

“Guía para determinar la reacción álcali-agregado y su posible solución, como mecanismo de patología preventiva en la construcción de proyectos”

Autor 1: Daniel Eduardo Ruiz Ospina¹

Autor 2: Juan David collazos Vargas²

Autor 3: Luis Fernando Oviedo Nuñez³

Tutor: Diana Mylena Zambrano Vásquez ⁴

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia.

daniel.ospinarui@usantotomas.edu.co

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia.

juan.vargascol@usantotomas.edu.co

³ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia.

luisoviedon@usantotomas.edu.co

⁴ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia.

diana.zambrano@usantotomas.edu.co

1. Resumen

El concreto es un material fundamental en la construcción, pero su durabilidad se ve comprometida por patologías como la reacción álcali-agregado (RAA), un proceso expansivo que causa fisuración y pérdida de propiedades mecánicas. Denominada el "cáncer del concreto" por sus daños irreversibles y los elevados costos de reparación, esta patología ha motivado el desarrollo de estrategias de mitigación, como la adición de materiales cementantes suplementarios (SCM), entre ellos las puzolanas. A pesar de que la eficacia de estas medidas está validada en laboratorio, su validación bajo condiciones reales de servicio prolongado es limitada, existiendo un vacío de conocimiento significativo. Este artículo aborda dicha brecha mediante un análisis retrospectivo de 12 años (2014-2026) del concreto en el muro parapeto de la Presa de la Central Hidroeléctrica de una Empresa del Sector Eléctrico Colombiano, en el que se empleó una adición del 20% de puzolana como medida de mitigación. El objetivo es verificar la eficiencia de esta estrategia en la conservación de las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. La metodología compara datos históricos de construcción con resultados actuales de ensayos de resistencia a la compresión, análisis petrográfico y microscopía electrónica de barrido (SEM). Este estudio de caso en una infraestructura crítica expuesta a alta humedad y variabilidad térmica ofrece una oportunidad única para aportar evidencia empírica sobre la efectividad a largo plazo de las medidas preventivas contra la RAA.

Palabras Clave: Reacción álcali-agregado (RAA), Mitigación, Concreto, Durabilidad, Puzolanas, Análisis retrospectivo, Presa Central Hidroeléctrica de una Empresa del Sector Eléctrico Colombiano, Materiales Cementantes Suplementarios (SCM), Propiedades mecánicas.

2. Introducción

El concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo debido a su versatilidad y resistencia. Sin embargo, su integridad a largo plazo puede ser amenazada por diversas patologías, entre las que destaca la reacción álcali-agregado (RAA).

Este fenómeno químico interno ocurre cuando los álcalis del cemento reaccionan con ciertos agregados de sílice reactiva, formando un gel expansivo que, en presencia de humedad, genera tensiones internas que provocan la fisuración y el deterioro progresivo de la estructura (Mehta & Monteiro, 2014).

Los daños asociados a la RAA, considerados irreversibles, conllevan enormes costos de reparación y ponen en riesgo la seguridad de infraestructuras críticas como las presas (Toxement, 2020; Neville, 2012).



Figura No.1: Esquema del proceso de la RAA

Para contrarrestar este problema, la ingeniería ha desarrollado diversas estrategias de mitigación, siendo una de las más comunes la incorporación de materiales cementantes suplementarios (SCM), como las cenizas volantes o las puzolanas naturales. Estos materiales actúan principalmente reduciendo la alcalinidad de la solución de los poros del concreto y consumiendo el hidróxido de calcio, limitando así las condiciones necesarias para la formación del gel expansivo. La eficacia de los SCM para inhibir la RAA ha sido ampliamente demostrada en ensayos acelerados de laboratorio.

Sin embargo, existe una brecha reconocida entre los resultados de laboratorio y el comportamiento real de las estructuras a lo largo de décadas. Investigaciones señalan que el desempeño a largo plazo de los concretos con SCM no es completamente conocido, y se requiere más evidencia empírica de obras en servicio. Este artículo busca cerrar esa brecha, evaluando la efectividad de una medida de mitigación en condiciones reales y prolongadas.

El presente estudio se desarrolló en colaboración con una Empresa del Sector Eléctrico Colombiano, propietaria de Centrales Hidroeléctricas de gran escala. Por razones de confidencialidad, no se menciona su nombre, limitándose la referencia a su carácter institucional como una Empresa del Sector Eléctrico Colombiano.



Fotografía No.1: Central Hidroeléctrica – Aguas abajo – Julio de 2025 – Fuente Grupo de Trabajo.



Fotografía No.2: Construcción Muro Parapeto Presa – Enero de 2014 – Fuente Empresa del Sector Eléctrico Colombiano.



Fotografía No.3: Muro Parapeto Presa – Sitio de Ensayos – Septiembre de 2025 – Fuente Grupo de Trabajo.

2. Se usó concreto clase K $f'_c=21$ MPa (210 kg/cm²) tamaño máximo de agregado 1 1/2" en el vástago.

Figura No.2: Tipo de concreto ejecutado en el Muro Parapeto Presa – Fuente Empresa del Sector Eléctrico Colombiano.

3. Planteamiento del Problema

El caso de estudio es el muro parapeto de la Presa de una Empresa del Sector Eléctrico Colombiano, una estructura de 190 metros de altura finalizada en el año 2014. En su construcción se utilizaron agregados locales con potencial reactivo, por lo que se optó por un diseño de mezcla que incluía un 20% de puzolana (ceniza volante) para mitigar la RAA. Tras 12 años de exposición a condiciones de alta humedad y variaciones térmicas, este estudio plantea la siguiente pregunta de investigación: ***¿Ha demostrado ser efectiva, bajo condiciones reales de exposición prolongada, la estrategia de mitigación contra la RAA implementada en el concreto del muro parapeto de la Presa de la Central Hidroeléctrica, en términos de conservación de sus propiedades mecánicas, estructurales y de durabilidad?***

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

- Verificar parcialmente la eficiencia a largo plazo de la estrategia de mitigación contra la RAA implementada en el concreto del muro parapeto de la Presa de la Central Hidroeléctrica, mediante un análisis retrospectivo de 12 años.

4.2. Objetivos Específicos

- Determinar la variación porcentual en la resistencia a la compresión del concreto.
- Identificar, mediante análisis petrográfico, la presencia de minerales reactivos o productos de deterioro.
- Cuantificar el grado de micro fisuración y la presencia de geles de sílice utilizando imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM).
- Comparar los resultados actuales con los parámetros de diseño y registros históricos, para evaluar la efectividad parcial de la estrategia de mitigación implementada contra la RAA en un periodo de 12 años.
- Establecer un porcentaje de eficacia parcial de la estrategia de mitigación aplicada, integrando los resultados de los tres métodos de análisis (Compresión, petrografía y SEM).
- Aportar evidencia técnica de investigación que contribuya a la implementación de un protocolo de inspección periódico para las estructuras principales de todos los proyectos de generación de la Empresa del Sector Eléctrico Colombiano.

5. Alcance de la investigación

La investigación se circunscribe al análisis retrospectivo de 12 años (2014–2026) del concreto del muro parapeto de la Presa de la Central Hidroeléctrica. El estudio se limita a verificar la eficiencia de la adición del 20% de puzolana mediante la comparación de registros históricos con ensayos actuales de compresión, petrografía y SEM (técnica de caracterización que utiliza un haz de electrones en lugar de luz para obtener imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra, permitiendo observar su morfología, textura y composición con gran detalle).

6. Marco teórico y conceptual

6.1. El Fenómeno de la Reacción Álcali-Agregado (RAA)

La RAA es una reacción química que se produce entre los hidróxidos alcalinos (Na^+ y K^+) presentes en la solución de los poros de la pasta de cemento y ciertas formas de sílice reactiva encontradas en los agregados (Sánchez & Gutiérrez, 2018). El proceso se desarrolla en tres fases:

1. **Ataque alcalino:** Los iones hidroxilo (OH^-), en un ambiente con pH superior a 12.5, atacan la estructura de la sílice reactiva del agregado (ver Figura No.4).



Figura No.3: Fase 1.

2. **Formación de gel:** Se forma un gel de sílice alcalina, que es higroscópico (ver Figura No.5).



Figura No.4: Fase 2.

3. **Expansión:** El gel absorbe agua de su entorno, hinchándose y generando una presión expansiva que supera la resistencia a la tracción del concreto, lo que conduce a la microfisuración interna y, eventualmente, a la aparición de fisuras visibles en la superficie, a menudo con un patrón de "mapa" o "piel de cocodrilo" (López & Martínez, 2016) (ver Figura No.6).



Figura No.5: Fase 3.

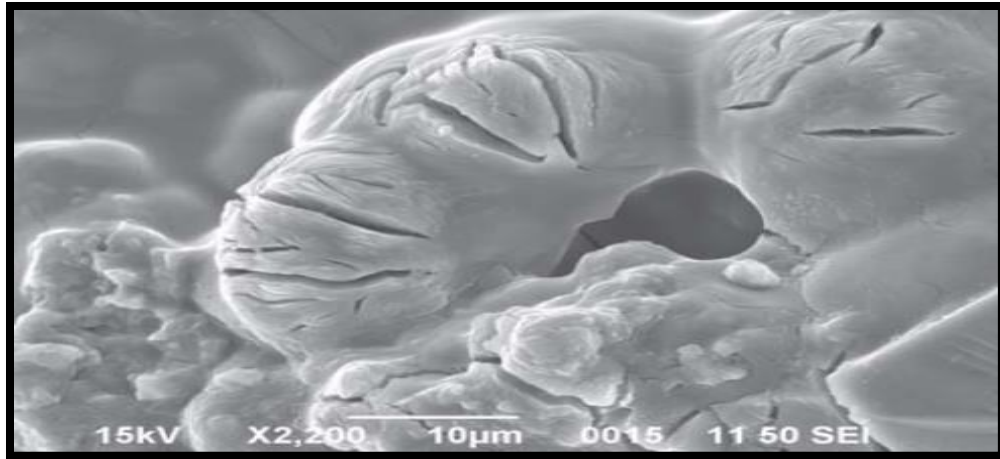


Figura No.6: Imagen de la morfología típica del gel de sílice en el mortero (Valdez Tamez et al., 2008).

6.2. Estrategias de mitigación y rol de las puzolanas

Las estrategias para mitigar la RAA se centran en controlar uno de los tres factores necesarios para la reacción: álcalis, sílice reactiva y humedad. El uso de SCM, como las puzolanas, es una de las medidas más eficaces y extendidas. Las puzolanas contribuyen de dos maneras principales:

- **Reacción Puzolánica:** Reaccionan con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), un subproducto de la hidratación del cemento, para formar más C-S-H (silicato de calcio hidratado), que es el principal aglomerante del concreto. Este proceso no solo densifica la microestructura, reduciendo la permeabilidad, sino que también consume el Ca(OH)_2 , que ayuda a mantener el alto pH necesario para la RAA.
- **Reducción de Álcalis:** Atrapan o "ligan" los iones alcalinos dentro del C-S-H recién formado, disminuyendo su concentración en la solución de los poros y, por tanto, su disponibilidad para reaccionar con los agregados.

Estudios de laboratorio han demostrado que la sustitución de cemento por puzolanas en porcentajes del 20% al 40% puede reducir drásticamente la expansión causada por la RAA.

7. Estado del arte y casos de estudio

La literatura mundial está bien documentada con casos de estructuras, especialmente presas, afectadas gravemente por la RAA. La presa Val de la Mare (Reino Unido) y la presa Chambon (Francia) son ejemplos históricos que mostraron un deterioro significativo décadas después de su construcción, requiriendo costosas intervenciones (Coombes, 1985; ICOLD, 1992).



Fotografía No.4: Vista aérea de la Presa Val de la Mare – Fuente (Coombes, L. Hm, 1985).



Fotografía No.5: Solución implementada Presa Val de la Mare – Fuente (Coombes, L. Hm, 1985).

En el año de 2011 se implementó en la presa Val de la Mare la solución de instalación de 3.100 m^2 de geomembrana especial para evitar contacto directo entre el concreto y el agua, con un valor aproximado de 2.000.000 USD (Coombes, L. Hm, 1985).



Fotografía No.6: Presa Chambon - Fuente (ICOLD, 1992 - *Boletín* 79).

En la presa Chambon, ubicada en Francia, se detectó un proceso de hinchamiento por efectos de la reacción álcali-agregado (RAA), en la sección de monitoreo desde 1980. (ICOLD, 1992 - Boletín 79). Esta patología se ha manifestado en numerosos países, el banco de datos de la empresa Acres Internacional Ltd. 2005, que se refiere a expansiones en presas y construcciones hidroeléctricas originadas por reacciones álcali-agregado (RAA), recoge 104 fichas que corresponden a otros tantos casos registrados en todo el mundo; estando los casos de mayor gravedad ligados a obras hidráulicas en los siguientes países: Argentina, Australia, Brasil, Canadá, España, Francia, Gran Bretaña, India, Kenia, Mozambique, Nigeria, Noruega, Pakistán, Portugal, Rusia, Suiza, Uruguay, USA, Zambia.

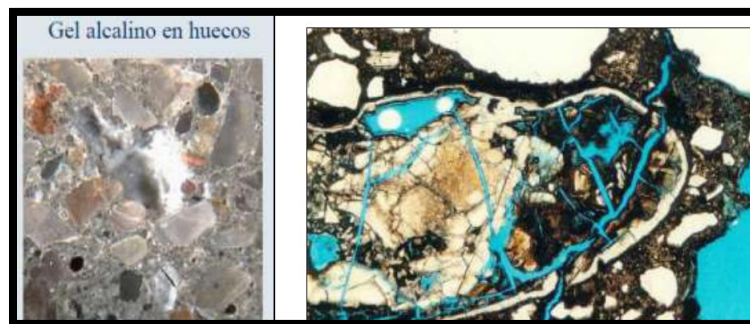


Figura No.7.a: Grietas por reactividad álcali-agregado – Fuente Handbook for identification of alkali-silica reactivity in airfield pavement (Menéndez, 2010).

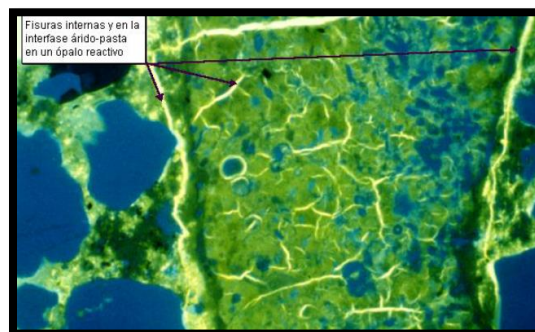


Figura No.7.b: Fisuración por geles expansivos de RAS (Microscopía con luz fluorescente, 63x) (Sprint RA-419, 1994).

