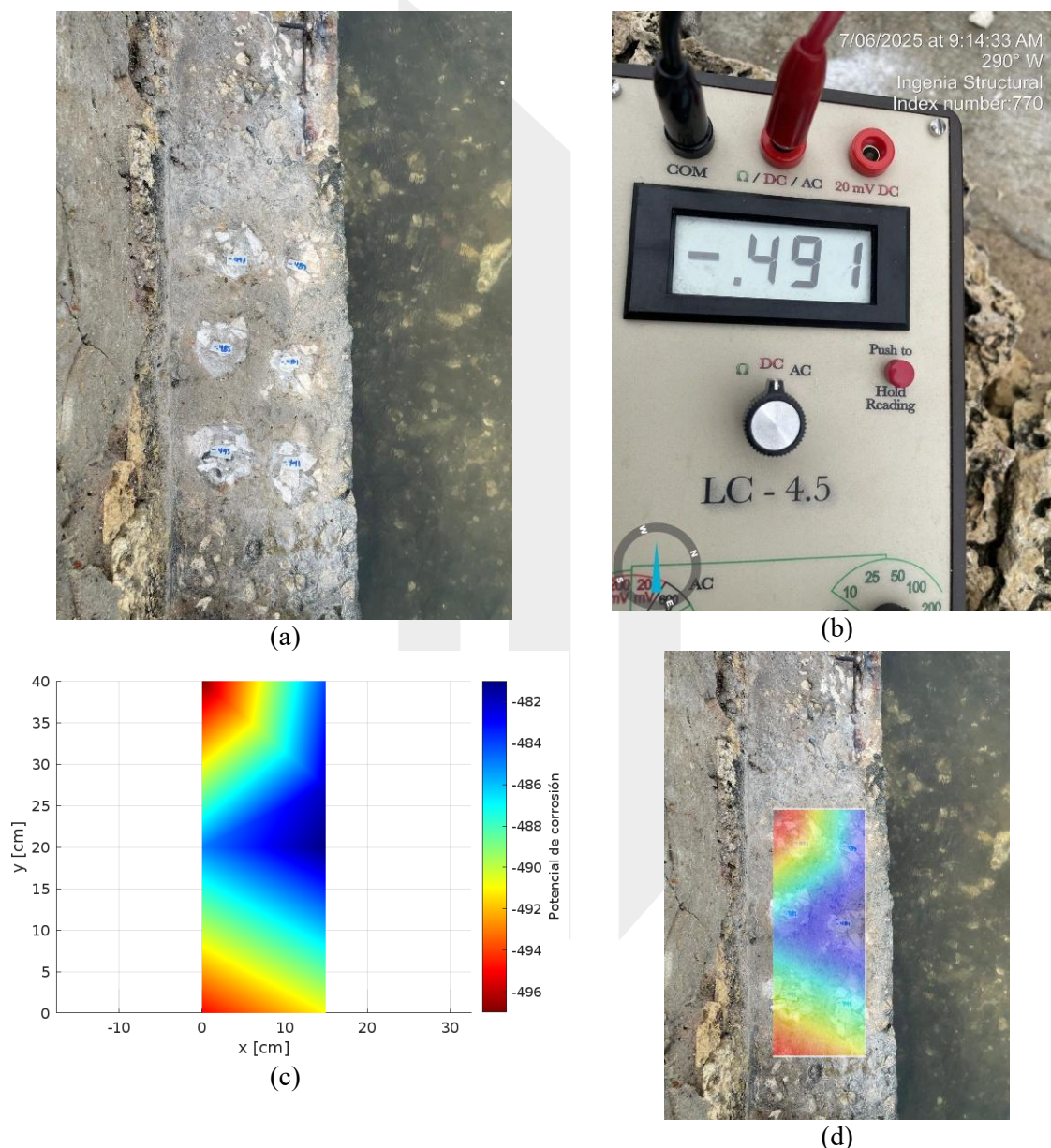


Figura 99. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC66

El ensayo PC66 presenta potenciales de corrosión entre -482 mV y -496 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores indican una probabilidad muy alta de corrosión activa en el acero de refuerzo. El

mapa refleja un deterioro homogéneo en toda el área medida, con una concentración de valores críticos en las esquinas superior e inferior izquierda del elemento evaluado.

PC67

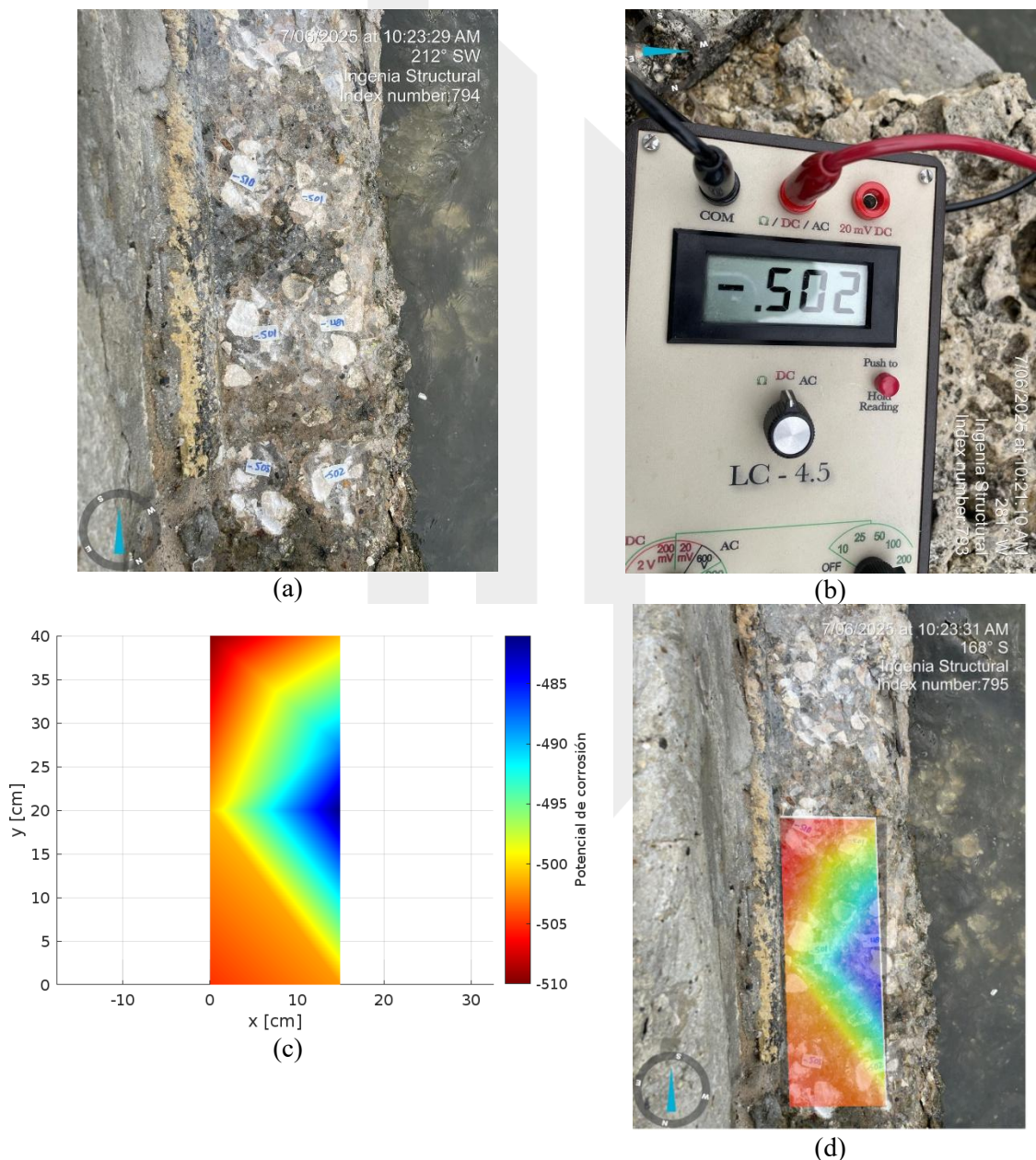


Figura 100. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC67

El ensayo PC67 registra potenciales entre -485 mV y -510 mV frente al electrodo CSE, situándose por debajo del umbral de -350 mV establecido en ASTM C876 para indicar corrosión activa. Los valores más negativos se concentran en la parte inferior y superior izquierda del área inspeccionada, lo que señala una condición de deterioro importante del acero de refuerzo en esos sectores.

PC68

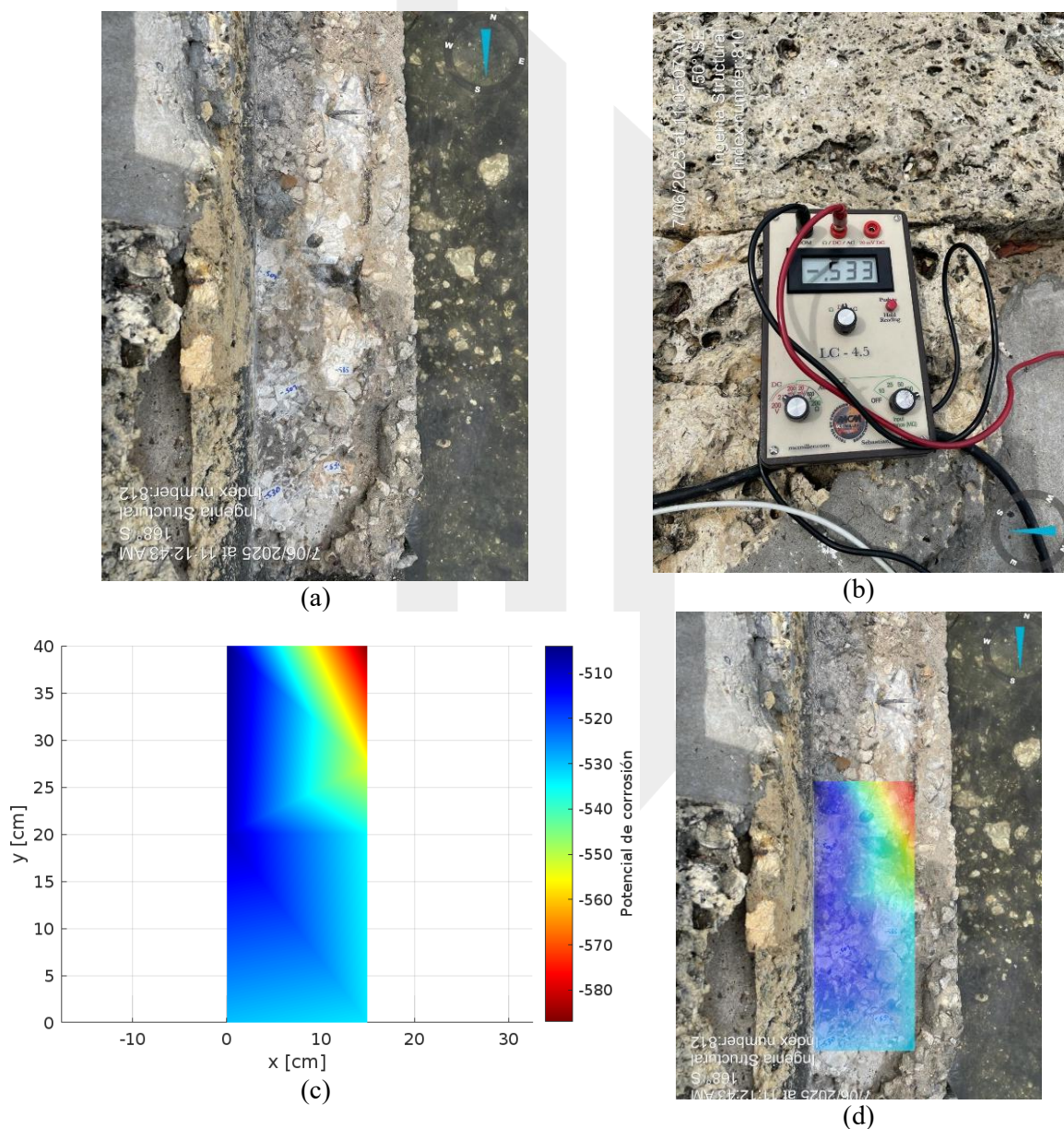
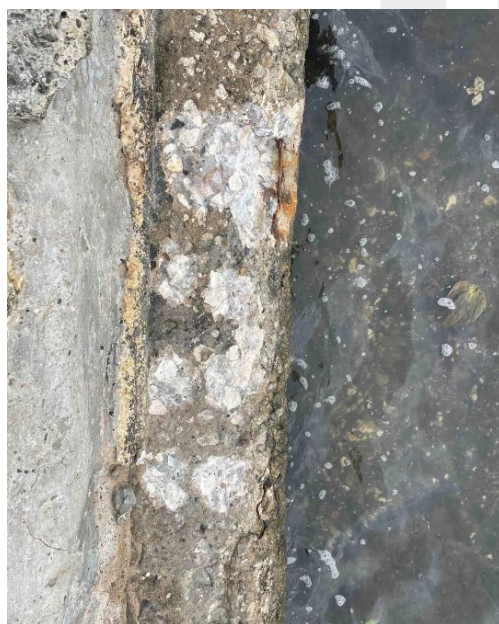


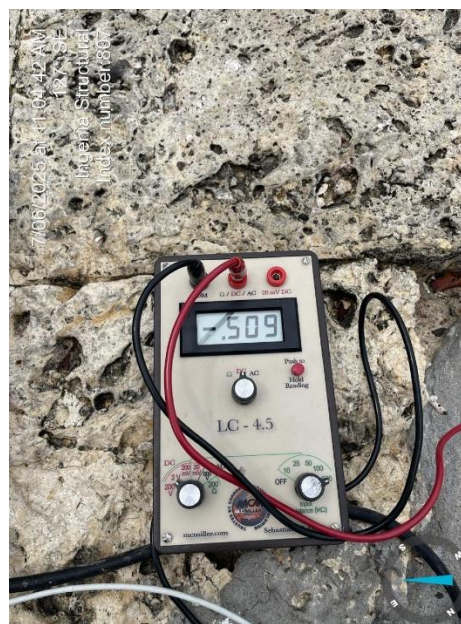
Figura 101. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC68

El ensayo PC68 reporta potenciales de corrosión entre -510 mV y -580 mV respecto al electrodo CSE, muy por debajo del umbral crítico de -350 mV establecido por la norma ASTM C876. Estos valores confirman una probabilidad superior al 90% de corrosión activa en el refuerzo, el área en estudio posee un comportamiento parcialmente homogéneo, destacándose la parte superior derecha como la más crítica de esta zona.

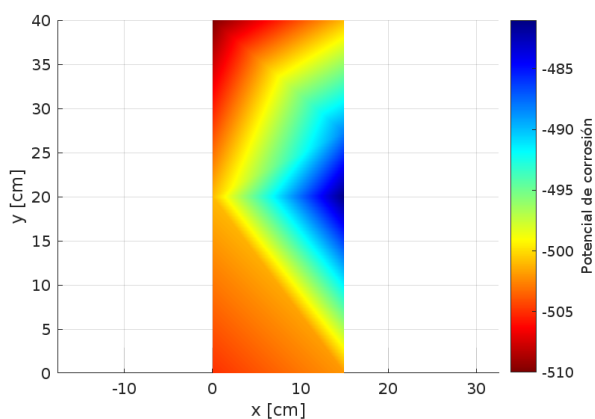
PC69



(a)



(b)



(c)

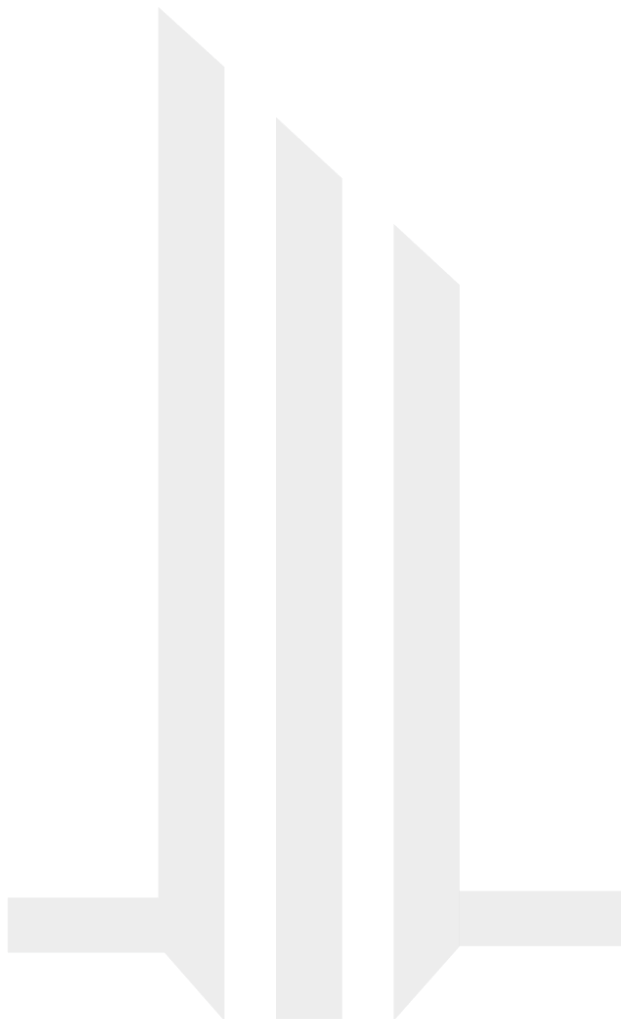


(d)

Figura 102. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC69

En el ensayo PC69, los potenciales medidos se sitúan entre -485 mV y -510 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores reflejan una alta probabilidad de corrosión activa en el acero de refuerzo. El área superior e inferior izquierda muestra los valores más negativos, evidenciando mayor riesgo de daño en esa zona específica.

PC610

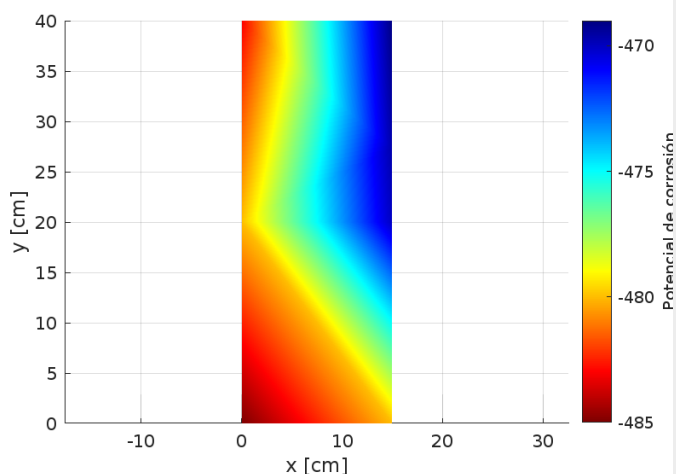




(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 103. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC610

El ensayo PC610 registra potenciales de corrosión entre -470 mV y -485 mV frente al electrodo CSE. Estos valores, ubicados por debajo de -350 mV según la norma, indican una probabilidad superior al 90% de corrosión activa en el acero de refuerzo. La mayor concentración de potenciales críticos se localiza en la la parte inferior izquierda.

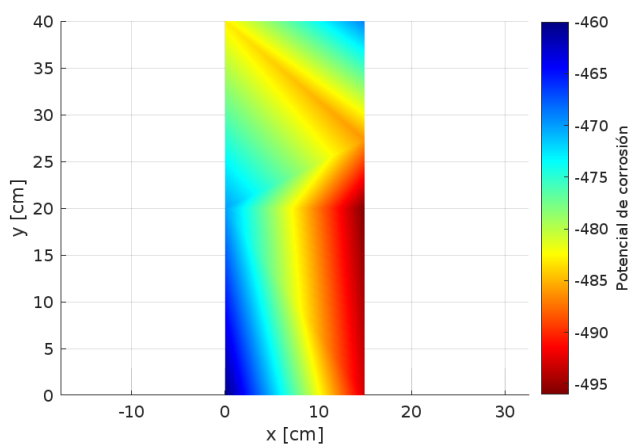
PC611



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 104. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC611

El resultado del ensayo PC611 muestra potenciales entre -460 mV y -495 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores indican, una alta probabilidad de corrosión activa del acero de refuerzo. El sector central y parte inferior derecha concentran los valores más negativos, señalando estas zonas como las más afectadas dentro del área evaluada.

PC612

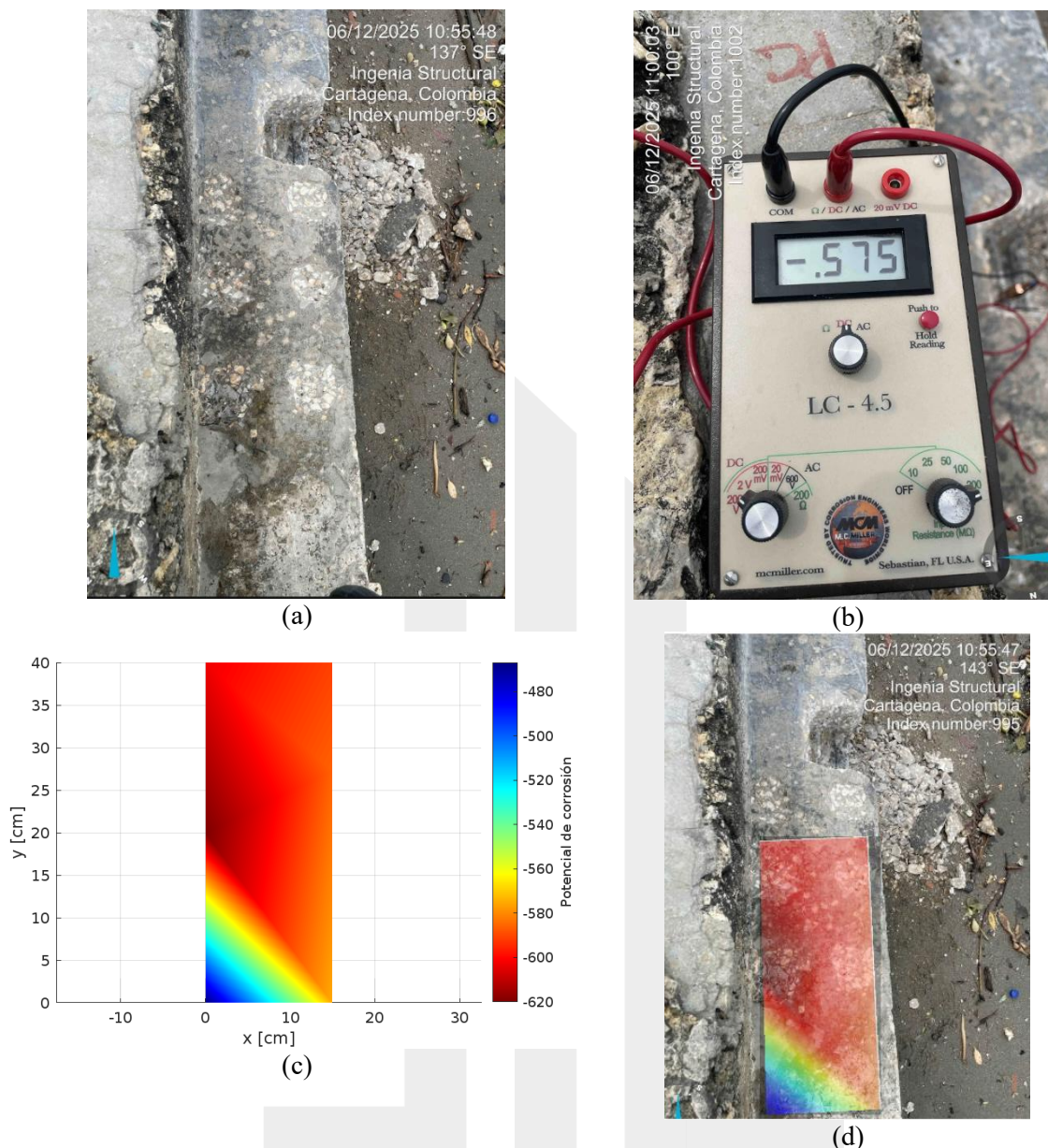


Figura 105. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC612

El ensayo PC12 evidencia potenciales de corrosión que varían entre -480 mV y -620 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores, confirman una probabilidad superior al 90% de presencia de corrosión activa en el acero de refuerzo. La zona superior del área inspeccionada concentra los valores más negativos, lo que refleja un estado de deterioro avanzado en esa sección del elemento estructural.

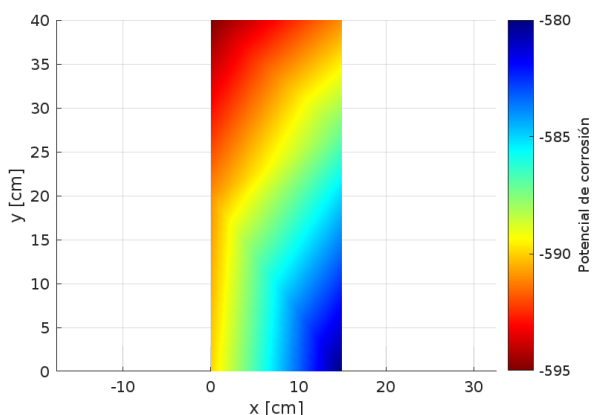
PC613



(a)



(b)



(c)

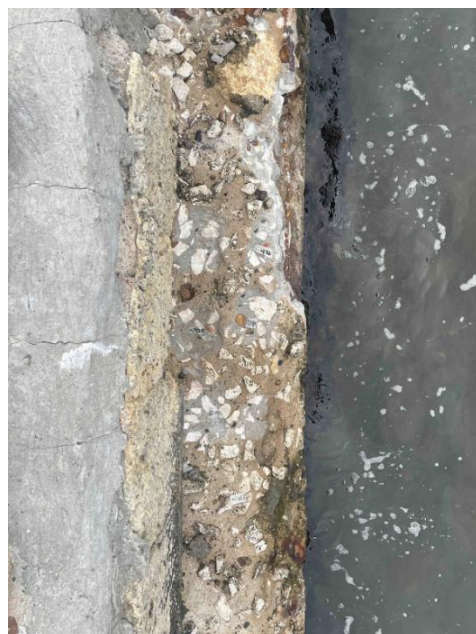


(d)

Figura 106. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC613

El ensayo PC613 reporta potenciales de corrosión entre -580 mV y -595 mV frente al electrodo CSE, ubicándose en el rango crítico según la ASTM C876. Estos valores indican una probabilidad muy alta de corrosión activa en el acero de refuerzo. La zona superior izquierda del área evaluada concentra los valores más negativos, lo que sugiere un deterioro severo y progresivo en esa sección del elemento.

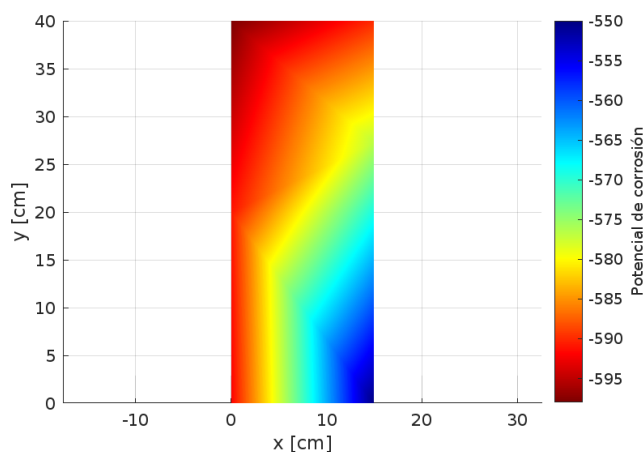
PC614



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 107. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC614

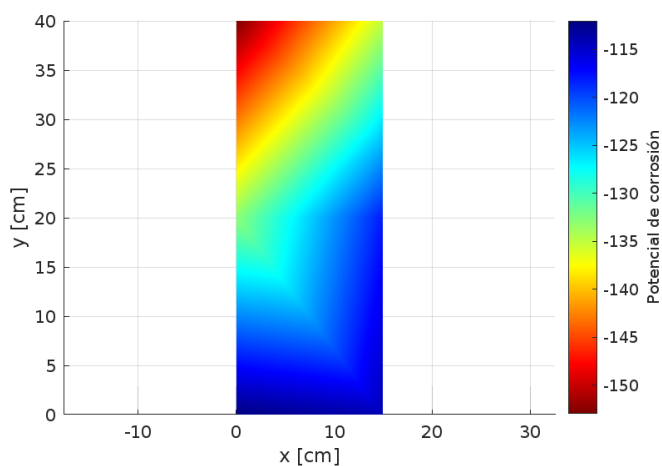
El ensayo PC614 presenta potenciales de corrosión en el rango de -550 mV a -595 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores confirman, según la norma ASTM C876, una alta probabilidad de corrosión activa en el refuerzo. El mapa indica una mayor concentración de potenciales críticos en la zona superior izquierda del área evaluada, identificando esa zona como prioritaria para intervenciones correctivas.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 108. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC615

En el ensayo PC615 se registraron potenciales entre -115 mV y -150 mV respecto al electrodo CSE. Al tratarse de valores mayores (menos negativos) a -200 mV, según la referencia ASTM C876, se interpreta que el elemento presenta una baja probabilidad de corrosión activa en el acero de refuerzo en el momento de la medición.

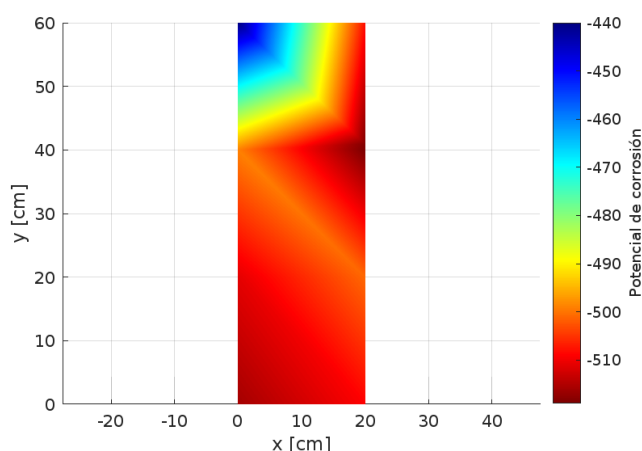
PC616



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 109. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC616

Los potenciales registrados en el ensayo PC616 varían entre -440 mV y -510 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores, al ser menores a -350 mV, indican una alta probabilidad de corrosión activa en el acero de refuerzo. Las zonas centrales e inferiores concentran los valores más negativos, identificándose como áreas críticas con riesgo evidente de deterioro.

PC617

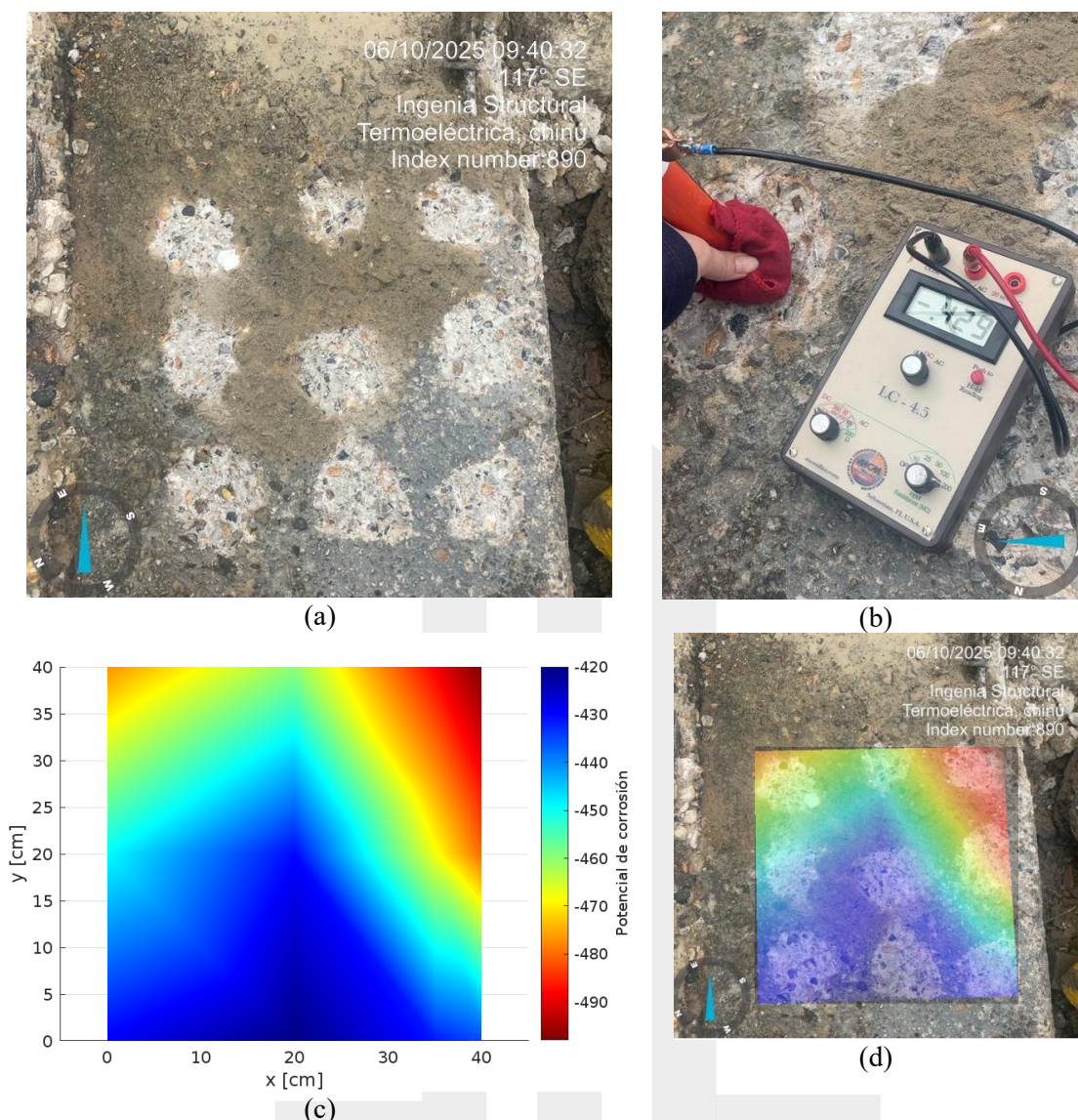


Figura 110. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC617

El mapa del ensayo PC617 muestra potenciales entre -420 mV y -490 mV respecto al electrodo CSE. Dado que todos los valores son menores a -350 mV, conforme a la referencia ASTM C876, el resultado indica una alta probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo. El área central y superior concentra los potenciales más negativos, por lo que estas zonas deben considerarse como prioritarias para acciones correctivas.

PC618

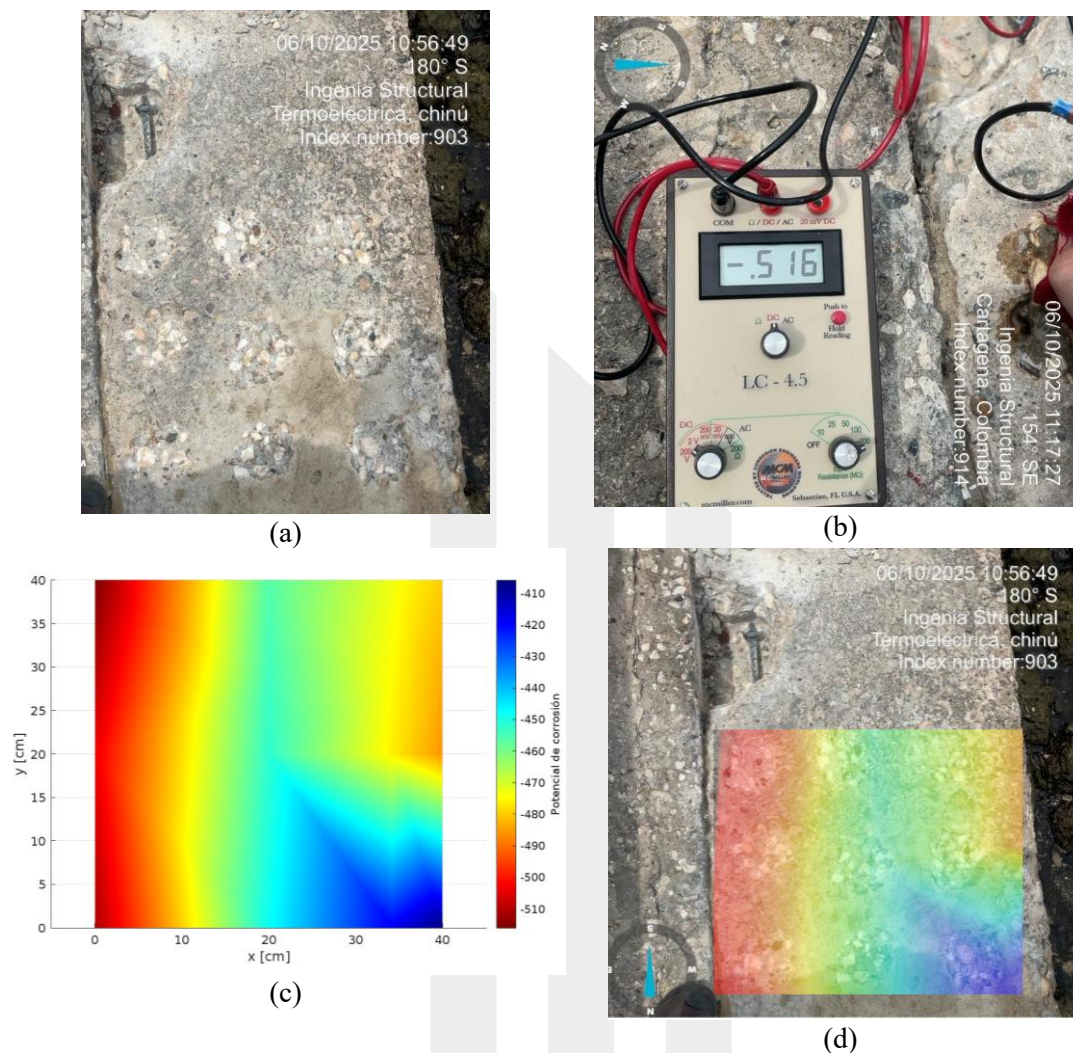


Figura 111. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC618

En el ensayo PC618 se detectan potenciales entre -410 mV y -510 mV respecto al electrodo CSE, todos dentro del rango que señala actividad corrosiva según. El sector izquierdo del área analizada presenta los valores más negativos, reflejando una condición desfavorable del refuerzo en ese tramo. El patrón general evidencia un estado comprometido del acero, con focos de deterioro más acentuados hacia los bordes.

