

Diagnóstico y Clasificación de Patologías Constructivas en la PTAP de Paz de Ariporo (Casanare) para la Formulación de Intervenciones Prioritarias

Autor 1: María Camila Barrera Moreno¹

Autor 2: Diego Fernando Gómez Vargas²

Tutor: Walter Mauricio Barreto Castillo³

¹ *Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
maria.barrera@usantotomas.edu.co*

² *Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
diegogomezv@usantotomas.edu.co*

³ *Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
walterbarreto@usta.edu.co*

Resumen

El deterioro de las estructuras hidráulicas en las plantas de tratamiento de agua potable representa un riesgo para la continuidad operativa y calidad del servicio, es por ello que en el presente estudio se diagnostica y clasifica lesiones de erosión causadas por abrasión en la cámara de filtración de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) del municipio de Paz de Ariporo (Casanare), y evalúa la viabilidad técnica de alternativas de intervención reportadas en la literatura técnica. La investigación se desarrolló bajo un enfoque descriptivo y analítico que incluyó revisión normativa y técnica, inspección visual, levantamiento de daños y análisis del mecanismo de deterioro, por medio de los cuales se realizó una evaluación comparativa de técnicas de reparación analizando su aplicabilidad en condiciones de operación real, y determinando cuál de ellas representa la alternativa más viable para el caso estudiado.

Palabras clave: erosión por abrasión, patología del concreto, cámara de filtración, PTAP, durabilidad, intervención estructural.

Abstract

Hydraulic structure deterioration in drinking water treatment plants represents a significant risk to operational continuity and service quality. Therefore, this study diagnoses and classifies abrasion-induced erosion damage in the filtration chamber of the Drinking Water Treatment Plant (DWTP) located in the municipality of Paz de Ariporo (Casanare), and evaluates the technical feasibility of intervention alternatives reported in the technical literature. The research was conducted under a descriptive and analytical approach, including regulatory and technical review, visual inspection, damage mapping, and assessment of deterioration mechanisms. Based on these procedures, a comparative evaluation of repair techniques was performed, analyzing their applicability under actual operating conditions and determining which alternative constitutes the most technically viable solution for the case under study.

Keywords: abrasion erosion, concrete pathology, hydraulic structures, durability.

Introducción

Las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) son infraestructuras esenciales para garantizar el acceso al agua segura, por lo que su desempeño estructural y operativo resulta determinante para la continuidad del servicio. Estas instalaciones operan bajo condiciones exigentes, caracterizadas por el contacto permanente con el agua y la presencia de partículas sólidas en suspensión, lo que incrementa la susceptibilidad de sus elementos de concreto a procesos de deterioro.

En estructuras hidráulicas como canales, tanques y cámaras de filtración, uno de los mecanismos de deterioro más recurrentes es la erosión por abrasión, originada por la acción mecánica del flujo hidráulico con sedimentos. Este proceso se manifiesta mediante la pérdida progresiva de la pasta cementicia superficial, la exposición del agregado pétreo y el aumento de la rugosidad, afectando la durabilidad del concreto y las condiciones hidráulicas del sistema. A diferencia de otros mecanismos de degradación, la abrasión suele evolucionar de manera homogénea y sin fisuración visible en sus etapas iniciales, lo que puede conducir a la subestimación del daño.

En el contexto colombiano, muchas plantas de tratamiento de agua potable operan con infraestructuras que superan su vida útil de diseño, enfrentando limitaciones presupuestales que dificultan intervenciones integrales. Esta situación hace necesario el desarrollo de estudios aplicados que permitan diagnosticar técnicamente las patologías estructurales y formular alternativas de intervención viables sin comprometer la continuidad del servicio.

En cuanto al contexto de las PTAP municipales, la operación continua de las unidades limita tanto la aplicación de métodos de evaluación invasivos como la ejecución de intervenciones que requieran la suspensión del servicio, lo que representa un desafío técnico para el diagnóstico y tratamiento de este tipo de lesiones. Esta situación es particularmente relevante en infraestructuras con mantenimiento preventivo limitado y alta demanda operativa.

El presente estudio aborda como caso de análisis la cámara de filtración de la Planta de Tratamiento de Agua Potable del municipio de Paz de Ariporo, Casanare, donde se ha identificado un deterioro superficial del concreto asociado a erosión por abrasión. El trabajo se desarrolla desde un enfoque patológico, orientado a caracterizar las manifestaciones del daño, analizar el mecanismo de deterioro predominante y evaluar sus principales causas.

A partir de este diagnóstico, se revisan y comparan técnicas de intervención reportadas en la literatura técnica para estructuras hidráulicas sometidas a abrasión, con el fin de proponer alternativas técnicamente viables y compatibles con condiciones de operación continua, que contribuyan a la recuperación funcional y a la extensión de la vida útil de la estructura.