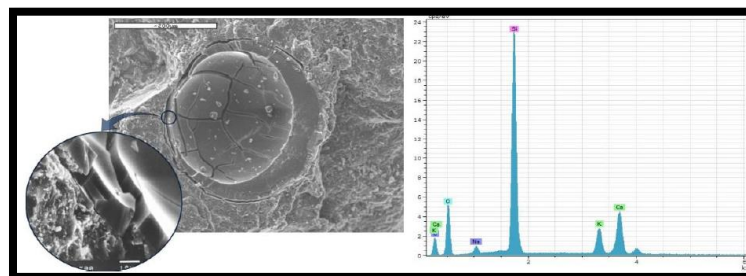


Figura No.7.c: Geles vítreos en el interior de un poro, con una composición muy rica en silicio, potasio y sodio, y calcio, procedente de la pasta cementante (SEM-EDX) (Menéndez, 2010). (Sprint RA-419, 1994).

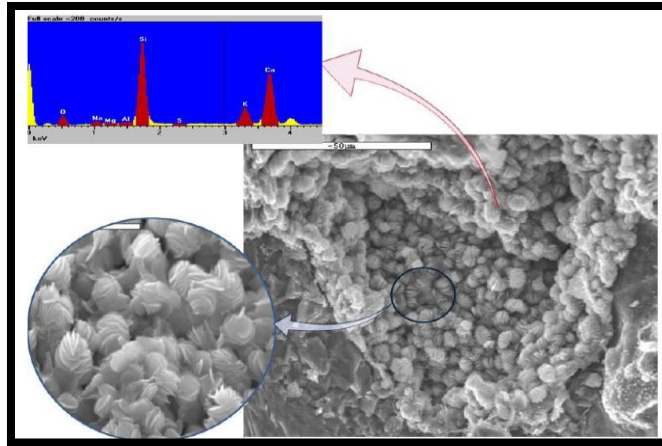


Figura No.7.d: Geles vítreos en el interior de un poro, con una composición muy rica en silicio, potasio y sodio, y calcio, proveniente de la pasta cementante (Menéndez, 2010).

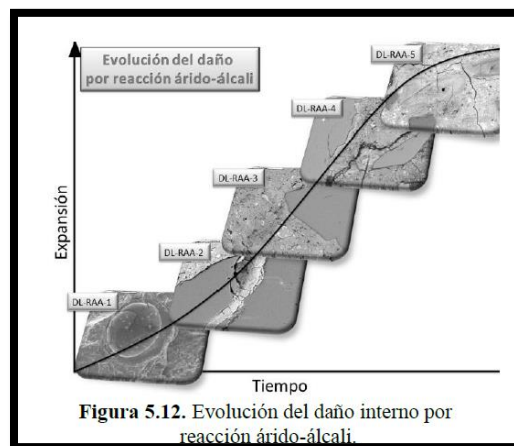


Figura No.7.e. Evolución del daño interno por reacción árido-álcali (Menéndez, 2010).

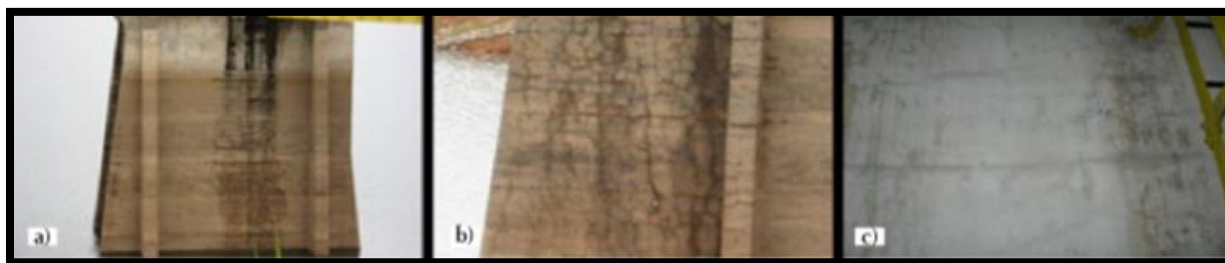
Más recientemente, en el contexto latinoamericano, la presa **Hidráulica de Jaguari** (Brasil) ha presentado agrietamientos y exudación de gel, confirmando la prevalencia del problema en la región (Zoilo et al., 2013).



Fotografía No.7: Represa hidráulica de Jaguari (PH) – Fuente CESP (2013).



Fotografía No.8: Presencia de gel en las grietas – Fuente CESP (2013).



Fotografía No.9: Grietas en los muros de contención en la entrada de agua. (a) Muro exterior, (b) Muro de contención y (c) muro interior – Fuente CESP (2013).

En Colombia, un estudio sobre varias presas mostró que la combinación de agregados reactivos y condiciones ambientales agresivas puede acelerar los efectos de la RAA, con resultados mixtos en la efectividad de los SCM utilizados (Melo Jiménez, 2014). Investigaciones más recientes en la región continúan validando el uso de puzolanas locales para mejorar las propiedades del concreto (Campos, 2024) y proponen metodologías adaptadas a la geología local para identificar agregados reactivos (Moscote Gil & Torres Ortega, 2024).

Incidencia de las reacciones expansivas en estructuras hidráulicas a nivel Internacional (SPANCOLD, 2025):

Las presas y las estructuras hidráulicas, en general, son estructuras con una vida útil prevista muy extensa con relación a otras estructuras de hormigón. Sin embargo, los grandes volúmenes de hormigón, además de las condiciones de exposición con elevada presencia de agua, hacen que las presas sean estructuras especialmente sensibles al desarrollo de reacciones expansivas, como la reacción álcali-agregado.

En el proyecto europeo IALAD (Network of Integrity Assessment of Large Concrete Dams) (IALAD, 2004) se analizaron las causas de degradación de más de 200 presas a nivel internacional, analizándose las causas de alteración de estas y clasificándolas en cuatro grupos principales: a) degradación del hormigón y la mampostería (63 %), donde se encuentran encuadrados los cambios dimensionales, b) degradación mecánica e hidráulica de la cimentación (19 %), c) elevaciones debidas a causas adicionales (12 %) y d) envejecimientos

de componentes, como anclajes y juntas, (6 %). Las causas de degradación del hormigón y de la mampostería se subdividen, a su vez, en deterioros debidos a cambios dimensionales, lixiviación, pérdida de estanqueidad y hielo-deshielo.

Analizando los datos recogidos en IALAD, 2004 y ACRES, 2006, se estima que aproximadamente el 30% de los casos de degradación en presas analizados están relacionados con el deterioro por reacciones expansivas tipo reacción árido-álcali y el ataque interno por sulfatos (Menéndez et al., 2011). Segarra, 2005, recoge 101 casos de presas afectadas por reacciones expansivas a nivel mundial. Charlwood y Sims, 2016, realiza una revisión de las 27 presas y estructuras hidráulicas internacionales afectadas por reacciones expansivas. En esta revisión se analiza la tipología de las presas, el tiempo en que se detectó la alteración y los niveles de expansión registrados; se referencian 8 presas de gravedad, 6 presas arco, 2 presas de contrafuertes, 6 desagües, 4 estaciones hidroeléctricas y 1 estructura de toma. Estos casos están considerados como los casos más significativos a nivel internacional. No obstante, se puede considerar que existe un gran número de presas con reacciones expansivas en las que no se ha diagnosticado todavía el fenómeno, bien por falta de recursos en la inspección y mantenimiento, o bien por desconocimiento de los síntomas específicos del fenómeno expansivo.

Basado en estos datos se puede considerar que el porcentaje de presas afectadas en Europa y otros países occidentales están en torno al 5-7%, No obstante, hay que tener en cuenta la incidencia de los tipos de áridos locales en las distintas zonas con presas afectadas.

En la Tabla 1 se recoge la distribución de casos por continentes, según los datos registrados por cada una de las fuentes analizadas:

Continente/Área	Estructuras afectadas por reacciones expansivas internas		
	Segarra, 2005	Menéndez et al., 2011, basado en IALAD, 2004 y ACRES, 2006	Charlwood y Sims, 2016
Europa	25,7 %	57,4 %	29,6 %
Norteamérica	49,5 %	23,5 %	51,9 %
América del Sur	4 %	1,5 %	---
Asia	4 %	4,4 %	3,7 %
África	16,8 %	13,2 %	14,8 %
Nº total casos analizados	101	68	27

Tabla No.1: Distribución de casos de reacciones expansivas, por áreas geográficas (SPANCOL, 2025).

La diferente distribución de los casos identificados de estructuras hidráulicas, afectadas por fenómenos expansivos, en distintos continentes/áreas no obedece necesariamente a una diferencia significativa en la presencia de áridos reactivos, en la tipología del hormigón o en las condiciones ambientales o mecánicas de las estructuras. Estas diferencias en los casos diagnosticados están directamente relacionadas con la eficiencia e intensidad de la inspección y control en determinadas áreas o países, debido a los recursos destinados a la inspección y mantenimiento y a los requerimientos legales en distintos países.

Este panorama confirma que, si bien el diagnóstico de la patología y sus consecuencias están bien estudiados, y la mitigación en laboratorio es prometedora, existe una carencia de estudios de caso que verifiquen el éxito de una estrategia de prevención a largo plazo en una obra de la magnitud de la Presa de la Central Hidroeléctrica.

8. Caso de estudio e información recolectada

Para nuestro caso de análisis de los concretos del muro parapeto se presenta toda la información de construcción, la cual es la información base para este artículo:

La zona de fuente de materiales de construcción está ubicado a 6,5 Km aguas abajo del sitio de Presa, sobre la margen izquierda del río (ver Fotografía No.10). Los depósitos aluviales están conformados por cantos y gravas redondeados con algunos bloques de arenisca, estratos limo arenoso, arena limosa gris, carmelita de grano medio no plástica, rocas gneiss, cuarzodiorita y caliza.



Fotografía No.10: Ubicación fuente de materiales – Fuente Grupo de Trabajo.

A continuación, se detallan los resultados de análisis de la reacción álcali-agregado del proyecto en el año 2009:

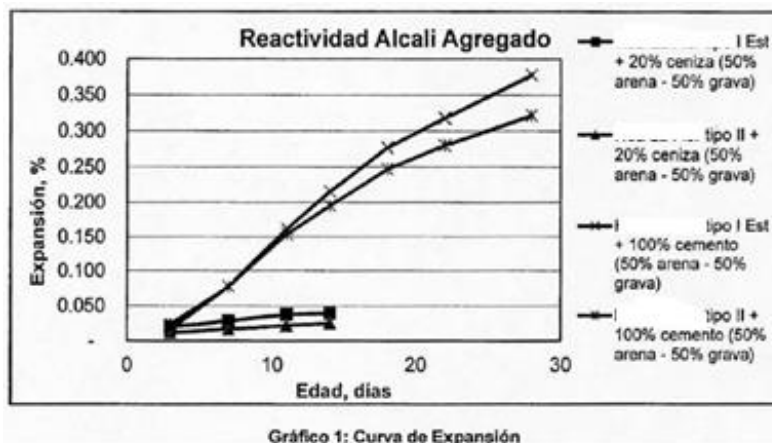


Figura No.8: Ensayos y Comunicaciones – Fuente Empresa del Sector Eléctrico Colombiano.

9. Metodología

Se emplea un diseño de investigación retrospectivo y evaluativo, estructurado bajo un enfoque mixto que integra metodologías cuantitativas y cualitativas. Este planteamiento metodológico permite abordar el objeto de estudio desde una perspectiva integral, combinando la rigurosidad de los datos numéricos con la interpretación contextual de los fenómenos observados.

El estudio se fundamenta en una comparación longitudinal entre la información documental de diseño y construcción de la estructura (año base: 2014) y los resultados de los ensayos y mediciones ejecutados en el presente año 2026. Esta estrategia comparativa posibilita identificar variaciones en las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los materiales, así como en el desempeño estructural bajo condiciones reales de servicio.

El carácter retrospectivo del diseño permite reconstruir la evolución del comportamiento del material a lo largo de más de una década de operación, mientras que el componente evaluativo aporta criterios técnicos para determinar el grado de deterioro, la pérdida de capacidad funcional y la necesidad de intervención. El enfoque mixto asegura que los hallazgos no se limiten a la cuantificación de parámetros, sino que también integren la interpretación de las causas y mecanismos de degradación, ofreciendo una visión holística del estado actual de la estructura.

En síntesis, este diseño metodológico constituye una herramienta robusta para validar la hipótesis de deterioro progresivo, correlacionar los resultados experimentales con las condiciones de servicio y establecer lineamientos técnicos para la conservación, rehabilitación o refuerzo de la obra.

9.1. Unidad de Análisis y Muestreo

La unidad de análisis es el concreto del muro parapeto de la Presa de la Central Hidroeléctrica, ubicado en la zona central de la cresta. Se seleccionó esta zona por ser representativa de la aplicación de la estrategia de mitigación y por su exposición a condiciones ambientales relevantes.

Se extraerán muestras mediante perforación con broca de diamante para minimizar la alteración del material. La selección de muestras incluye:

- **Un (1) núcleo cilíndrico de concreto** para ensayos de resistencia a la compresión.
- **Cuatro (4) muestra de concreto** para análisis petrográfico mediante análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM): dos muestras (2) en la zona de la Presa con adición de ceniza y dos muestras (2) en el Campamento sin adición de ceniza.

9.2. Procedimientos y Ensayos de Laboratorio

La investigación se desarrollará en las siguientes fases:

1. **Revisión Documental:** Recopilación y análisis de los registros de construcción de la Central Hidroeléctrica del año 2014, incluyendo los diseños de mezcla, los resultados de los ensayos de reactividad potencial (ASTM C1260 y C1567) y los registros de resistencia a la compresión originales ($f'_c = 21 \text{ MPa}$).
2. **Ensayos de Laboratorio (2026):**
 - **Resistencia a la Compresión (ASTM C39/C39M):** Se ensayará un núcleo para determinar la resistencia actual del concreto. Los resultados se compararán estadísticamente con el valor de diseño.
 - **Análisis Petrográfico de núcleos de concreto en sección delgada (ASTM C856 – 25):** Se examinará una sección delgada de la muestra bajo un microscopio petrográfico para establecer las propiedades físicas y químicas a nivel microscópico de materiales cementantes hidráulicos, como son el tipo de agregado, proporciones de mezcla, contenido de aire, presencia de minerales en la pasta cementante y la determinación de características químicas de posibles procesos degradativos si se existiesen en las muestras. Identificar la mineralogía de los agregados, la presencia de geles de sílice, microfisuras o cualquier otro producto de deterioro asociado a la RAA.
 - **Microscopía Electrónica de Barrido (SEM):** Se analizará la microestructura del concreto para observar con alta resolución la posible presencia y morfología de geles expansivos en los poros y en la interfaz agregado-pasta.
3. **Análisis Comparativo:** Se realizará una triangulación de los datos históricos con los resultados de los ensayos actuales para evaluar de manera integral si la estrategia de mitigación ha sido efectiva en preservar las propiedades del concreto.