PC619

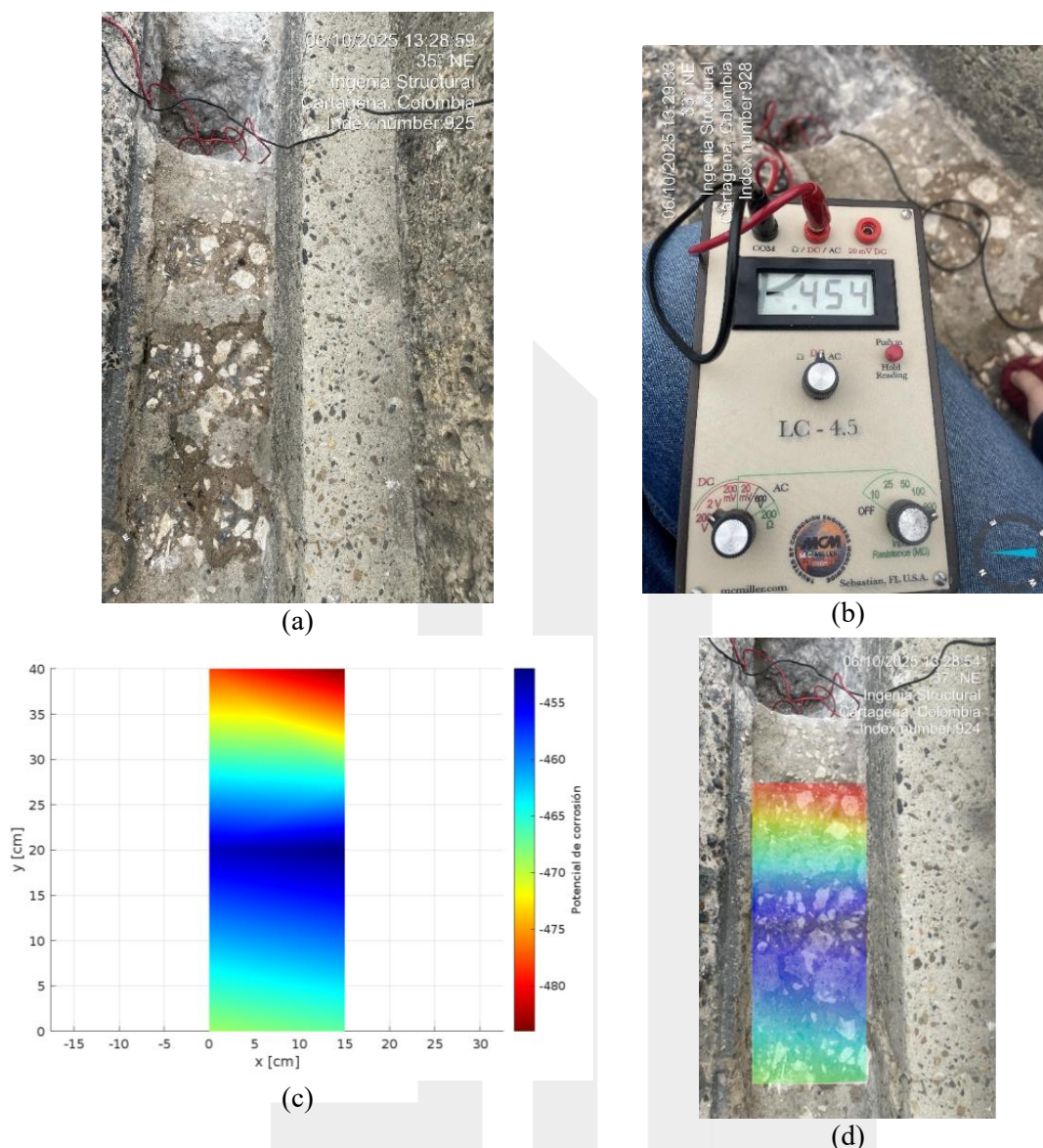


Figura 112. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC619

Los resultados del ensayo PC619 indican potenciales entre -455 mV y -480 mV respecto al electrodo CSE, lo que evidencia un entorno desfavorable para el refuerzo, con una clara condición de corrosión activa según la norma ASTM C876. La mayor concentración de potenciales negativos se observa en la franja superior del área evaluada, señalando esta zona como la de mayor vulnerabilidad estructural.

12.3 SECTOR 5

PC51

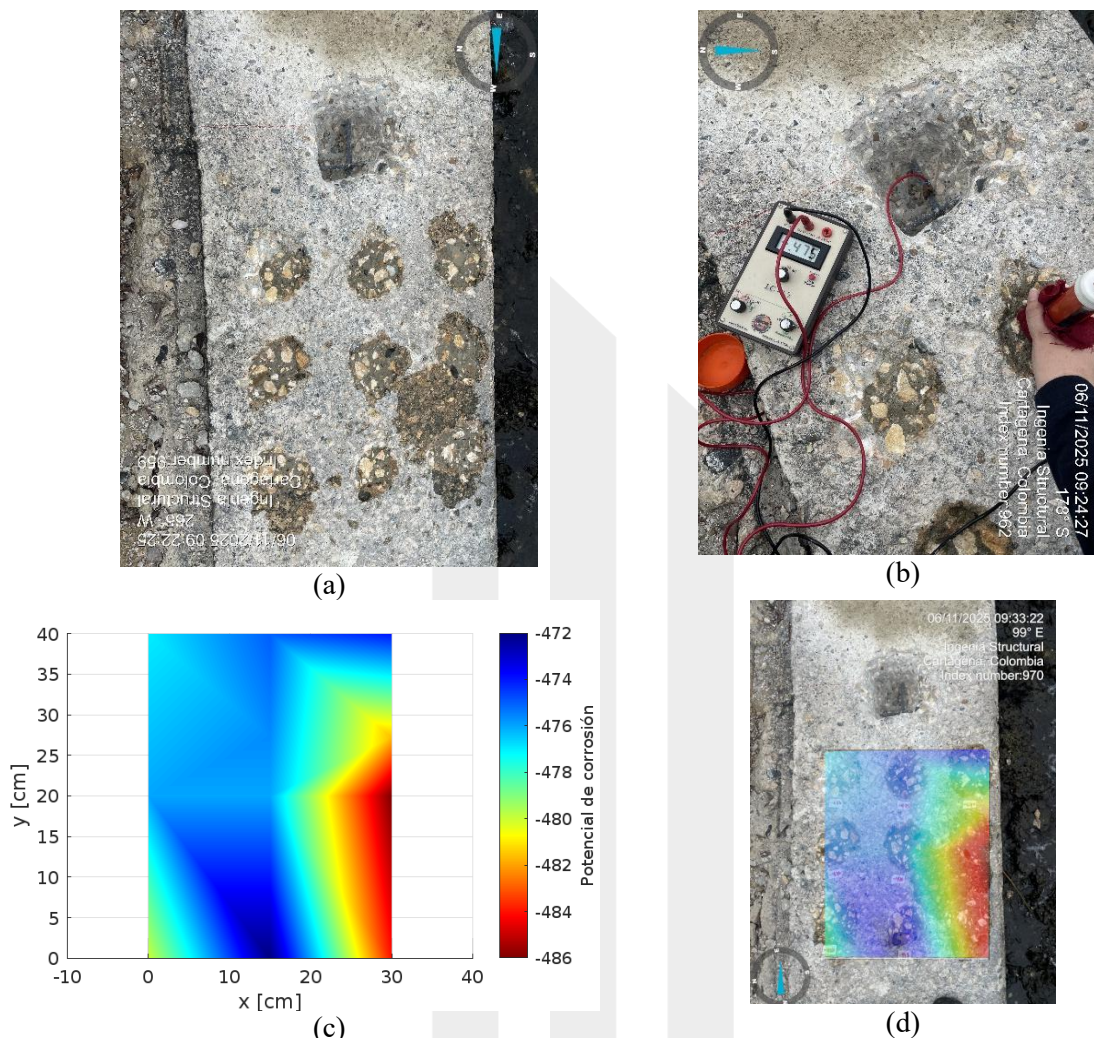


Figura 113. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC51

El ensayo PC51 reporta potenciales entre -472 mV y -486 mV respecto al electrodo CSE, ubicándose completamente por debajo del umbral de -350 mV. Estos valores confirman, una condición activa de corrosión en el acero de refuerzo. Las zonas laterales muestran mayor concentración de potenciales negativos, sugiriendo deterioro localizado hacia los extremos del elemento evaluado.

PC52

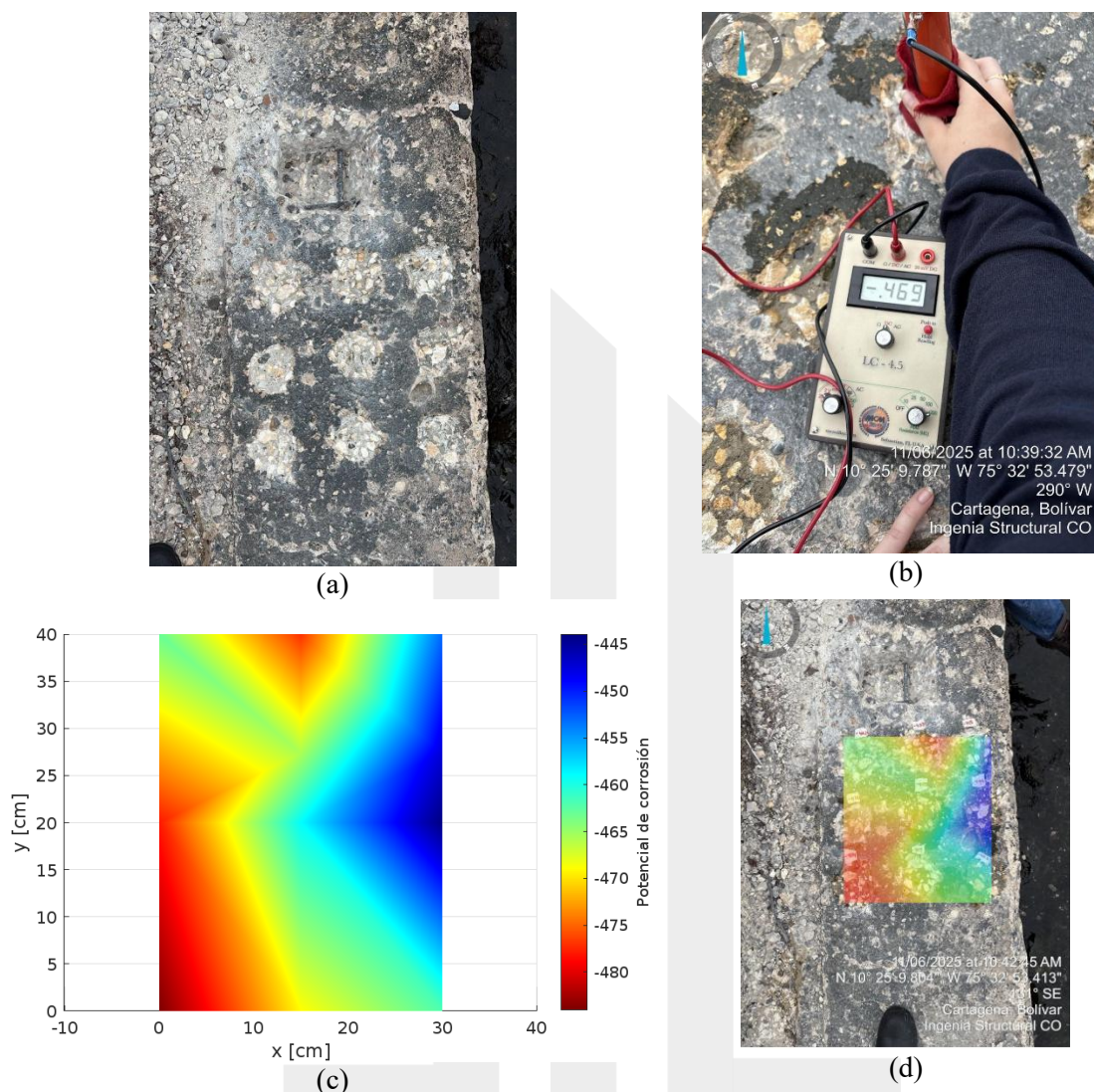


Figura 114. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC52

En el ensayo PC52 se midieron potenciales entre -445 mV y -480 mV respecto al electrodo CSE. Estos resultados reflejan un ambiente de corrosión activa en el acero de refuerzo, dado que todos los valores están por debajo de -350 mV. El mapa revela que la zona lateral izquierda concentra los potenciales más negativos, lo que sugiere un deterioro mayor en ese sector específico del elemento inspeccionado.

PC53

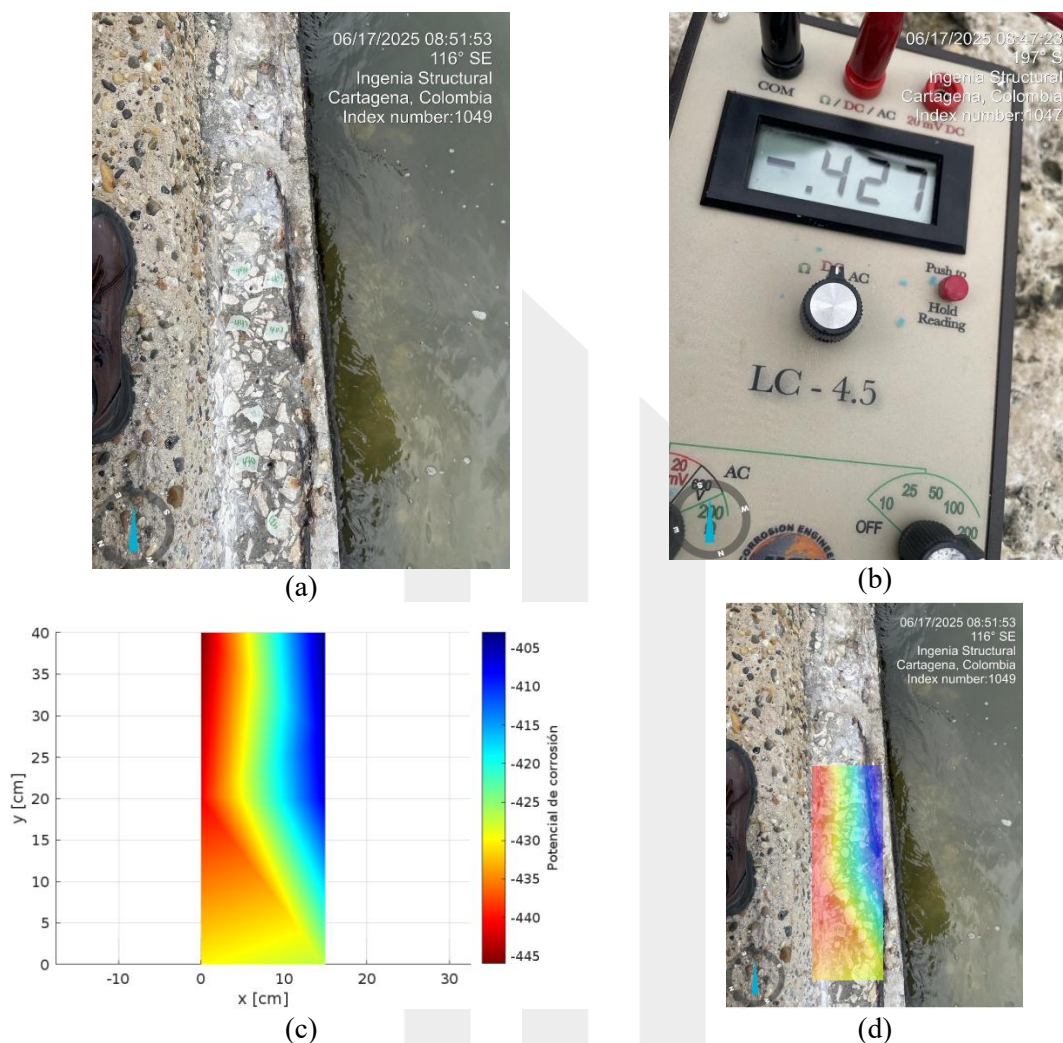


Figura 115. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC53

El ensayo PC53 presenta potenciales de corrosión entre -405 mV y -445 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores, al estar por debajo de -350 mV, indican mayor probabilidad de corrosión. La mayor concentración de potenciales negativos se registra en el lado izquierdo del área inspeccionada, sugiriendo una actividad corrosiva más avanzada en esa zona.

PC54

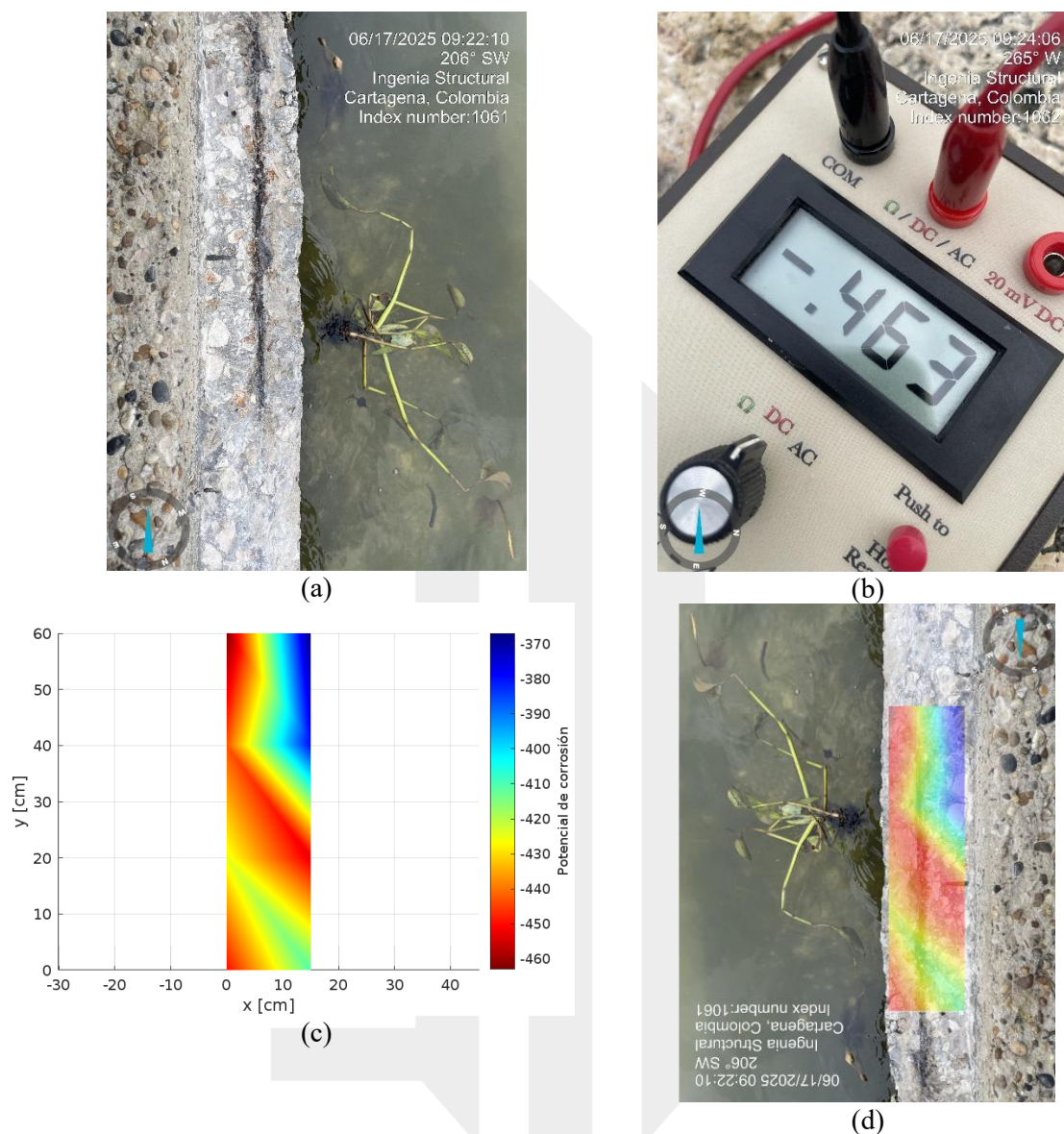


Figura 116. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC54

En el ensayo PC54 se registraron potenciales entre -370 mV y -460 mV respecto al electrodo CSE. Al estar todos los valores por debajo de -350 mV, el resultado indica una alta probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo. Las zonas más críticas se concentran en la parte inferior del área inspeccionada, donde los potenciales son más negativos.

PC55

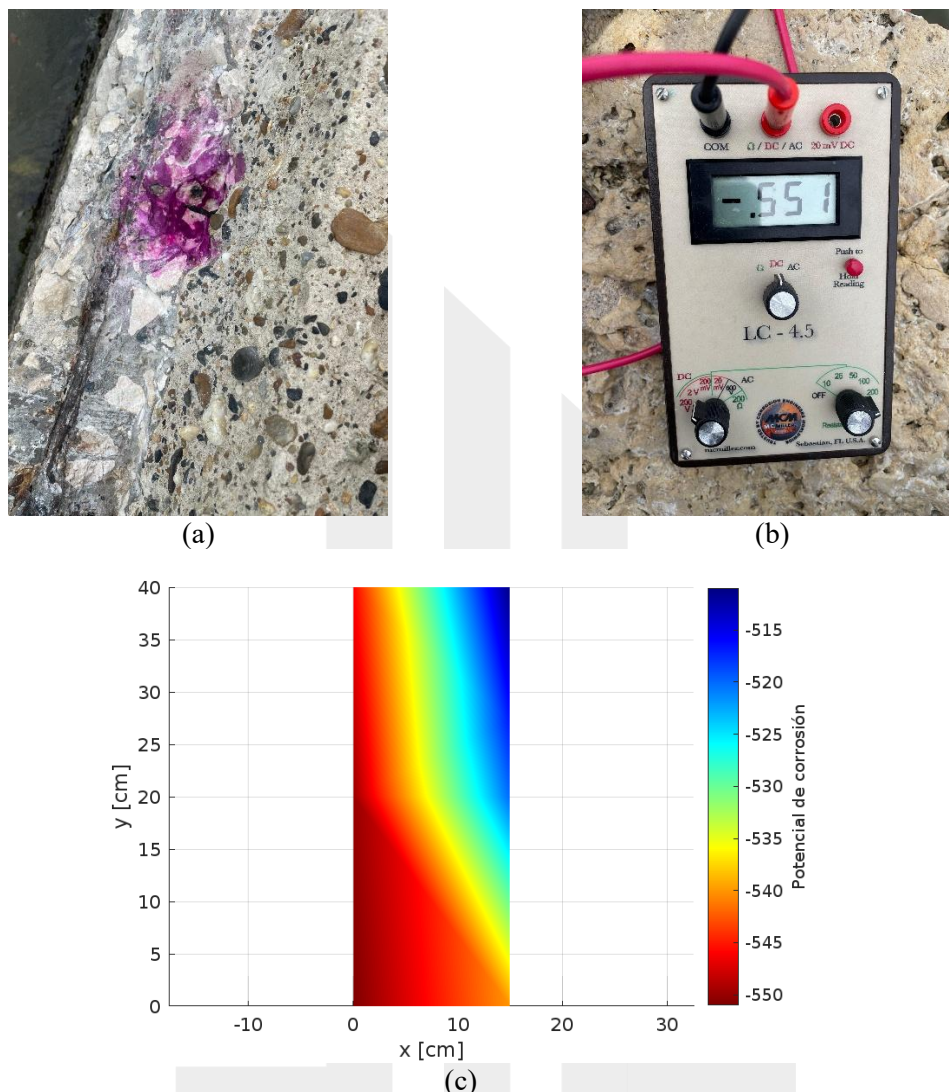


Figura 117. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC55

En el ensayo PC55 se midieron potenciales entre -515 mV y -550 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores reflejan una probabilidad muy alta de presencia de corrosión en el acero de refuerzo. Los valores más negativos predominan en la parte inferior izquierda del área evaluada, lo que sugiere mayor vulnerabilidad de esa zona frente al deterioro por corrosión.

PC56

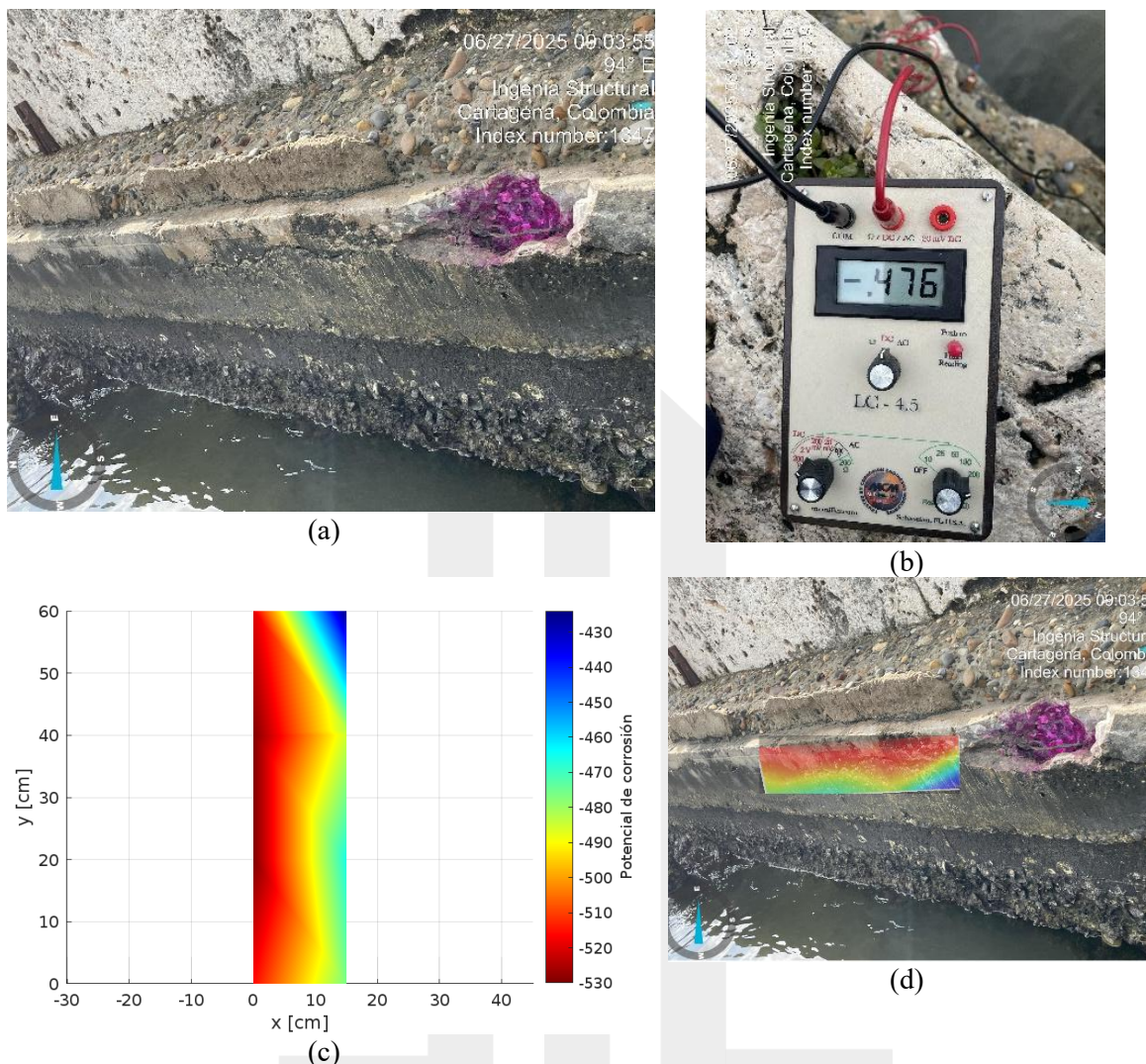


Figura 118. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC56

En el ensayo PC56 los potenciales medidos varían entre -430 mV y -530 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores indican una alta probabilidad de que se estén presentando procesos de corrosión en el acero de refuerzo. La mayor concentración de potenciales más negativos se localiza en la parte izquierda del área inspeccionada, lo que sugiere un riesgo mayor de deterioro en ese sector.

12.4 SECTOR 4

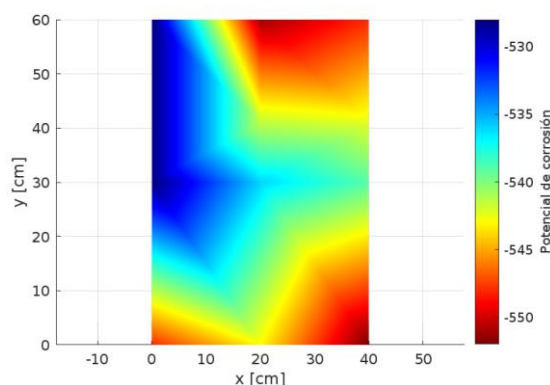
PC41



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 119. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC41

El ensayo PC41 refleja potenciales de corrosión entre -530 mV y -550 mV respecto al electrodo CSE. Estos resultados, corresponden a una probabilidad muy alta de corrosión en el acero de refuerzo. Las zonas laterales e inferiores concentran los potenciales más negativos, lo que sugiere una mayor vulnerabilidad estructural en esos sectores del elemento analizado.

PC42

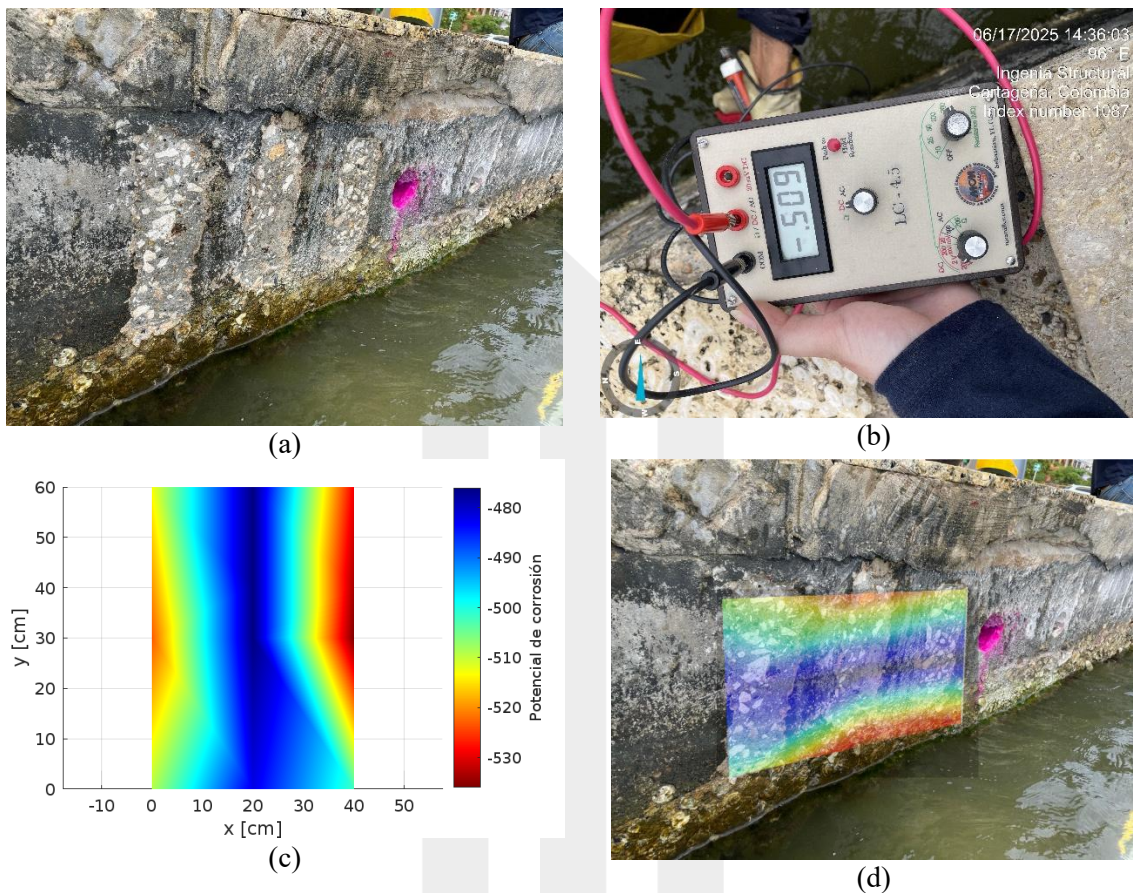


Figura 120. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC42

En el ensayo PC42 se midieron potenciales entre -480 mV y -530 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores, al estar por debajo de -350 mV, indican una probabilidad elevada de corrosión en el acero de refuerzo, según lo establece la referencia ASTM C876. El mapa muestra un patrón de

potenciales más negativos en los extremos del área evaluada, sugiriendo que esta zona concentra el mayor riesgo de deterioro.

PC43

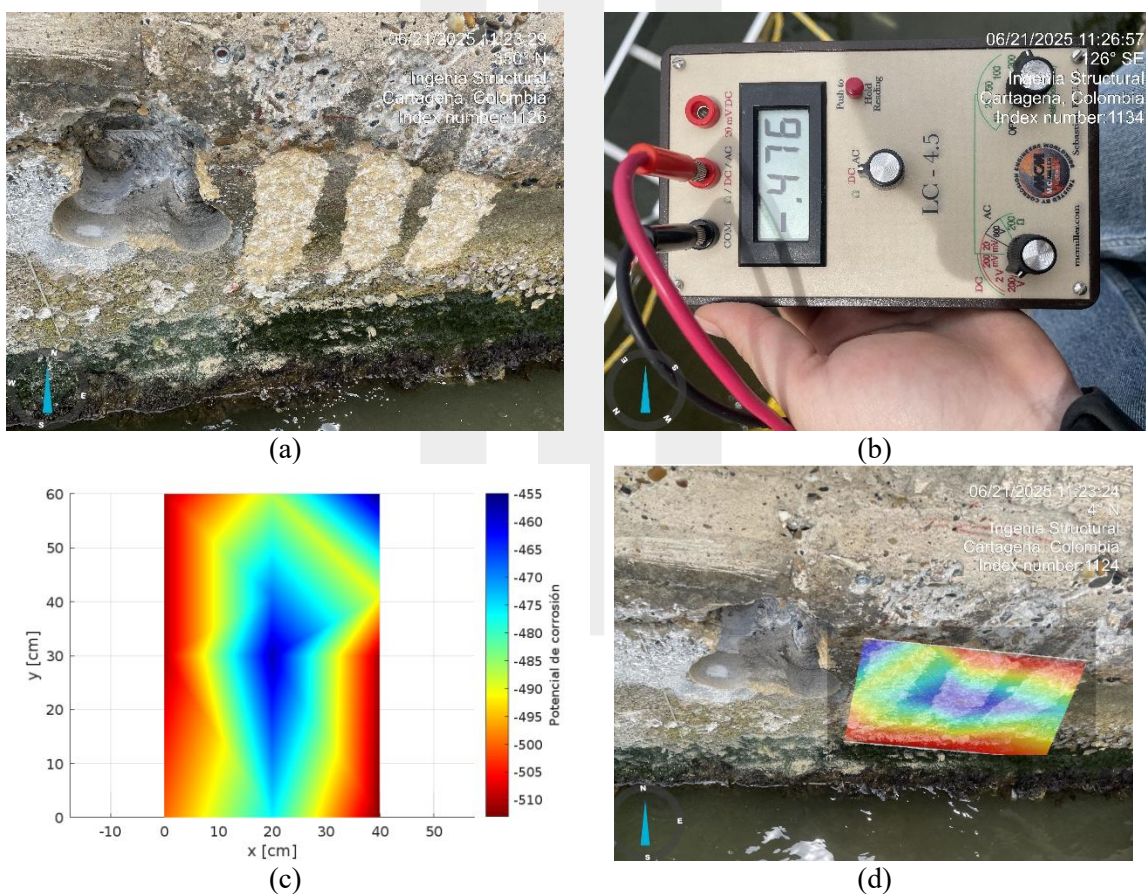
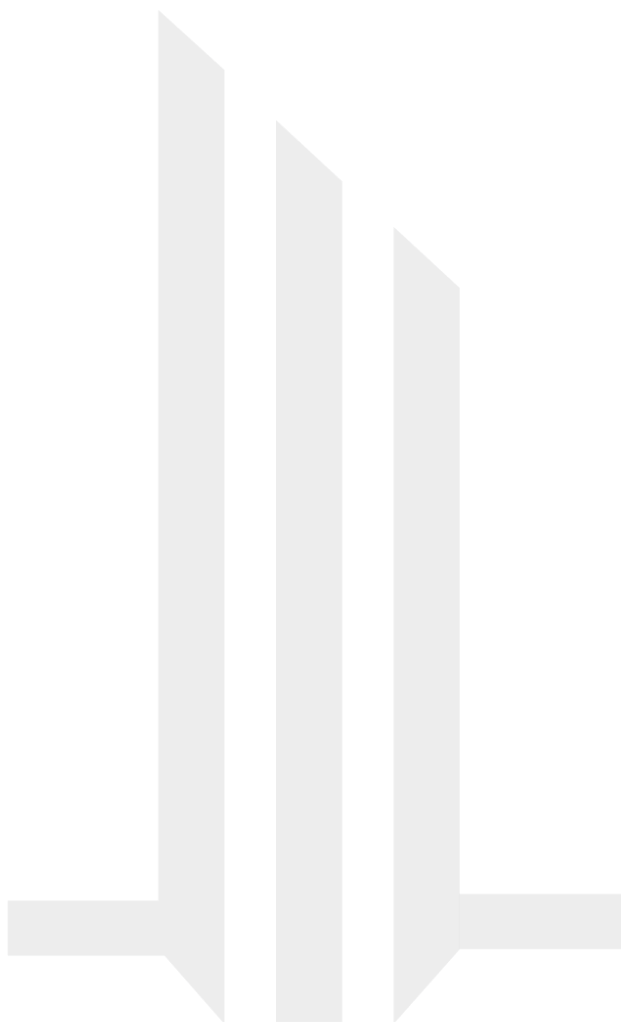


Figura 121. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC43

El ensayo PC43 muestra potenciales entre -455 mV y -510 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores, al ser inferiores a -350 mV, reflejan una probabilidad alta de presencia de corrosión en el

acero de refuerzo según ASTM C876. Los extremos inferior izquierdo y superior e inferior derecho del área analizada presentan los potenciales más negativos, identificándose como las zonas de mayor riesgo de deterior.