Planteamiento del problema

La planta de Tratamiento de agua potable (PTAP) en Paz de Ariporo, ubicada al norte del departamento de Casanare, constituye una infraestructura crucial para el abastecimiento de agua de la población local. Esta al ser usada para la prestación de un servicio público, ha sido sometida a una operación continua exigente, lo que ha influido de manera directa junto con el constante contacto al agua y la presencia de partículas sólidas con el estado de los elementos estructurales.

Lo anterior es principalmente evidenciado en la cámara de filtración, por ende, se ha identificado la presencia de una lesión patológica caracterizada por la erosión del concreto y la

exposición de los agregados pétreos, manifestada inicialmente mediante la pérdida de la pasta cementicia superficial, dando lugar al afloramiento progresivo del agregado grueso y al incremento de la rugosidad de las superficies en contacto con el flujo hidráulico.

La exposición de pétreos en los muros de la cámara de filtración de una estructura hidráulica puede generar consecuencias, lesiones más graves, como la aceleración del desgaste del concreto, la alteración de las condiciones hidráulicas del proceso de filtración y aumento en la frecuencia de mantenimiento correctivo. Asimismo, la continuidad de este tipo de lesión puede derivar en desprendimientos adicionales de material y en la reducción de la vida útil del elemento estructural afectado.

Por lo anterior y desde la perspectiva de la patología de la construcción, esta lesión no debe considerarse solamente como un daño superficial, sino como un síntoma de degradación del material que puede evolucionar y comprometer la durabilidad del elemento si no se aborda prontamente y de manera adecuada.

Además, la PTAP de Paz de Ariporo opera de forma continua, lo que limita la aplicación de metodologías de evaluación invasivas y restringe la ejecución de intervenciones que requieran la interrupción total del funcionamiento de la planta.

En este contexto el tratamiento de la lesión en la cámara de filtración al ser la patología con mayor avance y severidad presenta una necesidad de tratamiento sin embargo el funcionamiento operativo de la planta plantea un desafío técnico desde el enfoque de la patología de la construcción, ya que hace necesario el uso de alternativas de evaluación en campo que permitan determinar la profundidad real del daño por erosión, así como el análisis de estrategias de intervención compatibles con estructuras en servicio, que garanticen la continuidad operativa y la durabilidad de las soluciones adoptadas.

Objetivos

Objetivo General

Proponer técnicas de intervención a la lesión patológica por erosión del concreto y exposición de agregados pétreos en los muros laterales de la cámara de filtración de la PTAP de Paz de Ariporo acordes con las condiciones reales del elemento estructural y de acuerdo al análisis de alternativas en la literatura y el marco normativo colombiano vigente.

Objetivos Específicos

- Identificar y caracterizar las lesiones presentes en la cámara de filtración mediante inspección visual y levantamiento sistemático de daños.
- Analizar las posibles causas del deterioro, considerando variables hidráulicas, propiedades del concreto, condiciones de operación y ambiente de exposición.
- Revisar y sistematizar técnicas de intervención reportadas en la literatura técnica y normativa para estructuras hidráulicas sometidas a abrasión.
- Evaluar comparativamente la viabilidad técnica de las alternativas identificadas, en función de su desempeño frente a abrasión, durabilidad esperada y aplicabilidad en el contexto de una PTAP municipal en Colombia.

Marco teórico

El deterioro de estructuras en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) puede comprometer la calidad del agua y la eficiencia del sistema de abastecimiento, especialmente cuando las patologías estructurales afectan unidades en contacto directo con el flujo hidráulico. En este sentido, la identificación de los mecanismos de deterioro y el análisis de sus causas resultan fundamentales para garantizar la durabilidad y el adecuado desempeño de las estructuras. Por lo anterior, el presente marco teórico integra los conceptos asociados a las plantas de tratamiento, los materiales constitutivos del concreto, los mecanismos de deterioro y las metodologías de evaluación patológica, con énfasis en procesos de erosión por abrasión.

Las PTAP son sistemas encargados de eliminar todos los contaminantes existentes en el agua que pueden llegar a afectar la salud y transformarla en agua apta para consumo humano mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Estas estructuras incluyen unidades como bocatomas, rejillas, desarenadores, sistemas de mezcla, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y almacenamiento. En particular, las unidades de filtración cumplen una función esencial en la remoción de partículas remanentes, estando sometidas a condiciones de flujo continuo y contacto permanente con el agua tratada, lo que incrementa su exposición a procesos de desgaste superficial.

En este contexto, el concreto constituye el principal material estructural en las PTAP debido a su resistencia mecánica y adaptabilidad a diferentes condiciones de carga. Sin embargo, su desempeño se ve afectado por condiciones de exposición agresiva como el contacto permanente con agua, agentes químicos y partículas en suspensión. Según Neville (2011) y el American Concrete Institute, la durabilidad del concreto depende de factores como la relación agua-cemento, la calidad de los materiales, la porosidad y el control del proceso constructivo, los cuales determinan su resistencia frente a mecanismos de deterioro progresivo.