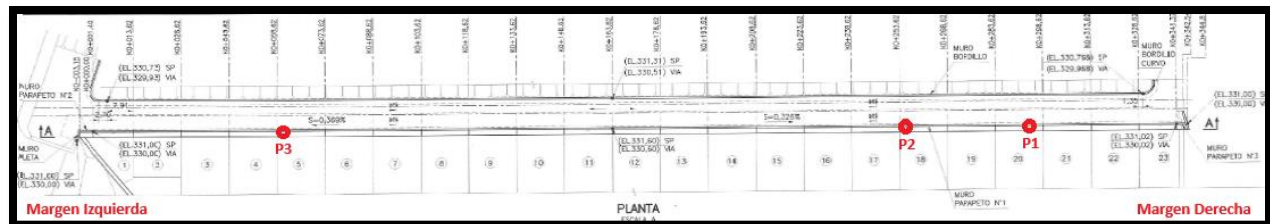
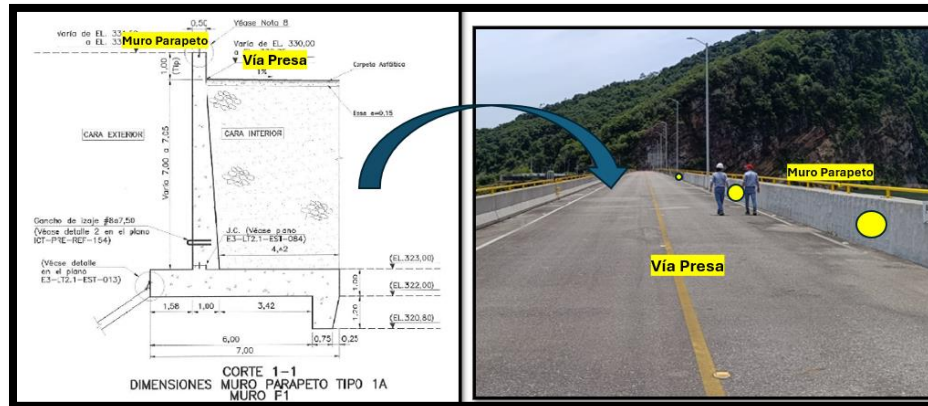
10. Resultados

i. Toma de muestras:

El 10 de febrero de 2026 se efectuó la toma de muestras en los dos sectores identificados para el análisis del presente estudio: Muro Parapeto de la Presa y las instalaciones del Campamento. La extracción se realizó siguiendo protocolos de muestreo establecidos para garantizar la trazabilidad y la validez de los resultados, documentando las condiciones iniciales de los materiales y el entorno. A continuación, se presentan la ubicación, el registro fotográfico y descriptivo correspondiente a cada punto de muestreo.

Muestreo muro Parapeto:

En el muro Parapeto se tomaron 3 muestras de concreto P1 (petrografía), P2 (resistencia a la compresión) y P3 (petrografía); con adición de ceniza al 20%:

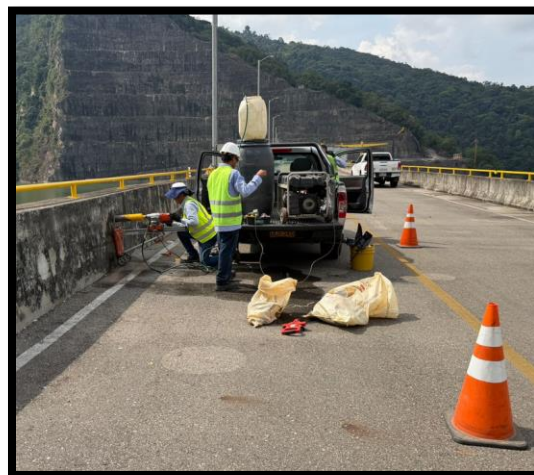


Fotografía No.11 – Ubicación muestreo Muro Parapeto de la Presa – Fuente Empresa del Sector Eléctrico Colombiano.

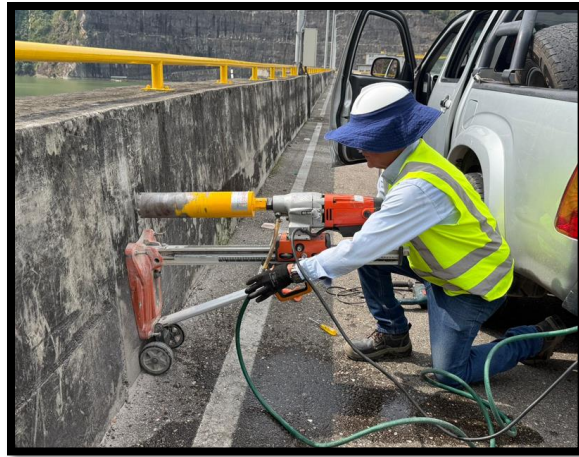
P1: K0+295 (petrografía) – En adelante se llamará **N1**.

P2: K0+255 (resistencia a la compresión).

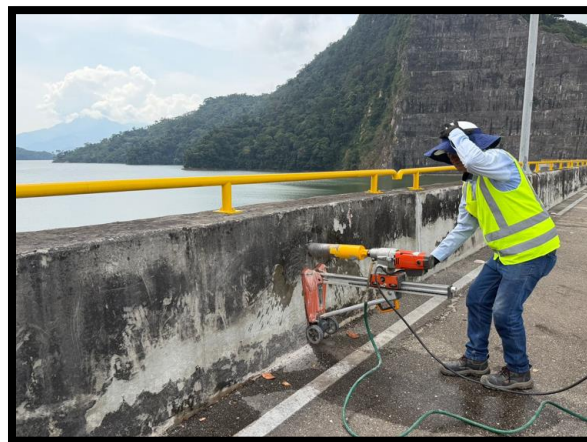
P3: K0+060 (petrografía) - En adelante se llamará **N2**.



Fotografía No.12 – Ejecución del muestreo – Fuente Grupo de Trabajo.



Fotografía No.13– Ejecución del muestreo – Fuente Grupo de Trabajo.



Fotografía No.14 – Ejecución del muestreo – Fuente Grupo de Trabajo.



Fotografía No.15 – Muestras N1, P2 y N2 iniciando de izquierda a derecha – Fuente Grupo de Trabajo.

Muestreo Campamento:

En el Campamento se realizó la toma de los núcleos ICT1 (Petrografía) e ICT2 (Petrografía) sin adición de ceniza, los cuales fueron ejecutados en el bordillo de la cuneta del módulo No.27:



Fotografía No.16 – Ubicación muestreo Campamento – Fuente Google Earth.

ICT1: Bordillo (petrografía) - En adelante se llamará **N3**.

ICT2: Bordillo (petrografía) En adelante se llamará **N4**.



Fotografía No.17 – Ejecución del muestreo – Fuente Grupo de Trabajo.



Fotografía No.18 – Muestras N3 y N4 iniciando de izquierda a derecha - Fuente Grupo de Trabajo.

ii. Ensayos de laboratorio

a) Resistencia a la compresión (INV E 410 – 2013_ INV E 418 – 2013):

El ensayo realizado sobre el núcleo P2 constituye una herramienta fundamental para evaluar la capacidad resistente real del concreto en obra, más allá de los valores teóricos de diseño. La extracción de núcleos permite identificar la heterogeneidad del material, la influencia de las condiciones de curado, la exposición ambiental y los procesos de degradación acumulados en servicio.

Preparación y validez del ensayo

- El aserrado en seco de las bases garantiza superficies paralelas, condición indispensable para evitar concentraciones de esfuerzos y asegurar una distribución uniforme de la carga.
- La protección con vinipel y almacenamiento en desecador con sílica gel minimizan variaciones de humedad, preservando las propiedades mecánicas originales del núcleo.

Tabla No.2: Resultados Ensayo de Compresión – Fuente Informe Laboratorio.



Fotografía No.19 – Ensayo a la Compresión de la muestra P2 – Fuente Informe Laboratorio.

b) Análisis Petrográfico de núcleos de concreto en sección delgada (ASTM C856 – 25):

Interpretación patológica del procedimiento petrográfico

El análisis petrográfico de núcleos de concreto constituye una de las herramientas más sólidas para comprender la microestructura y mineralogía del material en servicio, permitiendo identificar procesos de deterioro que no siempre son evidentes en ensayos mecánicos convencionales. En este caso, se recibieron cuatro núcleos: N1 y N2 con adición de ceniza y N3 y N4 sin adición de ceniza, todos con diámetros de 87 mm y longitudes variables entre 142 y 215 mm, lo que asegura una muestra representativa de la masa de concreto:

Muestra	Tipo de muestra	Diámetro (mm)	Longitud máxima (mm)	Cara superior	Cara inferior
N1	Núcleo completo	87	215	Terminación lisa	Irregular
N2	Núcleo completo	87	142	Terminación lisa	Terminación lisa por corte
N3	Núcleo completo	87	151	Rugosa	Irregular
N4	Núcleo completo	87	144	Rugosa	Irregular

Tabla No.3: Dimensiones y características de sus caras inferior y superior – Fuente Informe Laboratorio.

Preparación de las muestras

- La impregnación con resina epóxica azul no solo mejora la cohesión de los especímenes, sino que también permite evidenciar la porosidad y fisuración interna, facilitando la interpretación bajo microscopía.
- El corte longitudinal en dos mitades y el pulido de una cara generan bloques semipulidos útiles para observación macroscópica y registro fotográfico, mientras que la otra mitad se destina a la obtención de secciones delgadas para análisis microscópico.
- Este procedimiento cumple con la norma ASTM C 856-25, garantizando trazabilidad y validez internacional de los resultados.

Alcance del examen petrográfico

El uso de microscopía de luz polarizada en secciones delgadas permite:

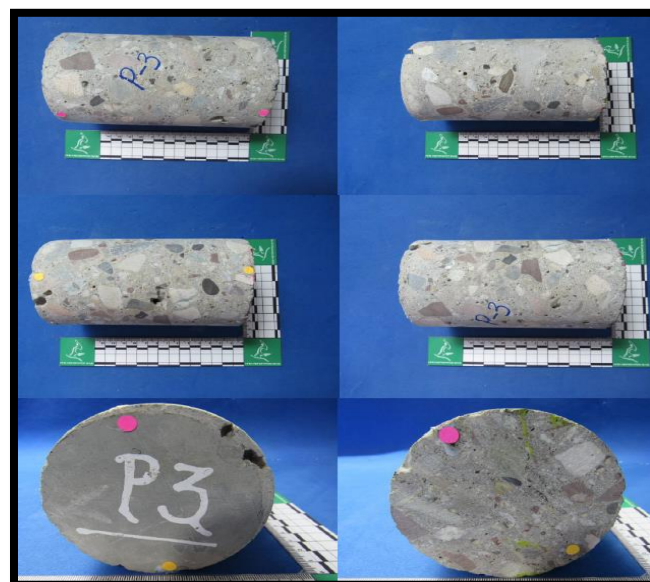
- Identificar la mineralogía de los áridos (granitos, cuarcitas, calizas, etc.) y su grado de reactividad potencial frente a procesos expansivos.
- Evaluar la matriz cementante, detectando productos de hidratación, presencia de geles de sílice asociados a reacciones árido-álcali.
- Reconocer microfisuras y vacíos que pueden ser indicadores de procesos de degradación progresiva, como ataque interno por sulfatos o ciclos de humedad-sequedad.

- Determinar la homogeneidad del concreto y la calidad de la pasta en relación con los áridos, lo cual es clave para establecer la durabilidad.

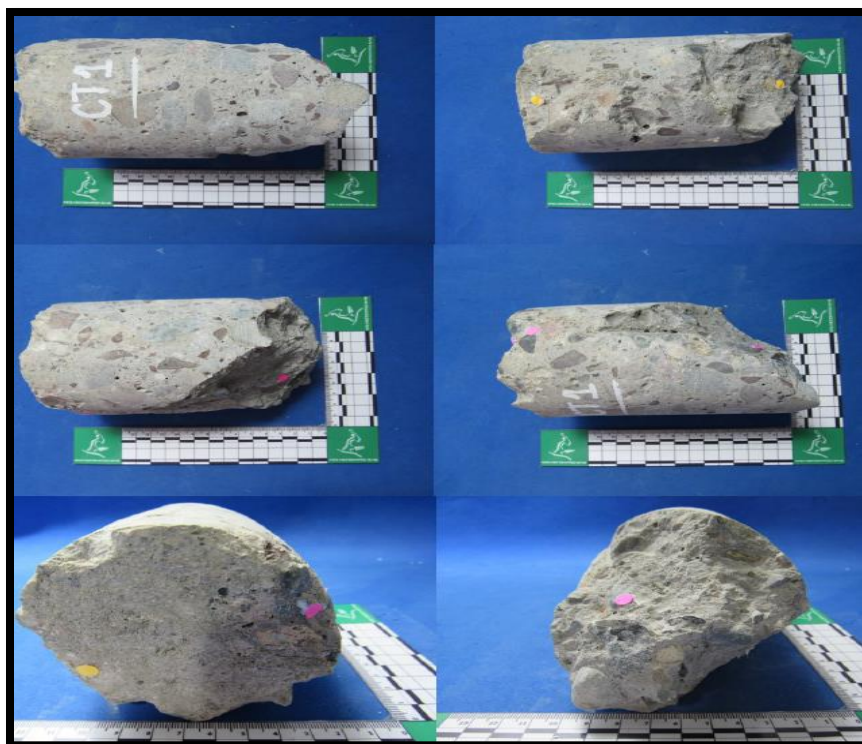
A continuación, se presentan las muestras analizadas:



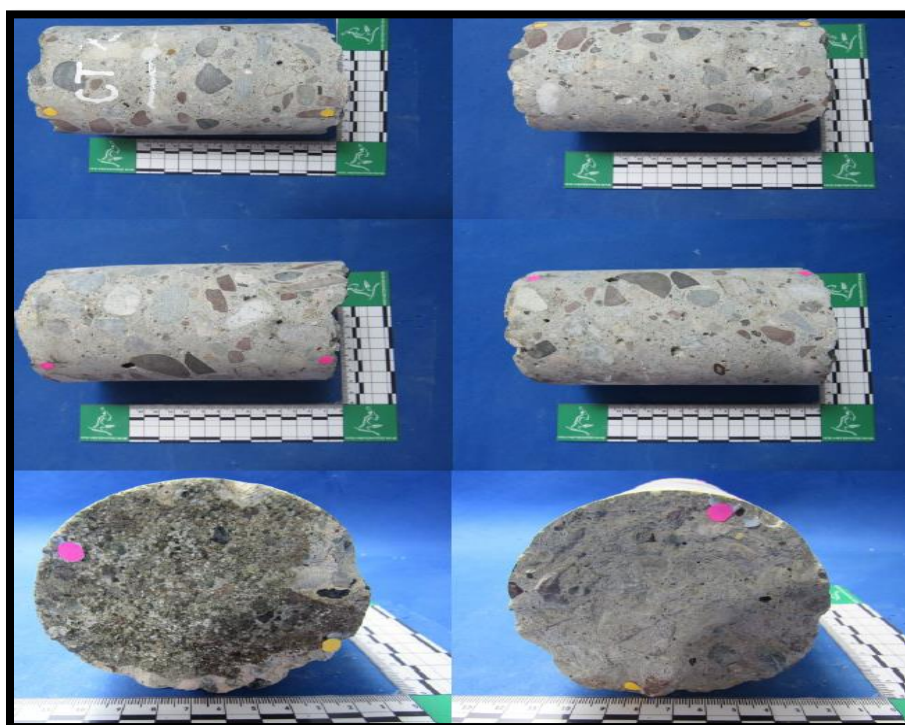
Fotografía No.20: Muestra N1, mostrando vistas laterales, la parte superior y parte inferior del núcleo.
Los puntos naranja y rosado muestran la orientación de los cortes – Fuente Informe Laboratorio.