PC44

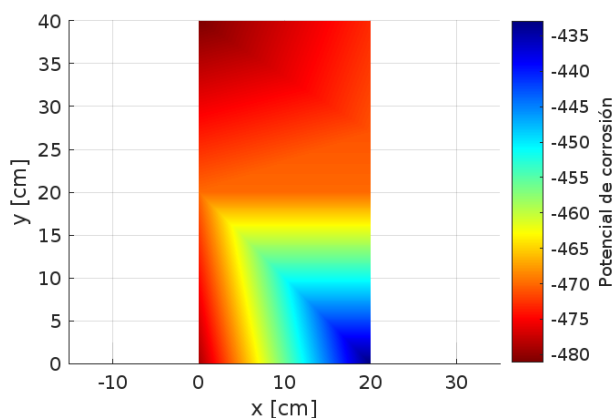




(a)



(b)



(c)

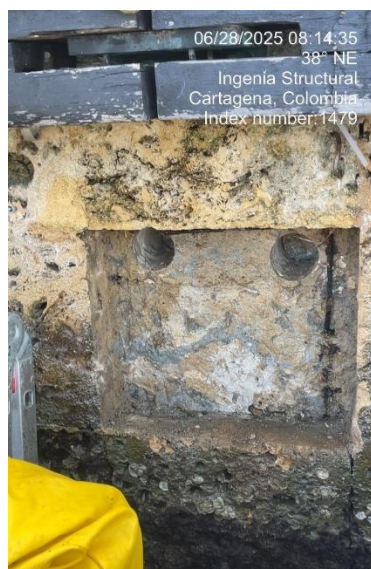


(d)

Figura 122. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC44

En el ensayo PC44, los potenciales registrados se encuentran en el rango de -435 mV a -480 mV frente al electrodo CSE. Estos resultados reflejan condiciones desfavorables para el refuerzo, con valores claramente por debajo del umbral de -350 mV, lo que sugiere una probabilidad elevada de que exista corrosión. El análisis del mapa de gradientes revela que las áreas más comprometidas se localizan principalmente en el sector superior del elemento inspeccionado.

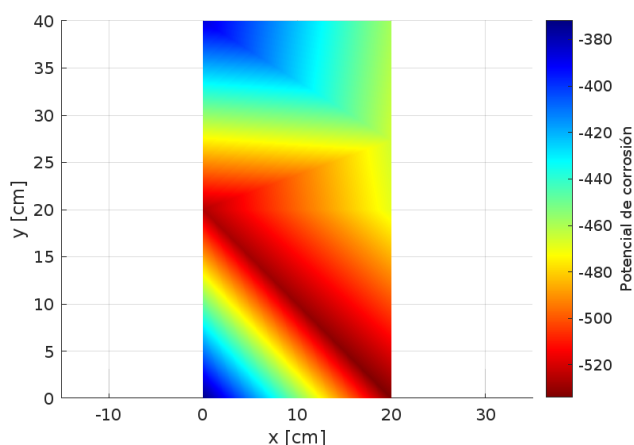
PC45



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 123. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC45

En el resultado del ensayo PC45 se observaron potenciales de corrosión entre -380 mV y -520 mV respecto al electrodo CSE. Al encontrarse estos valores por debajo de -350 mV, se interpreta una probabilidad alta de que esté ocurriendo corrosión en el refuerzo. El gradiente del mapa evidencia que las zonas más críticas se ubican a lo largo de una diagonal central, donde se concentran los potenciales más negativos, señalando esta franja como la de mayor vulnerabilidad del elemento inspeccionado.

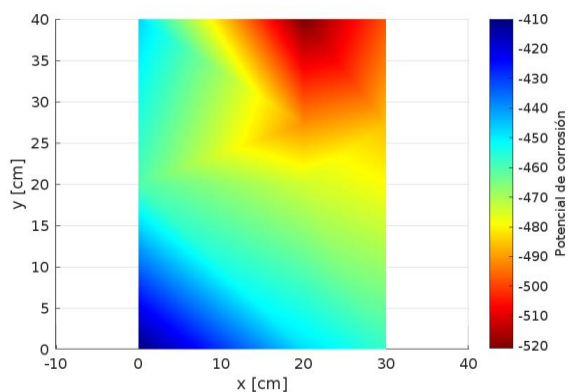
PC46



(a)



(b)



(c)



(d)

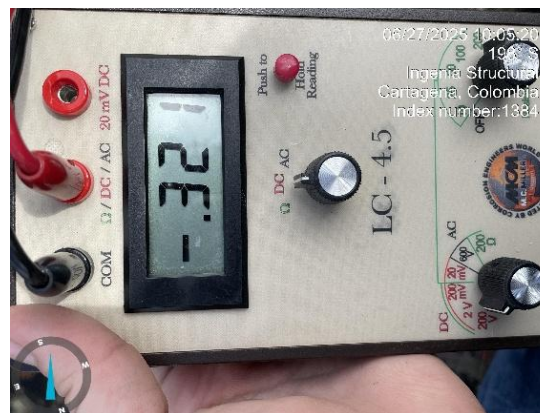
Figura 124. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC46

En el ensayo PC46 se registraron potenciales entre -410 mV y -520 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores, al ser menores a -350 mV, permiten clasificar el estado del acero como de alta probabilidad de corrosión activa, conforme a la norma ASTM C876. El análisis visual revela que el área superior derecha concentra los potenciales más negativos, configurándose como la región más expuesta a procesos de deterioro.

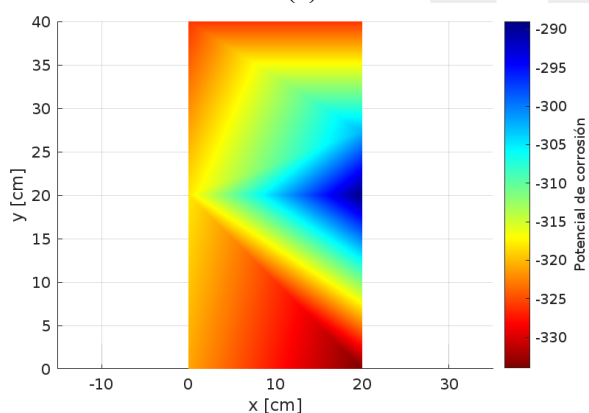
PC47



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 125. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC47

En el ensayo PC47 los potenciales medidos varían entre -290 mV y -330 mV respecto al electrodo CSE. Estos resultados, ubicándose entre -200 mV y -350 mV, se consideran dentro del rango de actividad incierta, conforme a la clasificación de la ASTM C876. El mapa muestra una distribución irregular de los valores, destacándose la zona inferior izquierda como la región con potenciales más negativos, aunque sin indicar claramente un riesgo definido de corrosión activa.

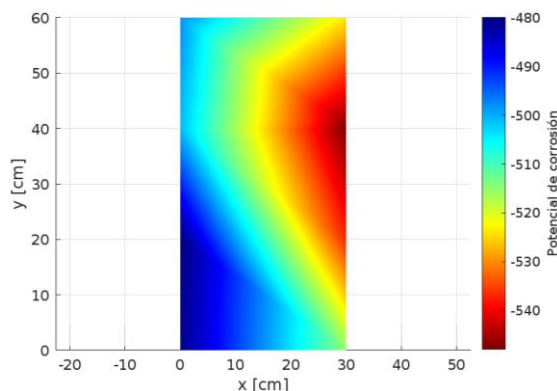
PC48



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 126. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC48

En el ensayo PC48 los potenciales registrados se ubican entre -480 mV y -540 mV frente al electrodo CSE. Estos valores reflejan una condición de alta probabilidad de corrosión activa, según los criterios de la ASTM C876. El mapa muestra que los valores más negativos se concentran en el lado derecho y zona superior derecha del área medida, destacando estas regiones como las más propensas a sufrir procesos de deterioro del refuerzo.

PC49

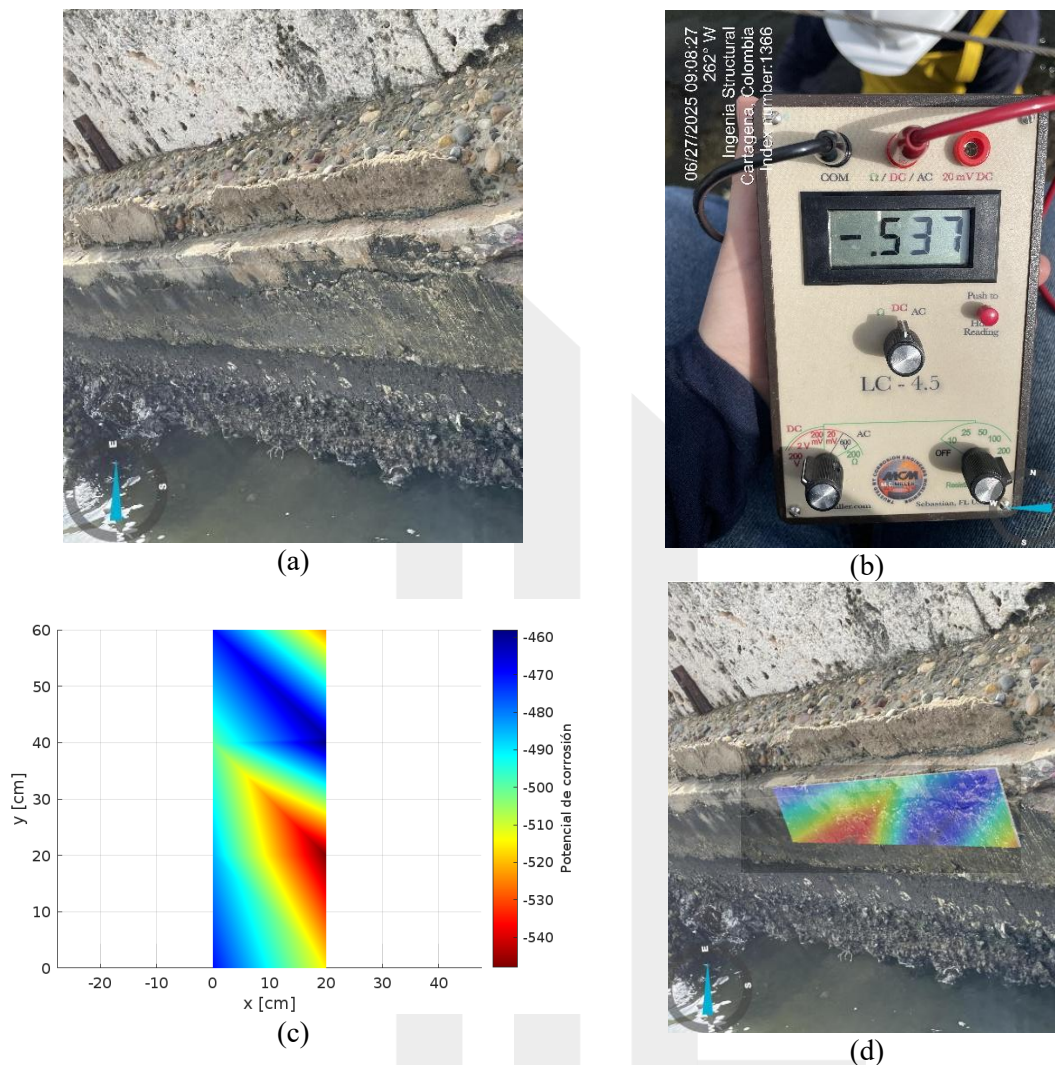


Figura 127. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC49

En el ensayo PC49 se midieron potenciales entre -460 mV y -540 mV frente al electrodo CSE. Dichos valores, al encontrarse por debajo de -350 mV, indican una probabilidad alta de que se estén generando procesos de corrosión en el refuerzo. El gradiente del mapa muestra que las zonas central-inferior derecha concentran los potenciales más negativos, identificándose como los sectores más comprometidos del área evaluada.

12.5 SECTOR 3

PC31

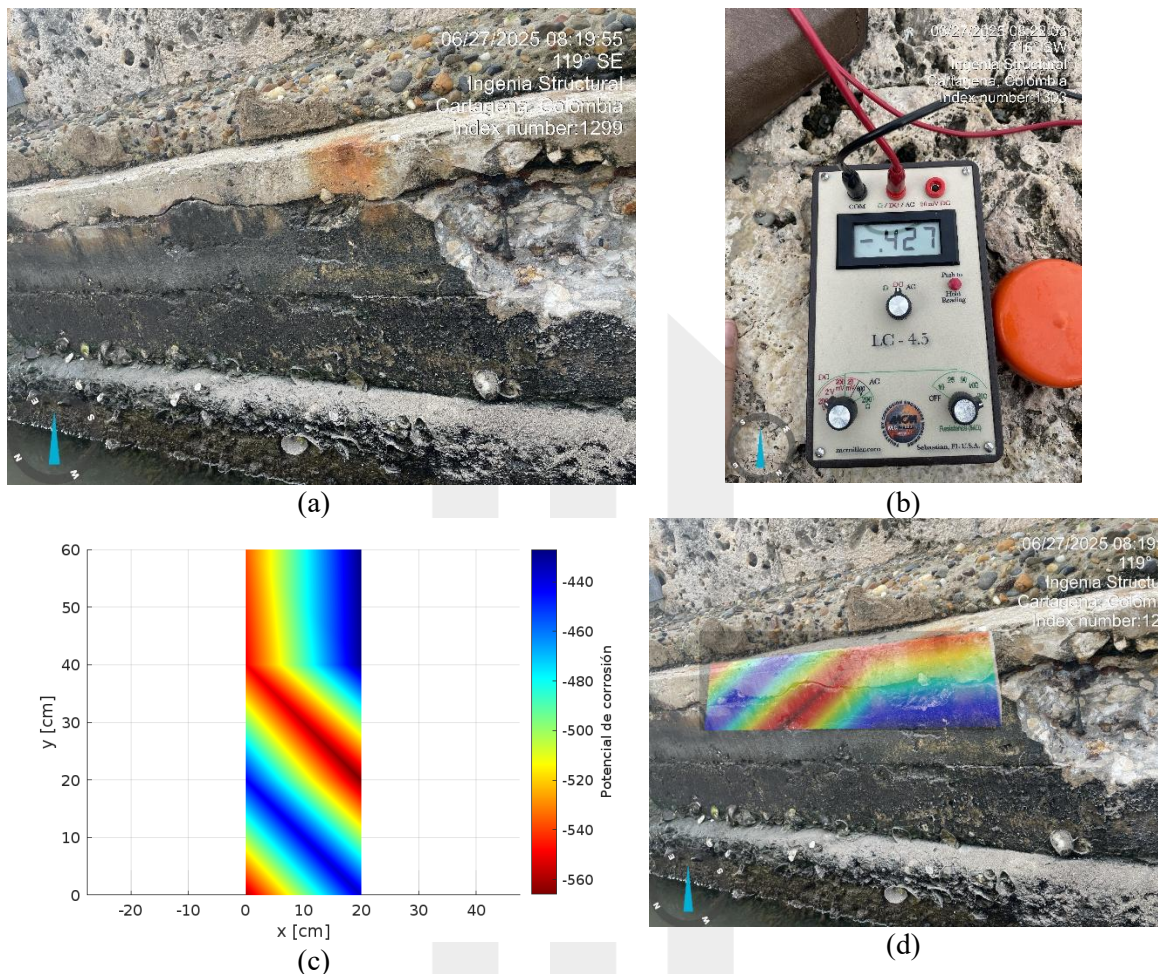


Figura 128. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC31

En el ensayo PC31 los potenciales varían entre -440 mV y -560 mV respecto al electrodo CSE. Según la ASTM C876, estos valores indican una alta probabilidad de presencia de corrosión activa en el acero de refuerzo. El patrón de potenciales más negativos se distribuye de manera diagonal desde el extremo superior izquierdo hasta el inferior derecho, identificando esa franja como el sector más vulnerable del área inspeccionada.

PC32

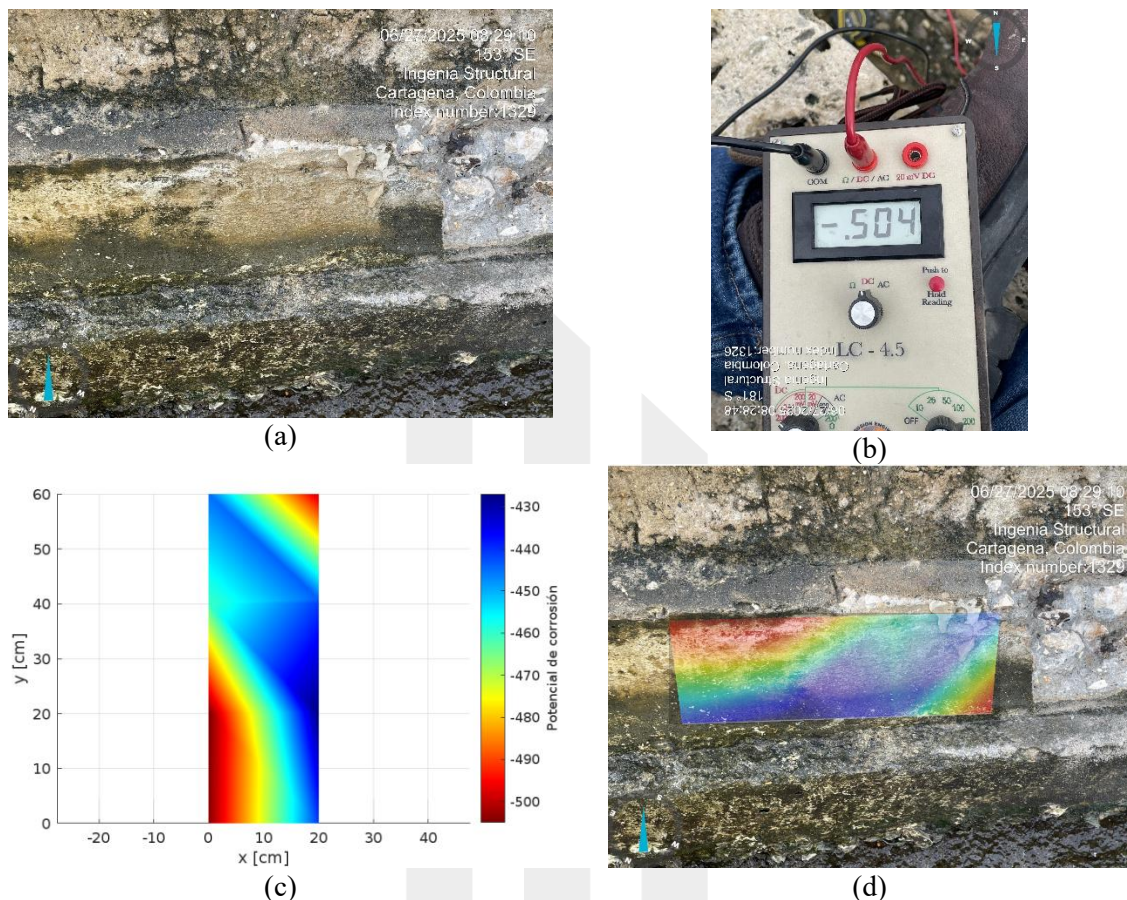


Figura 129. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC32

En el ensayo PC32 los potenciales medidos se encuentran en el rango de -430 mV a -500 mV respecto al electrodo CSE. Al estar por debajo del umbral de -350 mV, se interpreta una probabilidad elevada de corrosión activa en el acero de refuerzo, conforme a la ASTM C876. El borde inferior izquierdo muestra los potenciales más negativos, lo que señala esas regiones como las zonas de mayor riesgo dentro del elemento evaluado.

12.6 SECTOR 2

PC21

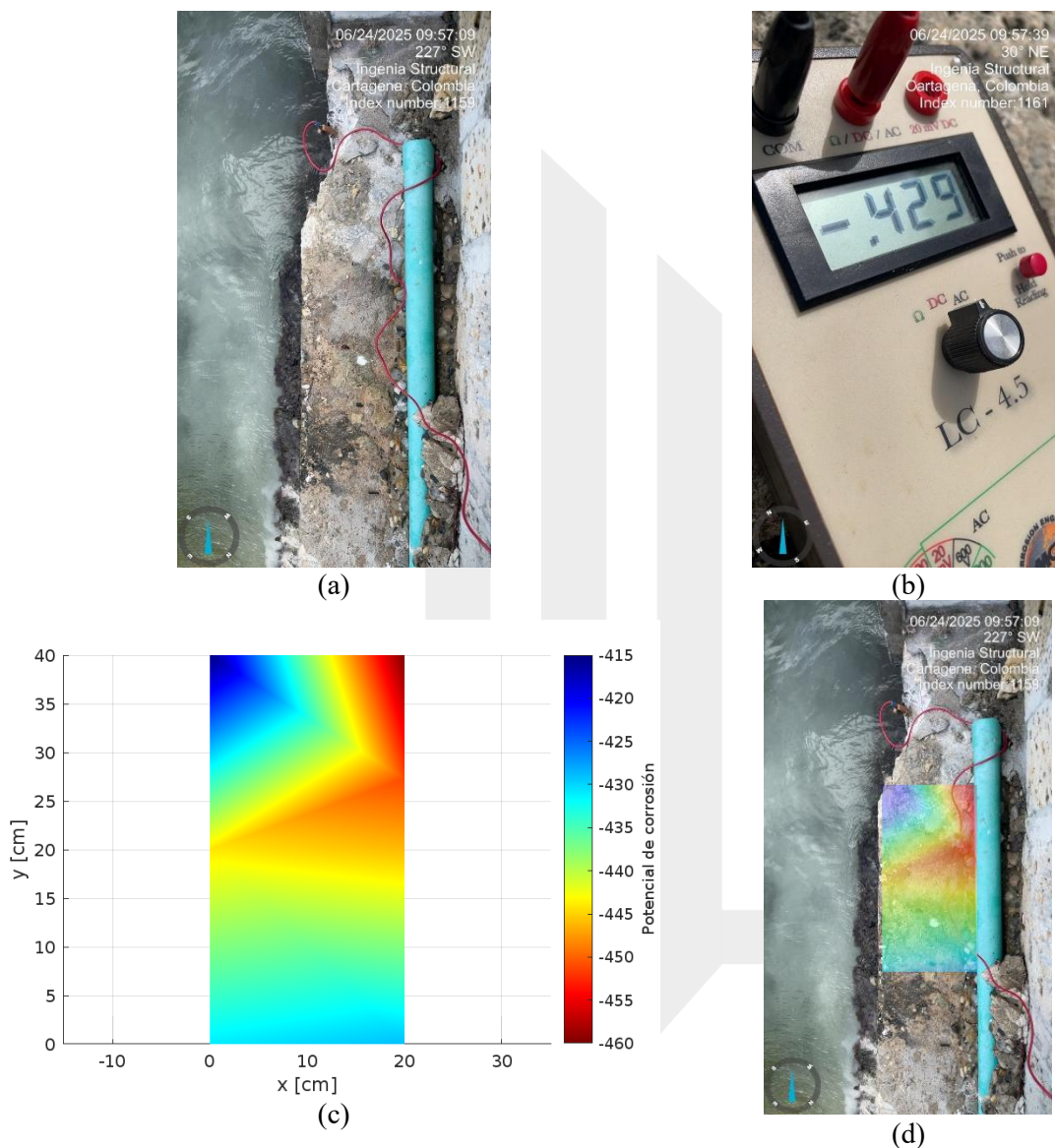


Figura 130. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC21

En el ensayo PC21 se registraron potenciales entre -415 mV y -460 mV respecto al electrodo CSE. Según la referencia ASTM C876, estos valores indican una probabilidad alta de corrosión en el acero de refuerzo. El área superior derecha del elemento presenta los potenciales más negativos, considerándose el sector con mayor riesgo de deterioro dentro del área evaluada.

PC22

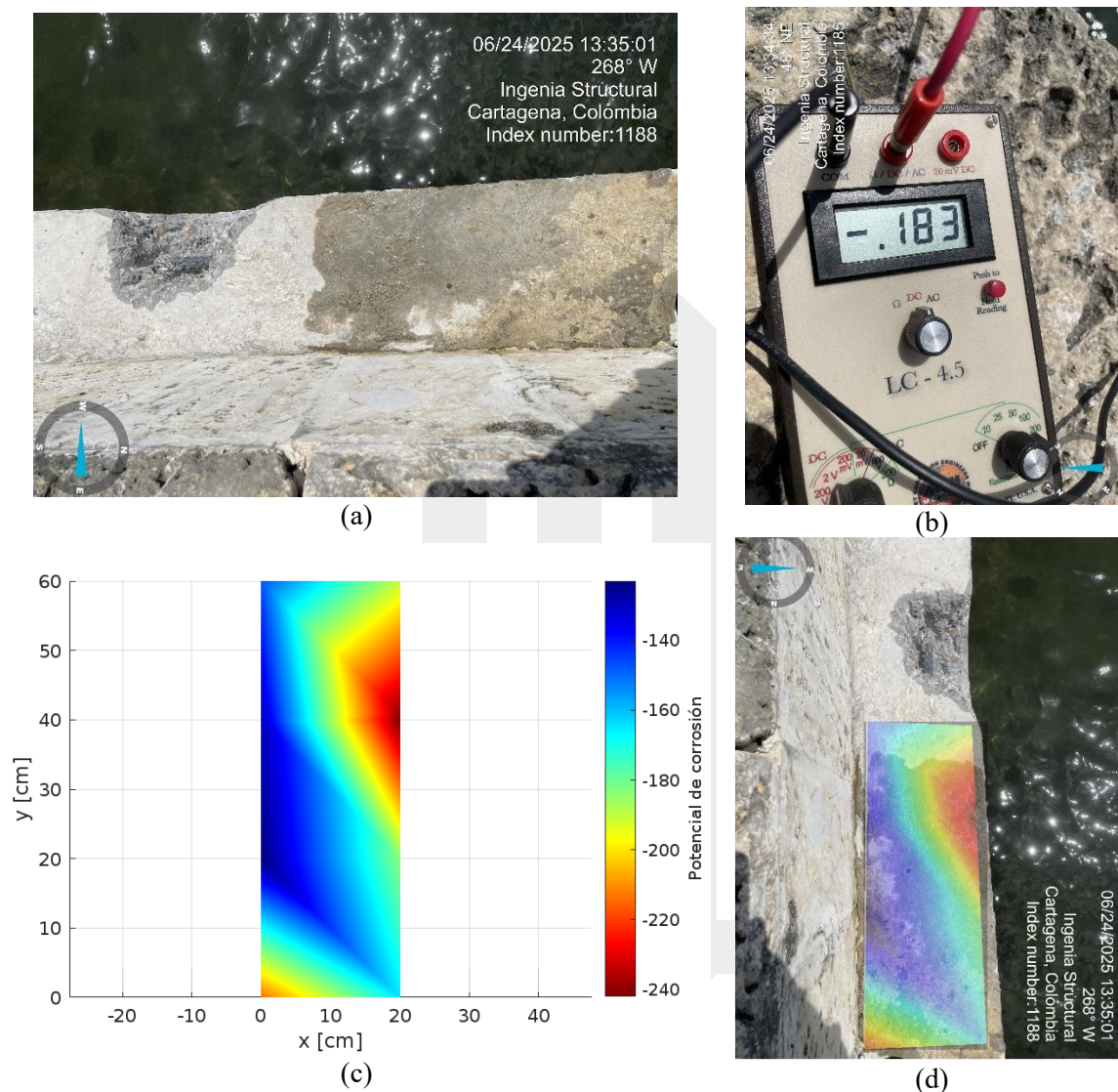


Figura 131. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC22

En el ensayo PC22 los potenciales obtenidos se sitúan entre -140 mV y -240 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores, al ser mayores (menos negativos) que -200 mV en buena parte del área, corresponden a una condición de baja probabilidad de corrosión según la referencia ASTM C876. La zona superior derecha concentra los valores más elevados, indicando un comportamiento más estable del acero de refuerzo en esa región.

PC23

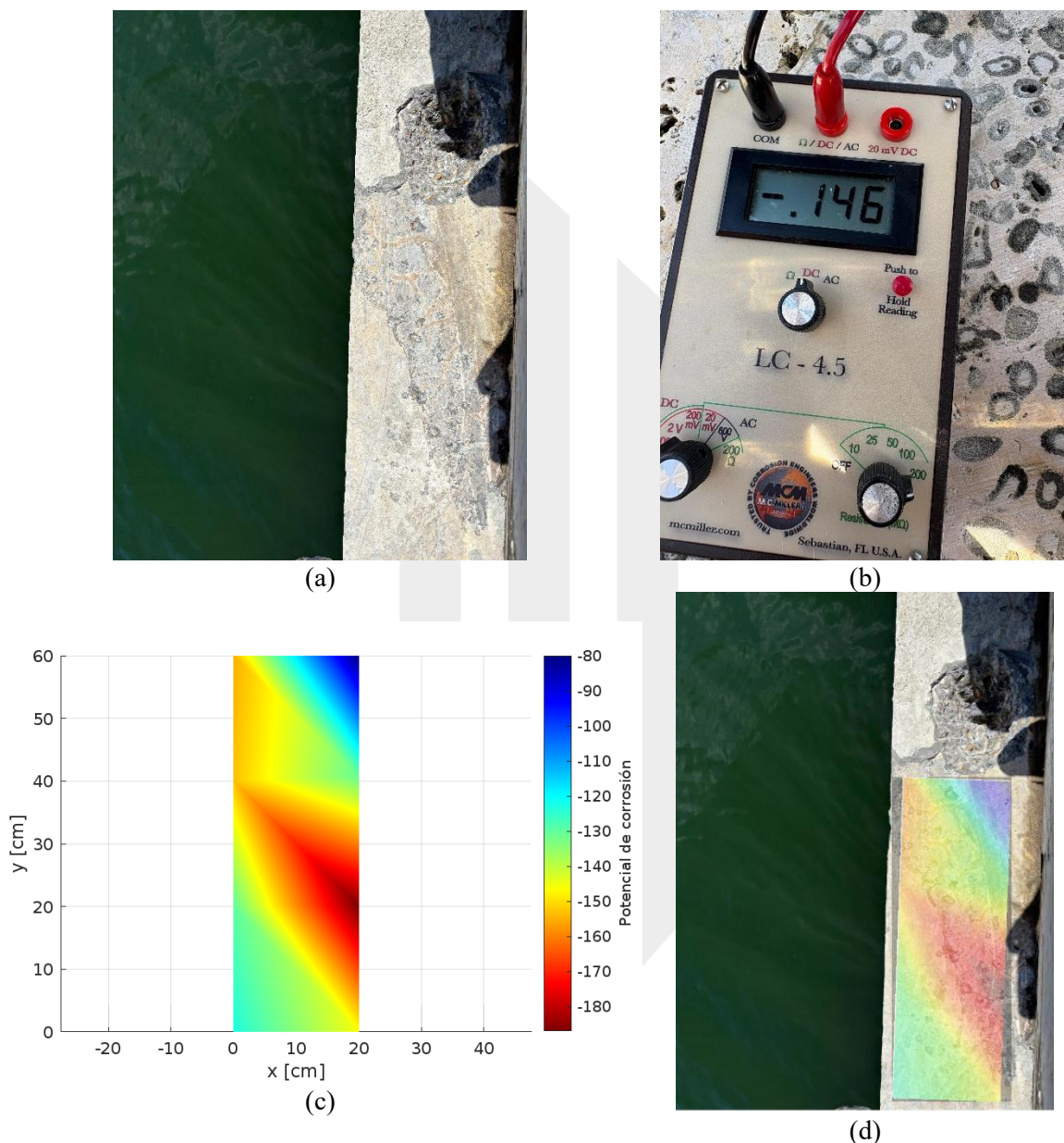


Figura 132. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC23

En el ensayo PC23 se registraron potenciales entre -80 mV y -180 mV respecto al electrodo CSE. De acuerdo con la referencia ASTM C876, estos valores reflejan una baja probabilidad de corrosión activa en el acero de refuerzo. Se presenta una franja en diagonal central, con los valores más elevados del elemento, sin embargo, se mantiene un comportamiento igualmente favorable desde el punto de vista electroquímico.

12.7 SECTOR 1

PC11

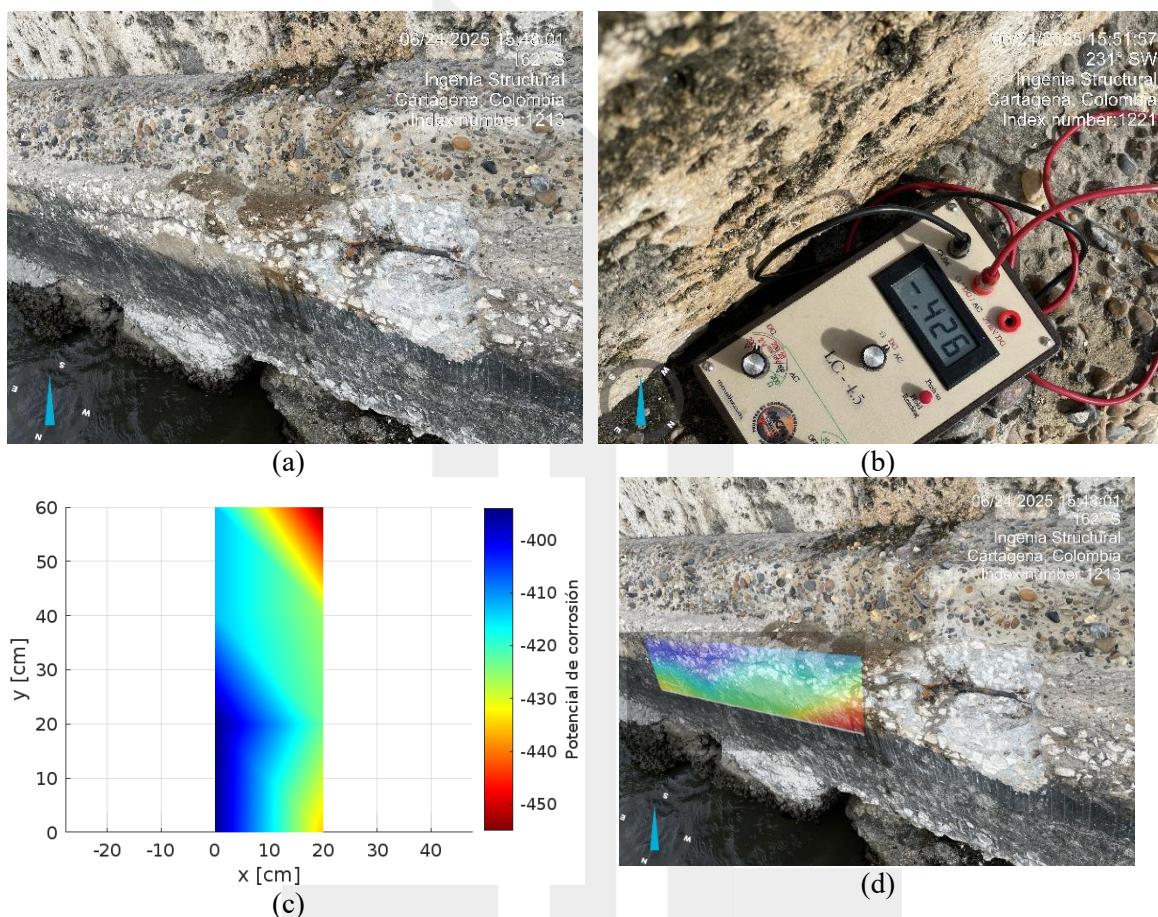


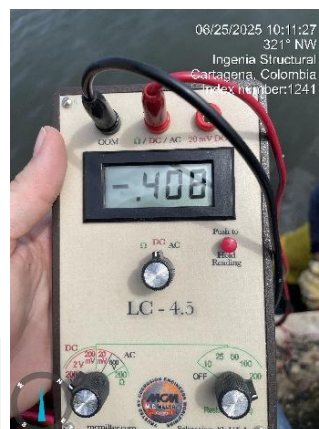
Figura 133. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC11

En el ensayo PC11 los potenciales medidos varían entre -400 mV y -450 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores, al encontrarse por debajo de -350 mV, sugieren una probabilidad alta de presencia de corrosión en el acero de refuerzo conforme a la norma ASTM C876. El análisis gráfico evidencia que los valores más negativos se concentran en el sector superior derecho, lo cual identifica esa zona como la más vulnerable dentro del área evaluada.