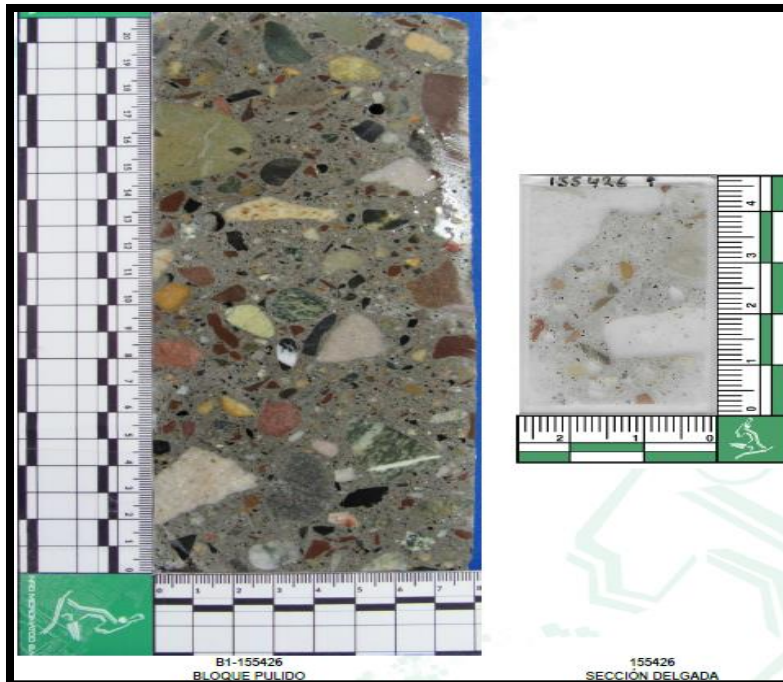
Fotografía No.21: Muestra N2, mostrando vistas laterales, la parte superior y parte inferior del núcleo.
Los puntos naranja y rosado muestran la orientación de los cortes – Fuente Informe Laboratorio.



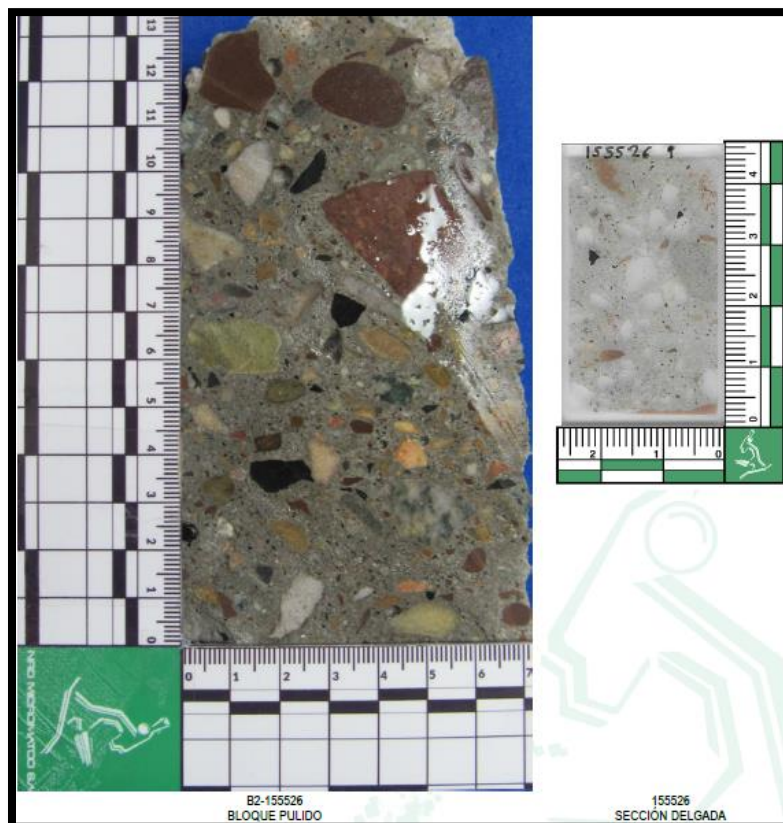
Fotografía No.22: Muestra N3, mostrando vistas laterales, la parte superior y parte inferior del núcleo.
Los puntos naranja y rosado muestran la orientación de los cortes – Fuente Informe Laboratorio.



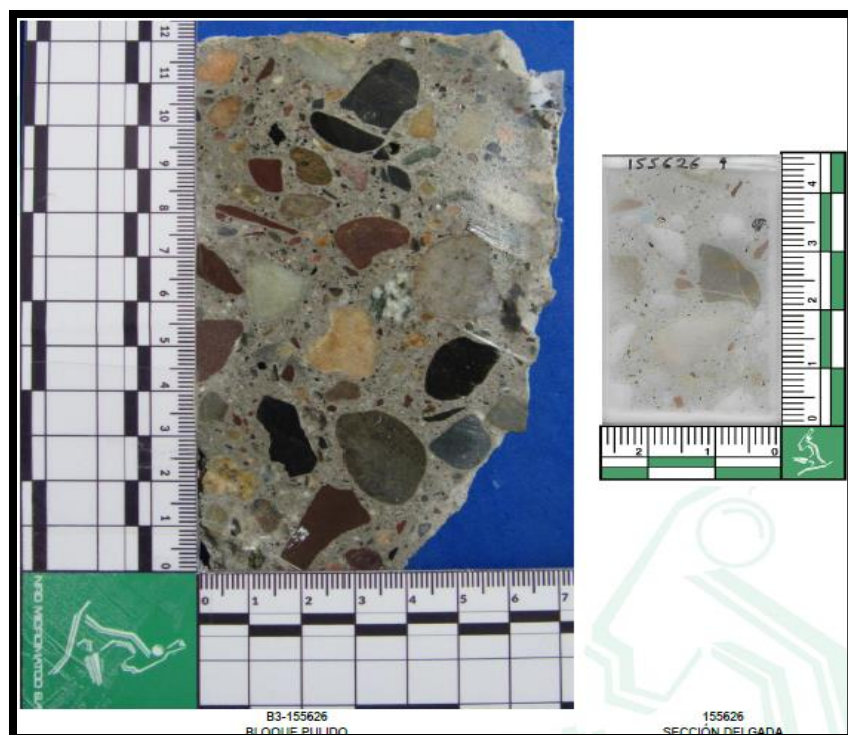
Fotografía No.23: Muestra N4, mostrando vistas laterales, la parte superior y parte inferior del núcleo.
Los puntos naranja y rosado muestran la orientación de los cortes – Fuente Informe Laboratorio.



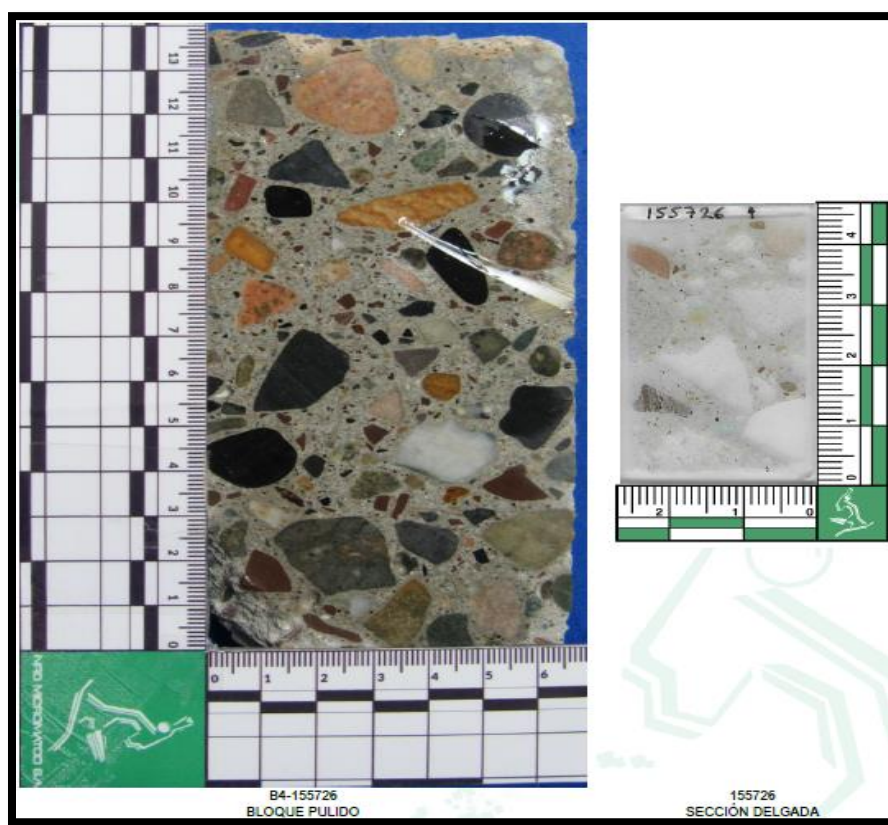
Fotografía No.24: Bloque semipulido y sección delgada de la muestra N1 – Fuente Informe Laboratorio.



Fotografía No.25: Bloque semipulido y sección delgada de la muestra N2 – Fuente Informe Laboratorio.



Fotografía No.26: Bloque semipulido y sección delgada de la muestra N3 – Fuente Informe Laboratorio.



Fotografía No.27: Bloque semipulido y sección delgada de la muestra N4 – Fuente Informe Laboratorio.

Metodología:

El presente informe de análisis petrográfico se realizó siguiendo los procedimientos propuestos en la norma ASTM C856-20 para la inspección petrográfica de concreto endurecido.

El análisis cualitativo y cuantitativo se efectuó a nivel microscópico mediante el examen de la sección delgada. El bloque semipulido se utilizó únicamente para el registro fotográfico. El análisis petrográfico de la sección delgada se llevó a cabo con microscopio de luz transmitida. Para la toma de imágenes se empleó una cámara Olympus modelo DP-12 adaptada al microscopio.

Se determinaron los rasgos importantes en cada sección delgada sobre líneas horizontales y verticales espaciadas 2,5 mm en el bloque y 1 mm en la sección:

SECCIÓN DELGADA	Volumen de constituyentes principales resultado del conteo de las secciones delgadas						
	MUESTRA	AGREGADOS* (%)	PASTA** (%)	VACÍOS (%)	MICROPOROSIDAD / MICROGRIETAS (%)	ADICIONES (%)	TOTAL (%)
	N1	66.5	29.0	1.2	0.2	3.0	100.0
	N2	64.2	28.5	0.6	0.8	5.8	100.0
	N3	67.9	30.5	0.6	0.9	0.0	100.0
	N4	62.6	34.7	1.2	1.4	0.0	100.0
<i>* Agregado grueso, fino y muy fino</i>							
<i>** Pasta cementante</i>							

Tabla No.4: Volumen de constituyentes principales – Fuente Informe Laboratorio.

El agregado grueso de las muestras N1, N2, N3 y N4 corresponde a grava de origen natural con formas subangulares a redondeadas y subdiscoidales a subprismoidales. El agregado fino también corresponde a arena de origen natural presenta formas subangulares a redondeados y subdiscoidales a subprismoidales (Ver tabla No.5).

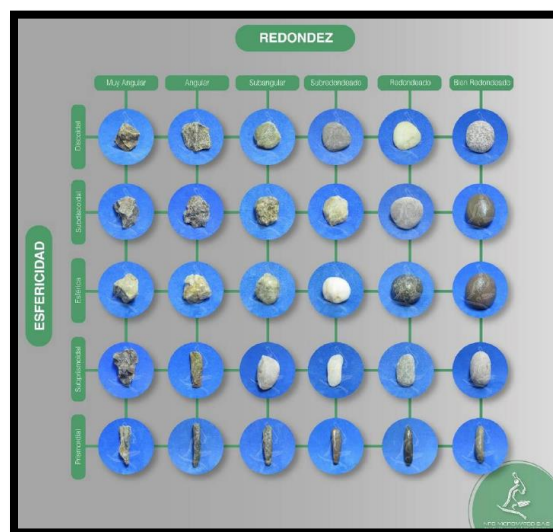


Figura No.9: Escala de redondez y esfericidad de Pettijohn *et al* – Fuente Informe Laboratorio.

✓ **Análisis de los Agregados:**

FORMA	El agregado grueso de las muestras N1, N2, N3 y N4 corresponde a grava de origen natural con formas subangulares a redondeadas y subdiscoidales a subprismoidales. El agregado fino también corresponde a arena de origen natural presenta formas subangulares a redondeados y subdiscoidales a subprismoidales (Ver figura 14).				
GRADACIÓN	En general en las muestras N1, N2, N3 y N4 se observa una buena gradación con un tamaño máximo de 1 ½" (N1 y N2) y 1" (N2 y N4). En la siguiente tabla se especifica el tamaño máximo nominal de los agregados en las muestras:				
	MUESTRA	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL (mm)	TAMIZ EQUIVALENTE (MATERIAL RETENIDO)		
	N1	33	1"		
	N2	25	1"		
	N3	21	¾"		
	N4	19	¾"		
DISTRIBUCIÓN	Los agregados están relativamente bien distribuidos en las muestras N1, N2, N3 y N4.				
CONTACTO PASTA – AGREGADO	En general los agregados en las muestras N1, N2, N3 y N4 se encuentran bien adheridos a la pasta cementante.				
COMPOSICIÓN	El agregado grueso corresponde principalmente a fragmentos de roca de origen sedimentario y metamórfico, principalmente areniscas finas, cherts, metareniscas, metagranitos y cuarcitas. Así mismo, el agregado fino está compuesto por fragmentos de cuarzo, entre otros. En la siguiente tabla se especifica la composición de los agregados en las muestras:				
	CARACTERÍSTICA DE LOS CONSTITUYENTES	MUESTRAS			
		N1	N2	N3	N4
		Porcentaje de Partículas			
	Cuarzo	26	17	14	7
	Arenisca fina	15	11	11	19
	Metarenisca	15	16	21	30
	Chert	12	4	1	
	Metagranito	11	7	12	13
	Arenisca lítica	8	14	4	
	Cuarzo policristalino	5		1	2
	Cuarcita	4	6	3	12
	Limolita	4	3	1	5
	Caliza arenosa	4		1	
	Mica	2	1		
	Caliza	2	1	27	4
	Cuarzo con extinción ondulante	2	10	2	2
	Plagioclasa		6	4	3
	Limolita ferruginosa		2		
	Opaco		1		1
	Arenisca calcárea			5	
	Gabro			2	
	Anfibol				1
	Feldespató potásico				2
	TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0
ALTERACIÓN	Se observa en algunos agregados la formación de algunos minerales arcillosos y presencia de óxidos producto de reacciones por meteorización.				
POROSIDAD	Se observa porosidad de tipo primaria en la mayoría de los granos de chert y areniscas.				
CONTAMINACIÓN	No se observa ninguna contaminación.				
OTRAS CARACTERÍSTICAS	No se observaron bordes de reacción ni evidencia de reacción de álcali – sílice (RAS). No se observaron revestimientos o incrustaciones perjudiciales.				

Tabla No.5: Análisis de los Agregados – Fuente Informe Laboratorio.

✓ **Análisis Vacíos y Microporos:**

CONTENIDO	Las muestras de concreto analizadas por estimación visual presentan menos del 2% de vacíos de aire. En la siguiente tabla se especifica el contenido de vacíos calculado por conteo de puntos en las secciones delgadas:				
	MUESTRA	CONTENIDO DE VACÍOS (%)			
		Sección delgada			
	N1	1.2			
	N2	0.6			
	N3	0.6			
	N4	1.2			
FORMA	Presentan formas esféricas a sub esférica a irregulares.				
DISTRIBUCIÓN	Es de resaltar que los vacíos se encuentran distribuidos en toda la masa de concreto, en cada una de las muestras.				
DEPÓSITOS SECUNDARIOS	Los vacíos están libres de depósitos secundarios en las muestras.				
MICROPOROS Y CAPILARES	La presencia de microporos y capilares varia en las muestras, como se puede observar en la siguiente tabla:				
		MUESTRAS			
		N1	N2	N3	N4
	Microporos y capilares (%)	0.2	0.1	0.3	0.2

4.6. GRIETAS Y MICROGRIETAS

MUESTRA N1	No se observa la presencia de grietas y microgrietas en la muestra.
MUESTRA N2	Se observa la presencia de microgrietas (0.6% en sección delgada) con distribución aleatoria, las cuales se encuentran atravesando la pasta de cemento, en la interface pasta agregado y en unos pocos casos algunos agregados. No se observaron depósitos secundarios en las grietas
MUESTRA N3	Se observa la presencia de microgrietas (0.6% en sección delgada) con distribución aleatoria, las cuales se encuentran atravesando la pasta de cemento, en la interface pasta agregado y en unos pocos casos algunos agregados. No se observaron depósitos secundarios en las grietas
MUESTRA N4	Se observa la presencia de microgrietas (1.2% en sección delgada) con distribución aleatoria, las cuales se encuentran atravesando la pasta de cemento, en la interface pasta agregado y en unos pocos casos algunos agregados. No se observaron depósitos secundarios en las grietas

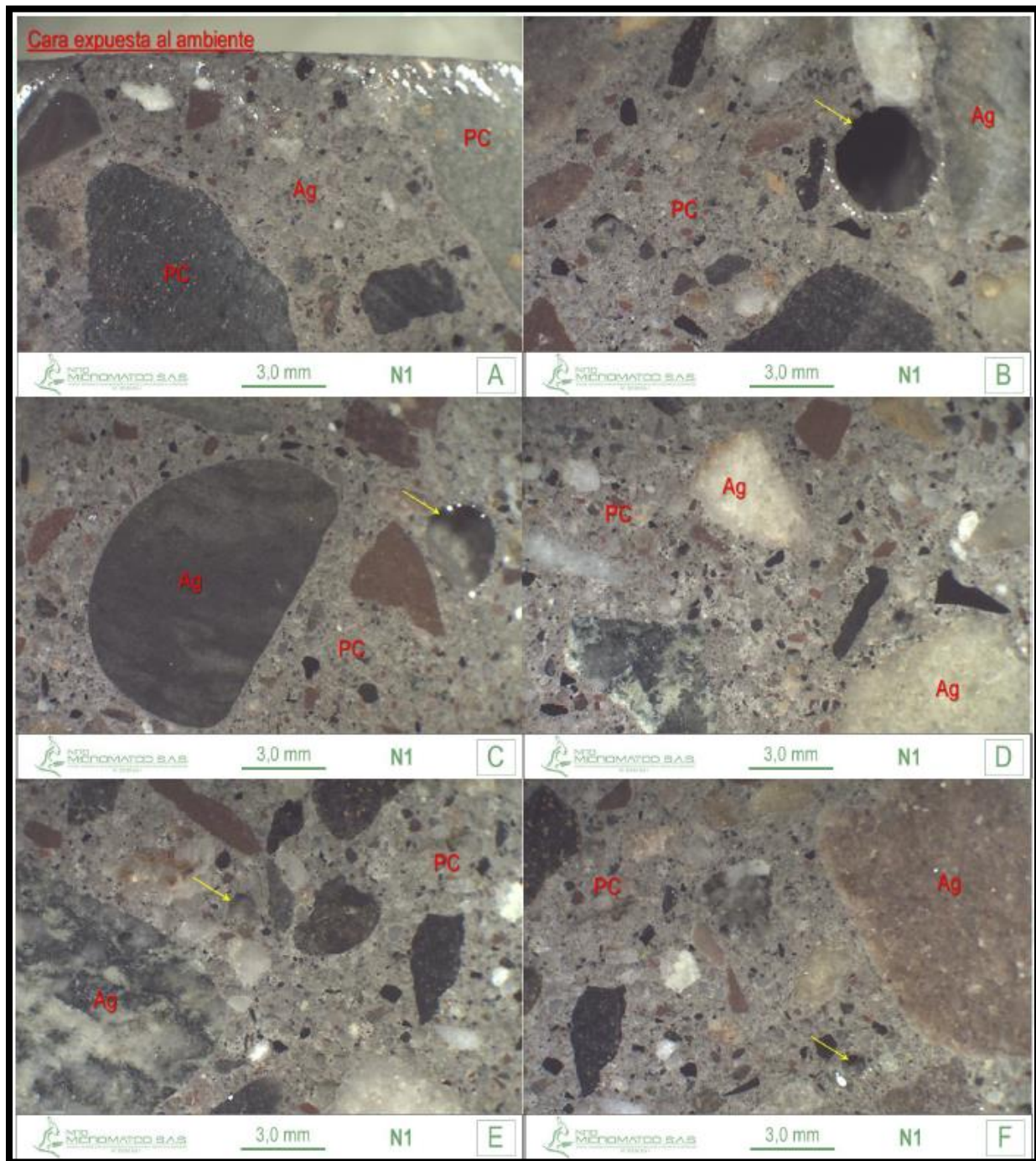
Tabla No.6: Análisis Vacíos y Microporos – Fuente Informe Laboratorio.

✓ **Análisis Pasta Cementante:**

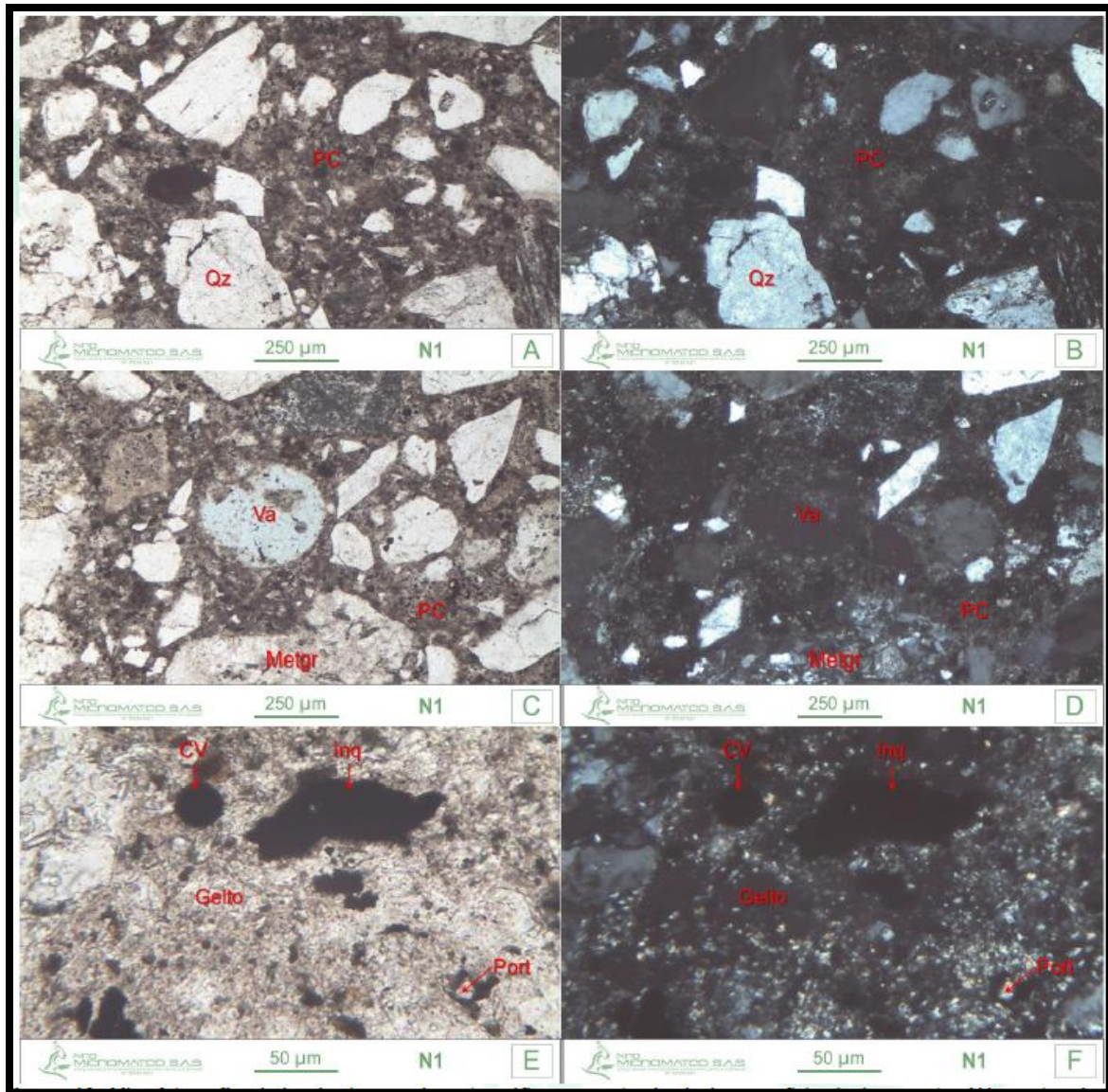
COLOR	En general, las propiedades físicas de la pasta como el color y el lustre son similares en todo el núcleo en las muestras N1 y N2 la pasta cementante presenta una tonalidad gris verdoso, mientras que en las muestras N3 y N4 se puede observar cambios de tonalidad desde la superficie de exposición al ambiente hacia el interior del núcleo. A nivel macroscópico se distinguen dos zonas; la primera hacia la parte más superior y hasta una profundidad de 4 mm (N3) y 6 mm (N4) la cual presenta una tonalidad gris amarilloso. En el resto del núcleo en cada una de las muestra N3 y N4 la pasta cementante presenta una tonalidad gris oliva claro. A nivel microscópico las muestras N1, N2, N3 y N4 exhiben un color marrón oscuro.																																																																									
DUREZA	En general en las muestras N1, N2, N3 y N4 la pasta cementante es moderadamente dura.																																																																									
LUSTRE	Opaco en todo el núcleo en las muestras N1, N2, N3 y N4.																																																																									
CARBONATACIÓN	No se observa carbonatación N1 y N2, mientras que en las muestras N3 y N4, debido a los cambios de tonalidad desde la superficie de exposición al ambiente hacia el interior del núcleo hasta una profundidad entre 4 mm (N3) y 6 mm (N4), se puede presumir que este cambio puede indicar que se trata del fenómeno de carbonatación, aunque no se descarta que se trate de la afectación de otro agente agresivo desde el exterior hacia el interior de las muestras.																																																																									
COMPOSICIÓN	En las muestras N1, N2, N3 y N4, los compuestos de cemento no hidratado e hidratado se encuentran distribuidos de manera irregular, pues se observa en ciertas áreas una distribución relativamente uniforme de gel de tobermorita con cristales bien formados de portlandita y en menor cantidad cristales de belita y clinker residual, en otras áreas se observa una concentración localizada de microcristales de portlandita. En la siguiente tabla se especifica la proporción de estas partículas en las muestras: <table><tr><th colspan="2" rowspan="3">CONSTITUYENTES</th><th colspan="4">COMPOSICIÓN DE LA PASTA CEMENTANTE EN LAS SECCIONES ANALIZADAS</th></tr><tr><th>N1</th><th>N2</th><th>N3</th><th>N4</th></tr><tr><th colspan="4">Porcentaje de Partículas</th></tr><tr><td rowspan="5">Minerales de cemento no hidratado</td><td>Alita</td><td>2.1</td><td>2.3</td><td>2.0</td><td>1.8</td></tr><tr><td>Belita</td><td>2.1</td><td>2.3</td><td>2.0</td><td>3.6</td></tr><tr><td>Ferrita</td><td>0.0</td><td>0.0</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr><tr><td>Clinker residual</td><td>16.7</td><td>6.8</td><td>14.3</td><td>17.9</td></tr><tr><td>SUBTOTAL</td><td>20.8</td><td>11.4</td><td>18.4</td><td>23.2</td></tr><tr><td rowspan="3">Minerales de cemento hidratado</td><td>Gel de Tobermorita</td><td>43.8</td><td>47.7</td><td>26.5</td><td>39.3</td></tr><tr><td>Portlandita</td><td>14.6</td><td>18.2</td><td>18.4</td><td>7.1</td></tr><tr><td>SUBTOTAL</td><td>58.3</td><td>65.9</td><td>44.9</td><td>46.4</td></tr><tr><td>Otro</td><td>Microcristales de portlandita</td><td>20.8</td><td>22.7</td><td>36.7</td><td>30.4</td></tr><tr><td colspan="2">TOTAL</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td></tr></table>						CONSTITUYENTES		COMPOSICIÓN DE LA PASTA CEMENTANTE EN LAS SECCIONES ANALIZADAS				N1	N2	N3	N4	Porcentaje de Partículas				Minerales de cemento no hidratado	Alita	2.1	2.3	2.0	1.8	Belita	2.1	2.3	2.0	3.6	Ferrita	0.0	0.0	0.0	0.0	Clinker residual	16.7	6.8	14.3	17.9	SUBTOTAL	20.8	11.4	18.4	23.2	Minerales de cemento hidratado	Gel de Tobermorita	43.8	47.7	26.5	39.3	Portlandita	14.6	18.2	18.4	7.1	SUBTOTAL	58.3	65.9	44.9	46.4	Otro	Microcristales de portlandita	20.8	22.7	36.7	30.4	TOTAL		100.0	100.0	100.0	100.0
CONSTITUYENTES		COMPOSICIÓN DE LA PASTA CEMENTANTE EN LAS SECCIONES ANALIZADAS																																																																								
		N1	N2	N3	N4																																																																					
		Porcentaje de Partículas																																																																								
Minerales de cemento no hidratado	Alita	2.1	2.3	2.0	1.8																																																																					
	Belita	2.1	2.3	2.0	3.6																																																																					
	Ferrita	0.0	0.0	0.0	0.0																																																																					
	Clinker residual	16.7	6.8	14.3	17.9																																																																					
	SUBTOTAL	20.8	11.4	18.4	23.2																																																																					
Minerales de cemento hidratado	Gel de Tobermorita	43.8	47.7	26.5	39.3																																																																					
	Portlandita	14.6	18.2	18.4	7.1																																																																					
	SUBTOTAL	58.3	65.9	44.9	46.4																																																																					
Otro	Microcristales de portlandita	20.8	22.7	36.7	30.4																																																																					
TOTAL		100.0	100.0	100.0	100.0																																																																					
ADICIONES	En las muestras N1 y N2 se observó la presencia de cenizas volantes y de inquemados (3,0% y 3,9% respectivamente) como adición a la mezcla. No se observa ningún tipo de adición a las muestras N3 y N4.																																																																									
REACCIONES DELETÉREAS	No se observa.																																																																									
PRESENCIA DE SULFATOS	No se observa.																																																																									
GRADO DE HIDRATACIÓN	No se determina por la distribución irregular de los compuestos de cemento hidratado en las muestras.																																																																									

Tabla No.7: Análisis Pastas Cementante – Fuente Informe Laboratorio.