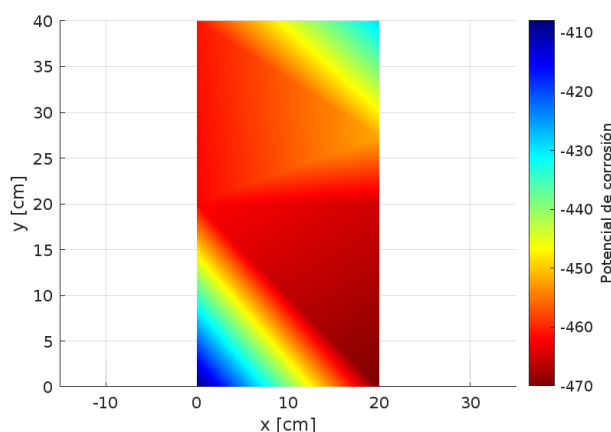
PC12



(a)



(b)



(c)



(d)

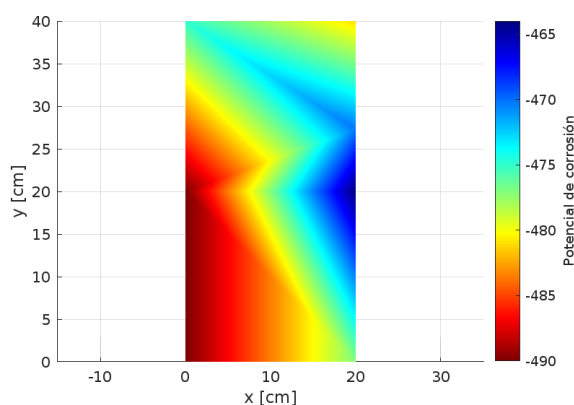
Figura 134. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC12

En el ensayo PC12 los potenciales de corrosión se encuentran en un rango de -410 mV a -470 mV respecto al electrodo CSE. Estos valores, siendo inferiores a -350 mV, reflejan una alta probabilidad de que se presenten procesos de corrosión en el refuerzo según la referencia ASTM C876. La distribución de potenciales revela una franja diagonal central donde se concentran los valores más negativos, lo que sugiere que esta zona concentra el mayor riesgo de deterioro dentro del área medida.

PC13



(a)



(b)

Figura 135. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC13

En el ensayo PC13, los potenciales medidos oscilan entre -465 mV y -490 mV respecto al electrodo CSE. De acuerdo con la referencia ASTM C876, estos valores corresponden a una probabilidad alta de corrosión en el acero de refuerzo. La concentración de potenciales más negativos se observa claramente en la zona inferior izquierda y el centro del área, señalando estas regiones como las más vulnerables frente a procesos de corrosión.

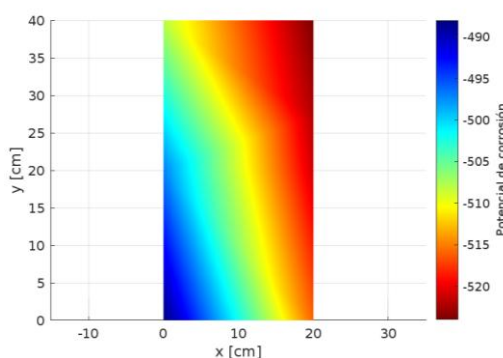
PC14



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 136. Ubicación y resultados de potencial de corrosión PC14

En el ensayo PC14 los potenciales se distribuyen entre -490 mV y -520 mV respecto al electrodo CSE. De acuerdo con la referencia ASTM C876, estos valores reflejan una alta probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo. El patrón del mapa muestra una franja diagonal bien definida, donde los potenciales más negativos se concentran, extendiéndose desde la parte superior izquierda hacia el borde inferior derecho del área evaluada.

En la siguiente tabla se resumen los resultados del ensayo de potencial de corrosión en cada una de las zonas o sectores evaluados, indicando el rango de potenciales encontrados y la probabilidad de corrosión asociada.

Tabla 23. Resultados de potencial de corrosión

| Sector | Punto evaluado | Potenciales (mV vs CSE) | Probabilidad de corrosión |
|--------|----------------|-------------------------|---------------------------|
| S7 | PC71 | -460 a -560 | Alta (>90%) |
| S7 | PC72 | -500 a -550 | Alta |
| S6 | PC61 | -460 a -500 | Alta |
| S6 | PC62 | -380 a -470 | Alta |
| S6 | PC63 | -440 a -475 | Alta |
| S6 | PC64 | -430 a -490 | Alta |
| S6 | PC65 | -540 a -575 | Alta |
| S6 | PC66 | -482 a -496 | Alta |
| S6 | PC67 | -485 a -510 | Alta |

| | | | |
|----|-------|-------------|----------|
| S6 | PC68 | -510 a -580 | Alta |
| S6 | PC69 | -485 a -510 | Alta |
| S6 | PC610 | -470 a -485 | Alta |
| S6 | PC611 | -460 a -495 | Alta |
| S6 | PC612 | -480 a -620 | Alta |
| S6 | PC613 | -580 a -595 | Alta |
| S6 | PC614 | -550 a -595 | Alta |
| S6 | PC615 | -115 a -150 | Baja |
| S6 | PC616 | -440 a -510 | Alta |
| S6 | PC617 | -420 a -490 | Alta |
| S6 | PC618 | -410 a -510 | Alta |
| S6 | PC619 | -455 a -480 | Alta |
| S5 | PC51 | -472 a -486 | Alta |
| S5 | PC52 | -445 a -480 | Alta |
| S5 | PC53 | -405 a -445 | Alta |
| S5 | PC54 | -370 a -460 | Alta |
| S5 | PC55 | -515 a -550 | Alta |
| S5 | PC56 | -430 a -530 | Alta |
| S4 | PC41 | -530 a -550 | Alta |
| S4 | PC42 | -480 a -530 | Alta |
| S4 | PC43 | -455 a -510 | Alta |
| S4 | PC44 | -435 a -480 | Alta |
| S4 | PC45 | -380 a -520 | Alta |
| S4 | PC46 | -410 a -520 | Alta |
| S4 | PC47 | -290 a -330 | Incierta |
| S4 | PC48 | -480 a -540 | Alta |
| S4 | PC49 | -460 a -540 | Alta |
| S3 | PC31 | -440 a -560 | Alta |
| S3 | PC32 | -430 a -500 | Alta |
| S2 | PC21 | -415 a -460 | Alta |
| S2 | PC22 | -140 a -240 | Baja |
| S2 | PC23 | -80 a -180 | Baja |
| S1 | PC11 | -400 a -450 | Alta |
| S1 | PC12 | -410 a -470 | Alta |
| S1 | PC13 | -465 a -490 | Alta |
| S1 | PC14 | -490 a -520 | Alta |

A continuación, se sintetizan los resultados en la **Figura 137** para cada uno de los puntos por sector.

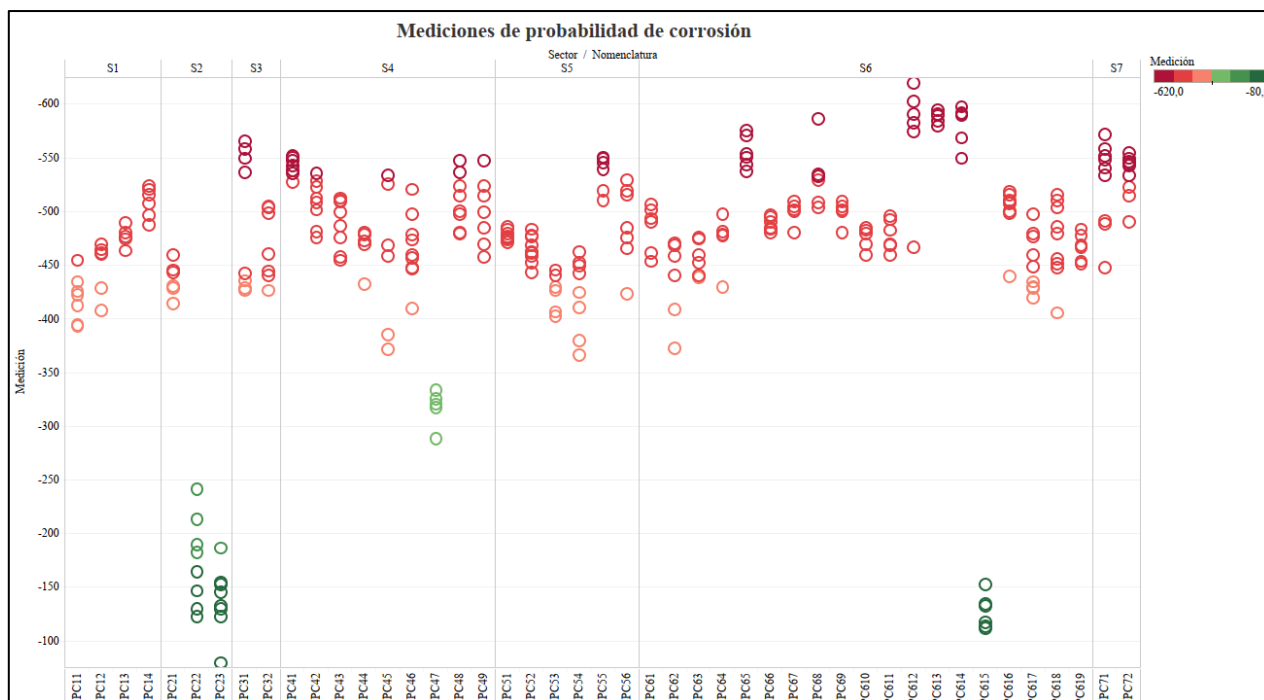


Figura 137. Mediciones de probabilidad de corrosión por punto.

El gráfico de dispersión que se muestra en la **Figura 137** presenta las mediciones de potencial de corrosión registradas en los distintos sectores estructurales (S1 a S7), diferenciados según su nomenclatura específica. En general, se observa que la mayoría de las mediciones en todos los sectores muestran valores negativos, indicativos de potenciales eléctricos más bajos, los cuales, conforme a los criterios del estándar ASTM C876, se asocian con una alta probabilidad de corrosión en esas zonas. Es importante resaltar, que las mediciones reportadas corresponden a la cara expuesta de la viga cabezal o muro perimetral en cada una de las zonas en estudio. Se puede resumir la condición de las zonas evaluadas a partir de los ensayos de potencial de media celda así:

- El sector S6 se confirma como el más crítico, concentrando el mayor número de mediciones con potenciales muy negativos (≤ -500 mV vs CSE), lo que evidencia una alta probabilidad de corrosión activa generalizada y un deterioro avanzado del acero de refuerzo.
- Los sectores S1, S3, S4 y S7, también presentan rangos de potenciales predominantemente negativos, asociados a condiciones de corrosión activa. Aunque la dispersión de los valores es menor que en S6, estos sectores muestran zonas localizadas de alta severidad que requieren atención prioritaria.
- En contraste, el sector S2 refleja un comportamiento diferente. La mayoría de las mediciones se ubican en rangos de baja probabilidad de corrosión, especialmente en las áreas intervenidas con tablestacado metálico y reconstrucción de la viga cabezal. Solo una medición, en el límite con el sector S3, mostró valores críticos, evidenciando que el riesgo se concentra en las zonas no rehabilitadas.

- El sector S5 exhibe también múltiples registros en rangos severos, con deterioro localizado en zonas laterales e inferiores, lo que lo posiciona entre los sectores con riesgo alto, aunque con un patrón menos homogéneo que S6.
- Las inspecciones visuales complementarias corroboran los resultados electroquímicos: en sectores como S7, S6, S5 y S3 se observaron áreas críticas con pérdida total del recubrimiento de concreto y exposición directa del acero. En algunos casos, el acero de refuerzo ha perdido sustancialmente área efectiva, dejando únicamente trazas de óxido en el concreto, lo que confirma el estado avanzado de deterioro estructural.

13 ENSAYO DE CARBONATACIÓN

La profundidad de carbonación del concreto de recubrimiento tiene influencia en el tiempo de iniciación de la corrosión del acero de refuerzo. Dependiendo de la calidad del concreto y la agresividad del medio, con un espesor de recubrimiento más bajo se producirá una corrosión más rápida del acero de refuerzo y posterior deterioro de la estructura si otras condiciones ambientales son propicias. La profundidad de penetración del CO_2 o avance del frente de carbonatación se midió en campo aplicando un indicador de pH (fenolftaleína) a superficies de concreto expuestas/fracturadas, una vez estas sean descubiertas con el taladro percutor (ver **Imagen 146**) siguiendo las especificaciones de la norma NT-BUILD 357. Las reparaciones se realizan con mortero de reparación, ver **Imagen 23**. El indicador de pH cambia de incoloro a color púrpura brillante por encima de un pH de aproximadamente 8.5, que es aproximadamente el nivel de umbral de pH asociado con la despasivación del acero de refuerzo. Como se observa en la **Figura 138**.

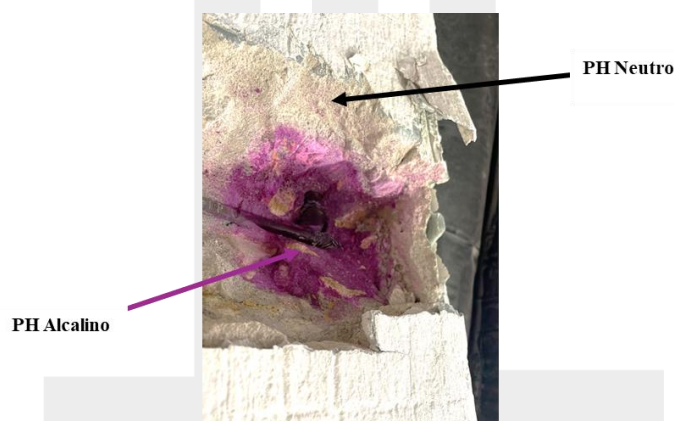


Figura 138. Identificación visual de carbonatación en concretos

Los puntos seleccionados para la realización del ensayo coinciden con la ubicación del acero de refuerzo transversal; esto se hizo con el objetivo de medir de manera directa el recubrimiento del acero. Los 40 ensayos fueron distribuidos de la siguiente manera:








Imagen 247. Ubicación de ensayos

A continuación, se presenta el registro de mediciones con los resultados discretizados en los siete (7) sectores en estudio. (ver **Tabla 24**).

Tabla 24. Resultados de ensayos de carbonatación
Registro de mediciones

| Sector 7 | | | |
|----------|--|-------------------------------------|-----------------|
| ID | Evidencia fotográfica | Medición | Elemento |
| CB71 | <p>Imagen 248. Ensayo en CB71</p> | Profundidad de carbonatación: 5 mm | Viga cabezal |
| CB72 | <p>Imagen 249. Ensayo en CB72</p> | Profundidad de carbonatación: 10 mm | Muro delineante |

| Sector 6 | | | |
|----------|---|-------------------------------------|--------------|
| ID | Elemento | Medición | |
| CB61 |  <p>Imagen 250. Ensayo en CB61</p> | Profundidad de carbonatación: 10 mm | Viga cabezal |
| CB62 |  <p>Imagen 251. Ensayo en CB62</p> | Profundidad de carbonatación: 20 mm | Viga cabezal |

| | | | |
|------|--|-------------------------------------|--------------|
| CB63 |  <p>Imagen 252. Ensayo en CB63</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| CB64 |  <p>Imagen 253. Ensayo en CB64</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| CB65 |  <p>Imagen 254. Ensayo en CB65</p> | Profundidad de carbonatación: 15 mm | Viga cabezal |













| | | | |
|------|--|-------------------------------------|--------------|
| CB66 |  <p>7/06/2025 at 11:14:33 AM 173° S Ingenia Structural Index number:813</p> | Profundidad de carbonatación: 10 mm | Viga cabezal |
| CB67 |  <p>7/06/2025 at 10:25:03 AM 322° NW Ingenia Structural Index number:796</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| CB68 |  <p>10/06/2025 at 10:02:34 AM N 124° 25' 8.847" W 75° 32' 52.628" 99° E Calle 24, Bolívar Ingenia Structural CO</p> | Profundidad de carbonatación: 20 mm | Viga cabezal |



Imagen 255. Ensayo en CB66

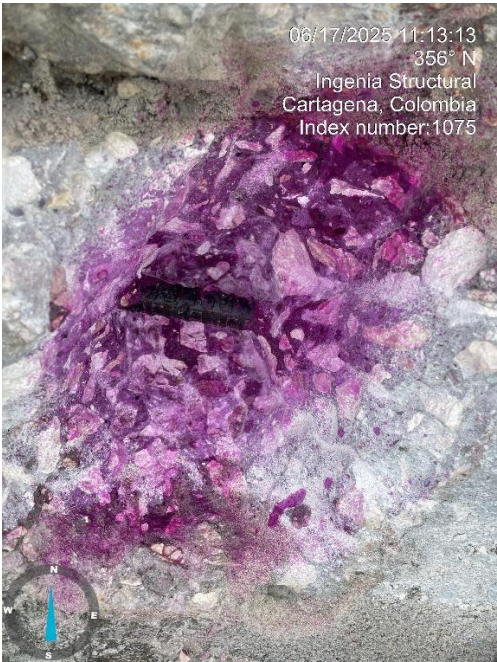
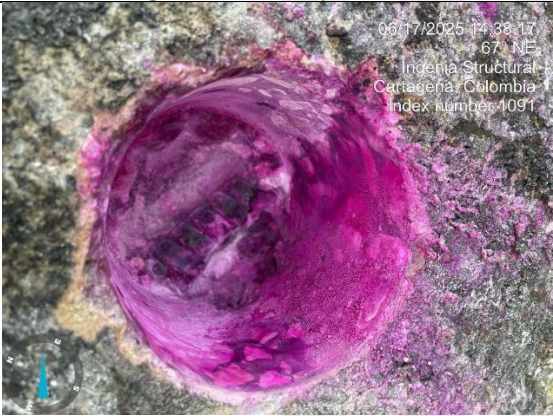

Imagen 256. Ensayo en CB67




| | | | | |
|-------|---|--|-------------------------------------|--------------|
| | Imagen 257. Ensayo en CB68 | | | |
| CB69 |  | | Profundidad de carbonatación: 20 mm | Viga cabezal |
| | Imagen 258. Ensayo en CB69 | | | |
| CB610 |  | | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| | Imagen 259. Ensayo en CB610 | | | |
| CB611 |  | | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| | Imagen 260. Ensayo en CB611 | | | |



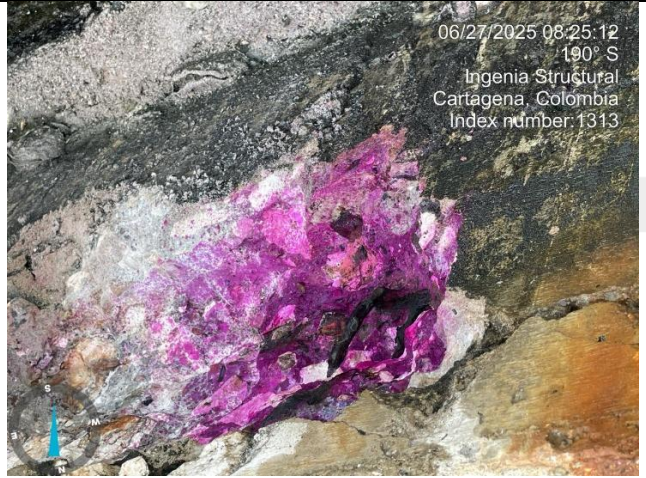
| | | | |
|-------|---|---------------------------------------|-----------------|
| CB612 |  <p>6/06/2025 at 2:37:45 PM 19° N Cartagena, Bolívar Ingenia Structural CO</p> <p>Imagen 261. Ensayo en CB612</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| CB613 |  <p>9/06/2025 at 1:39:41 PM N 10° 25' 6.877" W 75° 32' 51.488" 19° N Cartagena, Bolívar Ingenia Structural CO</p> <p>Imagen 262. Ensayo en CB613</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Muro delineante |
| CB614 |  <p>Imagen 263. Ensayo en CB614</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |




| CB615 |  | Profundidad de carbonatación: 5 mm | Viga cabezal |
|------------------------------------|---|-------------------------------------|--------------|
| Imagen 264. Ensayo en CB615 | | | |
| CB616 |  | Profundidad de carbonatación: 10 mm | Viga cabezal |
| Imagen 265. Ensayo en CB616 | | | |
| Sector 5 | | | |
| ID | Elemento | Medición | |
| CB51 |  | Profundidad de carbonatación: 10 mm | Viga cabezal |




| | | | |
|-----------------|--|------------------------------------|--------------|
| | Imagen 266. Ensayo en CB51 | | |
| CB52 |  | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| | Imagen 267. Ensayo en CB52 | | |
| CB53 |  | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| | Imagen 268. Ensayo en CB53 | | |
| Sector 4 | | | |
| ID | Elemento | Medición | |




| | | | |
|------|---|-------------------------------------|--------------|
| CB41 |  <p>06/17/2025 11:13:13 356° N Ingenia Structural Cartagena, Colombia Index number: 1075</p> <p>Imagen 269. Ensayo en CB41</p> | Profundidad de carbonatación: 40 mm | Viga cabezal |
| CB42 |  <p>06/17/2025 14:33:17 167° NE Ingenia Structural Cartagena, Colombia Index number: 1091</p> <p>Imagen 270. Ensayo en CB42</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| CB43 |  <p>06/25/2025 10:23:05 227° SW Ingenia Structural Cartagena, Colombia Index number: 1260</p> <p>Imagen 271. Ensayo en CB43</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |

| | | | |
|------|--|-------------------------------------|-----------------|
| CB44 |  <p>Imagen 272. Ensayo en CB44</p> | Profundidad de carbonatación: 50 mm | Viga cabezal |
| CB45 |  <p>Imagen 273. Ensayo en CB45</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Muro delineante |
| CB46 |  <p>Imagen 274. Ensayo en CB46</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Muro delineante |

| CB47 |  <p>Imagen 275. Ensayo en CB47</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
|-----------------|--|-------------------------------------|--------------|
| CB48 |  <p>Imagen 276. Ensayo en CB48</p> | Profundidad de carbonatación: 10 mm | Viga cabezal |
| Sector 3 | | | |
| ID | Elemento | Medición | |
| CB31 |  <p>Imagen 277. Ensayo en CB31</p> | Profundidad de carbonatación: 10 mm | Viga cabezal |

| CB32 |  <p>06/27/2025 08:29:37 167° S Ingenia Structural Cartagena, Colombia Index number: 1330</p> <p>Imagen 278. Ensayo en CB32</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
|----------|--|-------------------------------------|--------------|
| CB33 |  <p>06/27/2025 08:32:57 207° SW Ingenia Structural Cartagena, Colombia Index number: 1345</p> <p>Imagen 279. Ensayo en CB33</p> | Profundidad de carbonatación: 10 mm | Viga cabezal |
| Sector 2 | | | |
| ID | Elemento | Medición | |
| CB21 |  <p>Imagen 280. Ensayo en CB21</p> | Profundidad de carbonatación: 20 mm | Viga cabezal |

| | | | |
|-----------------|--|-------------------------------------|--------------|
| CB22 |  <p>Imagen 281. Ensayo en CB22</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| CB23 |  <p>Imagen 282. Ensayo en CB23</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
| CB24 |  <p>Imagen 283. Ensayo en CB24</p> | Profundidad de carbonatación: 10 mm | Viga cabezal |
| Sector 1 | | | |
| ID | Elemento | Medición | |

| | | | |
|------|--|-------------------------------------|--------------|
| CB11 |  <p>Imagen 284. Ensayo en CB11</p> | Profundidad de carbonatación: 20 mm | Viga cabezal |
| CB12 |  <p>Imagen 285. Ensayo en CB12</p> | Profundidad de carbonatación: 10 mm | Viga cabezal |
| CB13 |  <p>Imagen 286. Ensayo en CB13</p> | Profundidad de carbonatación: 15 mm | Viga cabezal |

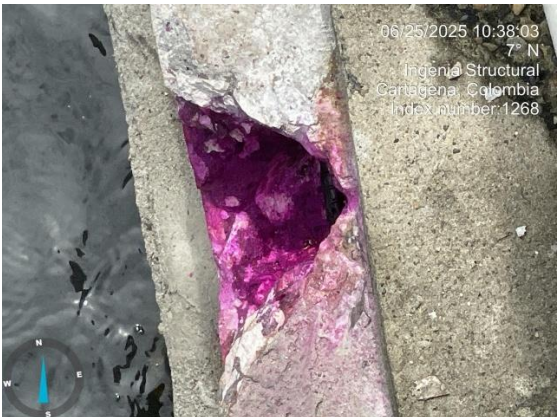
| | | | |
|------|--|------------------------------------|--------------|
| CB14 |  <p>06/25/2025 10:38:03 7° N Ingenia Structural Cartagena, Colombia Index number 1268</p> | Profundidad de carbonatación: 0 mm | Viga cabezal |
|------|--|------------------------------------|--------------|

Imagen 287. Ensayo en CB14

Los 40 ensayos de carbonatación realizados en los siete sectores de la estructura perimetral del Centro de Convenciones Cartagena de Indias evidencian, en términos generales, la ausencia de un frente de carbonatación activo al nivel del acero de refuerzo. Se pueden emitir las siguientes conclusiones preliminares:

- En la mayoría de las muestras (particularmente en sectores 5, 6, y 3) se registraron profundidades de carbonatación nulas o muy reducidas (0 a 10 mm).
- En sectores puntuales (principalmente sectores 1, 2 y 4) se observaron profundidades aisladas de 15 a 50 mm. Sin embargo, estos valores no representan un patrón generalizado y se mantienen por debajo de los recubrimientos nominales.
- El comportamiento detectado es coherente con la condición de los elementos analizados (viga cabezal perimetral y muro delineante), los cuales permanecen en sus condiciones de exposición han estado en contacto directo con agua de mar. Este ambiente saturado limita la difusión de dióxido de carbono existente hacia el interior del concreto, reduciendo significativamente el riesgo de carbonatación, especialmente en estructuras en esas condiciones de saturación.

En consecuencia, se puede decir que la corrosión observada en la estructura no está asociada a un proceso de carbonatación en el concreto, sino que responde a otros mecanismos de deterioro, que pueden estar principalmente relacionados con la exposición a cloruros en el ambiente marino como se estudia más adelante.

14 ANÁLISIS DE RESULTADO DE LABORATORIO

Los análisis realizados sobre los núcleos extraídos permitieron evaluar parámetros de resistencia mecánica y durabilidad del concreto en distintos sectores de la estructura perimetral. Un total de 67 núcleos fueron sometidos a ensayos de resistencia a compresión y 62 núcleos se destinaron al análisis de parámetros de durabilidad, incluyendo contenido de cloruros, perfil de sulfatos, petrografía y contenido de cemento. Los ensayos de resistencia, cloruros y sulfatos fueron ejecutados en los laboratorios de la Universidad del Norte, mientras que los estudios de petrografía fueron realizados en Micromatco S.A.S. y el análisis de contenido de cemento en los laboratorios de Analquímicos S.A.S.

Para los ensayos de sulfatos y cloruros, los núcleos fueron cortados cuidadosamente en rodajas de 1.2 cm de espesor desde la cara expuesta como se aprecia en la **Imagen 288**, garantizando así la obtención de los perfiles de penetración de agentes agresivos y permitiendo una caracterización del estado de deterioro del concreto.

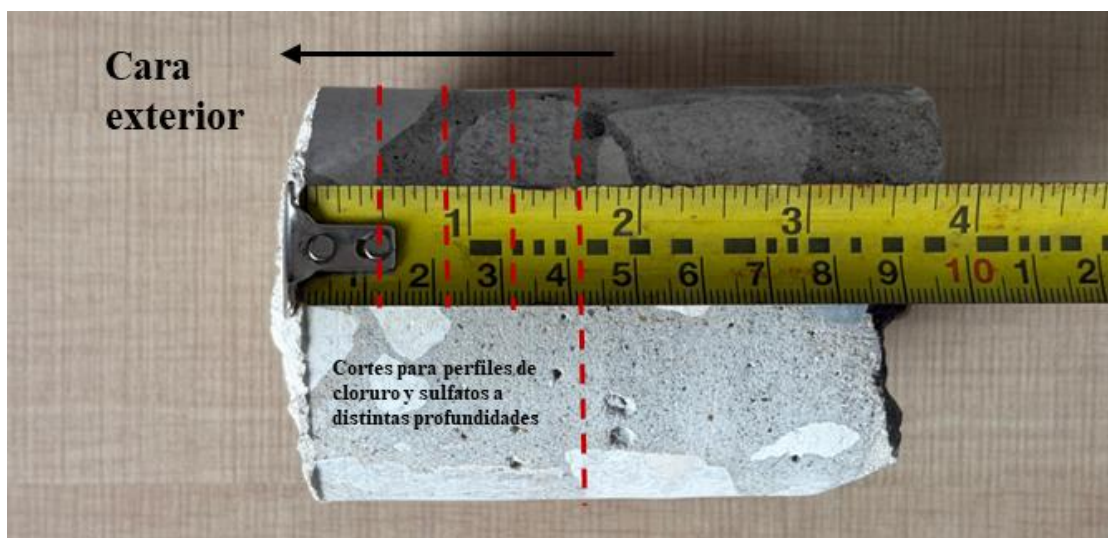


Imagen 288. Cortes para perfiles de cloruros y sulfatos

14.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El ensayo de resistencia a la compresión permite evaluar la capacidad mecánica del concreto para resistir cargas axiales. Se realiza extrayendo núcleos cilíndricos de 3.5" de diámetro y 18 cm de longitud (dentro de lo posible) de elementos estructurales en estudio, los cuales son cortados, refrentados y ensayados en laboratorio conforme a la norma ASTM C39 (ver **Imagen 289**). Este ensayo es fundamental para verificar si el concreto cumple con los requisitos estructurales de diseño mecánico y de durabilidad, así como para establecer correlaciones con otros ensayos no destructivos. El procedimiento incluye la localización de acero con ferroescaner, extracción mediante corona diamantada, y reparación con mortero de características similares al concreto original. Se realizaron 68 ensayos, a lo largo de los 7 sectores y los resultados se representan en el diagrama de barras de la **Figura 139**.

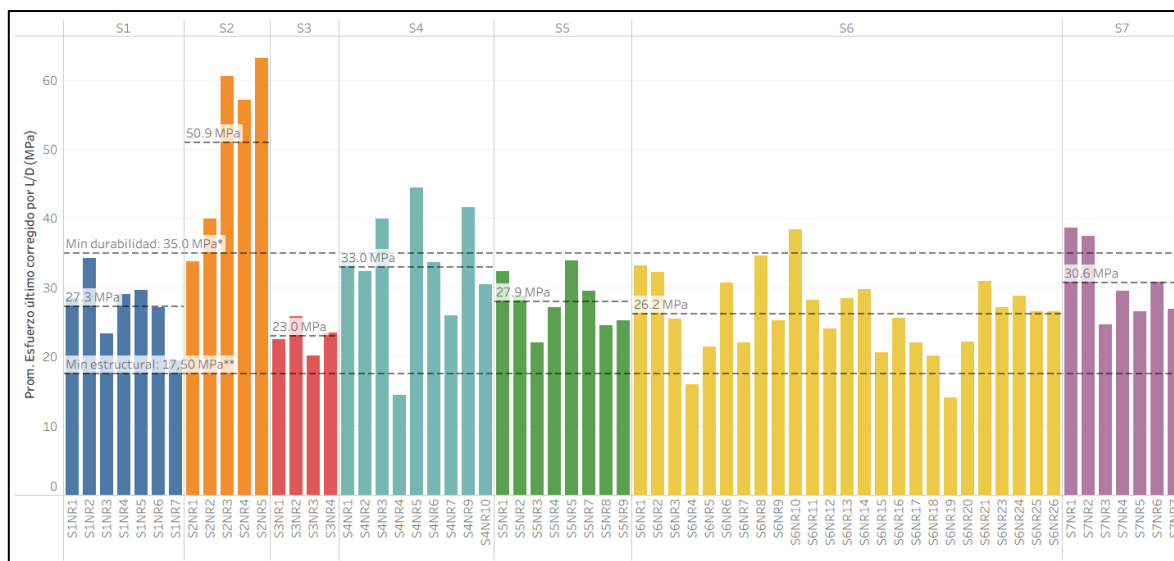


Imagen 289. Testeo de especímenes en maquina universal para ensayos a resistencia a compresión
A continuación, en la **Tabla 25** se presentan los parámetros básicos de algunos núcleos ensayados, que servirán de insumo para parámetros de durabilidad por cloruros (ver ANEXOS para la totalidad de la información de los núcleos ensayados)

Tabla 25. Parámetros físicos de cilindros ensayados a resistencia a compresión

| Sector | Nomenclatura | peso (g) | Diametro (mm) | Altura (mm) | r (m) | V(cm3) | Densidad (kg/m3) | Densidad Promedio(kg/m3) |
|--------|--------------|----------|---------------|-------------|-------|---------|------------------|--------------------------|
| 7 | S7NR1 | 1504 | 83.4 | 120.9 | 41.7 | 660.463 | 2277.19 | 2278.019 |
| | S7NR7 | 2119 | 83.6 | 169.4 | 41.8 | 929.856 | 2278.84 | |
| 6 | S6NR1 | 2005 | 84.1 | 164.5 | 42.05 | 913.793 | 2194.15 | 2200.35 |
| | S6NR9 | 1768 | 84 | 147.4 | 42 | 816.857 | 2164.39 | |
| | S6NR16 | 1018 | 84.1 | 82.1 | 42.05 | 456.063 | 2232.14 | |
| | S6NR26 | 1147 | 84.1 | 93.4 | 42.05 | 518.834 | 2210.72 | |
| 5 | S5NR1 | 1122 | 84.2 | 91.3 | 42.1 | 508.376 | 2207.02 | 2200.51 |
| | S5NR5 | 1396 | 84.3 | 114 | 42.15 | 636.282 | 2193.99 | |
| 4 | S4NR1 | 1179 | 84.3 | 93.9 | 42.15 | 524.096 | 2249.58 | 2265.12 |
| | S4NR5 | 1412 | 84.5 | 110.4 | 42.25 | 619.116 | 2280.66 | |
| 3 | S3NR1 | 1378 | 84.4 | 106.8 | 42.2 | 597.511 | 2306.23 | 2243.89 |
| | S3NR4 | 961 | 84.1 | 79.3 | 42.05 | 440.509 | 2181.56 | |
| 2 | S2NR1 | 1249 | 84.3 | 100.3 | 42.15 | 559.817 | 2231.08 | 2268.90 |
| | S2NR4 | 1337 | 84.4 | 103.6 | 42.2 | 579.608 | 2306.73 | |
| 1 | S1NR1 | 1204 | 84.4 | 93.3 | 42.2 | 521.983 | 2306.58 | 2315.77 |
| | S1NR4 | 1090 | 84.5 | 83.6 | 42.25 | 468.824 | 2324.96 | |

Los resultados de los núcleos ensayados se aprecian en la **Figura 139**.



*Según la norma NSR10 título C, tabla C.4.3.1

**Según la norma NSR10 título C, capítulo C.1.1.1

Figura 139. Resistencias a la compresión por sectores

La gráfica presenta los resultados promedio de resistencia a la compresión (MPa) obtenidos en los siete sectores de la estructura, comparados con la resistencia mínima exigida de 35 MPa establecida en la NSR-10, Título C en la tabla C.4.3.1, como requisito para garantizar condiciones adecuadas de durabilidad en ambientes agresivos (exposición C2). En términos generales, se observa una marcada variabilidad entre sectores. El Sector 2 destaca con los valores más altos, alcanzando promedios superiores a 50 MPa, lo que indica un concreto de buena calidad y claramente por encima del umbral normativo, resultado esperado, ya que este corresponde al concreto más reciente. En contraste, el Sector 3 presenta las resistencias más bajas, con un promedio cercano a 23 MPa, muy por debajo del mínimo requerido, reflejando un concreto deficiente.

Los Sectores 1, 5, 6 y 7 muestran valores intermedios, con promedios entre 26 y 31 MPa, todos ellos por debajo del límite normativo de 35 MPa, lo que indica que, aunque se encuentran en condiciones aceptables para soportar cargas, no cumplen con la exigencia de durabilidad planteada por la NSR-10 para ambientes de exposición severa como el marino. El Sector 4 alcanza un promedio de 33 MPa, cercano al límite normativo, pero aún insuficiente para cumplir plenamente con la norma.

Es importante destacar que los resultados de VPU (Velocidad de Pulso Ultrasónico) reportaron, en su mayoría, concretos de calidad pobre, muy pobre y cuestionable, mientras que las resistencias a compresión muestran valores mecánicos considerablemente más altos. Esta aparente contradicción se explica porque las mediciones de VPU se realizaron mayoritariamente mediante métodos indirectos y semidirectos, debido a las limitaciones en la configuración de los elementos para realizar ensayos directos. El VPU mide la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en el material, parámetro que se ve afectado no solo por la densidad y compacidad del concreto, sino también por la presencia de fisuras, microgrietas y discontinuidades internas. Así, un concreto puede registrar resistencias mecánicas aceptables en ensayos de compresión, pero simultáneamente mostrar calidades bajas en VPU debido a la fisuración interna, tal como ha quedado evidenciado a lo largo del informe en la inspección visual, las auscultaciones y confirmado posteriormente en los estudios petrográficos.

Finalmente, debe considerarse que estas estructuras fueron construidas y diseñadas hace aproximadamente 45 años (exceptuando el 99% del Sector 2), en una época en la que la normativa nacional exigía resistencias mínimas de 21 MPa. Bajo esa condición, los valores obtenidos resultarían aceptables en el contexto histórico. Sin embargo, a la luz de la **NSR-10 vigente**, estos mismos resultados son insuficientes para garantizar la durabilidad requerida en ambientes marinos agresivos, lo cual refuerza la necesidad de plantear intervenciones correctivas y de reforzamiento en los sectores que no cumplen con los parámetros actuales.

14.2 CONTENIDO DE CEMENTO

El ensayo de contenido de cemento permite cuantificar la cantidad de cemento presente en el concreto endurecido, lo cual es esencial para evaluar su calidad, durabilidad y capacidad de resistencia frente a agentes agresivos. La muestra es obtenida mediante extracción de núcleos y posteriormente analizada en laboratorio mediante métodos químicos establecidos en la norma técnica colombiana NTC 3726. Las muestras son trituradas para realizar los respectivos ensayos (ver **Imagen 290**).



Imagen 290. Muestras trituradas para ensayo de contenido de cemento

Este ensayo proporciona información relevante sobre la dosificación real del concreto, permitiendo identificar posibles deficiencias en el diseño de mezcla o su ejecución en obra. Se realizaron 12 ensayos distribuidos en distintos sectores estructurales (ver resultados en **Tabla 26**), seleccionados en función del estado de deterioro y representatividad.

Tabla 26. Resultados de contenido de cemento

| ID | SECTOR | Resultado (%) | Cemento (kg/m ³) |
|-------|--------|---------------|------------------------------|
| ND73 | 7 | 17.89 | 407.54 |
| ND63 | 6 | 27.30 | 600.70 |
| ND68 | | 30.35 | 667.81 |
| ND610 | | 26.04 | 572.97 |
| ND613 | | 37.19 | 818.31 |

| | | | |
|-----------------|---|-------|--------|
| ND614 | | 24.59 | 541.07 |
| ND618 | | 32.00 | 704.11 |
| ND53 | 5 | 35.49 | 780.96 |
| ND45 | 4 | 42.00 | 951.35 |
| ND33 | 3 | 37.28 | 836.53 |
| ND22 | 2 | 35.53 | 806.14 |
| ND16 | 1 | 37.87 | 876.99 |
| Promedio | | 31.96 | 713.71 |

El análisis de los siete sectores de la estructura perimetral del Centro de Convenciones evidencia un comportamiento heterogéneo que condiciona su desempeño global. Los sectores 1 a 4 presentan concretos de buena calidad, con altos contenidos de cemento, densidades adecuadas y resultados superiores al 35%, destacándose el sector 4 como el de mayor capacidad estructural, lo que sugiere intervenciones más recientes o mezclas más robustas. El sector 5 mantiene valores aceptables, aunque su baja densidad refleja posibles porosidades o deterioro que pueden comprometer su durabilidad a mediano plazo. Los sectores 6 y 7 concentran las mayores vulnerabilidades: el primero muestra alta variabilidad en el desempeño de los núcleos, con zonas puntuales de baja resistencia y deficiencias en el contenido de cemento, mientras que el sector 7 presenta resultados críticos, con el menor contenido de cemento y desempeño estructural, lo que compromete directamente su capacidad portante y estabilidad. Cabe resaltar que los valores de contenido de cemento obtenidos son considerablemente altos, condición que se explica por la presencia de agregados silíceos (principalmente calizas, basaltos y cherts), tal como lo confirma el estudio petrográfico, que pueden afectar el resultado del ensayo químico.

14.3 CONTENIDO DE CLORUROS

Los perfiles de concentración de cloruros se determinaron cortando el núcleo en 4 rebanadas de espesor variable correspondiente a 12 mm, 24 mm, 36 mm y 42 mm respectivamente (como se aprecia en la **Imagen 288**), con el fin de obtener el avance de la penetración de cloruros en el concreto para cada caso evaluado. Cada rebanada luego se sometió a un proceso de pulverización y análisis químico (cloruros solubles en ácido) de acuerdo con la norma NTC 5557 (ICONTEC, s. f.-b). Los perfiles de concentración de cloruro fueron procesados matemáticamente para la determinación del coeficiente de difusión de cloruro efectivo aparente (D_{app}). El ajuste de las curvas de concentración de cloruros fue basado en la solución de la segunda ley de Fick de difusión de acuerdo a la Ecuación (NordTest Method, s. f.):

$$C_{(cc,t)} = C_s - (C_s - C_o) \cdot \operatorname{erf} \frac{C_c}{2 \cdot \sqrt{D_{ef} \cdot t}}$$

C_s = concentración en la superficie (kg/m³, % cementante)

C_o = concentración en la superficie (kg/m³, % cementante)

D_{app} = coeficiente de difusión de cloruros (cm², m²/s)

C_{cc} = recubrimiento del acero en el concreto

t = tiempo

Una estimación aproximada del tiempo de inicio de corrosión debido a la corrosión inducida por cloruro, tcl, a partir de los parámetros encontrados es posible considerando que la concentración de cloruros a nivel del recubrimiento del acero alcanza un valor límite. Se considera que los cloruros penetran en el concreto endurecido y a cierto nivel de concentración (*llamado umbral de cloruros, Cu*), causaran la descomposición de la capa pasiva del acero de refuerzo iniciando la corrosión y expansión de la matriz del concreto. La determinación de la concentración de iones cloruro en el concreto es entonces esencial para evaluar la necesidad de mantenimiento y diseñar las medidas efectivas de intervención y reparación.

El perfil de contenido de cloruros se realiza para determinar la concentración de iones cloruro en el concreto, que pueden inducir procesos de corrosión en el acero de refuerzo. Se emplea un perfil de 4 puntos mediante extracción de polvo a distintas profundidades (normalmente 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 mm) siguiendo los lineamientos de la norma NT-BUILD 443. Los resultados permiten identificar zonas críticas en donde la concentración de cloruros supera el umbral de riesgo. Se realizaron 24 perfiles a lo largo de la estructura, priorizando zonas cercanas a la acción marina directa y evidencias visuales de corrosión del acero. Las rodajas cortadas se aprecian en la **Imagen 291**, posterior a esto, las muestras son trituradas hasta conseguir un polvo fino que pase el tamiz 50 como se aprecia en la **Imagen 292**.



Imagen 291. Cortes de rodajas en muestras de cloruros



Imagen 292. Muestras trituradas y tamizadas

Ahora bien, se extrajeron 24 núcleos con el fin de analizar 4 puntos por perfil de cloruros. Los datos obtenidos de concentración de cloruros en las muestras analizadas se reportan en porcentaje por peso de concreto, se asume un tiempo de construcción de los sectores 1,3,4,5,6 y 7 es de 45 años y para el sector 2 sería de 3 años. Se asume que estos siguen la segunda ley de Fick para calcular el coeficiente difusión y los perfiles de cloruros.

Las extracciones de núcleo se realizaron en la cara lateral y superior de la viga perimetral o cabezal de cada uno de los sectores, para su identificación, en la nomenclatura original se le agregará un guión “-“ y la letra L (Lateral, de manera horizontal con la cara de exposición al mar) o S (Superior, de manera vertical) según corresponda; los resultados, discretizados por sector y por elemento se encuentran en la **Tabla 27**.

Tabla 27. Resultados de cloruros

| Referencia | | Cara del ensayo | Slice | X (m) | Contenido de cloruros (% Wconcreto) |
|------------|---------|-----------------|-------|-------|-------------------------------------|
| ND72 | S7PC1-S | Superior | S1 | 0.006 | 1.2606 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.7314 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.3838 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.3865 |
| ND75 | S7PC2-S | Superior | S1 | 0.006 | 0.7433 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.512 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.6032 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.4019 |
| ND61 | S6PC1-S | Superior | S1 | 0.006 | 1.1473 |
| | | | S2 | 0.018 | 1.1318 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.8339 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.4638 |
| ND64 | S6PC2-S | Superior | S1 | 0.006 | 1.6387 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.7737 |

| | | | | | |
|-------|----------|----------|----|-------|--------|
| | | | S3 | 0.03 | 1.0491 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.606 |
| ND65 | S6PC3-S | Superior | S1 | 0.006 | 0.9465 |
| | | | S2 | 0.018 | 1.3767 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.0863 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.8328 |
| ND611 | S6PC4-L | Lateral | S1 | 0.006 | 0.8972 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.7965 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.7197 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.6007 |
| ND612 | S6PC5-L | Lateral | S1 | 0.006 | 0.8394 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.8348 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.6702 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.5989 |
| ND616 | S6PC6-L | Lateral | S1 | 0.006 | 1.3322 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.6111 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.2079 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.0446 |
| ND617 | S6PC7-L | Lateral | S1 | 0.006 | 1.263 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.6754 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.3518 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.2199 |
| ND619 | S6PC8-S | Superior | S1 | 0.006 | 1.2731 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.8028 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.293 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.0918 |
| ND620 | S6PC9-L | Lateral | S1 | 0.006 | 1 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.7228 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.6679 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.6653 |
| ND621 | S6PC10-S | Superior | S1 | 0.006 | 0.9716 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.8694 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.7794 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.6568 |
| ND622 | S6PC11-L | Lateral | S1 | 0.006 | 0.6392 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.6423 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.6166 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.5656 |
| ND624 | S6PC12-S | Superior | S1 | 0.006 | 0.5394 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.4675 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.5778 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.4288 |
| ND51 | S5PC1-S | Superior | S1 | 0.006 | 0.0544 |

| | | | | | |
|------|---------|----------|----|-------|--------|
| | | | S2 | 0.018 | 0.0547 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.0578 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.0647 |
| ND55 | S5PC2-L | Lateral | S1 | 0.006 | 0.4 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.3911 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.3797 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.4837 |
| ND41 | S4PC1-L | Lateral | S1 | 0.006 | 1.0344 |
| | | | S2 | 0.018 | 1.1396 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.8801 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.4558 |
| ND43 | S4PC2-L | Lateral | S1 | 0.006 | 0.8991 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.8604 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.777 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.6554 |
| ND31 | S3PC1-L | Lateral | S1 | 0.006 | 1.4592 |
| | | | S2 | 0.018 | 1.1607 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.6649 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.4232 |
| ND35 | S3PC2-L | Lateral | S1 | 0.006 | 1.1659 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.9878 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.8789 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.8424 |
| ND21 | S2PC1-L | Lateral | S1 | 0.006 | 0.7681 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.5852 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.3951 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.3442 |
| ND25 | S2PC2-S | Superior | S1 | 0.006 | 0.2021 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.0213 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.0195 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.0168 |
| ND12 | S1PC1-S | Superior | S1 | 0.006 | 0.6994 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.6275 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.5676 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.3677 |
| ND14 | S1PC2-L | Lateral | S1 | 0.006 | 0.6343 |
| | | | S2 | 0.018 | 0.6206 |
| | | | S3 | 0.03 | 0.6009 |
| | | | S4 | 0.042 | 0.5507 |

De acuerdo con la concentración de cloruros límites establecida en la norma ACI 318 se emplea para análisis comparativo con un contenido máximo permitido de iones de cloruro que oscila entre 0.15% - 0.20% por peso del cementante en el concreto. Sin embargo, se han reportado valores de umbral en

el rango de 0.2% - 0.4% del peso de cemento en estructuras en ambiente costeros, en el caso específico de Cartagena, ubicada en una zona costera, el umbral de cloruros se estima en un 0,4 % wob (por peso de cemento), se realiza la conversión de los umbrales para cada sector por peso de concreto, de acuerdo a las densidades promedios calculadas en la **Tabla 25** y a los contenidos de cementos reportados en la **Tabla 26**. Los umbrales por sector se registran en la **Tabla 28**.

Tabla 28. Umbrales de cloruro para cada sector por peso de concreto

| Sector | Umbral %woc |
|--------|-------------|
| 7 | 0.072 |
| 6 | 0.118 |
| 5 | 0.142 |
| 4 | 0.168 |
| 3 | 0.149 |
| 2 | 0.142 |
| 1 | 0.151 |

Con base en los resultados, se realiza la construcción de los perfiles de cloruros para cada una de las muestras tomadas. Para el sector 7, los perfiles se muestran en la **Figura 140**. Los resultados fueron proyectados al recubrimiento normativo para zonas marinas de 75 mm. Sin embargo, cabe aclarar que de acuerdo con la gráfica de la Figura 87, los recubrimientos promedio para ambas caras (superiores y laterales) han sido sobrepasados por el avance de cloruros.

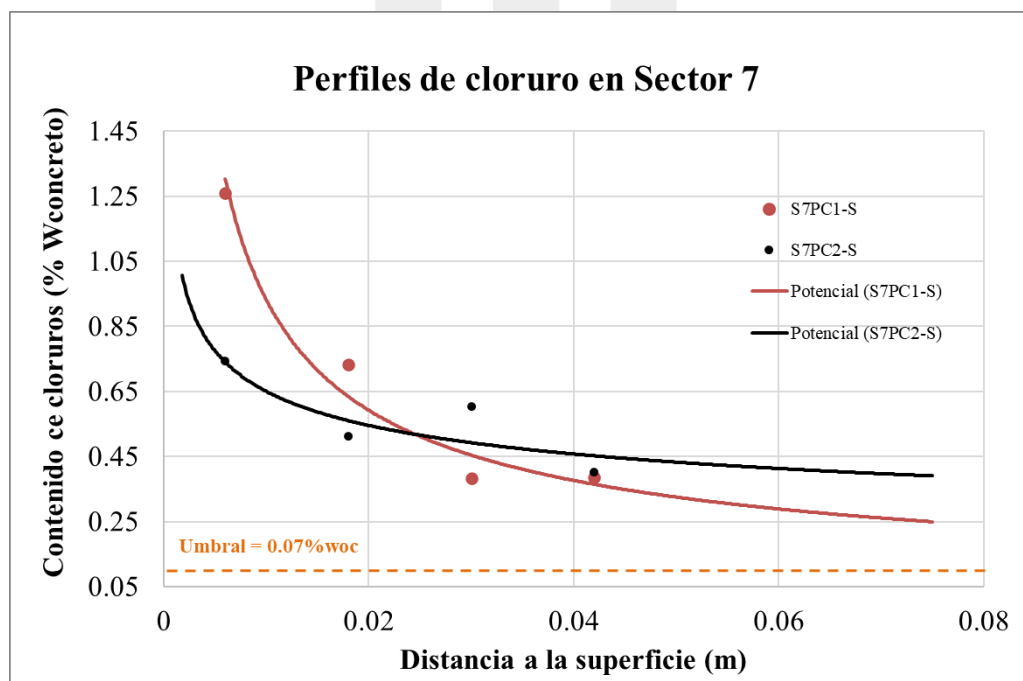


Figura 140. Perfiles de cloruros en sector 7

La gráfica presenta los perfiles de concentración de cloruros en dos puntos del Sector 7 (S7PC1 y S7PC2), ambos medidos en la cara superior del elemento estructural. Se observa una disminución del contenido de cloruros (% respecto al peso del concreto) con la profundidad desde la superficie,

comportamiento típico en elementos expuestos a ambientes marinos. El punto S7PC1 muestra concentraciones superficiales más elevadas (cercanas al 1.3%) en comparación con S7PC2 (cercanas al 0.8%) y un comportamiento más constante a lo largo del perfil, lo que sugiere una mayor penetración de agentes agresivos en esa zona. Las curvas de ajuste permiten modelar la difusión de cloruros y proyectar su evolución. En ambos casos, los niveles detectados superan el umbral crítico de 0.07%woc comúnmente asociado al inicio de la corrosión del acero.

En la **Figura 141** y la **Figura 142** se reportan los resultados del Sector 6. De acuerdo con la gráfica de la Figura 87, los recubrimientos promedio para ambas caras (superiores y laterales) han sido sobrepasados por el avance de cloruros.

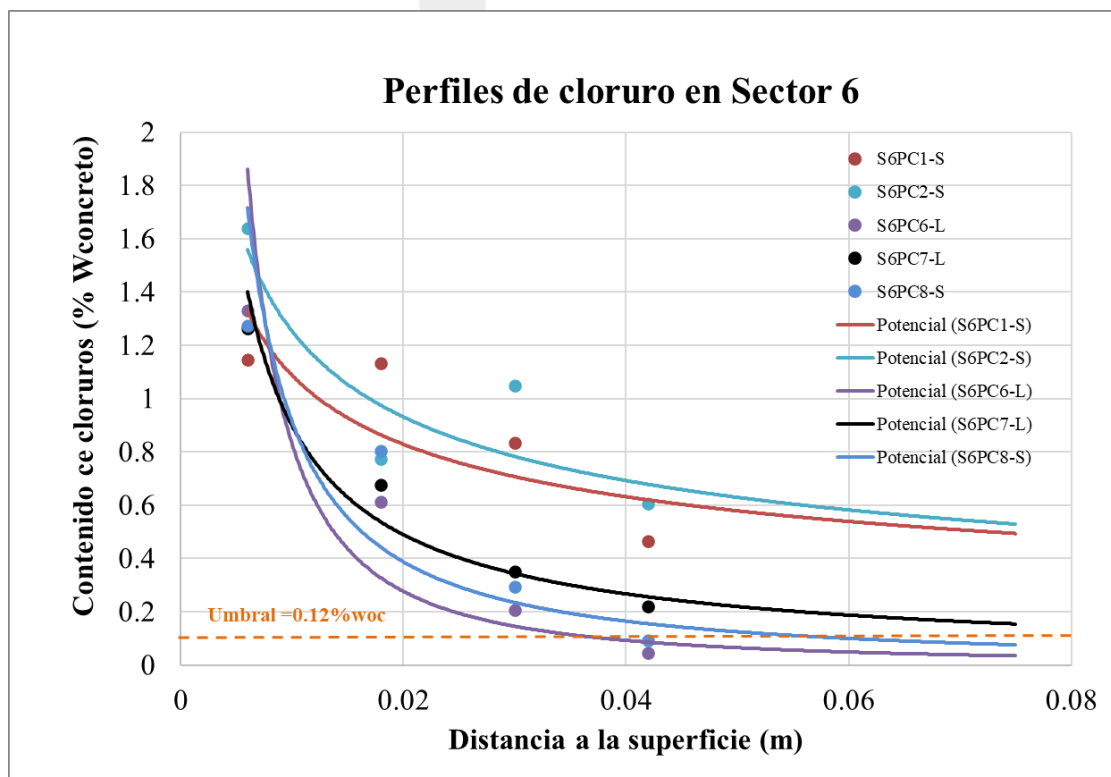


Figura 141. Perfil de cloruros en sector 6 – comportamiento ley de fick

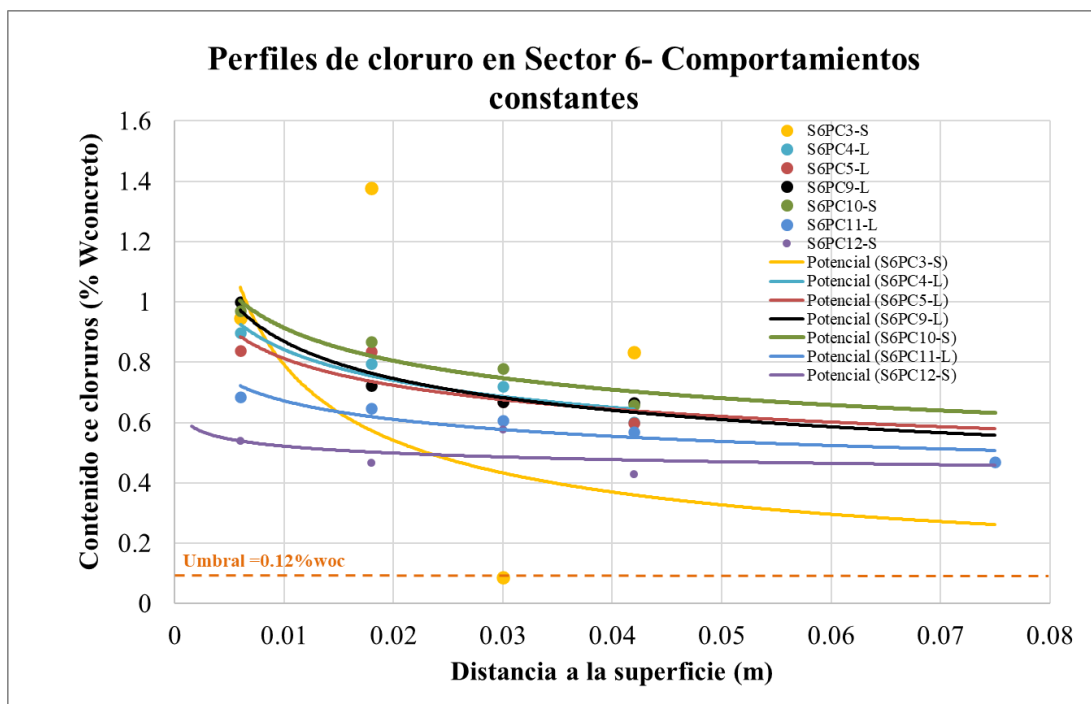


Figura 142. Perfil de cloruros en sector 6 – Comportamientos constantes

En el análisis del Sector 6 se observaron dos comportamientos distintos en los perfiles de concentración de cloruros, en función de la ubicación de extracción y la respuesta del material. En la **Figura 141**, correspondiente a los puntos S6PC1, S6PC2, S6PC6, S6PC7 y S6PC8 —predominantemente en la cara lateral del elemento— se evidencia un perfil decreciente típico de difusión, donde la concentración de cloruros es mayor en la superficie y disminuye con la profundidad, lo que coincide con el comportamiento previsto por la ley de Fick para elementos en exposición marina directa. En cambio, la **Figura 142** agrupa perfiles correspondientes a los puntos S6PC3, S6PC4, S6PC5, S6PC9, S6PC10, S6PC11 y S6PC12, de los cuales una proporción significativa fueron extraídos desde la cara superior, y presentan un comportamiento relativamente constante o incluso irregular a lo largo de la profundidad del núcleo. Esta tendencia indica una posible redistribución interna de cloruros debido a microfisuras, humectación intermitente, porosidad conectada o acumulación por acción capilar, condiciones que pueden presentarse más intensamente en zonas horizontales expuestas al mar. En particular, el punto S6PC3 —ubicado en cara superior— destaca por presentar valores significativamente altos y dispersos, lo que sugiere un foco local de acumulación crítica. En general, todos los perfiles superan el umbral de cloruro para este sector (0.12%woc), lo que representa un deterioro estructural latente tanto en elementos horizontales como verticales.

Para el sector 5 se muestran los perfiles en la **Figura 143**. De acuerdo a la gráfica de la **Figura 85** los recubrimientos promedios para ambas caras (superiores y laterales) han sido sobrepasados por el avance de cloruros.

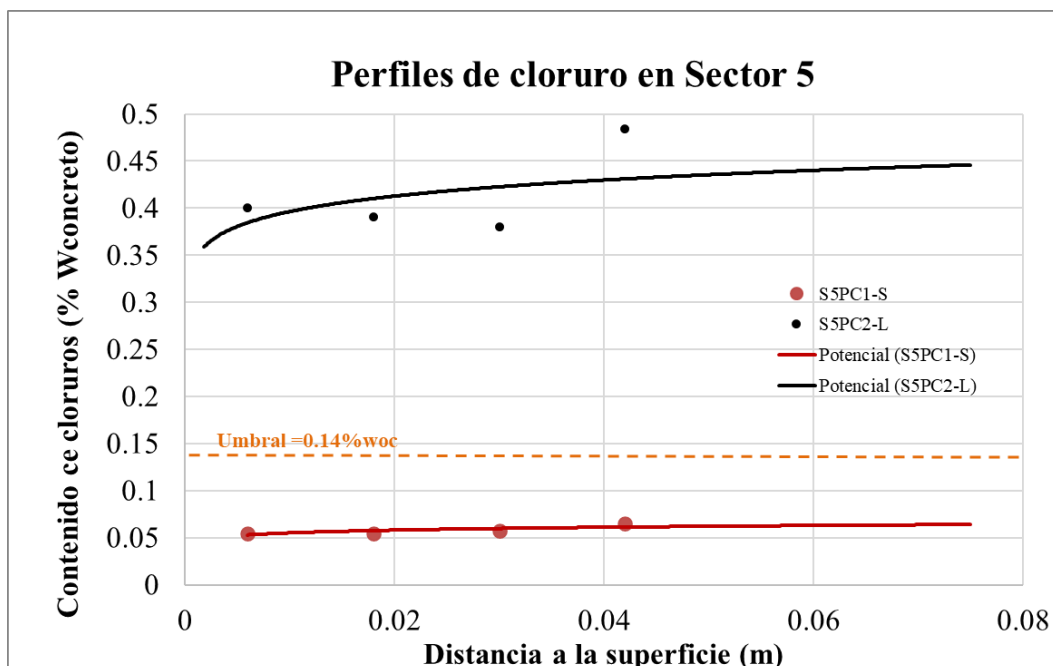


Figura 143. Perfiles de cloruros en el sector 5

En el Sector 5 se evaluaron dos elementos estructurales distintos: S5PC1, ubicado en la cara superior de una estructura puntual presente solo en una parte del sector (Sistema contención sector 5-6), y S5PC2, correspondiente a la viga perimetral que se extiende en la mayor parte de este sector. Los resultados muestran un contraste significativo: en S5PC1 la concentración de cloruros es muy baja y prácticamente constante a lo largo de la profundidad (≈ 0.05 % Wconcreto), lo que indica baja exposición y mínima penetración de cloruros, en esta zona, el nivel del agua suele ser más bajo según lo evidenciado en campo. En cambio, en S5PC2 la concentración es considerablemente mayor y muy constante a lo largo de la profundidad (entre 0.38 y 0.48 % Wconcreto), superando en varios puntos el umbral crítico calculado para el sector 5 (0.14%woc). Esto implica que, aunque el riesgo en la estructura asociada a S5PC1 es bajo, la condición de la viga perimetral representada por S5PC2 constituye un escenario de alto riesgo de corrosión activa, dado que su comportamiento uniforme refleja un estado avanzado de ingreso de cloruros en la sección expuesta.

Para el sector 4 se presenta el perfil en la **Figura 144**. De acuerdo a la gráfica de la **Figura 85** los recubrimientos promedios para las caras laterales corresponden a 61 mm, por lo tanto, los perfiles de cloruros se proyectan hasta llegar al recubrimiento mínimo normativo de 75 mm.

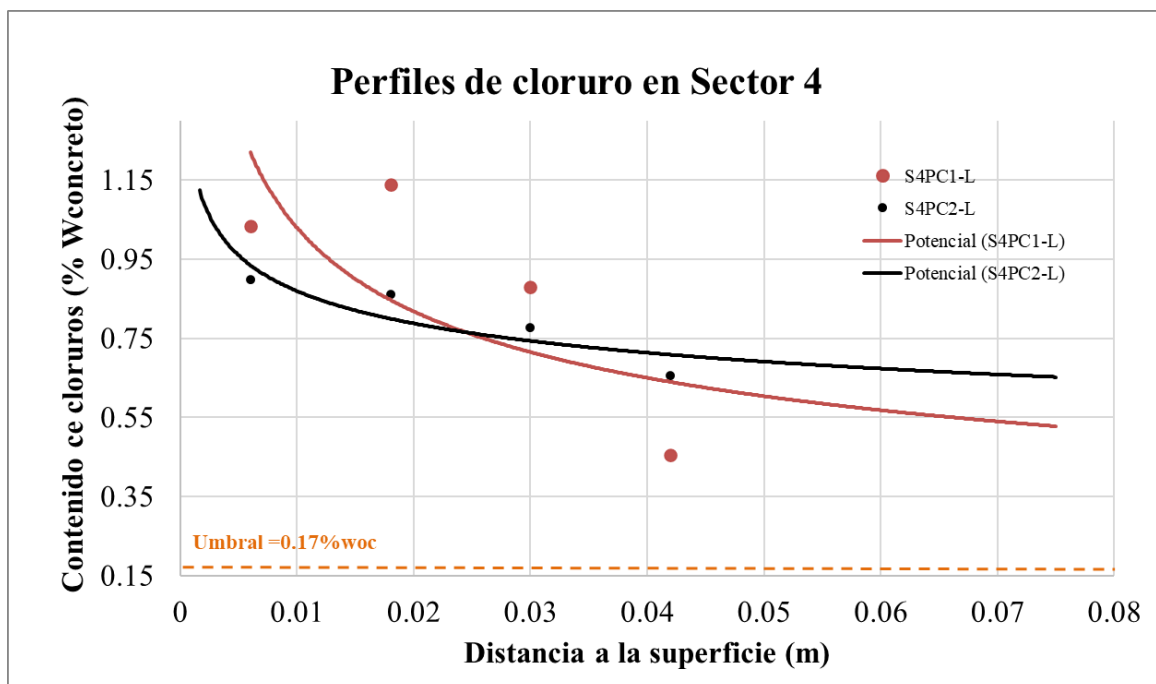


Figura 144. Perfiles de cloruros en el sector 4

En el Sector 4 se realizaron perfiles de cloruros en dos puntos extraídos de manera lateral en la viga ubicada debajo del relleno (la medida del relleno está entre 40-50 cm). Ambos perfiles (S4PC1 y S4PC2) muestran un comportamiento con valores altos y superan ampliamente el umbral crítico de cloruros para la iniciación de la corrosión del acero de refuerzo ($\approx 0.17\%$ Wconcreto), alcanzando concentraciones superiores al 1.1 % en superficie y manteniéndose por encima de 0.65–0.77 % incluso a 4 cm de profundidad. Este comportamiento evidencia un estado avanzado de penetración de cloruros en la sección analizada, lo que implica que la armadura en esta viga se encuentra bajo un riesgo severo de corrosión activa. La constancia de valores elevados a lo largo del perfil refuerza la necesidad de plantear medidas urgentes de intervención, considerando la condición crítica del concreto que actúa como contención del relleno en este sector.

Para el sector 3 los perfiles se presentan en la **Figura 145**. De acuerdo a la gráfica de la **Figura 85** los recubrimientos promedios para las caras laterales corresponden a 47 mm, si embargo, los perfiles de cloruros se proyectan hasta llegar al recubrimiento mínimo permitido por la norma.

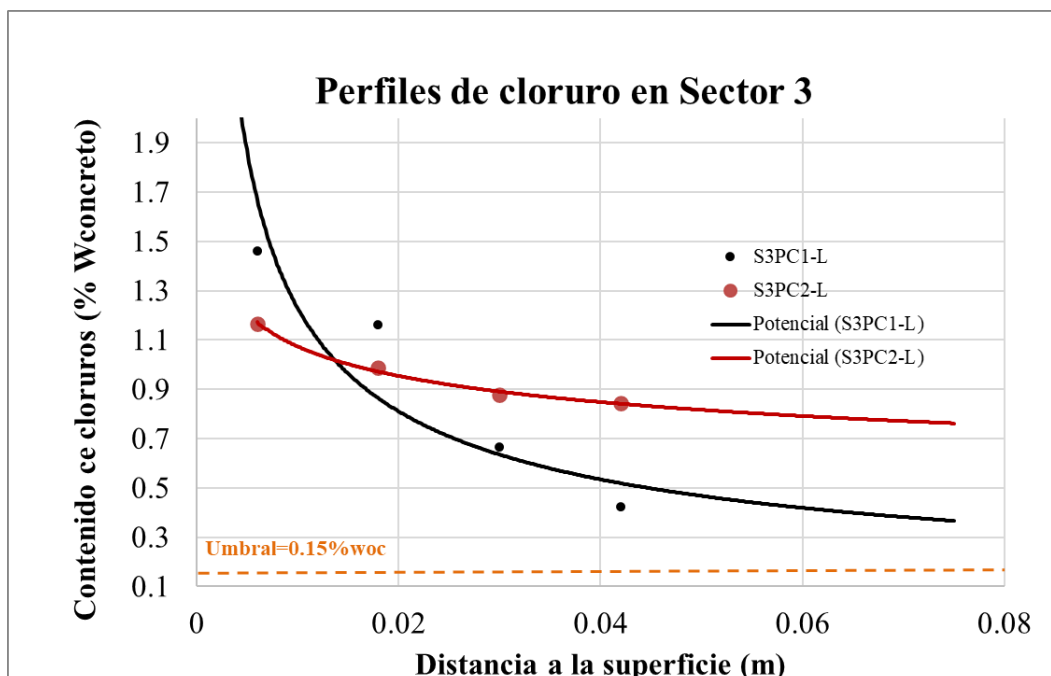


Figura 145. Perfiles de cloruros en el sector 3

En el Sector 3 se realizaron perfiles de cloruros en dos puntos extraídos de la cara lateral de la viga perimetral de la estructura, ubicados en proximidad vertical, con S3PC2 localizado 20 cm por encima de S3PC1. Los resultados muestran concentraciones iniciales elevadas en ambos puntos, con valores en superficie de hasta 1.45 % Wconcreto en S3PC1 y 1.16 % Wconcreto en S3PC2, todos ellos muy por encima del umbral crítico (0.15%woc) para la iniciación de la corrosión del acero de refuerzo. A medida que aumenta la profundidad, se observa una disminución de los valores, aunque se mantienen altos incluso a 4–5 cm, con concentraciones de 0.42–0.84 % Wconcreto. Este comportamiento indica una fuerte penetración de cloruros en el concreto de la viga perimetral y un riesgo severo de corrosión activa en la armadura. La diferencia de magnitud entre S3PC1 y S3PC2 refleja que, aunque ambos puntos están afectados, la condición en la parte inferior (S3PC1) es más crítica, posiblemente asociada a una mayor exposición directa al medio marino o a procesos de humectación más intensos en esa zona de la estructura.

Para el sector 2 los perfiles se presentan en la **Figura 146**. De acuerdo a la gráfica de la **Figura 85** los recubrimientos promedios para las caras laterales corresponden a 61 mm y para las caras superiores de 94 mm, sin embargo, los perfiles de cloruros se proyectan hasta llegar al recubrimiento mínimo permitido por la normativa, como se observa a continuación:

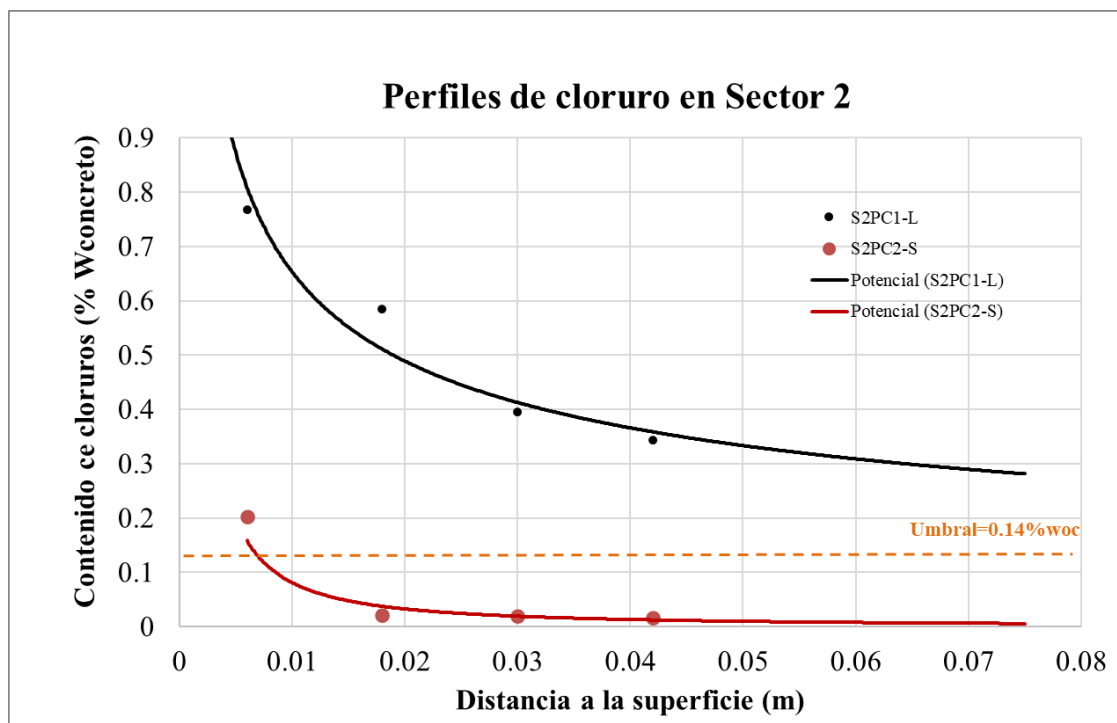


Figura 146. Perfiles de cloruros en el sector 2

En el Sector 2 se tomaron dos perfiles de cloruros en elementos de distinta naturaleza. El punto S2PC1, ubicado en la cara lateral del elemento original que no fue reconstruido y que comparte sistema estructural con el Sector 3 (ver **Figura 147**), muestra concentraciones de cloruros elevadas en superficie (0.77 % woc) y aunque decrecen con la profundidad, permanecen por encima del umbral crítico de corrosión (0.14%woc) hasta los 7.5 cm, lo que evidencia una penetración significativa de agentes agresivos y un riesgo alto de corrosión activa en la armadura. En contraste, el punto S2PC2, ubicado en la cara superior de la zona reconstruida en 2021, presenta concentraciones notablemente bajas y en toda la profundidad (≤ 0.02 % Wconcreto), coherentes con la condición de un concreto nuevo. La comparación entre ambos perfiles confirma la eficacia del proceso de reconstrucción realizado en esta zona, pero al mismo tiempo resalta la vulnerabilidad persistente de los elementos originales.