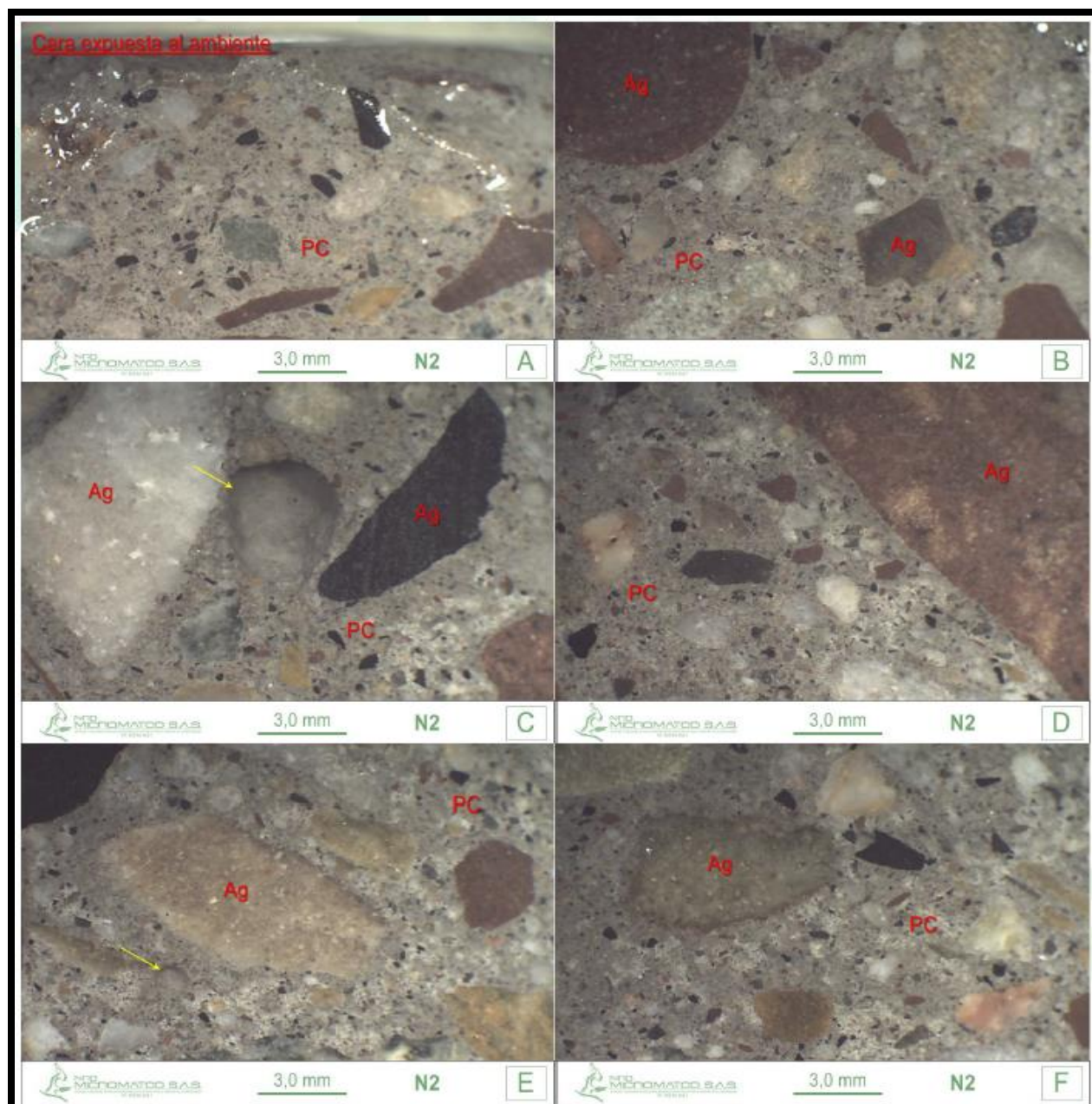
✓ **Análisis Microfotografías bajo el estéreo microscopio:**



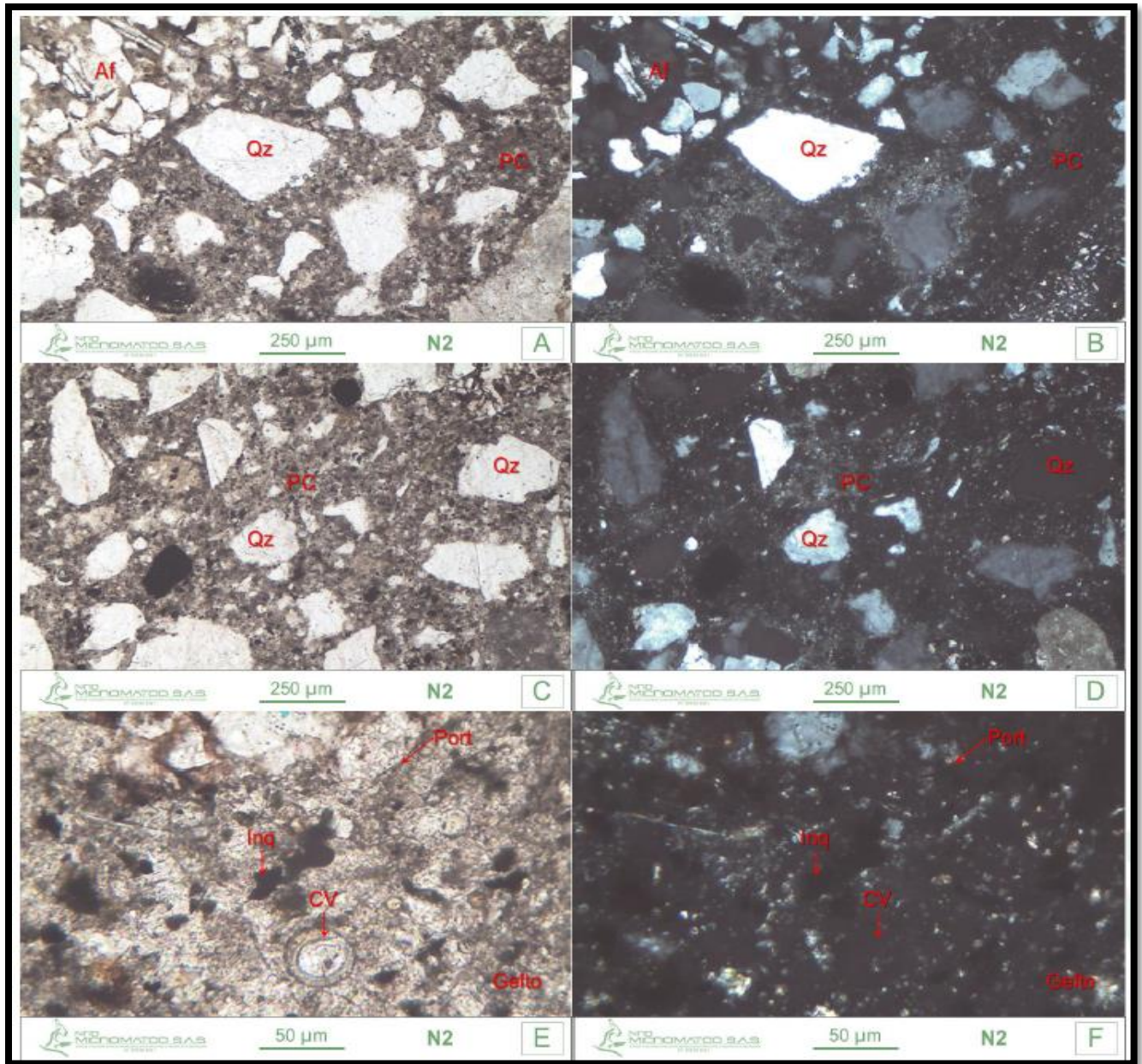
Fotografía No.28: Microfotografías bajo el estéreo microscopio en corte desde la superficie de la muestra N1. Se muestra la textura y color de la pasta cementante en la parte superior (**A y B**), en la parte central (**C y D**) e inferior (**E y F**) de la muestra. Se resalta en el concreto la distribución de los agregados gruesos y finos (Ag) y la textura y tonalidad gris verdoso de la pasta cementante (PC), además de la presencia de vacíos (flechas de color amarillo). (**Superficie húmeda para contraste: A, B, C, D, E y F**)
– Fuente Informe Laboratorio.



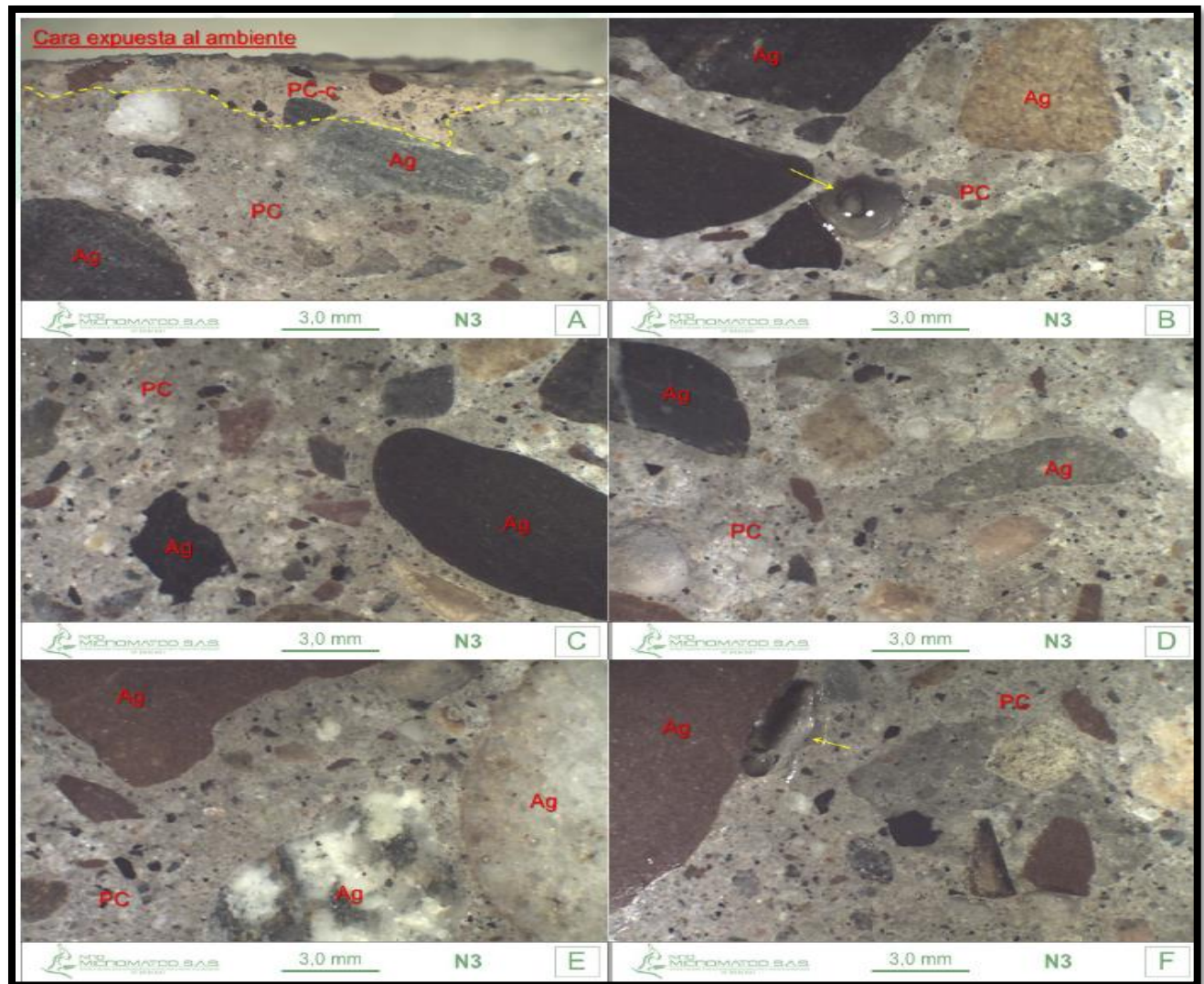
Fotografía No.29: Microfotografías bajo el microscopio petrográfico en corte desde la superficie de la muestra N1 mostrando la apariencia general donde se observa la composición de los agregados finos como el cuarzo (Qz), además de la presencia de vacíos (Va) y la textura de la pasta cementante (PC) con inquemados (Inq), cenizas volantes (CV), gel de tobermorita (Gelto) y portlandita (Por), vistas con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente, vistas con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente (A, C, E y B, D, F) – Fuente Informe Laboratorio.