Figura 147. Toma de muestras en sector 2

Para el sector 1 los perfiles se presentan en la **Figura 148**. De acuerdo a la gráfica de la **Figura 85** los recubrimientos promedios para ambas caras (superiores y laterales) han sido sobrepasados por el avance de cloruros.

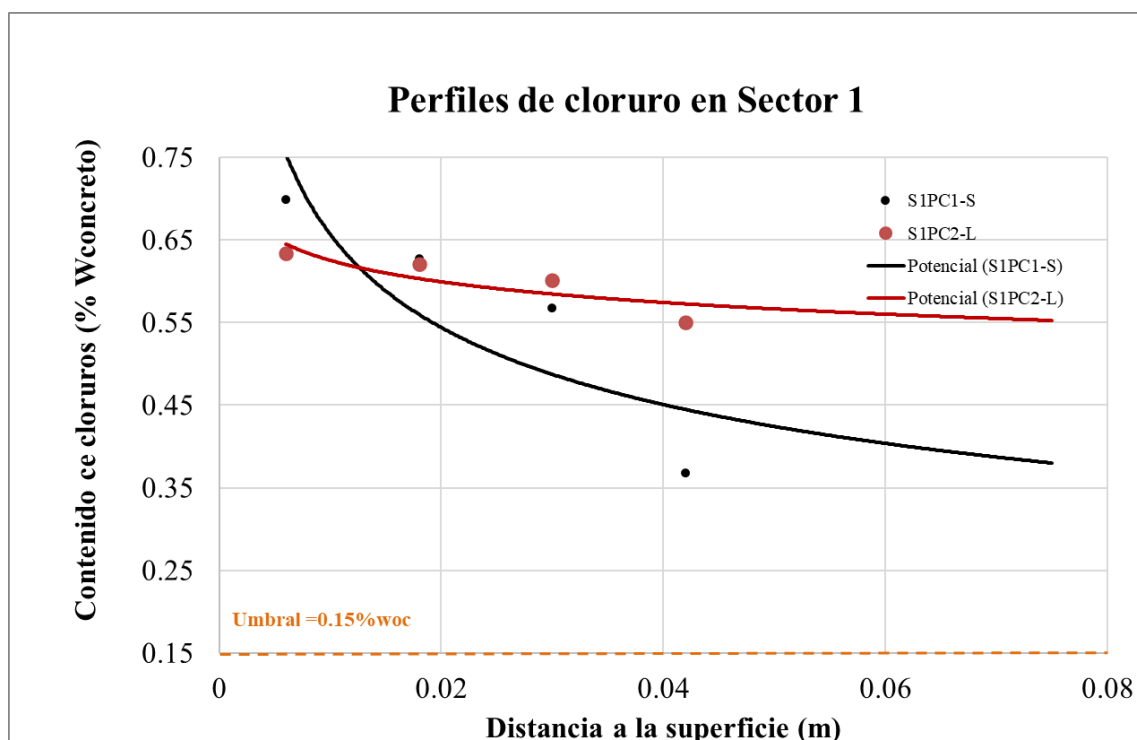


Figura 148. Perfiles de cloruros en el sector 1

En el Sector 1 se realizaron perfiles de cloruros en dos puntos (S1PC1 y S1PC2), ambos extraídos de la cara lateral de la viga perimetral. Los resultados muestran concentraciones superficiales relativamente altas, con valores cercanos a 0.70 % Wconcreto en S1PC1 y 0.64 % Wconcreto en S1PC2, superando en todo momento el umbral crítico de corrosión (0.15%woc) del acero de refuerzo. En profundidad, S1PC1 presenta una reducción más marcada, alcanzando valores de 0.35 % a 4 cm, mientras que S1PC2 se mantiene más constante en el rango de 0.55–0.63 %, lo que indica que, aunque ambos perfiles reflejan un grado importante de penetración de cloruros, el riesgo en S1PC2 es aún más crítico debido a su uniformidad en niveles altos a lo largo de toda la sección. En conjunto, el comportamiento observado confirma que la viga perimetral del Sector 1 se encuentra comprometida por el ingreso de cloruros, con alta probabilidad de corrosión activa en la armadura.

A continuación, En la **Tabla 29** se presenta los coeficientes de difusión (ver **Figura 149**) y contenido de cloruros en la superficie (ver **Figura 150**).

Tabla 29. Coeficientes de difusión y concentración en la superficie

| REFERENCIA | COEFICIENTES DE DIFUSIÓN (cm ² /segundos) | C _s |
|------------|--|----------------|
| S7PC1-S | 3.2E-09 | 1.436 |
| S7PC2-S | 1.9E-08 | 0.757 |
| S6PC1-S | 5.3E-09 | 1.794 |

| | | |
|----------|---------|-------|
| S6PC2-S | 7.5E-09 | 1.639 |
| S6PC3-S | 2.1E-09 | 1.000 |
| S6PC4-L | 2.8E-08 | 0.958 |
| S6PC5-L | 3.2E-08 | 0.915 |
| S6PC6-L | 1.3E-09 | 1.768 |
| S6PC7-L | 2.0E-09 | 1.542 |
| S6PC8-S | 1.8E-09 | 1.652 |
| S6PC9-L | 2.4E-08 | 0.986 |
| S6PC10-S | 3.0E-08 | 1.029 |
| S6PC11-L | 1.1E-07 | 0.705 |
| S6PC12-S | 1.7E+04 | 0.384 |
| S5PC1-S | 3.5E-05 | 0.051 |
| S5PC2-L | 5.1E-07 | 0.405 |
| S4PC1-L | 1.2E-08 | 1.271 |
| S4PC2-L | 6.0E-07 | 0.962 |
| S3PC1-L | 4.7E-09 | 1.722 |
| S3PC2-L | 3.6E-08 | 1.190 |
| S2PC1-L | 7.4E-09 | 0.847 |
| S2PC2-S | 4.8E-09 | 0.381 |
| S1PC1-S | 1.6E-08 | 0.779 |
| S1PC2-L | 1.9E-07 | 0.656 |

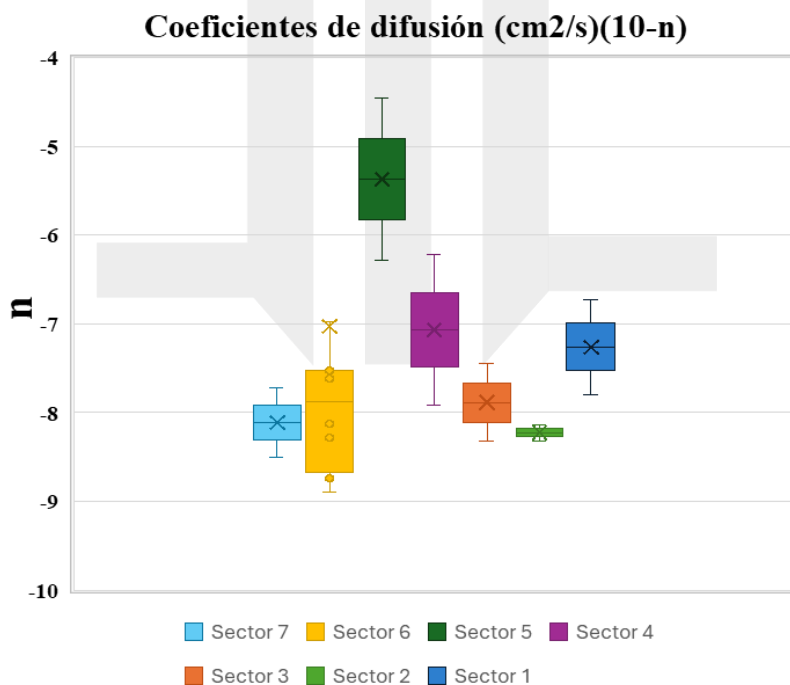


Figura 149. Coeficiente de difusión por sectores

El coeficiente de difusión refleja la capacidad del concreto en cada sector para permitir el paso de los iones cloruro a través de su red porosa; valores más altos indican una mayor facilidad de ingreso, mientras que valores más bajos corresponden a concretos más compactos y resistentes al transporte. Un valor típico para los coeficientes de concretos modernos son los exponentes de -9. En este sentido, se observa que el Sector 5 presenta los coeficientes más elevados, lo que evidencia un material con mayor facilidad de difusión. Por el contrario, los Sectores 1, 2, 3, 4, 6 y 7 muestran valores más bajos y relativamente cercanos entre sí, lo que sugiere concretos de comportamiento más denso o con menor capacidad de transporte de cloruros, aunque con diferencias de dispersión entre muestras.

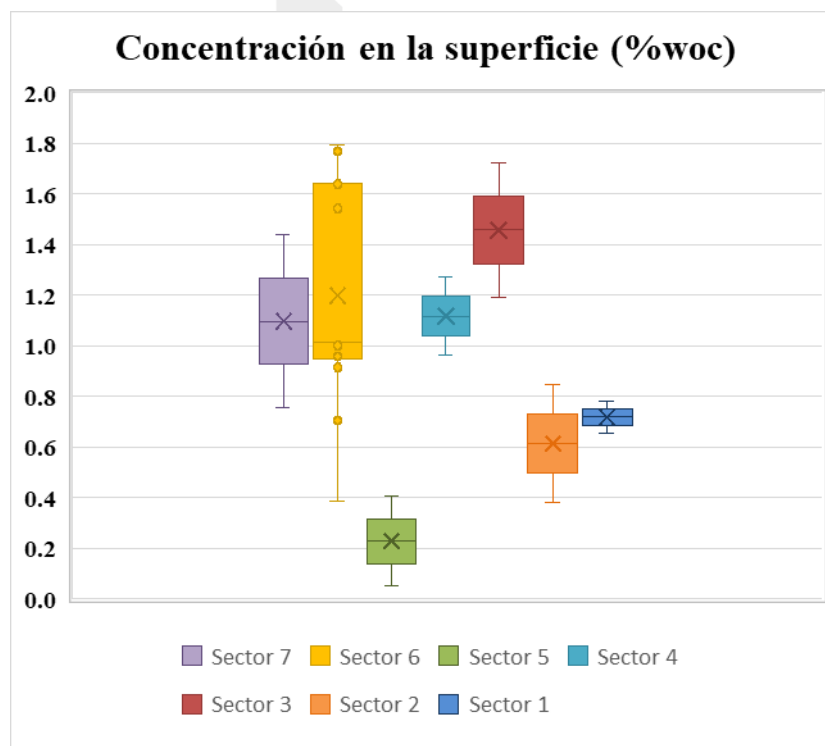


Figura 150. Concentración de coluros en la superficie

En cuanto a la concentración en la superficie (C_s), que representa la cantidad de cloruros acumulada en la capa más expuesta y constituye la condición de frontera del proceso de ingreso, también se distinguen tendencias claras por sector. El Sector 6 muestra los valores más altos y dispersos, indicando una superficie sometida a mayor acumulación. Le siguen los Sectores 3, 4 y 7, con concentraciones elevadas, pero más consistentes. En cambio, los Sectores 1 y 2 presentan valores intermedios, mientras que el Sector 5 evidencia las concentraciones más bajas, lo que refleja menor exposición en superficie.

En conjunto, los coeficientes de difusión y la concentración superficial permiten establecer un comportamiento diferenciado por sectores: el Sector 5 se caracteriza por baja concentración superficial pero alta difusión, mientras que el Sector 6 combina alta concentración superficial con valores de difusión variables; los Sectores 3, 4 y 7 presentan condiciones de superficie elevadas y difusión moderada, y los Sectores 1 y 2 mantienen un comportamiento intermedio.

14.4 CONTENIDO DE SULFATOS

El concreto frecuentemente se expone a contacto con agua o suelos que contienen sulfatos, especialmente estructuras enterradas y/o expuestas a ambientes marinos. Los sulfatos pueden penetrar y reaccionar con los componentes del cemento causando reacciones químicas con el hidróxido de calcio en la matriz del concreto o con los aluminatos presentes en el cemento, que desencadenan expansiones y agrietamiento en el concreto. Una patología común de ataque por sulfatos es la exposición del agregado en el concreto debido a la disolución de la pasta en el concreto, esto se pudo evidenciar en varias zonas (Ver **Imagen 293**) y se pudo verificar en los ensayos de petrografía del concreto que se muestran en la siguiente sección, donde se evidenció presencia de sulfatos en las muestras evaluadas en los sectores S6, S5, S3, S2, S1.

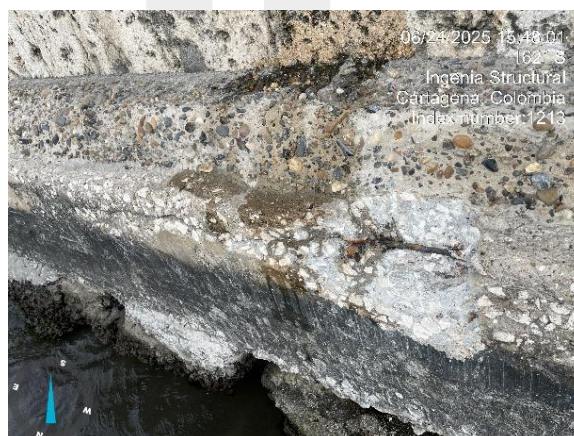


Imagen 293. Concreto afectado por sulfatos

Se quiere verificar el contenido de sulfatos en muestras de concreto endurecido para evaluar si existe una fuente externa de sulfatos que pueda afectar potencialmente la estructura en términos de durabilidad. Las pruebas se llevaron a cabo en muestras de polvo de concreto pulverizado a partir de núcleos segmentados y siguiendo los lineamientos de la norma NTC 184, expresándose el resultado como el porcentaje de SO_4 en masa de concreto. Normalmente se recomienda un límite de 3.0-3.5% para el porcentaje (%) de SO_3 ($SO_4 \times 0.833$) por peso de cemento de acuerdo con lo establecido en la ASTM C150. En cuando a concretos contaminados con sulfatos se han reportados valores de hasta 5-6% por masa de cemento como contenido total de sulfatos que puede contener el concreto a base de cemento Portland.

En la **Tabla 30** se reportan los valores de contenido de sulfatos (expresado en % por peso de concreto) obtenidos para cada una de las muestras evaluadas, por sector y por tramo o módulo donde fue extraída. Para una densidad del concreto promedio de 2246 kg/m³, obtenida a partir de los ensayos de laboratorio a segmentos de núcleos extraídos de los diferentes elementos estructurales y un valor teórico de 600 Kg/m³ del contenido de cemento en el concreto (obtenido de análisis químico – NTC 3726), se obtiene un porcentaje de sulfatos límite por peso de concreto de 0.67% (aproximadamente la concentración inicial de sulfatos en el concreto en este estudio). En la **Figura 151** a **Figura 157** se muestra los resultados de perfil de sulfatos evaluados a distancias de 0.6 cm, 1.8 cm, 3.0 cm y 4.2 cm respectivamente desde la cara del concreto, indicando una leve variación en el contenido de sulfatos con la distancia desde la superficie para todos los núcleos evaluados en la estructura. Se indica con

una línea roja punteada el porcentaje límite para todos los casos, indicando que se ha sobrepasado el contenido de sulfatos permisible para todos los perfiles reportados.

Tabla 30. Resultados de contenidos de sulfatos agrupados por perfil

| Sector | Nomenclatura | Distancia (cm) | Sulfatos SO ₄ (%) | Sulfatos SO ₃ (%) |
|--------|--------------|----------------|------------------------------|------------------------------|
| 7 | S7PS1 | 0.6 | 1.15 | 0.95795 |
| | | 1.8 | 1.16 | 0.96628 |
| | | 3 | 0.44 | 0.36652 |
| | | 4.2 | 0.56 | 0.46648 |
| 6 | S6PS1 | 0.6 | 3.11 | 2.59063 |
| | | 1.8 | 1.58 | 1.31614 |
| | | 3 | 1.27 | 1.05791 |
| | | 4.2 | 1.51 | 1.25783 |
| 5 | S5PS1 | 0.6 | 1.62 | 1.34946 |
| | | 1.8 | 1.94 | 1.61602 |
| | | 3 | 1.12 | 0.93296 |
| | | 4.2 | 1.49 | 1.24117 |
| 4 | S4PS1 | 0.6 | 1.38 | 1.14954 |
| | | 1.8 | 1.23 | 1.02459 |
| | | 3 | 1.95 | 1.62435 |
| | | 4.2 | 1.86 | 1.54938 |
| 3 | S3PS1 | 0.6 | 1.87 | 1.55771 |
| | | 1.8 | 1.47 | 1.22451 |
| | | 3 | 1.57 | 1.30781 |
| | | 4.2 | 1.45 | 1.20785 |
| 1 | S1PS1 | 0.6 | 4.29 | 3.57357 |
| | | 1.8 | 3.93 | 3.27369 |
| | | 3 | 3.35 | 2.79055 |
| | | 4.2 | 0.3 | 0.2499 |

Para el sector 7 se presenta el perfil en la **Figura 151**.

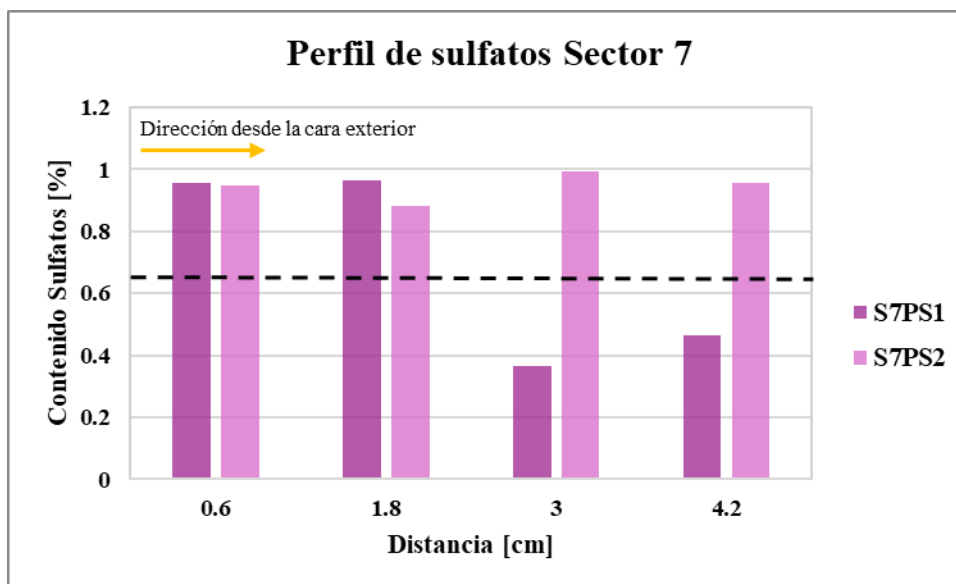


Figura 151. Perfil de sulfatos en sector 7

Para el sector 6 se presenta el perfil en la **Figura 152.**

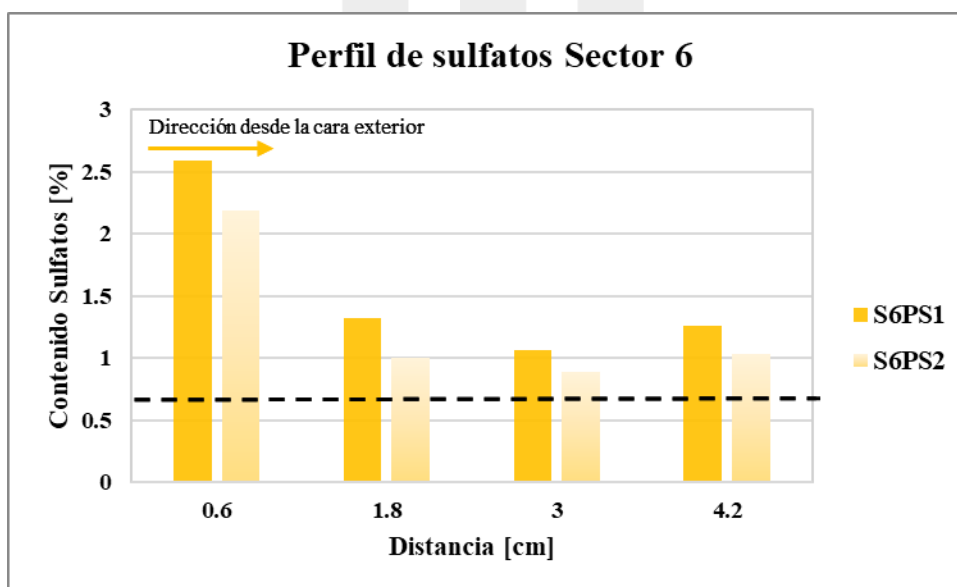


Figura 152. Perfil de sulfatos en sector 6

Para el sector 5 se presenta el perfil en la **Figura 153.**

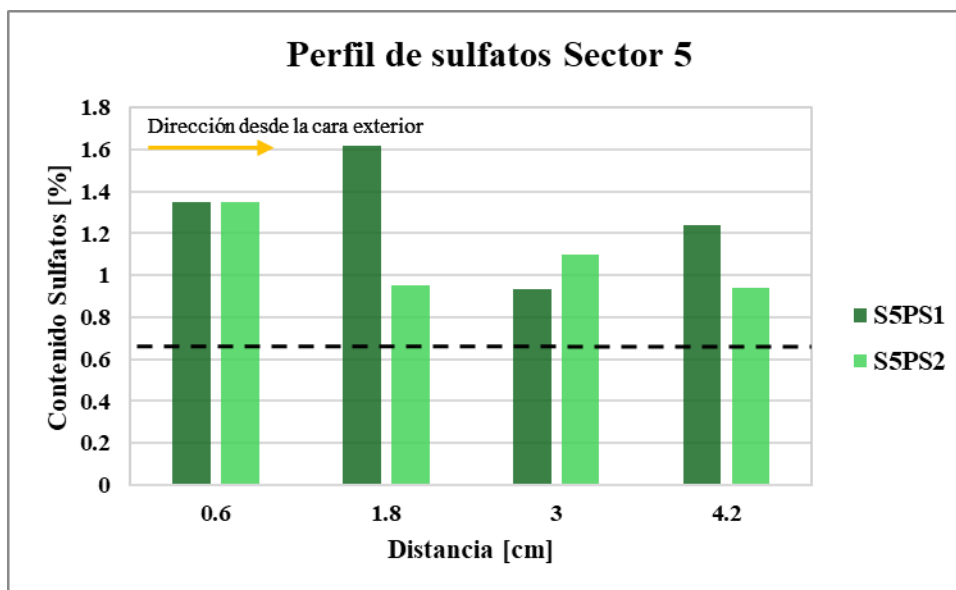


Figura 153. Perfil de sulfatos en sector 5

Para el sector 4 se presenta el perfil en la **Figura 154**.

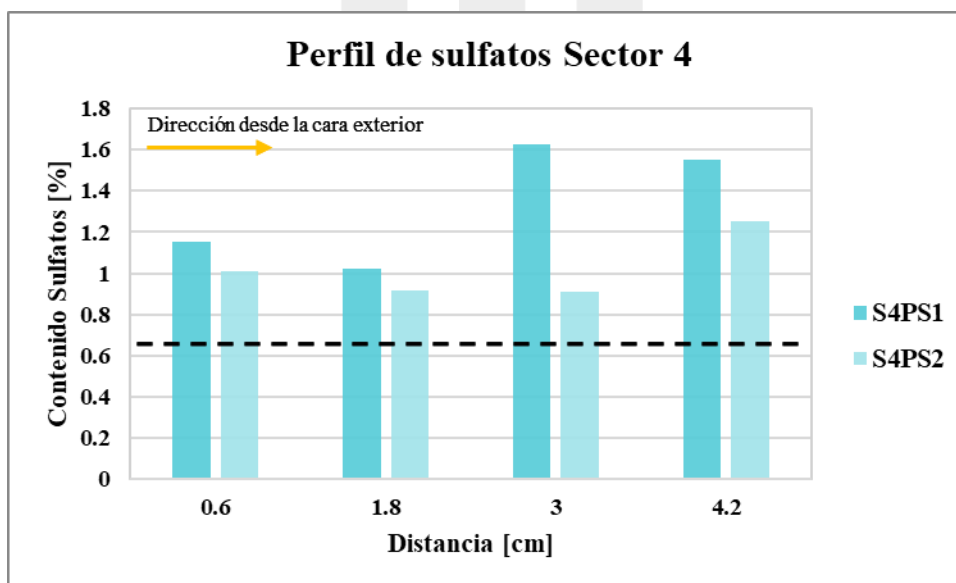


Figura 154. Perfil de sulfatos en sector 4

Para el sector 3 se presenta el perfil en la **Figura 155**.

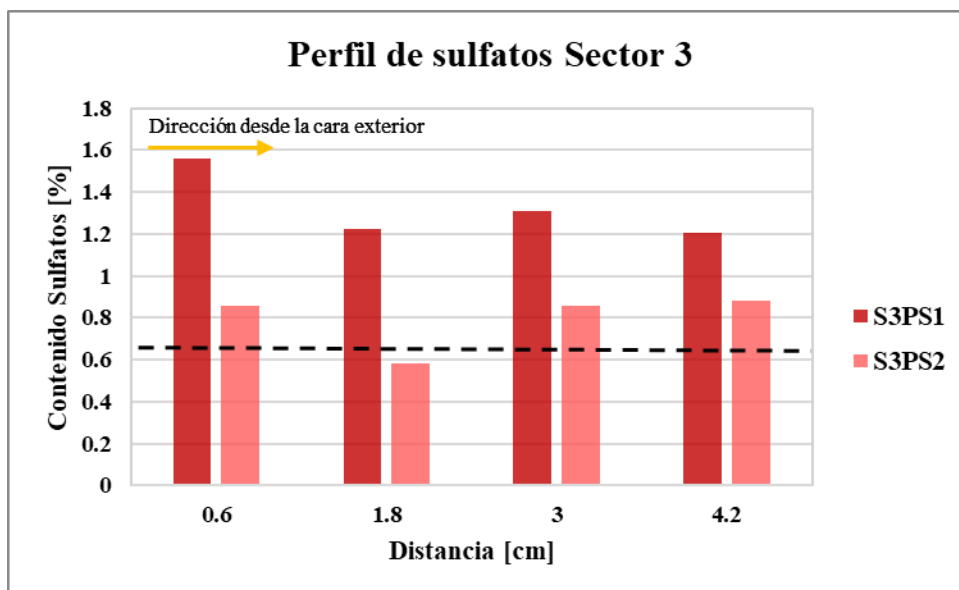


Figura 155. Perfil de sulfatos en sector 3

Para el sector 2 se presenta el perfil en la **Figura 156**.

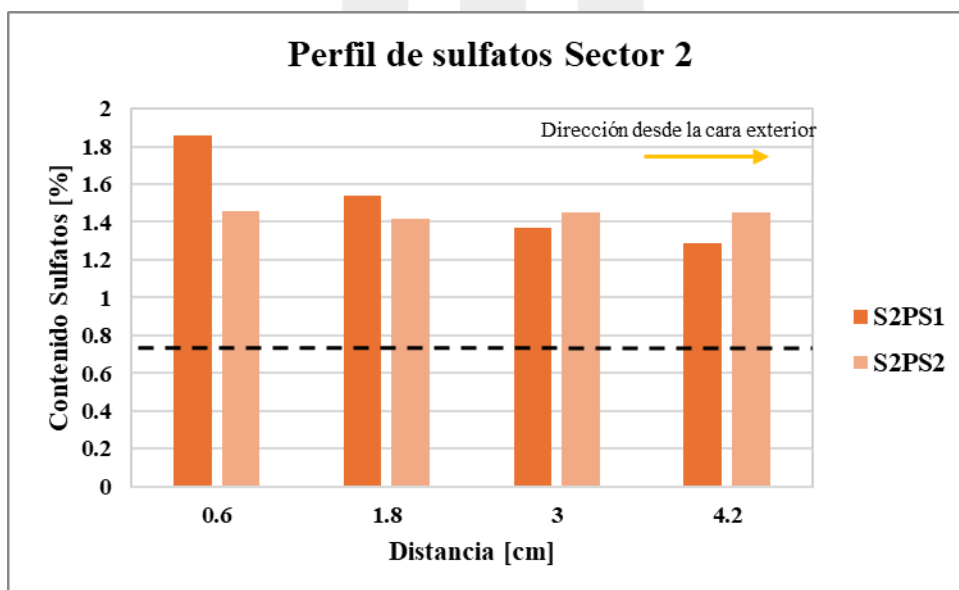


Figura 156. Perfil de sulfatos en sector 2

Para el sector 1 se presenta el perfil en la **Figura 156**.

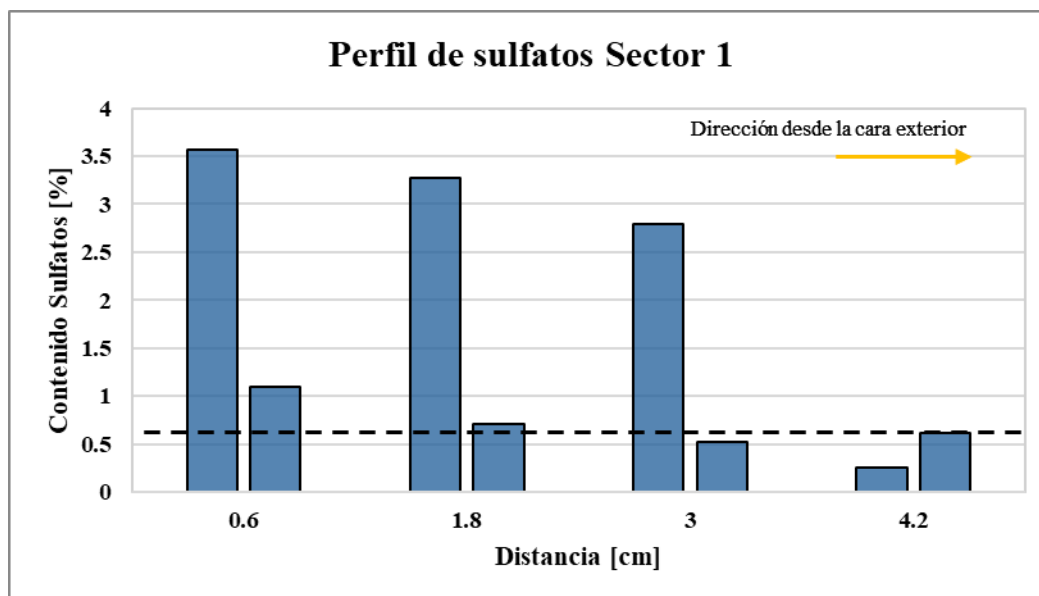


Figura 157. Perfil de sulfatos en sector 1

A partir de los resultados del contenido de sulfato en las muestras evaluadas, expresados como % SO₄ por peso de concreto, y considerando un 3% por peso de cemento como valor reportado en las normativas para el contenido de sulfatos en el concreto. Se encontró que dado el contenido de cemento de 600 kg/m³ y una densidad del concreto de 2246 kg/m³, el valor límite establecido equivale a 0.67% por masa de concreto (sulfatos atribuidos al cemento en la mezcla). Sin embargo, el 94.6% de los datos superan el contenido límite, evidenciando un comportamiento típico en los datos de contenido de sulfatos en cementos, por lo cual son evidencia suficiente de contaminación en la masa de concreto causada por el medio en todos los sectores.

14.5 PETROGRAFÍA

El estudio petrográfico se llevó a cabo con MICROMATCO S.A.S. Las muestras se cortaron longitudinalmente en dos mitades y una de las superficies resultantes de cada corte se pulió generando el respectivo bloque semipulido (B1-140125, B2-140225, B3-140325, B4-140425, B5-140525, B6-140625, B7-140725, B8-140825, B9-140925, B10-141025, B11-141125 y B12-141225) los cuales se examinaron utilizando un estereomicroscopio, mientras que la otra mitad se impregnó con una resina epóxica de color azul, con el propósito de aumentar su cohesión, luego se cortó en pequeños bloques rectangulares de los cuales se extrajo de la parte más superior de cada muestra una tableta que es sometida a varios procesos, para obtener finalmente las secciones delgadas (140125, 140225, 140325, 140425, 140525, 140625, 140725, 140825, 140925, 141025, 141125 y 141225) las cuales se examinaron utilizando un microscopio de luz polarizada para estudiar la mineralogía y la microestructura de las muestras. Las pruebas se realizaron en los siguientes núcleos extraídos:

- ND74
- ND62
- ND67
- ND69
- ND615
- ND623

- ND625
- ND52
- ND44
- ND34
- ND24
- ND13

A continuación, se presentan cada una de las muestras a analizar:

Para el sector 7 las muestras se detallan en **Imagen 294**.

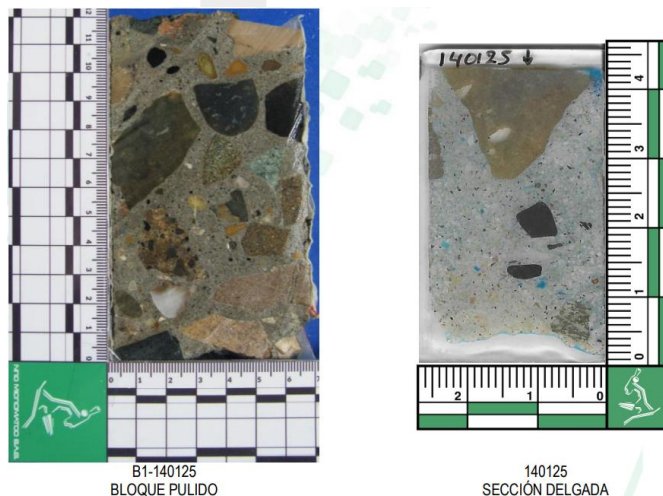


Imagen 294. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND74

Para el sector 6 las muestras se detallan de la **Imagen 295** a la **Imagen 300**.