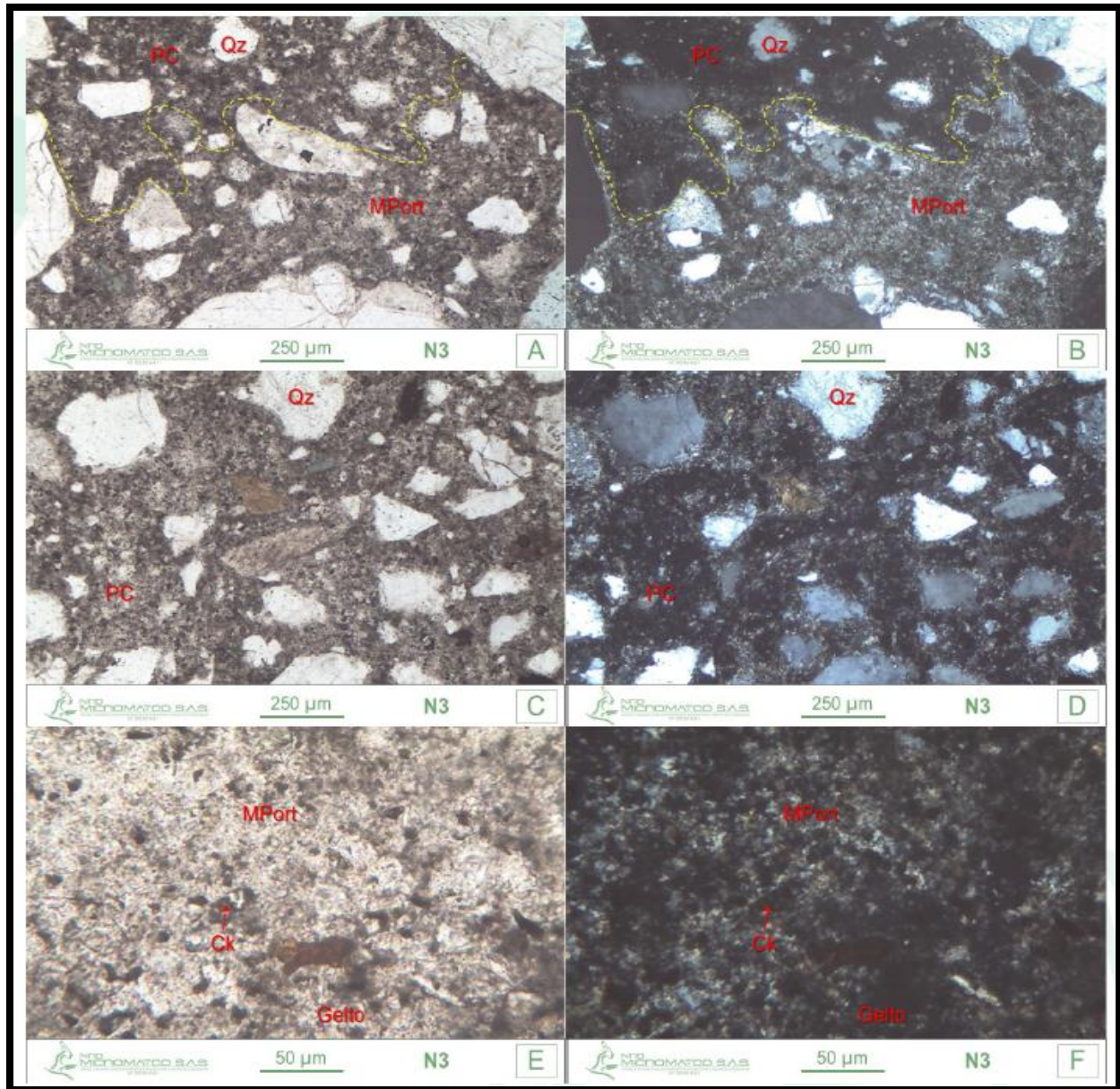
Fotografía No.30: Microfotografías bajo el estéreo microscopio en corte desde la superficie de la muestra N2. Se muestra la textura y color de la pasta cementante en la parte superior (**A y B**), en la parte central (**C y D**) e inferior (**E y F**) de la muestra. Se resalta en el concreto la distribución de los agregados gruesos y finos (Ag) y la textura y tonalidad gris verdoso de la pasta cementante (PC), además de la presencia de vacíos (flechas de color amarillo). (**Superficie húmeda para contraste: A, B, C, D, E y F**)
 – Fuente Informe Laboratorio.



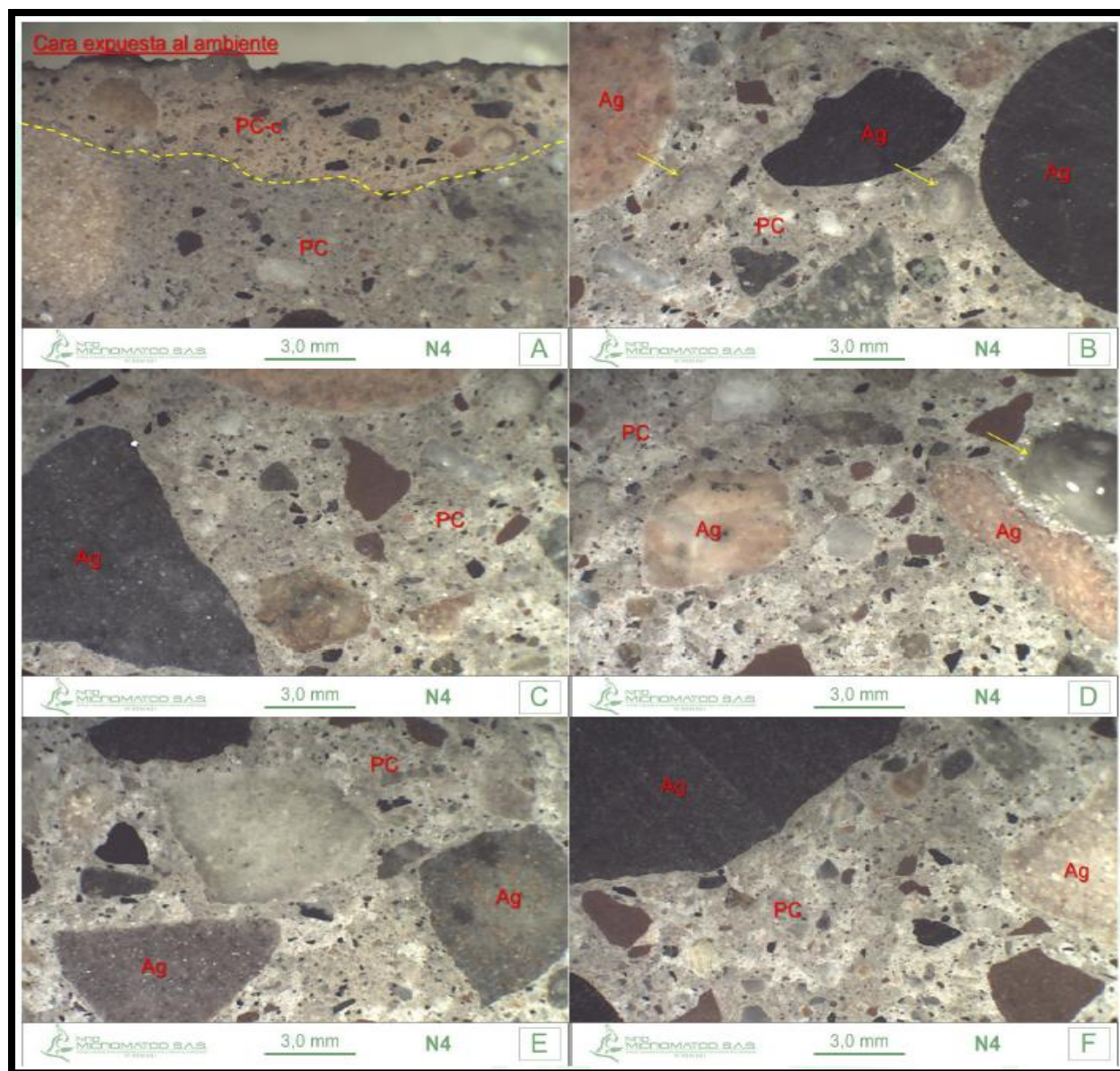
Fotografía No.31: Microfotografías bajo el microscopio petrográfico en corte desde la superficie de la muestra N2 mostrando la apariencia general donde se observa la composición de los agregados finos como el cuarzo (Qz) y arenisca fina (af), además de la textura de la pasta cementante (PC) con inquemados (Inq), cenizas volantes (CV), gel de tobermorita (Gelto) y portlandita (Por), vistas con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente, vistas con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (A, C, E y B, D, F) – Fuente Informe Laboratorio.



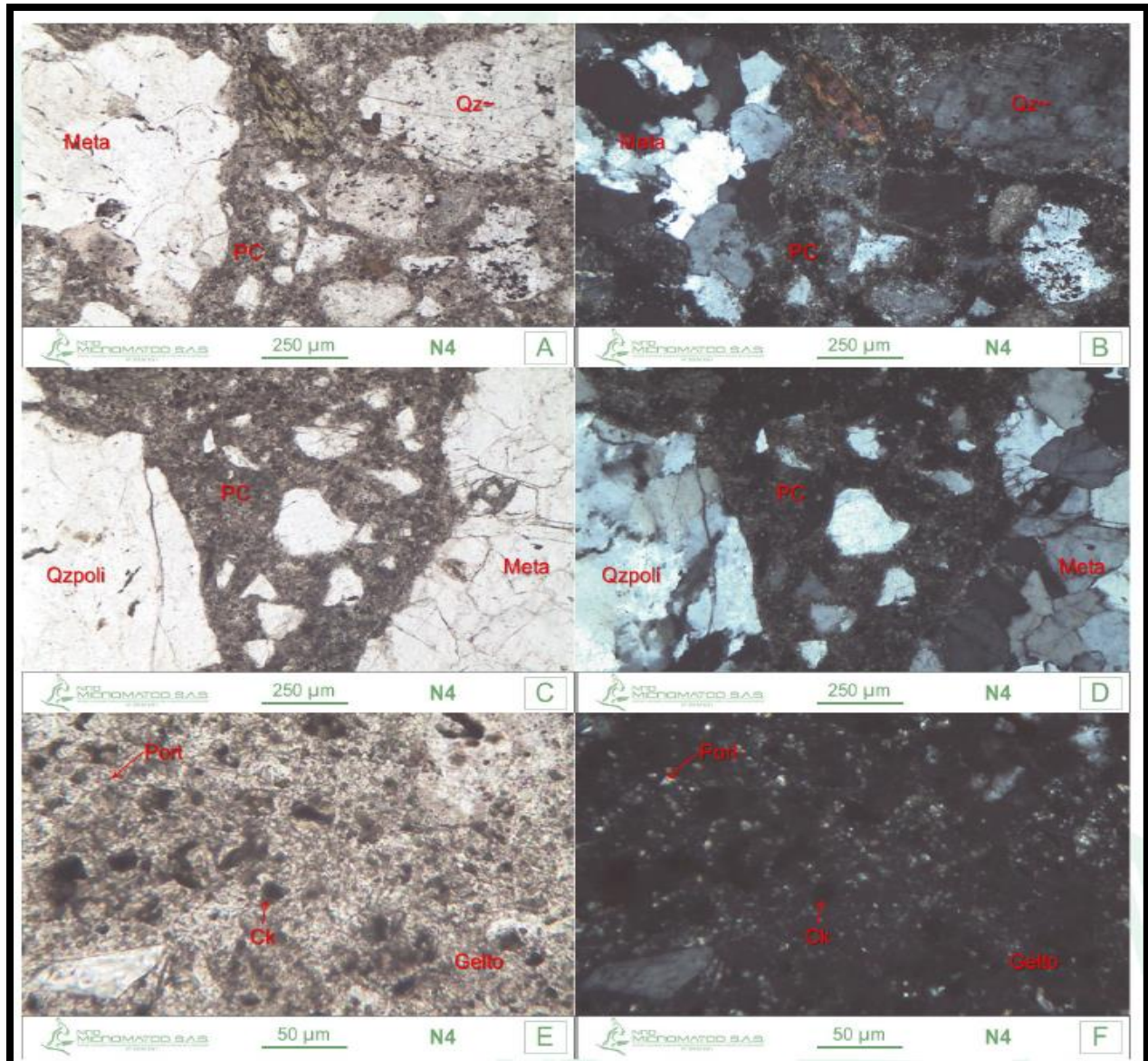
Fotografía No.32: Microfotografías bajo el estéreo microscopio en corte desde la superficie de la muestra N3. Se muestra la textura y color de la pasta cementante en la parte superior (**A y B**), en la parte central (**C y D**) e inferior (**E y F**) de la muestra. Se resalta en el concreto la distribución de los agregados gruesos y finos (Ag) y la textura y tonalidad gris amarilloso de la pasta cementante en la zona más expuesta de la muestra indicando que se encuentra afectada por el fenómeno de carbonatación (PC-c) con una profundidad máxima de 4 mm (línea punteada amarilla) y la textura y tonalidad gris verdoso de la pasta cementante en el resto de la muestra (PC), además de la presencia de vacíos (flechas de color amarillo). (**Superficie húmeda para contraste: A, B, C, D, E y F**) – Fuente Informe Laboratorio.



Fotografía No.33: Microfotografías bajo el microscopio petrográfico en corte desde la superficie de la muestra N3 mostrando la apariencia general donde se observa la composición de los agregados finos como el cuarzo (Qz). Además, se detalla la textura de la pasta cementante con sectores en los que se observa una distribución relativamente uniforme compuestos de cemento hidratado (PC) con clinker residual (Ck), gel de tobermorita (Gelto) y otros sectores con una mayor proporción de microcristales de portlandita (Mport) (línea punteada amarilla), vistas con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (A, C, E y B, D, F) – Fuente Informe Laboratorio.



Fotografía No.34: Microfotografías bajo el estéreo microscopio en corte desde la superficie de la muestra N4. Se muestra la textura y color de la pasta cementante en la parte superior (**A y B**), en la parte central (**C y D**) e inferior (**E y F**) de la muestra. Se resalta en el concreto la distribución de los agregados gruesos y finos (Ag) y la textura y tonalidad gris amarilloso de la pasta cementante en la zona más expuesta de la muestra indicando que se encuentra afectada por el fenómeno de carbonatación (PC-c) con una profundidad máxima de 6 mm (línea punteada amarilla) y la textura y tonalidad gris verdoso de la pasta cementante en el resto de la muestra (PC), además de la presencia de vacíos (flechas de color amarillo). (**Superficie húmeda para contraste: A, B, C, D, E y F**) – Fuente Informe Laboratorio.



Fotografía No.35: Microfotografías bajo el microscopio petrográfico en corte desde la superficie de la muestra N4 mostrando la apariencia general donde se observa la composición de los agregados finos como el Metarenisca (Meta), cuarzo policristalino (Qzpoli) y cuarzo con extinción ondulante (Qz~). Además, se detalla la textura de la pasta cementante (PC) con clinker residual (Ck), gel de tobermorita (Gelto) y portlandita (Port), vistas con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (**A, C, E y B, D, F**) – Fuente Informe Laboratorio.