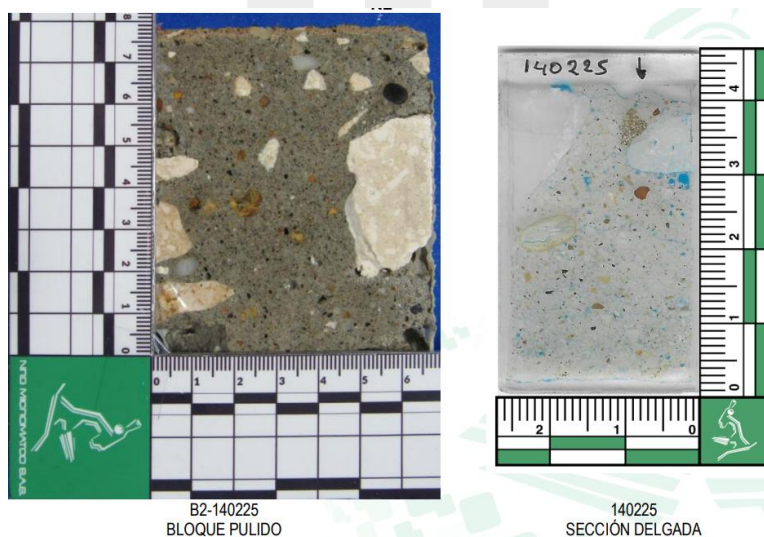


Imagen 295. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND62

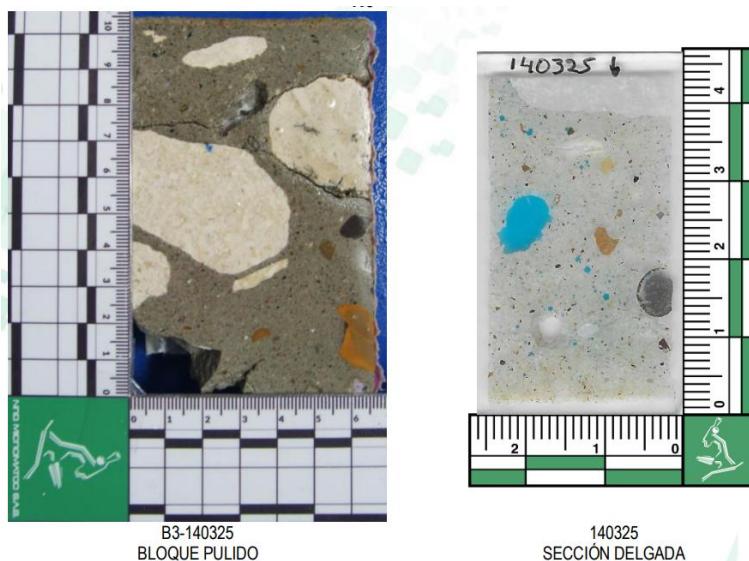


Imagen 296. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND67

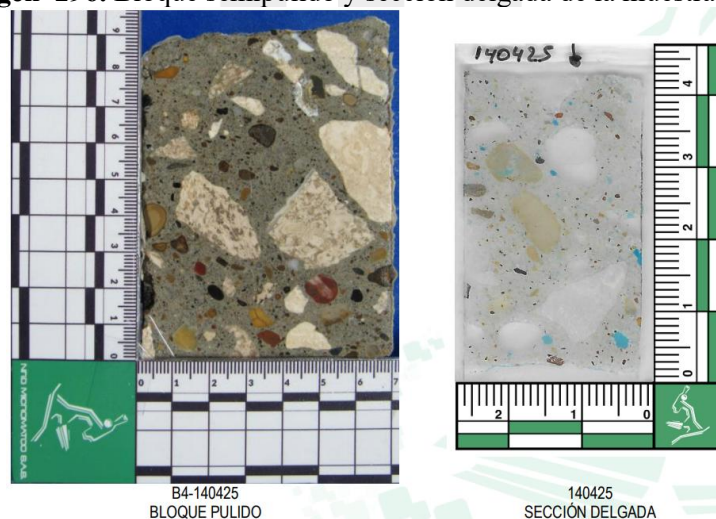


Imagen 297. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND69

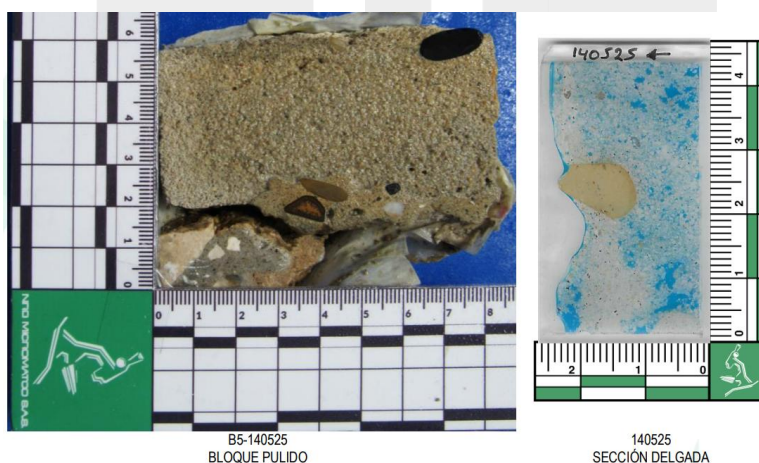


Imagen 298. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND615

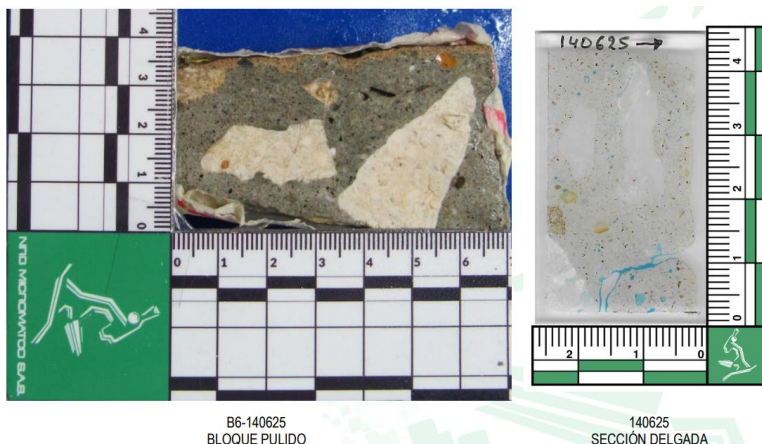


Imagen 299. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND623

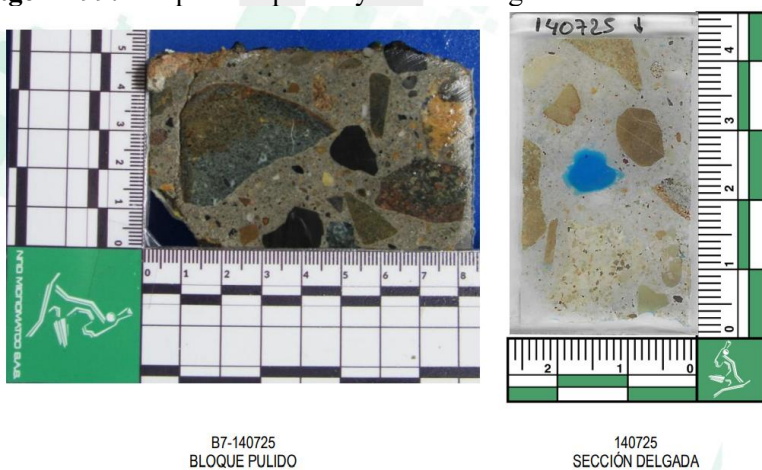


Imagen 300. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND625

Para el sector 5 las muestras se detallan en la **Imagen 301**.

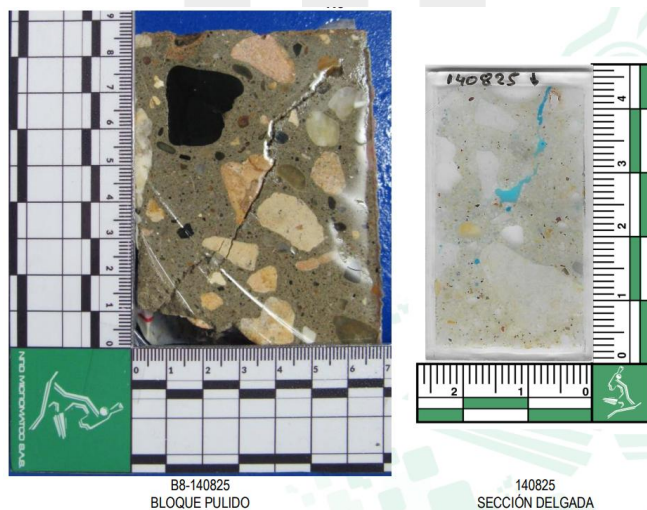


Imagen 301. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND52

Para el sector 4 las muestras se detallan en la **Imagen 302**.

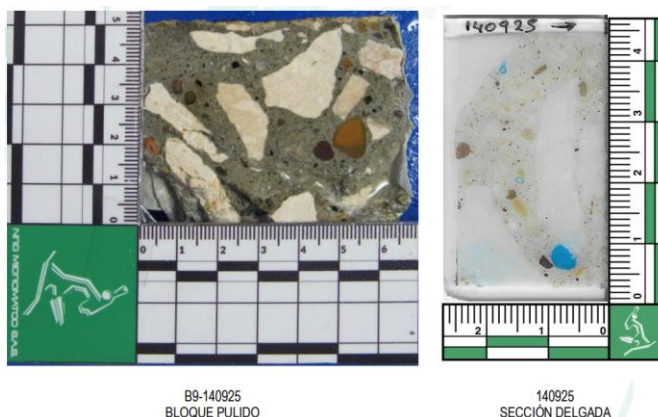


Imagen 302. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND44

Para el sector 3 las muestras se detallan en la **Imagen 303.**

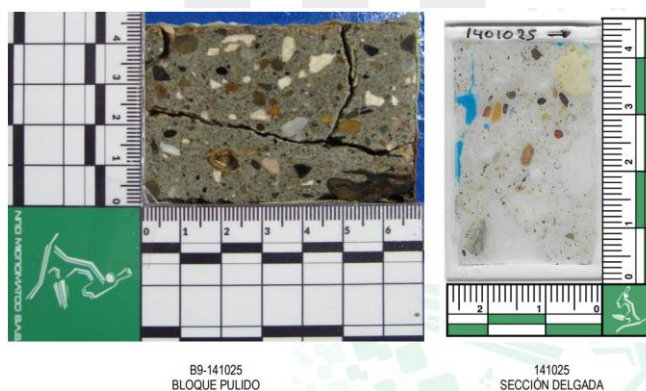


Imagen 303. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND34

Para el sector 2 las muestras se detallan en la **Imagen 305.**

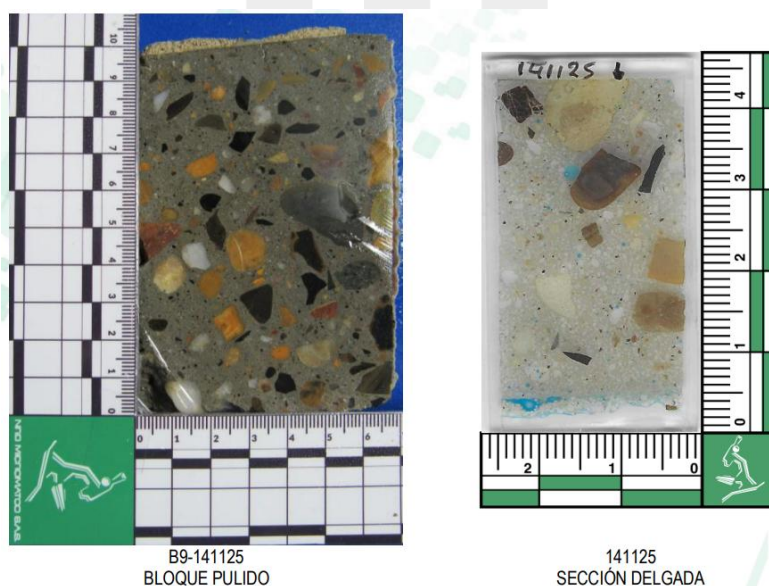


Imagen 304. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND24

Para el sector 1 las muestras se detallan en la **Imagen 305**.



Imagen 305. Bloque semipulido y sección delgada de la muestra ND13

Con base a las muestras analizadas, se lograron identificar los principales constituyentes en cada uno de los núcleos, como se aprecia en la **Figura 158** extraída del informe de micromatco.

| | Volumen de constituyentes principales resultado del conteo de los bloques semipulidos | | | | | | |
|--------------------------|---|----------------------|---------------------|--------------|------------|-------------|-----------|
| | MUESTRA | AGREGADO GRUESO* (%) | AGREGADO FINO** (%) | PASTA*** (%) | VACÍOS (%) | GRIETAS (%) | OTROS (%) |
| | TOTAL (%) | | | | | | |
| BLOQUE SEMIPULIDO | ND74 | 52.0 | 24.3 | 21.6 | 1.4 | 0.7 | 0.0 |
| | ND62 | 18.5 | 46.5 | 31.2 | 1.9 | 1.9 | 0.0 |
| | ND67 | 52.5 | 22.7 | 21.3 | 0.7 | 2.8 | 0.0 |
| | ND69 | 26.2 | 34.9 | 34.9 | 3.2 | 0.8 | 0.0 |
| | ND615 | - | - | - | - | - | - |
| | ND623 | 40.2 | 27.2 | 29.3 | 1.1 | 2.2 | 0.0 |
| | ND625 | 42.4 | 23.2 | 32.0 | 2.4 | 0.0 | 0.0 |
| | ND52 | 39.1 | 28.6 | 29.3 | 1.5 | 1.5 | 0.0 |
| | ND44 | 41.7 | 16.7 | 36.1 | 3.7 | 1.9 | 0.0 |
| | ND34 | 5.8 | 45.3 | 40.7 | 0.0 | 8.1 | 0.0 |
| | ND24 | 23.8 | 38.1 | 36.2 | 1.9 | 0.0 | 0.0 |
| | ND13 | 61.1 | 14.3 | 23.8 | 0.8 | 0.0 | 0.0 |
| | | | | | | | |
| SECCIÓN DELGADA | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

* Agregado grueso (partículas con tamaños que equivalen a retenido en el tamiz No 4)
 ** Agregado fino (partículas con tamaños que equivalen a pasa tamiz No 4 hasta No 100)
 *** Pasta cementante y agregado muy fino (partículas con tamaños que equivalen a pasa tamiz No 100)

| Volumen de constituyentes principales resultado del conteo de las secciones delgadas | | | | | | |
|--|----------------|--------------|------------|-----------------------------------|---------------|-----------|
| MUESTRA | AGREGADOS* (%) | PASTA ** (%) | VACÍOS (%) | MICROPOROSIDAD / MICROGRIETAS (%) | ADICIONES (%) | TOTAL (%) |
| ND74 | 59.6 | 34.6 | 1.3 | 4.5 | 0.0 | 100.0 |
| ND62 | 67.0 | 23.3 | 6.8 | 2.8 | 0.0 | 100.0 |
| ND67 | 62.1 | 36.1 | 1.5 | 0.3 | 0.0 | 100.0 |
| ND69 | 59.6 | 37.7 | 1.4 | 1.4 | 0.0 | 100.0 |
| ND615 | 60.6 | 26.8 | 6.3 | 6.3 | 0.0 | 100.0 |
| ND623 | 57.4 | 38.5 | 0.0 | 4.1 | 0.0 | 100.0 |
| ND625 | 69.7 | 27.7 | 1.3 | 1.3 | 0.0 | 100.0 |
| ND52 | 61.4 | 36.7 | 1.3 | 0.6 | 0.0 | 100.0 |
| ND44 | 53.4 | 42.0 | 3.4 | 1.1 | 0.0 | 100.0 |
| ND34 | 60.1 | 35.7 | 2.8 | 1.4 | 0.0 | 100.0 |
| ND24 | 42.6 | 47.5 | 8.5 | 1.4 | 0.0 | 100.0 |
| ND13 | 66.7 | 31.3 | 1.4 | 0.7 | 0.0 | 100.0 |

* Agregado grueso, fino y muy fino
 ** Pasta cementante

Figura 158. Volúmenes y características de los principales constituyentes en el concreto

En términos generales, las muestras analizadas en todos los sectores corresponden a un concreto duro y compacto, sin presencia de elementos embebidos. Sin embargo, se destaca el caso de la muestra ND615, la cual no corresponde a concreto estructural sino a un mortero utilizado en posibles

reparaciones de la viga perimetral (en la zona que se presenta en la **Figura 159**). Este mortero presenta características de dureza intermedia, lo que indica un material de menor desempeño en comparación con el concreto original.



Figura 159. Zona intervenida con mortero en sector 6

Por su parte, en todas las muestras de los 7 sectores no se observan segregaciones en el concreto. En las muestras ND62, ND67 y ND26 se observa una alta proporción de agregados tamaño arena en relación con la grava. Se identificó que en las muestras del sector 6 acumulaciones significativas de óxidos de hierro, hallazgo que sugiere la existencia de acero de refuerzo en un estado muy avanzado de corrosión, con pérdida considerable de material metálico, evento confirmado con las auscultaciones e inspecciones visuales reportadas en capítulos anteriores.

El análisis de agregados de las muestras evidenció que, en general, el concreto corresponde a una mezcla de grava triturada y arenas naturales con formas subangulares a redondeadas. En términos de gradación, las muestras ND74, ND69, ND625, ND52, ND44, ND34, ND24 y ND13 presentaron una buena distribución con tamaños máximos entre $1\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ ", mientras que en las muestras ND62, ND67 y ND623 se observó una mala gradación, con tamaños máximos entre $1\frac{1}{2}$ " y 1. En cuanto a la distribución, la mayoría de las muestras mostraron un arreglo uniforme de partículas, excepto las ya mencionadas (ND62, ND67 y ND623) donde predominó material fino tipo arena. En lo referente al contacto pasta-agregado, los áridos se encontraron en su mayoría bien adheridos a la pasta cementante. La composición de los agregados estuvo dominada por calizas, basaltos y cherts, además de cuarzo y plagioclasa; sin embargo, en varias muestras (ND62, ND67, ND69 y ND623) se identificaron productos de la reacción álcali-sílice (RAS), asociados a expansiones internas. Adicionalmente, se reportó contaminación puntual con material vegetal en la muestra ND74 y concretos visiblemente porosos en ND67 y ND623, lo que incrementa la vulnerabilidad a la penetración de agentes agresivos.

El análisis de vacíos (ver **Tabla 31**) en las muestras de concreto indica contenidos menores al 9% de aire, con variaciones entre secciones del mismo material. En particular, las muestras ND74, ND69, ND52, ND44, ND34, ND24 y ND13 presentan porcentajes bajos de vacíos, inferiores al 2%, mientras que en ND62, ND67 y ND615 se registraron valores más altos, alcanzando hasta 6,8% en secciones delgadas. En cuanto al tamaño, predominan vacíos menores de 1,2 mm, aunque en ND615 se observaron concentraciones que tienden a unirse formando figuras tipo "8". La forma de los vacíos es esférica a subesférica, con distribución general en toda la matriz de concreto. Cabe resaltar que

algunos vacíos se encuentran parcial o totalmente rellenos por productos secundarios, como cristales de ettringita y geles asociados a la reacción álcali-sílice (RAS), especialmente en ND62, ND67, ND69 y ND615. Finalmente, la presencia de microporos y capilares varió entre 0,6% y 3,8%, siendo más significativa en ND74 y ND615, lo que refleja mayor vulnerabilidad a la penetración de agentes agresivos.

Tabla 31. Porcentaje de vacíos

| MUESTRA | CONTENIDO DE VACÍOS (%) | |
|---------|-------------------------|-----------------|
| | Bloque semipulido | Sección delgada |
| ND74 | 1,4 | 1,3 |
| ND62 | 1,9 | 6,8 |
| ND67 | 0,7 | 1,5 |
| ND69 | 3,2 | 1,4 |
| ND615 | - | 6,3 |
| ND623 | 1,1 | 0,0 |
| ND625 | 2,4 | 1,3 |
| ND52 | 1,5 | 1,3 |
| ND44 | 3,7 | 3,4 |
| ND34 | 0,0 | 2,8 |
| ND24 | 1,9 | 8,5 |
| ND13 | 0,8 | 1,4 |

Se analizaron las grietas y microgrietas en cada una de las muestras y los reportes se sintetizan en la **Tabla 32**.

Tabla 32. Descripción de grietas y microgrietas en los especímenes

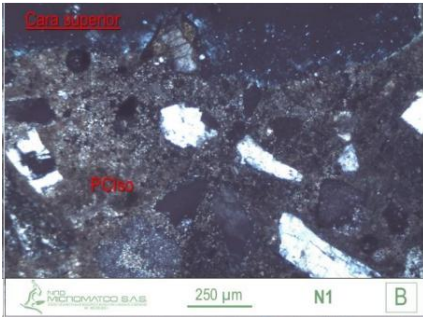
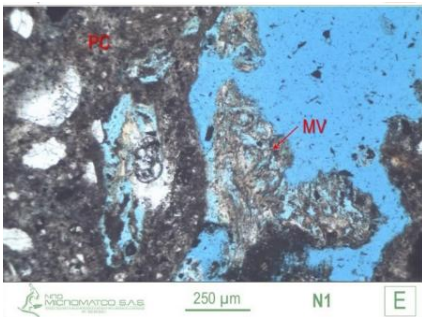
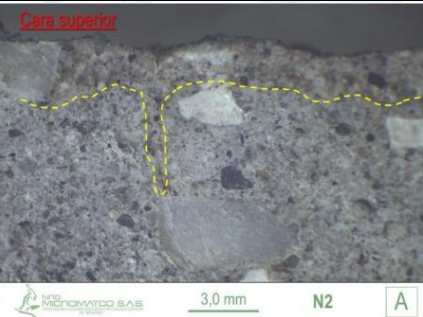
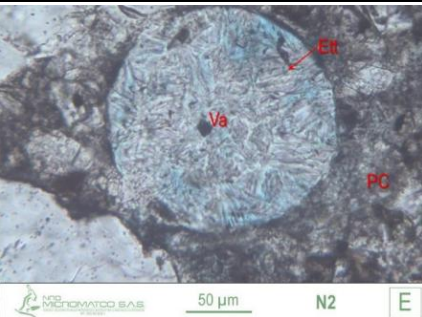

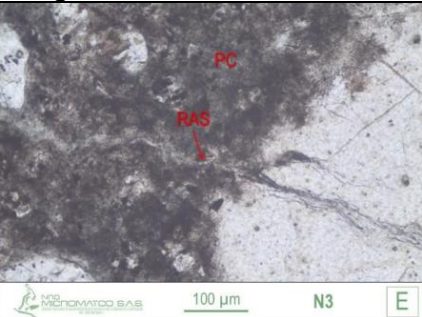

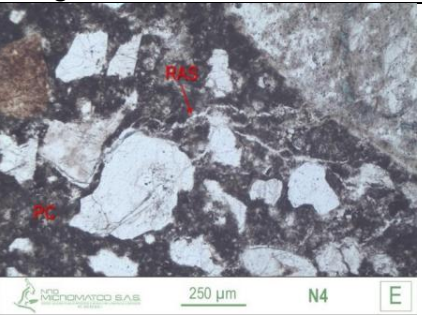
| Sector | Muestra | Descripción |
|--------|---------|---|
| 7 | ND74 | Se observó presencia de grietas y microgrietas en un 1,4% del bloque semipulido y 0,6% en sección delgada, con distribución aleatoria atravesando la pasta cementante y la interfaz pasta-agregado. |
| 6 | ND62 | Se observó presencia de grietas y microgrietas en un 1,9% del bloque semipulido y 2,3% en sección delgada, con orientación pseudo-hexagonal. Presentaron depósitos secundarios birrefringentes y cristales de ettringita en algunas microgrietas. |
| | ND67 | Se registraron grietas y microgrietas en un 0,7% del bloque semipulido y 0,3% en sección delgada, atravesando pasta cementante, interfaz pasta-agregado, vacíos y agregados. |
| | ND69 | Se evidenció presencia de grietas y microgrietas en un 3,2% del bloque semipulido y 1,4% en sección delgada, con orientación pseudo-hexagonal. Presentaron depósitos birrefringentes y cristales de ettringita. |
| | ND615 | No se observó presencia de grietas ni microgrietas. |
| | ND623 | Se observó presencia de grietas y microgrietas en un 1,1% del bloque semipulido y 4,1% en sección delgada, atravesando pasta cementante, interfaz pasta-agregado y vacíos. Presentaron orientación pseudo-hexagonal y depósitos birrefringentes, además de cristales de ettringita. |
| | ND625 | Se registró presencia de grietas y microgrietas en un 1,3% del bloque semipulido y 2,4% en sección delgada, con orientación pseudo-hexagonal. Se observaron depósitos secundarios birrefringentes y cristales de ettringita en varias microgrietas. |

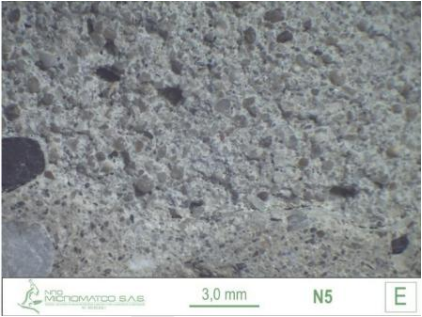
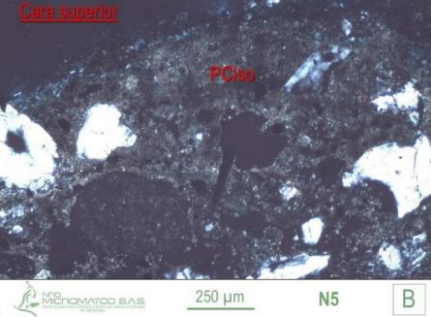

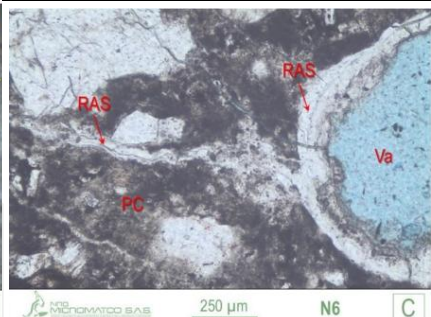

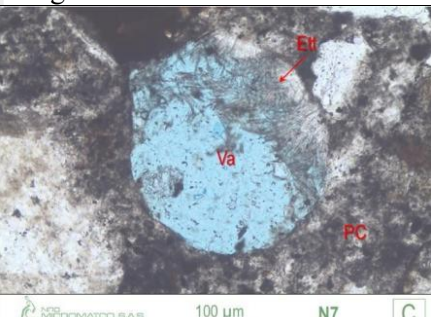
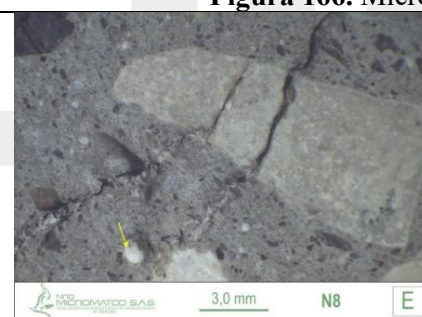
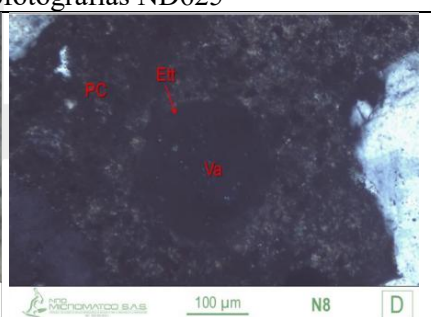
| | | |
|---|------|---|
| 5 | ND52 | Se registró presencia de grietas y microgrietas en un 1,5% del bloque semipulido y 0,6% en sección delgada, atravesando pasta cementante e interfaz pasta-agregado. Se observó presencia de cristales de ettringita en la mayoría de las microgrietas. |
| 4 | ND44 | Se observó presencia de grietas y microgrietas en un 3,7% del bloque semipulido y 1,5% en sección delgada, atravesando pasta cementante, interfaz pasta-agregado y vacíos. Se identificó formación de cristales de ettringita en la mayoría de las microgrietas. |
| 3 | ND34 | Se evidenció presencia de grietas y microgrietas en un 1,4% del bloque semipulido y 1,4% en sección delgada, con distribución en la pasta cementante y en la interfaz pasta-agregado. Se observó orientación pseudo-hexagonal en varias microgrietas y depósitos secundarios birrefringentes. |
| 2 | ND24 | Se observó presencia de grietas y microgrietas en un 1,9% del bloque semipulido y 0,7% en sección delgada, atravesando la pasta cementante, la interfaz pasta-agregado y vacíos. En la mayoría de las microgrietas se registró formación de cristales de ettringita. |
| 1 | ND13 | Se observó presencia de grietas y microgrietas en un 0,8% del bloque semipulido y 0,7% en sección delgada, atravesando la pasta cementante, la interfaz pasta-agregado, vacíos y algunos agregados. En la mayoría de las microgrietas se identificó presencia de cristales de ettringita. |


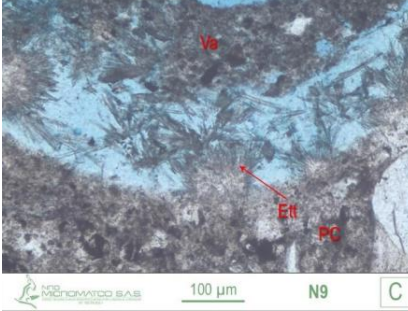
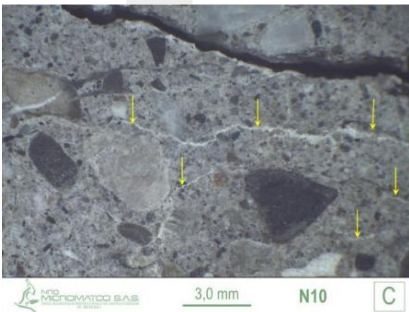
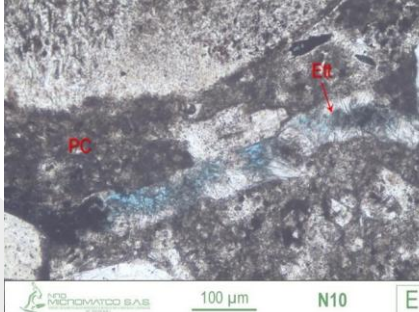

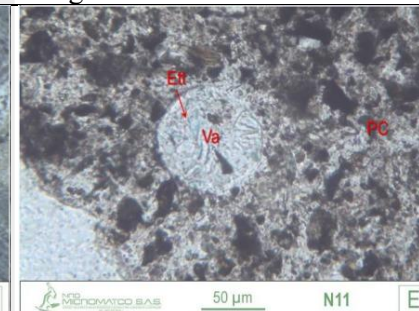

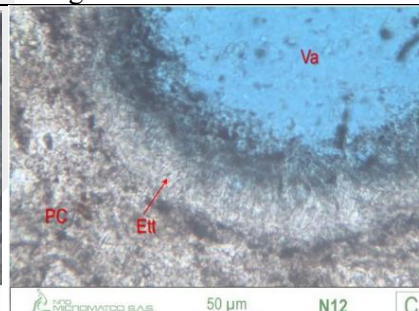
El análisis de la pasta cementante (ver **Tabla 33**) de las muestras permite identificar dos zonas macroscópicas: una superior más clara, de color gris, que alcanza profundidades variables según la muestra (entre 0,5 mm y 4 mm), y otra interna más oscura, de color gris a marrón. A nivel microscópico, la pasta presenta tonalidades desde marrón rojizo hasta marrón claro, con un lustre opaco en todos los núcleos. En general, la dureza se clasifica como moderadamente dura. El fenómeno de carbonatación se encuentra presente en la mayoría de las muestras, con profundidades que varían entre 0,5 mm y 4 mm, lo que confirma el ingreso de agentes externos al núcleo del concreto. En cuanto a la composición, se observan minerales de cemento hidratado dominados por alita y belita, con menores proporciones de clinker residual, además de fases secundarias como gel de tobermorita y portlandita, cuya concentración se detecta en sectores en la interfaz agregado-pasta y en los bordes de vacíos. En la muestra ND24 se observó además la presencia particular de portlandita cristalina en forma de “gel”. En varias muestras (ND62, ND67, ND69 y ND625) se identificaron reacciones deletéreas con presencia de gel cristalino de interferencia de primer orden (gris a blanco) y segundo orden, localizado en grietas, en la interfaz pasta-agregado y dentro de los vacíos. Dicho gel presenta fracturas debidas a retracción por ciclos de humedecimiento y secado, con apariencia viscosa y extrusión en “lenguas”. Por último, se constató la presencia de sulfatos, principalmente en forma de cristales de ettringita en vacíos y microgrietas, con disposición perpendicular a las paredes. Estos cristales se observaron de manera recurrente en varias muestras, como ND615, ND623, ND52, ND34 y ND24, lo que evidencia un entorno químico agresivo que favorece procesos expansivos internos, comprometiendo la durabilidad del concreto. A continuación, se presentan algunas fotos analizadas. (Para más información, referirse a **ANEXOS**)

Tabla 33. Reporte de microfotografías por sector y muestra

| Sector | Muestra | Descripción |
|--------|---------|-------------|
|--------|---------|-------------|

| | | |
|---|------|--|
| 7 | ND74 |   <p>Figura 160. Microfotografías ND74</p> |
| 6 | ND62 |   <p>Figura 161. Microfotografías ND62</p> |
| | ND67 |   <p>Figura 162. Microfotografías ND67</p> |
| | ND69 |   <p>Figura 163. Microfotografías ND69</p> |

| | | |
|---|-------|--|
| 5 | ND615 |   <p>Figura 164. Microfotografías ND615</p> |
| | ND623 |   <p>Figura 165. Microfotografías ND623</p> |
| | ND625 |   <p>Figura 166. Microfotografías ND625</p> |
| | ND52 |   <p>Figura 167. Microfotografías ND52</p> |

| | | |
|---|------|--|
| 4 | ND44 |   <p>Figura 168. Microfotografías ND44</p> |
| 3 | ND34 |   <p>Figura 169. Microfotografías ND34</p> |
| 2 | ND24 |   <p>Figura 170. Microfotografías ND24</p> |
| 1 | ND13 |   <p>Figura 171. Microfotografías ND13</p> |

15 TIEMPO DE INICIACIÓN, PROPAGACIÓN Y VIDA ÚTIL

Para proyectar la vida útil residual de la estructura se tuvieron en cuenta los lineamientos del ACI 365-1R, empleando el concepto básico del pronóstico de la durabilidad por corrosión del acero de refuerzo el cual se considera como un proceso de deterioro en dos etapas como se ilustra en la **Figura 172**. La primera, llamada etapa de iniciación de la corrosión (ti), que es el periodo durante el cual la concentración de los cloruros en el concreto en contacto con el acero aumenta hasta que la concentración finalmente llega al valor límite o umbral de cloruros, CU. En ese momento, si se dan

las condiciones propicias, se pierde pasivación del refuerzo y la corrosión comienza de forma activa, iniciando la etapa de propagación. En esta etapa, y debido a la pérdida de sección del acero, los productos de la corrosión del acero se acumulan y finalmente causan la formación de delaminaciones, quebraduras o grietas que emergen en la superficie externa del concreto requiriendo una intervención de mantenimiento y/o reparación-rehabilitación. Esta etapa usualmente se considera como el tiempo de nivel de daños aceptable en términos de agrietamientos y pérdida de sección del acero de refuerzo.

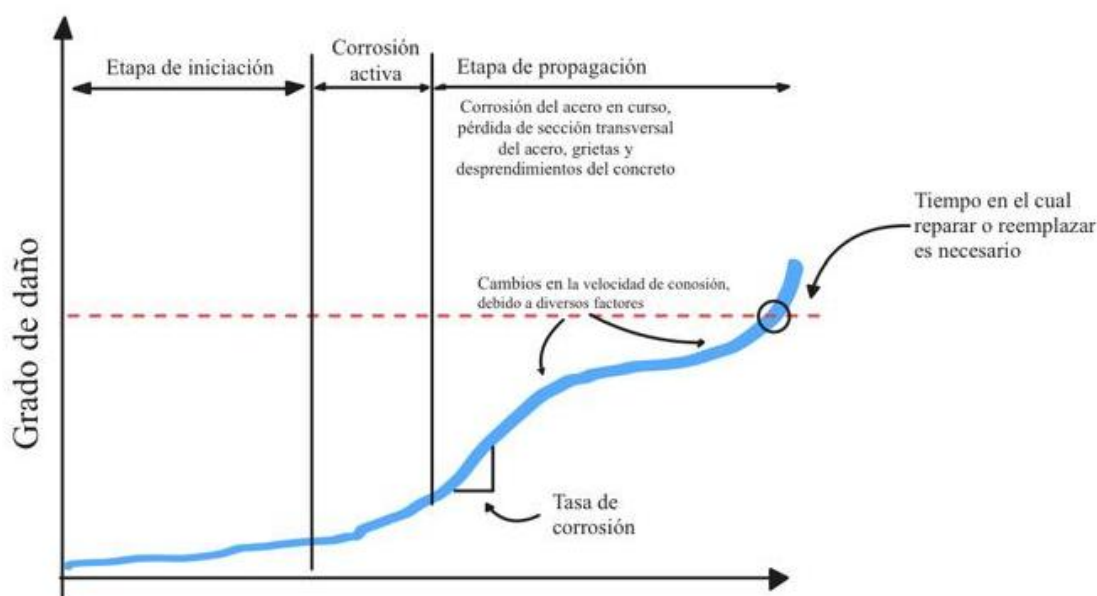


Figura 172. Representación esquemática de la vida de servicio de una estructura de concreto reforzado

En el pronóstico de la durabilidad para cálculo de vida residual de los diferentes elementos de la estructura perimetral del centro de convenciones se tuvo en cuenta lo siguiente:

- El mecanismo de ingreso de los cloruros en la estructura es principalmente por el mecanismo de difusión. Matemáticamente se tomaron los parámetros de durabilidad calculados en la etapa de ensayos de cloruros para cada uno de los casos considerados, y se resolvió la ecuación de difusión de Fick, calculando el tiempo necesario para que la concentración de cloruros en la superficie del acero (ubicada a un espesor de recubrimiento establecido) llegue al valor umbral conocido como CU o umbral de cloruros. El resultado es el valor t_{ci} , el tiempo de iniciación de la corrosión.
- La duración del período de propagación (t_p) depende de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo o rata de corrosión y está limitado por un criterio de vida útil que establece el grado inaceptable de daño, antes de que la estructura deba ser reparado o reemplazado. La tasa de acumulación de óxidos o tasa de expansión del acero puede estimarse a partir de la velocidad de corrosión de las barras de acero y poder determinar así el tiempo en que ocurre el agrietamiento, la delaminación o el desprendimiento en el concreto. Sin embargo, la tasa de corrosión no es constante, varía con el tiempo y muchos otros factores; por ende, se hace muy difícil calcular la acumulación total de óxido. Para el caso de acero de refuerzo convencional la duración de la etapa de propagación es típicamente corta comparada con el

tiempo de iniciación. Un valor $t_p = 5-10$ años se ha reportado en estructuras en ambiente marino con concentraciones de cloruros igual o superior a las reportadas para los elementos estructurales del túnel, por lo que se considera representativa de la propagación de la corrosión en este tipo de estructuras y se empleara aquí para el pronóstico de vida útil residual de la estructura

Es importante mencionar que las proyecciones basadas en estos parámetros de durabilidad son aproximaciones y sus resultados deben ser interpretados como tal, debido a la variabilidad en la cantidad de humedad y oxígeno que también son parte de la reacción de corrosión. Zonas de la estructura donde ya se ha sobrepasado el umbral de cloruros para el inicio de la corrosión son críticas, pero no necesariamente reproducen lo que sucede en toda la estructura. Se considera que las proyecciones reproducen condiciones que suceden en el área de muestreo seleccionada en la patología, que, si bien son representativas del comportamiento en las zonas evaluadas, no son específicas de toda la estructura delineante de los diferentes sectores.