11. Conclusiones

- ✓ La diferencia del 5% entre la resistencia obtenida en el ensayo de núcleos (20 Mpa) y la resistencia de diseño (21 Mpa), debe interpretarse dentro del rango de variabilidad esperada en este tipo de pruebas. Este margen no obedece a una pérdida real de capacidad estructural, sino que responde principalmente a factores asociados al proceso de muestreo y manipulación del espécimen, tales como la perforación, el transporte, el aserrado y la preparación de las bases.

En la práctica de la patología estructural, es ampliamente reconocido que la extracción de un único núcleo puede introducir incertidumbre estadística, ya que no refleja la totalidad del comportamiento del elemento ni la heterogeneidad del concreto en masa. Además, las tensiones inducidas durante la perforación y el posible microdaño por vibración o manipulación pueden afectar marginalmente la resistencia medida.

Por lo tanto, la discrepancia registrada se considera metodológica y no estructural. El concreto mantiene un desempeño acorde con los parámetros de diseño, y la variación observada se encuentra dentro de los límites de tolerancia establecidos por la normativa (INV E 418-13 y equivalentes internacionales).

Desde la perspectiva patológica, este hallazgo confirma que el material conserva su capacidad resistente funcional, y que las diferencias responden más a la naturaleza del ensayo puntual que a un deterioro generalizado de la estructura.

- ✓ En el análisis del ensayo de compresión de la muestra P2 no se revela fisuración interna significativa en el núcleo.
- ✓ No se observa segregación en las muestras.
- ✓ Se observa en algunos agregados la formación de algunos minerales arcillosos y presencia de óxidos producto de reacciones por meteorización.
- ✓ En general en las muestras el concreto es duro y compacto sin ningún tipo de contaminación.
- ✓ El agregado grueso de las muestras corresponde a grava de origen natural con formas subangulares a redondeadas y subdiscoidales a subprismoidales. El agregado fino también corresponde a arena de origen natural presenta formas subangulares a redondeados y subdiscoidales a subprismoidales; las cuales coinciden con la descripción geológica de la fuente de materiales del Proyecto.

- ✓ En general en las muestras N1, N2, N3 y N4 se observa una buena gradación con un tamaño máximo de 1 ½" (N1 y N2) y 1" (N3 y N4).y con un tamaño máximo nominal observado entre 19 mm y 33 mm que equivale al tamiz ¾" y 1".
- ✓ Por otra parte, el agregado grueso corresponde principalmente a fragmentos de roca origen sedimentario y metamórfico, principalmente areniscas finas, cherts, metareniscas, metagranitos y cuarcitas. Así mismo, el agregado fino está compuesto por fragmentos de cuarzo, entre otros; las cuales coinciden con la descripción geológica de la fuente de materiales del Proyecto.
- ✓ En cuanto al contacto de los agregados con la pasta de cemento, en general se encuentran bien adheridos a la pasta cementante.
- ✓ Las muestras de concreto analizadas por estimación visual presentan menos del 2% de vacíos de aire. Es de resaltar que los vacíos se encuentran distribuidos en toda la masa de concreto, en cada una de las muestras. Así mismo, los vacíos están libres de depósitos secundarios.
- ✓ En las muestras N2, N3 y N4 se observó la presencia de microgrietas (0,6%, 0,6% y 1,2% respectivamente) con distribución aleatoria, las cuales se encuentran atravesando la pasta de cemento, en la interface pasta agregado y en unos pocos casos algunos agregados. No se observaron depósitos secundarios en las grietas.
- ✓ No se observa carbonatación N1 y N2 (interior de los núcleos), mientras que en las muestras N3 y N4, debido a los cambios de tonalidad desde la superficie de exposición al ambiente hacia el interior del núcleo hasta una profundidad entre 4 mm (N3) y 6 mm (N4), se puede presumir que este cambio puede indicar que se trata del fenómeno de carbonatación, aunque no se descarta que se trate de la afectación de otro agente agresivo desde el exterior hacia el interior de las muestras.
- ✓ En las muestras N1 y N2 se observó la presencia de cenizas volantes y de inquemados (3,0% y 3,9% respectivamente) como adición a la mezcla. No se observa ningún tipo de adición a las muestras N3 y N4, lo cual coincide con los parámetros de diseño y ejecución de obra.
- ✓ Las muestras no presentan presencia de sulfatos.
- ✓ Al momento del presente análisis, las muestras examinadas no evidencian la presencia de reacciones deletéreas internas que comprometan la interacción entre los agregados y la pasta cementante, tales como la reacción álcali-agregado (RAA) o procesos expansivos asociados. Este hallazgo es particularmente relevante, ya que confirma que las medidas de mitigación implementadas en la etapa constructiva mediante la incorporación de cenizas han resultado efectivas en controlar la reactividad potencial de los áridos.

✓

Tras 12 años de operación continua de la Central Hidroeléctrica, el concreto mantiene un comportamiento estable, sin manifestaciones de geles expansivos, microfisuración anómala ni productos secundarios de hidratación que pudieran indicar procesos de deterioro progresivo. La ausencia de patologías asociadas a la RAA valida la estrategia de diseño prestacional aplicada en la obra, demostrando que la adición de materiales puzolánicos no solo redujo la disponibilidad de álcalis libres, sino que también mejoró la durabilidad global del sistema cementante.

Desde la perspectiva patológica, este resultado aporta evidencia de que el concreto conserva su integridad microestructural y funcional, lo cual se traduce en una mayor confiabilidad de la estructura frente a las sollicitaciones hidráulicas y ambientales. No obstante, se recomienda mantener un programa de monitoreo periódico mediante ensayos complementarios (microscopía petrográfica, difracción de rayos X, análisis químico de álcalis) para confirmar la estabilidad a largo plazo y anticipar cualquier manifestación tardía de procesos expansivos.

✓

En el análisis de las muestras P2 y N1, se confirma la ausencia de fisuras y microfisuras, lo cual constituye un indicador sólido de la efectividad de la estrategia de mitigación con ceniza volante implementada durante la etapa constructiva. Este resultado valida que la incorporación de material puzolánico logró reducir la disponibilidad de álcalis libres en la pasta cementante, limitando la posibilidad de formación de geles expansivos asociados a la reacción álcali-agregado (RAA). Después de más de una década de operación, el concreto en estas zonas mantiene una microestructura estable y homogénea, sin evidencias de procesos deletéreos internos.

Por el contrario, las muestras N3 y N4, extraídas en el Campamento, donde no se aplicó la mitigación con ceniza, presentan microfisuración incipiente aunque sin presencia de geles de sílice. Este hallazgo es relevante desde la perspectiva patológica, ya que sugiere un estado inicial de deterioro microestructural posiblemente asociado a tensiones internas por humedad, ciclos térmicos o reactividad latente de los áridos. La ausencia de gel indica que el proceso expansivo aún no se ha desarrollado plenamente, pero la microfisuración observada constituye una señal temprana que debe ser monitoreada para evitar su progresión hacia un daño más severo.

La comparación entre ambos escenarios (con y sin mitigación) aporta evidencia concluyente de que la estrategia de diseño prestacional con ceniza volante fue efectiva, asegurando la durabilidad del concreto en las zonas críticas de la Central. Asimismo, pone de manifiesto la importancia de las medidas preventivas en la etapa constructiva, ya que las estructuras sin tratamiento presentan síntomas iniciales de vulnerabilidad frente a la RAA.

- ✓ Es pertinente aclarar que el estudio presentó una limitación en la cantidad de muestras extraídas, debido a que la Empresa propietaria del Proyecto no autorizó un número mayor de núcleos de concreto. Esta restricción condiciona el alcance estadístico de los resultados, ya que reduce la representatividad frente a la totalidad de las estructuras. Sin embargo, los ensayos realizados aportan información valiosa sobre las propiedades mecánicas y físicas del material, permitiendo establecer parámetros de resistencia, grado de carbonatación y evidencias de procesos de degradación como reacciones álcali-agregado, lixiviación o microfisuración.

A pesar de la restricción, se destaca la importancia de haber obtenido resultados confiables en un Proyecto de alta relevancia para el Sistema Energético Nacional. Estos hallazgos constituyen una base técnica para la gestión de activos críticos, orientada a garantizar la durabilidad del concreto, la integridad estructural y la seguridad operacional de la infraestructura. En consecuencia, se continuará con la implementación de estrategias de monitoreo y mantenimiento, enmarcadas en la gestión de riesgos y en la política de seguridad de presas, asegurando beneficios tanto para la Empresa como para el País.

- ✓ Por motivos de alcance y limitaciones de tiempo en la ejecución de los ensayos por parte del laboratorio contratado, no fue posible determinar las propiedades químicas de las muestras analizadas.
- ✓ Uno de los objetivos específicos del estudio consiste en aportar evidencia técnica de investigación que respalde la implementación de un protocolo de inspección periódica en las estructuras principales de los Proyectos de generación de la compañía. En este sentido, se efectuó la presentación de resultados a la Empresa, lo cual derivó en la adopción de un plan sistemático de inspecciones patológicas focalizado en las estructuras críticas. Dicho plan se fundamenta en criterios de ingeniería de materiales y patología estructural, orientados a la identificación temprana de procesos de deterioro, la caracterización del estado actual del concreto y la definición de estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo.

Es importante precisar que, por razones de confidencialidad asociadas a los sistemas internos de monitoreo, no es posible divulgar el detalle de este monitoreo periódico. No obstante, la implantación de este protocolo constituye un avance significativo en la gestión de activos críticos, al establecer una línea base de seguimiento técnico que permitirá evaluar tendencias de degradación, garantizar la integridad estructural y fortalecer la confiabilidad operativa de las centrales hidroeléctricas de la compañía.

- ✓ Se reconoce y agradece el apoyo brindado por la Empresa del Sector Eléctrico Colombiano, cuya identidad se mantiene reservada por motivos de confidencialidad.

La colaboración de esta entidad fue fundamental para el acceso a la información técnica y a las estructuras objeto de estudio, permitiendo la ejecución de los ensayos y la recopilación de datos relevantes para la investigación.

El aporte de esta colaboración se considera esencial para fortalecer la investigación en patología de materiales, consolidar estrategias de mantenimiento preventivo y aportar al conocimiento técnico que respalda la confiabilidad operativa de las Centrales Hidroeléctricas del País.

12. Referencias Bibliográficas

- ACI Committee 201. (2016). *Guide to Durable Concrete* (ACI 201.2R-16). American Concrete Institute.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Toxement. (2020). *Guía sobre la reactividad álcali-agregado en concretos*. https://www.toxement.com.co/media/4160/qui-a_reactividad-alkali-comprimido.pdf.
- Campos, I. J. (2024). Optimización de concreto hidráulico con puzolana de mazorca y ceniza de eucalipto. *Obras y Proyectos*, (36). https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132024000200074.
- Melo Jiménez, L. J. (2014). *Reactividad álcali-agregado (RAA): experiencias en presas colombianas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52819>.
- Rivera Delgado, J. I. (2021). *Estudio de la reacción álcali-agregado en concreto: caso de estudio en infraestructura vial* [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Uniandes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/438c8521-0615-4bd1-8040-030702eb9366>.
- Thomas, M. D. A. (2011). The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1224–1231. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.003>.
- Toxement. (2020). *Patologías del concreto: Reacción álcali-agregado*. Boletín técnico.
- Silva, C. S., Monteiro, E. B., Santos, M. S. C., Andrade, T. W. C. O., Soares, W. A., & Neves, D. C. M. (2021). Procedimientos de recuperación en fundaciones por problemas de reacción álcali/agregado. Investigación documental. *Revista ALCONPAT*, 11(2), 183–198. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.499>.
- Zoilo, C., Akasaki, J., Fioriti, C., Bernardes, H. de M., Salles, F. M., & Pereira, A. (2013). Estudio cualitativo sobre fisuración debida a la reacción álcali-sílice en el forjado de la represa hidráulica de Jaguari. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(3), 263–274. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732013000300005>.
- Fournier, B., & Bérubé, M. A. (2000). Alkali-aggregate reaction in concrete: A review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(2), 226–245.

- Fournier, B., Bérubé, M. A., Thomas, M. D. A., & Folliard, K. J. (2005). Mitigation of the effect of alkali-silica reaction in concrete structures: A review. *IBRACON Materials Journal*, 1(1), 35–42.
- Cavalcante-da Silva, C. F., Barreto-Monteiro, E. C., & Duarte-Gusmão, A. (2011). *Análisis de métodos de prevención de la reacción álcali-agregado: Análisis petrográfico y método acelerado para barras de mortero*. Ingeniería, 15(1), 9–17. Universidad Autónoma de Yucatán. Disponible en Redalyc.
- Moscote Gil, J. P., & Torres Ortega, R. J. (2024). *Reacción álcalis-agregados en los concretos hidráulicos: Una aproximación con materiales de la región Caribe colombiana* [Trabajo de grado, Universidad de Cartagena]. Repositorio Institucional Universidad de Cartagena. Consulta el documento completo.
- Sánchez, M., & Gutiérrez, R. (2018). *Evaluación de la reactividad potencial de agregados frente a la reacción álcali-agregado mediante métodos acelerados*. Revista Ingeniería y Universidad, 22(2), 45–58. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu22-2.erap>.
- López, J. A., & Martínez, F. (2016). *Influencia de la reacción álcali-agregado en la durabilidad de estructuras de concreto en ambientes tropicales*. Revista ALCONPAT, 6(3), 234–248. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i3.174>.
- Torres, C., & Ramírez, D. (2020). *Caracterización petrográfica de agregados y su relación con la expansión por reacción álcali-agregado*. Revista de la Construcción, 19(1), 75–84. <https://doi.org/10.7764/RDLC.19.1.75>.
- ASTM International. (2019). *Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Reaction in Concrete* (ASTM C1778-19a). <https://www.astm.org/c1778-19a.html>.
- Valdez Tamez, P. L., Fajardo San Miguel, G., Hermosillo Mendoza, R., & Flores Vivian, I. (2008). *Efectividad de las puzolanas naturales para reducir la expansión álcali-agregado*. Ciencia UANL, 11(3), 256–263.
- Lu, D., Fournier, B., & Grattan-Bellew, P. E. (2006). Evaluation of accelerated test methods for determining alkali-silica reactivity of concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 28, 546–554.
- Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD). (1992). *Instrumentación de presas de tierra y de enrocamiento: Boletín 79*. Comité Español de Grandes Presas.
- Fournier, B. (2010). *Alkali-aggregate reactions in concrete – A review*. ICOLD.
- Coombes, L. H. (1985). *Val de la Mare Dam, Jersey, Channel Islands*. Proceedings of the 3rd International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), Institution of Civil Engineers.
- ACI Committee 201. (2016). *Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R-16)*. American Concrete Institute.
- Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD). (2025). *Monografía sobre reacciones expansivas en presas de hormigón*. Madrid: SPANCOLD.