Entonces la vida de servicio residual se establece aquí como el tiempo en el cual la estructura alcanza un límite inaceptable (tiempo de intervención por daños por corrosión), aquí definido como $t_{cl} + t_p$ (donde t_p corresponde al tiempo de propagación, que para este caso se asumirá de 5 años como lo utiliza LIFE 365). Durante este período, la reparación de la estructura usualmente se inicia o se toman medidas de reparación o intervención, entonces el término residual es aplicado cuando ninguna acción inmediata se toma para mejorar la condición de la estructura, la cual empezará a deteriorarse progresivamente a una tasa de corrosión dada, que en ambiente marino es alta.

Teniendo en cuenta los resultados de cloruros estimados en la sección **14.3** a continuación, en la **Tabla 34** se presenta la vida útil residual por elementos ensayados.

Tabla 34. Estimaciones de tiempo de vida útil residual por muestras

| Sector | Referencia | | Resultado obtenido | Tiempo de iniciación | T propagación | T vida útil | Tresidual | Tr= Vida residual |
|--------|------------|---------|--------------------|----------------------|---------------|-------------|-----------|--------------------|
| 7 | ND7 2 | S7PC1-S | Supera el umbral | 21.0 | 6 | 27.0 | -18.0 | Agotada |
| | ND7 5 | S7PC2-S | Supera el umbral | 4.8 | 6 | 10.8 | -34.2 | Agotada |
| 6 | ND6 1 | S6PC1-S | Supera el umbral | 14.2 | 6 | 20.2 | -24.8 | Agotada |
| | ND6 4 | S6PC2-S | Supera el umbral | 10.5 | 6 | 16.5 | -28.5 | Agotada |
| | ND6 5 | S6PC3-S | Supera el umbral | No sigue ley | - | - | - | Agotada |
| | ND6 11 | S6PC4-L | Supera el umbral | 3.9 | 6 | 9.9 | -35.1 | Agotada |
| | ND6 12 | S6PC5-L | Supera el umbral | 3.4 | 6 | 9.4 | -35.6 | Agotada |
| | ND6 16 | S6PC6-L | Supera el umbral | 40.0 | 6 | 46.0 | 1.0 | Agotada |
| | ND6 17 | S6PC7-L | Supera el umbral | 39.8 | 6 | 45.8 | 0.8 | Agotada |
| | ND6 19 | S6PC8-S | Supera el umbral | 42.3 | 6 | 48.3 | 3.3 | 3.3 años restantes |

| | | | | | | | | |
|---|-----------|--------------|---------------------|-------------------|---|------|-------|---------|
| | ND6 20 | S6PC9- L | Supera el umbral | 4.4 | 6 | 10.4 | -34.6 | Agotada |
| | ND6 21 | S6PC10 -S | Supera el umbral | 3.4 | 6 | 9.4 | -35.6 | Agotada |
| | ND6 22 | S6PC11 -L | Supera el umbral | 1.3 | 6 | 7.3 | -37.8 | Agotada |
| | ND6 24 | S6PC12 -S | Supera el umbral | No sigue ley | - | - | - | - |
| 5 | ND5 1 | S5PC1- S | No supera umbral | No sigue ley | - | - | - | - |
| | ND5 5 | S5PC2- L | Supera el umbral | 0.6 | 6 | 6.6 | -38.4 | Agotada |
| 4 | ND4 1 | S4PC1- L | Supera el umbral | 9.1 | 6 | 15.1 | -29.9 | Agotada |
| | ND4 3 | S4PC2- L | Supera el umbral | 10.0 | 6 | 16.0 | -29.0 | Agotada |
| 3 | ND3 1 | S3PC1- L | Supera el umbral | 18.3 | 6 | 24.3 | -20.7 | Agotada |
| | ND3 5 | S3PC2- L | Supera el umbral | 18.1 | 6 | 24.1 | -20.9 | Agotada |
| 2 | ND2 1 | S2PC1- L | Supera el umbral | 18.1 | 6 | 24.1 | -20.9 | Agotada |
| | ND2 5 | S2PC2- S | No supera umbral | Concreto reciente | - | - | - | - |
| 1 | ND1 2 | S1PC1- S | Supera el umbral | 9.4 | 6 | 15.4 | -29.6 | Agotada |
| | ND1 4 | S1PC2- L | Supera el umbral | 0.9 | 6 | 6.9 | -38.1 | Agotada |

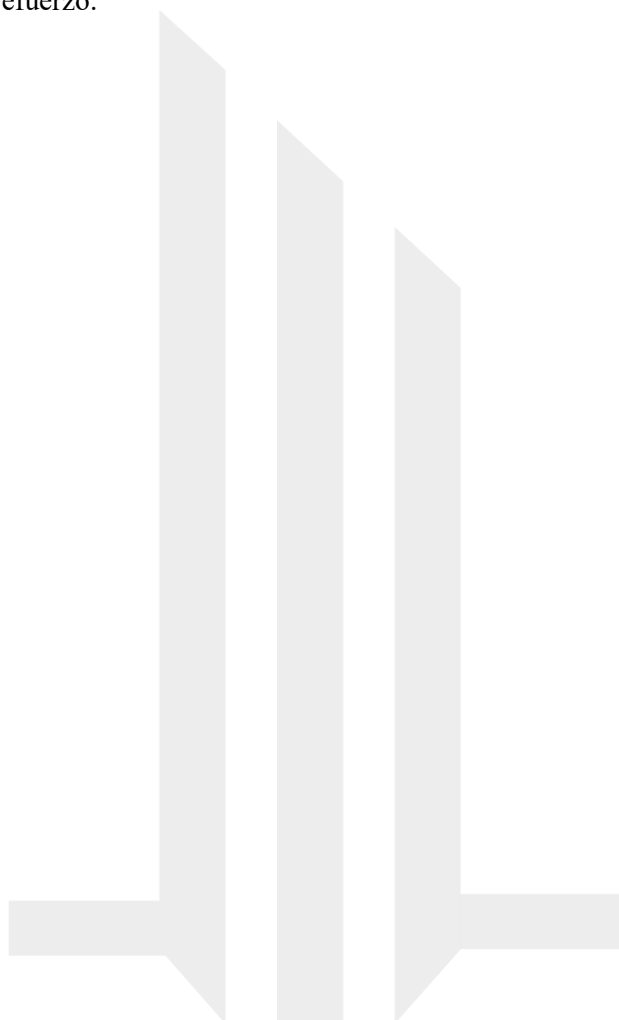
*Tp = elegido del life 365, tiempo estándar utilizado para modelaciones de vida útil.

El análisis de los perfiles de cloruros evidencia que en la mayoría de los sectores los contenidos obtenidos superan de manera significativa los umbrales teóricos establecidos para el inicio de la corrosión. Bajo estas condiciones, no solo puede afirmarse que la vida útil de servicio (etapa de iniciación) se encuentra agotada, sino que, en coherencia con la magnitud de los resultados y las evidencias de campo, también se considera que la etapa de propagación ha sido superada. Esto se evidencia con los tiempos negativos en el reporte de Tresidual como se observa en la **Tabla 34**.

Las inspecciones visuales, las auscultaciones y los ensayos de potenciales de corrosión corroboran esta condición, puesto que en numerosos puntos se observaron fisuras, desprendimientos y exposición del acero de refuerzo con claros signos de corrosión avanzada, incluso con pérdida de sección. Esta combinación de resultados indica que el deterioro ya se encuentra en una fase crítica, donde los procesos de corrosión han progresado hasta comprometer la capacidad resistente de la viga perimetral.

En consecuencia, no es posible hablar de una vida residual de los elementos evaluados, dado que tanto la fase de iniciación como la fase de propagación han finalizado. En términos prácticos, la viga perimetral presenta un grado de deterioro que ha comprometido su vida útil en los sectores inspeccionados, lo que implica la necesidad de acciones de intervención inmediata, encaminadas tanto a la recuperación de la capacidad estructural, como de sus condiciones de seguridad y durabilidad.

En el caso de los núcleos S5PC1-S y S2PC2-S, no fue posible establecer una proyección de vida útil residual. Para el núcleo S5PC1-S, la concentración de cloruros no presentó el comportamiento esperado según la ley de Fick, lo que impide estimar un modelo confiable de durabilidad. Por su parte, el núcleo S2PC2-S corresponde a un vaciado de concreto nuevo, con apenas tres años y bajas concentraciones de cloruros hasta la fecha, lo que hace prematuro proyectar su vida útil. En este sector, el concreto se encuentra en buen estado, aunque se recomienda realizar evaluaciones periódicas cada diez años para verificar el avance de los procesos de penetración de cloruros y la condición del acero de refuerzo.



16 DIAGNÓSTICO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN SECTOR 2

En el sector 2 de la estructura perimetral del Centro de Convenciones se instaló en 2022 un sistema de tablestacado metálico como medida de reemplazo del muro colapsado (ver **Imagen 306**). Este sistema fue protegido con un recubrimiento epóxico de alto espesor (Sigmashield 880) y complementado con un esquema de protección catódica por ánodos de sacrificio de aleación de aluminio (Galvotec III). El diagnóstico técnico realizado sobre dicho tramo (metros 87 a 127) evidencia que, si bien la aplicación inicial del recubrimiento se ejecutó conforme a especificaciones y con valores satisfactorios de espesor, adherencia y reparación de discontinuidades, el proceso de hincado produjo daños inevitables. En particular, la abrasión por contacto con el suelo y el acople entre láminas generaron rayones y micro fisuras, reduciendo la efectividad del recubrimiento en servicio. La zona de “splash” o franja intermareal se identificó como la más crítica, pues en ella la protección catódica no logra compensar eficazmente los defectos y la durabilidad depende casi por completo de la integridad del recubrimiento.



Imagen 306. Tablestacado instalado en sector 2-a fecha 2025

En cuanto a la protección catódica, el sistema se diseñó con la instalación de 13 ánodos (10 en el lado mar -estos se aprecian en la **Figura 173** y en la **Imagen 308**- y 3 en el lado tierra evidenciados en la **Imagen 307**), sin embargo, los cálculos normativos (NACE/AMPP, DNV, ISO) demuestran que la masa anódica instalada, de aproximadamente 130 kg, solo corresponde a un 26 % de lo requerido para garantizar una vida útil de 10 años. Esto significa que, en lugar de la protección prevista, la vida real del sistema no supera los 2 a 3 años. Las inspecciones realizadas en 2024 confirmaron esta proyección: los ánodos del lado mar ya se encuentran prácticamente consumidos (revisar **Imagen 308**), dejando zonas críticas del tablestacado sin protección efectiva frente a la corrosión. La situación es aún más desfavorable en el lado tierra, donde únicamente se instalaron 3 ánodos sin backfill adecuado.

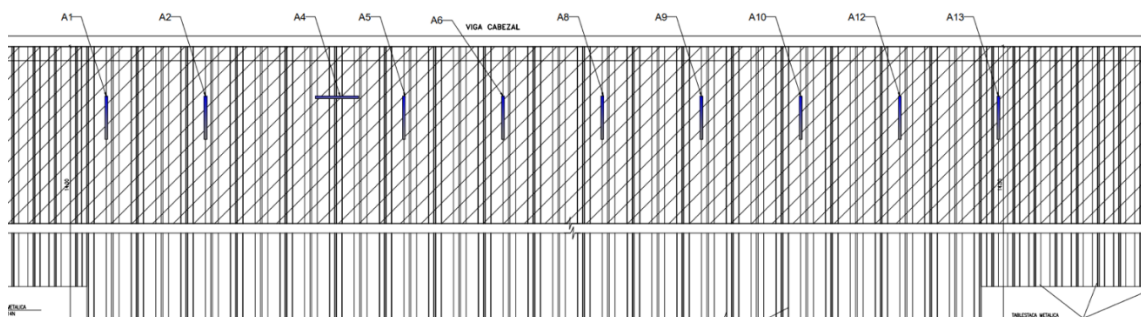


Figura 173. Esquemas de ánodos en lado mar

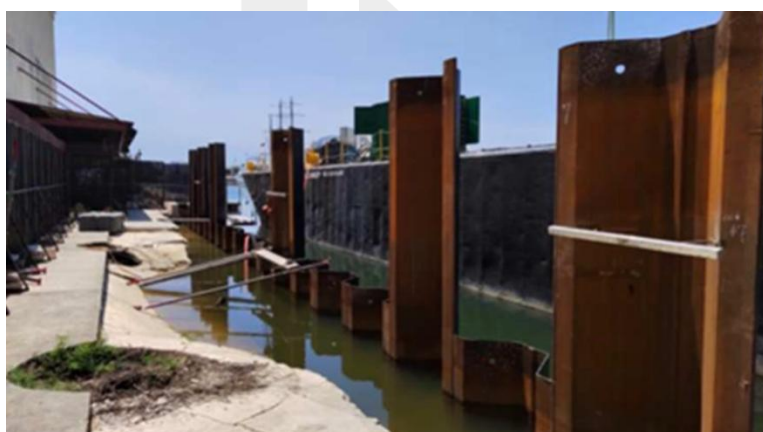


Imagen 307. Instalación de ánodos en lado tierra



Imagen 308. Estado de ánodos instalados a fecha de 2024

Otro aspecto crítico identificado es la instrumentación de monitoreo. El electrodo permanente instalado corresponde a un modelo diseñado para operar en agua de mar (Ag/AgCl seawater), pero fue dispuesto en zonas de relleno granular. En estas condiciones, su desempeño es inadecuado y genera lecturas inestables, lo cual compromete la verificación de criterios de protección en el lado tierra. Para una operación confiable, el sistema requiere electrodos de referencia apropiados para

suelo (Ag/AgCl-soil o Cu/CuSO₄), además de puntos de medida que permitan validar en campo el comportamiento de la protección catódica.

En síntesis, el diagnóstico concluye que el sistema de tablestacado del sector 2 presenta deficiencias estructurales en el diseño del esquema de protección catódica, una vida útil real considerablemente menor a la prevista y limitaciones en la confiabilidad del monitoreo. La protección global de la estructura en este tramo no está garantizada a largo plazo, lo que expone al tablestacado a procesos acelerados de corrosión y pérdida de sección. Se recomienda llevar a cabo una ingeniería de detalle integral que contemple alternativas tanto galvánicas como de corriente impresa, reforzadas con modelación computacional de distribución de corriente y la instalación de probetas de corrosión para monitoreo. Igualmente, debe implementarse un plan de inspecciones periódicas, con mediciones de potencial bajo criterios NACE/AMPP y verificaciones de espesores por ultrasonido.

Cabe resaltar que los detalles completos del diagnóstico, incluyendo memorias técnicas, cálculos de demanda de corriente, registros de instalación, observaciones críticas y plan de acción propuesto, se encuentran consignados en el documento técnico original, el cual se adjunta en los **ANEXOS** del presente informe para consulta detallada.

17 RESUMEN

El presente capítulo consolida los resultados obtenidos a lo largo del informe de patología, integrando en tablas resumen los diferentes ensayos y diagnósticos realizados sobre la estructura perimetral del Centro de Convenciones. En esta síntesis se recogen de manera comparativa los hallazgos más relevantes de cada técnica aplicada, tanto en laboratorio como en campo, con el fin de ofrecer una visión integral del estado actual de los materiales y elementos estructurales evaluados en cada uno de los sectores. Este capítulo, en consecuencia, constituye una guía práctica para la toma de decisiones, sustentada en la evidencia técnica recolectada y en el análisis detallado presentado en los capítulos anteriores. Posteriormente, en el documento de recomendaciones y especificaciones se establecen las recomendaciones técnicas derivadas de estos resultados, orientadas a priorizar acciones de intervención, definir estrategias de mantenimiento y/o reemplazo y proponer medidas de seguimiento que aseguren la estabilidad y durabilidad de la estructura.

A continuación, se presentan las tablas resumen de los resultados (ver de la **Tabla 35** a la **Tabla 38**).

Tabla 35. Resumen de ensayos inspección visual, suelos, prueba de integridad y acero de refuerzo encontrado

| Sectores | Ensayos | | | |
|----------|--|--|---------------------------------|---|
| | Inspección visual | Sondeos | Prueba de integridad de pilotes | Resultado de acero y recubrimiento |
| 1 | Presencia de fisuras, desprendimientos y corrosión avanzada del acero. Deterioro generalizado. | Perfil de suelo con rellenos y arenas limosas, nivel freático superficial, suelo tipo D. | NA | Acero expuesto y recubrimientos muy deficientes, con valores promedio entre 2-27 mm |

| | | | | |
|---|---|---|--|---|
| 2 | Tramo nuevo en buen estado, zonas antiguas presentan fisuras y desprendimientos. Contraste constructivo. | NA | NA | Buen recubrimiento en el concreto del sector con tablestacado (82 mm en promedio). En el tramo antiguo, recubrimiento deficiente y acero visible. |
| 3 | Alta porosidad, cavidades y acero expuesto. Crítico por condiciones irregulares y deterioro. | NA. | NA | Presencia de acero corroído, recubrimientos heterogéneos (promedio 47 mm) y pérdida de sección del acero de refuerzo. |
| 4 | Fisuras, desprendimientos y desgaste superficial. Deterioro visible y continuo. | El sondeo evidenció estratos con rellenos y arenas, con materia orgánica intercalada. Suelo tipo D. | Se realizaron 3 pruebas, profundidad de 8.0 a 8.9 m. Pilotes con buena continuidad. | Recubrimientos heterogéneos (promedio 61 mm), acero parcialmente expuesto, condiciones variables por zona. |
| 5 | Grietas profundas, socavaciones y desgaste superficial. Riesgo estructural progresivo. | El sondeo reflejó capas de arena limosa con humedad alta y contenido orgánico. Nivel freático alto. | Se realizó 1 prueba. Profundidad 6.5 m, sin anomalías. | Recubrimientos bajos (4-10 mm). Riesgo medio. |
| 6 | Fisuras extensas, rehabilitaciones no uniformes, biota marina y concreto poroso. Deterioro acumulado severo. | El sondeo indicó suelos heterogéneos, baja capacidad portante en la capa superficial. Suelo tipo D. | 4 pilotes ensayados, profundidades de 5.9 a 6.6 m. Continuidad estructural adecuada. | Acero de refuerzo expuesto, recubrimientos deficientes (promedio 10 mm). |
| 7 | Grietas, delaminaciones con desprendimiento del recubrimiento. Daño visible en los elementos del sistema de contención. | Presencia de rellenos superficiales y arenas densas a profundidad. SPT >20 a 18 m. | 2 pilotes ensayados. Profundidades 5.1 y 5.3 m. Sin defectos relevantes. | Recubrimientos muy deficientes (promedio 9 mm), corrosión generalizada del acero con secciones reducidas. |

NA: No aplica para el sector en cuestión

Tabla 36. Resumen de resultados exploraciones en cimentación, VPU, potencial de corrosión y carbonatación

| Sectores | Ensayos | | | |
|----------|------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------|
| | Exploración de cimentaciones | Velocidad de pulso ultrasónico | Potencial de corrosión | Carbontación |

| | | | | |
|---|----------------|---|---|--|
| 1 | Identificada | VPU <3000 m/s. Concreto de baja calidad. | Potenciales negativos > -350 mV. Alta probabilidad de corrosión activa. | No representan un patrón generalizado. Frente de carbonatación por debajo de los recubrimientos nominales. |
| 2 | NA | Resultados variables. Concreto nuevo >3600 m/s, tramo antiguo <3000 m/s. Calidad heterogénea. | Zona intervenida con baja probabilidad de corrosión. Sector antiguo con potenciales mixtos, riesgo localizado. | No representan un patrón generalizado y se mantienen por debajo de los recubrimientos nominales. |
| 3 | NA | VPU <3000 m/s. Concreto deficiente con zonas debilitadas. | Potenciales negativos > -350 mV. Alta probabilidad de corrosión activa. | Nula o muy reducida |
| 4 | No concluyente | VPU 3100-3600 m/s. Calidad de concreto regular. | Rangos variables, sectores inciertos y probabilidad de corrosión alta con potenciales > -350 mV. | No representan un patrón generalizado y se mantienen por debajo de los recubrimientos nominales. |
| 5 | Identificada | VPU 3000-3300 m/s. Concreto de calidad aceptable pero no homogéneo. | Potenciales negativos > -350 mV. Alta probabilidad de corrosión en viga perimetral y en elementos del sistema de contención 5-6. | Nulas o muy reducidas |
| 6 | Identificada | VPU <3000 m/s. Concreto degradado, requiere reforzamiento. | Potenciales negativos > -350 mV. Alta probabilidad de corrosión en la viga perimetral, en zonas previamente reparadas y en elementos del sistema de contención 5-6. | No representan un patrón generalizado y se mantienen por debajo de los recubrimientos nominales. |
| 7 | Identificada | VPU 2900-3100 m/s. Concreto deficiente, zonas con pérdida de masa. | Potenciales negativos > -350 mV. Alta probabilidad de corrosión activa en la viga perimetral y en elementos del sistema de contención 7. | Nulas o muy reducidas |

Tabla 37. Resúmenes resultados f'_c , contenido de cemento, contenido de cloruros y sulfatos

| Ensayos |
|---------|
|---------|

| Sectores | Resistencia a la compresión | Contenido de cemento* | Contenido de cloruros | Contenido de sulfatos |
|----------|--|-----------------------|---|-----------------------|
| 1 | f _c promedio =27.3 MPa. Por debajo de lo mínimo para exposición C2. | 17.89% | Presencia de cloruros > el umbral máximo. | Espera de resultados |
| 2 | f _c promedio en zona intervenida =50.9 MPa. Cumple con resistencia mínima para exposición C2. | 29.50% | Tramo nuevo sin contaminación relevante. Tramo antiguo con presencia de cloruros > umbral máximo. | Espera de resultados |
| 3 | f _c promedio =23MPa. Por debajo de lo mínimo para exposición C2. | 35.49% | Presencia de cloruros > umbral máximo. | Espera de resultados |
| 4 | f _c promedio =33MPa. Por debajo de lo mínimo para exposición C2. | 42% | Presencia de cloruros > umbral máximo. | Espera de resultados |
| 5 | f _c promedio =27.9 MPa. Por debajo de lo mínimo para exposición C2. | 37.28% | En la viga cabezal hay presencia de cloruros > umbral máximo. En el sistema de contención 5-6, cloruros < umbral máximo. | Espera de resultados |
| 6 | f _c promedio =26.2 MPa. Por debajo de lo mínimo para exposición C2. | 35.53% | En viga cabezal y en zona previamente rehabilitada, presencia de cloruros > umbral máximo. En el sistema de contención 5-6, existe presencia de cloruros < el máximo permitido. | Espera de resultados |
| 7 | f _c promedio =30.6 MPa. Por debajo de lo mínimo para exposición C2. | 37.87% | Presencia de cloruros en el sistema de contención 7 > umbral máximo. | Espera de resultados |

*Contenido de cemento reportado por ensayo químico NTC 3726. Valores reportados aquí exceden valores esperados del contenido de cemento en las muestras. Se atribuyen estos valores a la pulverización del agregado del concreto, principalmente calizo.

Tabla 38. Resumen resultados petrografía, vida útil y recomendaciones

| Ensayos |
|---------|
|---------|

| Sectores | petrografia | Tiempo de Vida util | Recomendaciones |
|----------|--|---|---|
| 1 | Concreto duro y compacto, sin segregación. Carbonatación 2 mm. Se detectan óxidos de hierro asociados a refuerzo corroído. Vacíos <9%, algunos rellenos por etringita. | La viga cabezal sobrepasa la vida útil. | Reforzamiento |
| 2 | Concreto compacto, sin segregación. Carbonatación 0.5 mm. Se identifica portlandita en estado cristalino. Refuerzo con oxidación localizada. Vacíos con microcristales. | Tramo nuevo, tiene corta edad para realizar cálculo de vida útil. Tramo antiguo, superó la vida útil. | Sistema de protección catódica requiere rediseño en tablestacas. Demolición - reconstrucción del tramo antiguo. |
| 3 | Concreto duro, homogéneo. Carbonatación 2 mm. Evidencia de óxidos de hierro por corrosión de refuerzo. Vacíos <9%, algunos con etringita. | La viga cabezal sobrepasa la vida útil. | Construcción de nuevo sistema estructural. |
| 4 | Concreto con buena gradación. Carbonatación 4 mm. Micro fisuras y vacíos rellenos con productos de reacción. Evidencia de degradación. | Viga cabezal sobrepasa la vida útil. | El sistema estructural no es concluyente, posibles capas de relleno sin acero estructural. Se necesitan realizar estudios detallados para emitir recomendaciones. |
| 5 | Concreto duro y compacto. Carbonatación 3 mm. Presencia de microfisuras y vacíos rellenos con etringita. Señales de debilitamiento progresivo. | La viga cabezal sobrepasa la vida útil. Datos no concluyentes para el sistema de contención 5-6. | Construcción de un nuevo sistema estructural. |
| 6 | Concretos heterogéneos. Carbonatación de 1 a 4 mm. Alta porosidad y mala gradación en varias muestras. Evidencias claras de reacción álcali-sílice (RAS) y presencia de gel. Acero corroído en N623. | Viga cabezal y zona recientemente rehabilitada sobrepasa la vida útil. Datos no concluyentes para el sistema de contención 5-6. | Demolición y reconstrucción de viga cabezal, reforzamiento con concreto en sistema de contención 5-6 y en zona rehabilitada recientemente. |
| 7 | Concreto duro y compacto, sin segregación. Carbonatación 1 mm. Buena gradación. Vacíos <9% con etringita. | Sistema de contención 7 sobrepasó la vida útil. | Demolición y reconstrucción del sistema de contención 7 |

18 CONCLUSIONES

A partir de los ensayos realizados sobre los elementos estructurales de la estructura perimetral del Centro de Convenciones de Cartagena, se identificaron condiciones que podrían comprometer la durabilidad y capacidad estructural en algunos sectores. Los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones técnicas:

- Las condiciones ambientales del entorno, sumadas a la exposición prolongada al ambiente marino, han generado un escenario propicio para procesos de deterioro relacionados con la corrosión del acero de refuerzo y otros mecanismos fisicoquímicos (ataque de sulfatos, cloruros, pérdida de pasta).
- Se observan manifestaciones físicas de deterioro en los elementos de concreto reforzado en diferentes sectores estudiados, tales como fisuración, exposición de acero de refuerzo, desprendimiento de recubrimientos y presencia de agentes agresivos.
- Las auscultaciones evidenciaron corrosión generalizada y pérdida de sección del acero, salvo en sectores puntuales (2, parte del 4 y entre 5–6). Esta condición reduce la capacidad de los elementos estructurales y compromete la durabilidad de la estructura, por lo que se requiere una intervención prioritaria en los sectores críticos.
- Sector 1, Sector 5, Sector 6 y Sector 7 presentan recubrimientos promedio muy inferiores al mínimo de 35 mm, con valores de 2 mm, 9 mm, 10 mm y 25 mm respectivamente, lo cual incrementa de manera crítica la exposición del acero a agentes agresivos. Sector 3 registra un valor promedio de 47 mm, dentro del rango aceptable, aunque con dispersión hacia valores bajos. Sectores 2 y 4 son los únicos que superan ampliamente los requisitos, con valores promedio de 82–86 mm y 61–94 mm respectivamente, tanto en caras laterales como superiores.
- En términos de recubrimiento, la comparación entre caras laterales y caras superiores muestra que los mayores déficits se concentran en las caras laterales de los sectores 1, 5, 6 y 7, mientras que los sectores 2 y 4 cumplen incluso el criterio de mínimo de 75 mm para ambientes marinos severos.
- Las mediciones de VPU oscilaron entre valores mínimos cercanos a 1000 m/s y máximos de 5500 m/s, pero principalmente un rango de valores entre 1000 y 3600 m/s, lo que corresponde a calidades de concreto muy pobre, pobre y cuestionable. El histograma de frecuencias confirma que más del 70% de los resultados se ubican por debajo de 3600 m/s, es decir, entre calidades cuestionables y muy pobres, evidenciando la pérdida significativa de compacidad y resistencia en el concreto o posibles agrietamientos en este.
- En términos generales, los ensayos de VPU permitieron identificar que el estado del concreto no es homogéneo a lo largo del perímetro en los sectores evaluados, con sectores críticos (1, 3, 6 y 7) que presentan valores bajos, y sectores puntuales como el 2 y 4, que aún conservan concreto en buen estado. Se resalta que la mayoría de las mediciones se realizaron en el recubrimiento del concreto, indicando el pobre estado del concreto en el sitio de inspección y ensayos.
- La mayoría de las lecturas de potencial de corrosión registradas se ubican por debajo de -350 mV (Cu/CuSO₄), lo que indica $>90\%$ de probabilidad de corrosión activa del acero de refuerzo en amplias zonas de la estructura. Este comportamiento es consistente con los

excavos recubrimientos y la degradación observada en campo. Los sectores más críticos en términos de corrosión y de intervención inmediata son los sectores 5, 3, 6 y 1 respectivamente.

- La carbonatación identificada en los elementos de la estructura perimetral es superficial y discontinua, con profundidades máximas de 40–50 mm en puntos localizados (Sector 4), sin alcanzar en ningún caso la profundidad del recubrimiento. Los valores obtenidos confirman que el frente de carbonatación no constituye un factor determinante en la despasivación del acero de refuerzo en este caso, dado que el cambio en el pH es bajo.
- Existe una alta variabilidad en el parámetro de resistencia a la compresión entre sectores, con valores que van desde 23 MPa en el Sector 3 hasta más de 50 MPa en el Sector 2. El Sector 2 confirma su condición con construcción más reciente, con resistencias significativamente superiores al umbral normativo de 35 MPa, clasificándose como el sector con concreto de mejor desempeño mecánico. El Sector 3 resulta crítico, al presentar los valores más bajos (≈ 23 MPa), lo que refleja un concreto de baja calidad, insuficiente para los requisitos actuales de durabilidad y desempeño estructural. Los Sectores 1, 5, 6 y 7, con resistencias entre 26–31 MPa, y el Sector 4, con 33 MPa, se encuentran por debajo del límite de 35 MPa exigido por la NSR-10, lo que indica que, si bien resisten cargas de servicio, no garantizan la durabilidad necesaria en ambiente marino.
- Los resultados de VPU (pobre, muy pobre y cuestionable en la mayoría de sectores) contrastan con los de compresión. Esta diferencia se explica porque el VPU se realizó mediante métodos indirectos y semidirectos, lo que lo hace más sensible a la fisuración interna, microgrietas y discontinuidades que reducen la calidad del concreto sin necesariamente disminuir su resistencia mecánica inmediata.
- Considerando la edad de la estructura (≈ 45 años), los valores obtenidos hubieran sido aceptables bajo la normativa de la época (21 MPa). Sin embargo, a la luz de la NSR-10 vigente, son insuficientes para garantizar el desempeño en ambientes de exposición C2 (marino).
- Composición y relaciones pasta–agregado: Las muestras analizadas (ND74, ND62, ND67, ND69, ND615, ND623, ND625, ND52, ND44, ND34, ND24 y ND13) evidencian concretos con relaciones pasta/agregado variables, desde 1:0,3 hasta 1:1,1. En general, se observa buena adherencia entre pasta y agregado, aunque en sectores como ND62 y ND615 predominan deficiencias de homogeneidad y variabilidad en la granulometría. Los agregados corresponden principalmente a calizas, basaltos y cherts, materiales que aportan resistencia mecánica, pero algunos de ellos propician la reactividad potencial frente a procesos de expansión RAS (reacción alcali-sílice)
- Microestructura y porosidad: Se identificaron vacíos y microporos distribuidos en toda la matriz, en porcentajes entre 0,5% y 6%, asociados en algunos casos a procesos de retracción y a la formación de geles RAS. En ND1 se encontraron contaminantes como partículas vegetales, mientras que en ND62, ND67 y ND623 se reportaron mayores concentraciones de vacíos y poros interconectados, lo que implica menor durabilidad y mayor susceptibilidad al ingreso de agentes agresivos.
- Procesos de alteración y reacciones deletéreas: En las muestras ND62, ND67, ND69, ND623 y ND625 se observó gel de reacción álcali-sílice (RAS), con morfologías pseudo hexagonales

y características de retracción por humedad-secado. Adicionalmente, en ND62, ND67, ND69 y ND623 se evidenció acumulación de portlandita y en ND11 (ND24) cristalización localizada en forma de gel, lo que refuerza la presencia de procesos expansivos activos. Estos hallazgos explican la fisuración recurrente observada en campo.

- El límite de referencia establecido en este estudio corresponde a 0.67 % de sulfatos por masa de concreto, considerando un contenido de cemento de 600 kg/m³ y una densidad de 2246 kg/m³. El 87.5 % de los resultados obtenidos supera este límite, lo que constituye evidencia clara de contaminación externa por sulfatos proveniente del ambiente marino.
- La estructura se encuentra bajo un proceso sostenido de ataque por sulfatos, lo que constituye un factor determinante en la pérdida de vida útil y en la necesidad de medidas de reparación y reconstrucción.
- Se identificaron cristales de etringita, tanto en vacíos como en microgrietas, en la mayoría de las muestras, destacando ND67, ND615, ND52 y ND34. Estos productos secundarios generan expansión interna y favorecen la propagación de grietas, actuando en conjunto con los efectos de la RAS y comprometiendo la estabilidad de los elementos estructurales.
- El sistema de protección catódica instalado en 2022 en el sistema de tablestacado del sector 2 presenta un diseño subdimensionado, con solo un 26 % de la masa anódica requerida y ánodos del lado mar prácticamente consumidos en menos de tres años, lo que reduce drásticamente su vida útil y deja zonas críticas del tablestacado sin protección efectiva frente a la corrosión.
- La combinación de recubrimiento dañado durante el hincado, deficiencias en la distribución de ánodos y uso inadecuado de electrodos de referencia en el sistema de tablestacado del sector 2 compromete la confiabilidad del sistema; por ello, se requiere una ingeniería de detalle integral que incluya rediseño del esquema de protección (galvánico o corriente impresa), modelación de distribución de corriente y un plan robusto de inspección y monitoreo.
- En todos los sectores analizados, con excepción de las zonas reconstruidas recientemente (caso S2PC2), los perfiles de cloruros superan los umbrales críticos establecidos por norma, lo que indica un riesgo generalizado de corrosión activa en la armadura del concreto expuesto al ambiente marino.
- Los perfiles muestran dos tendencias principales: (1) disminución típica por difusión (modelado usando segunda ley de Fick) en caras laterales, y (2) concentraciones constantes o irregulares en caras superiores, asociadas a microfisuras, porosidad conectada y acumulación por humedecimiento y secado, lo que agrava el deterioro estructural en esas zonas.
- Los sectores 3, 4, 6 y 7 presentan los valores más elevados y persistentes de concentración de cloruros, muy por encima del umbral, lo que confirma una condición avanzada de ingreso de agentes agresivos y la necesidad de medidas de intervención urgentes para evitar la progresión del daño.

Andrés Galán B.

Andrés F. Galán B.
Representante Legal Principal
Consorcio ingenia & ecoplanet
I.C. – M.I.C.
Mat. 08202-251164 ATL

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM International. (2017). ASTM C823/C823M, "Standard Practice for Examination and Sampling of Hardened Concrete in Constructions". ASTM International. https://www.astm.org/c0823_c0823m-12r17.html.
- ASTM International. (2020). ASTM C42/C42M, "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete". ASTM International. https://www.astm.org/c0042_c0042m-20.html.
- ASTM International. (2023). ASTM C597-16, "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete". ASTM International. <https://www.astm.org/c0597-16.html>.
- Ebell, G., Burkert, A., & Mietz, J. (2018). Detection of Reinforcement Corrosion in Reinforced Concrete Structures by Potential Mapping: Theory and Practice. *International Journal of Corrosion*, 2018, 3027825. <https://doi.org/10.1155/2018/3027825>
- Google Maps. (2024). [Conjunto residencial Palmas de Mallorca]. Recuperado el 28 de agosto de 2024 de <https://maps.app.goo.gl/RsFYLkBe2Qhb3fj8>
- Nordtest method. (1989). NT-BUILD 357, "Concrete, Repairing Materials and Protective Coating: Carbonation Resistance". Nordtest method. <https://www.nordtest.info/wp/1989/09/22/concrete-repairing-materials-and-protective-coating-carbonation-resistance-nt-build-357/>
- Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 125, 1022-1027
- NTC 3726:1995, "MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE CEMENTO PÓRTLAND DEL CONCRETO DE CEMENTO HIDRÁULICO ENDURECIDO".
- L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, y R. B. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, 2nd ed. Weinheim, Germany: Wiley VCH, 2014.

ANEXOS

- Anexo 1: Ensayos de ferroescáner
- Anexo 2: Gráficas de velocidad de pulso ultrasónico
- Anexo 3: Resultados de Resistencia a compresión
- Anexo 4: Resultados de Contenido de cemento

- Anexo 5: Resultados de Contenido de cloruros
- Anexo 6: Resultados de Contenido de sulfatos
- Anexo 7: Resultados de Petrografía
- Anexo 8: Diagnóstico de sistema de protección catódica en sector 2