Uno de los elementos fundamentales para la protección del acero de refuerzo es el recubrimiento de concreto, el cual actúa como barrera frente a la penetración de agentes externos como humedad, dióxido de carbono y sustancias agresivas. De acuerdo con el American Concrete Institute, un recubrimiento inadecuado puede acelerar procesos de deterioro como la corrosión del acero y la degradación superficial del concreto, afectando la vida útil de la estructura.

Como medida complementaria de protección, se emplean sistemas impermeabilizantes que reducen la permeabilidad del concreto y limitan la entrada de agua y agentes agresivos. Según Emmons (1994) y el ACI, estos sistemas son especialmente importantes en estructuras hidráulicas sometidas a exposición continua, ya que contribuyen a mejorar la durabilidad del elemento estructural, siempre que se garantice su adecuada adherencia y compatibilidad con el sustrato.

Dentro del análisis patológico de estructuras, es fundamental comprender que las lesiones corresponden a manifestaciones visibles de procesos de deterioro que pueden tener origen físico, químico o mecánico. Según Broto (2005), estas causas pueden clasificarse en directas, cuando originan el daño de manera inmediata, o indirectas, cuando se relacionan con errores de diseño, construcción o selección de materiales.

En el caso específico de estructuras hidráulicas como las cámaras de filtración, uno de los mecanismos de deterioro más relevantes es la erosión por abrasión, definida como el desgaste progresivo de la superficie del concreto debido al impacto y la fricción de partículas sólidas transportadas por el flujo de agua. El comportamiento hidráulico juega un papel fundamental al

momento de determinar los mecanismos de deterioro superficial debido a que los gradientes de velocidad, cambios en las direcciones de flujo y fenómenos de turbulencia favorece el impacto repetitivo de partículas sólidas contra la superficie en concreto del elemento estructural, además esta teoría se fundamenta en lo dicho por el American Concrete Institute, ya que dice que el fenómeno de erosión se intensifica en condiciones de flujo continuo, presencia de sólidos en suspensión y geometrías hidráulicas que inducen turbulencia, lo que puede comprometer la integridad superficial del elemento estructural.

Finalmente, la evaluación de este tipo de patologías se basa en metodologías de inspección visual y levantamiento de daños, las cuales permiten identificar, clasificar y registrar las lesiones presentes en la estructura. De acuerdo con el International Concrete Repair Institute, estos procesos incluyen la observación directa, el registro fotográfico y la elaboración de fichas técnicas, lo que permite establecer patrones de deterioro y sustentar el análisis de causas y la selección de intervenciones adecuadas.

Estado del Arte

El deterioro de estructuras de concreto en instalaciones hidráulicas ha sido ampliamente documentado debido a su impacto en la durabilidad y funcionalidad de sistemas asociados al abastecimiento de agua potable. Las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), en particular, operan bajo condiciones exigentes caracterizadas por flujo continuo, presencia de partículas sólidas y ambientes de humedad permanente, lo que las hace susceptibles a diversos mecanismos de degradación del material.

Dentro de las patologías más frecuentes en obras hidráulicas se encuentra la erosión por abrasión, definida como la pérdida progresiva de material superficial del concreto causada por la acción mecánica del flujo de agua con sedimentos en suspensión. Estudios técnicos y normativos, como los desarrollados por el American Concrete Institute, evidencian que este tipo de deterioro depende de factores como la velocidad del flujo, la turbulencia, la dureza del agregado, la calidad de la pasta cementicia y las condiciones de exposición. A diferencia de otros procesos de deterioro, la abrasión suele manifestarse de forma uniforme y sin fisuración inicial, lo que puede retrasar su identificación y tratamiento oportuno.

En el ámbito normativo, documentos como ACI 201.2R y ACI 210R proporcionan lineamientos para la evaluación del desgaste por abrasión en estructuras hidráulicas; sin embargo, su aplicación se ha concentrado principalmente en obras de gran escala como presas y vertederos. En el contexto colombiano, la NSR-10 reconoce la importancia del ambiente de exposición en la durabilidad del concreto, pero no desarrolla criterios específicos para la intervención de lesiones por abrasión en estructuras hidráulicas en operación continua, lo que evidencia un vacío técnico en este tipo de infraestructura.

La literatura reporta diversas técnicas de intervención para mitigar el desgaste por abrasión. Los morteros cementicios modificados con polímeros son utilizados por su buena adherencia y baja permeabilidad, aunque su desempeño frente a la abrasión severa es limitado. Por su parte, los morteros y concretos con agregados de alta dureza presentan mejor resistencia mecánica al desgaste, pero requieren tiempos de curado que dificultan su aplicación en estructuras en servicio. Los revestimientos poliméricos han sido empleados principalmente como barreras de protección, con efectividad dependiente de las condiciones hidráulicas y de la correcta preparación de la

superficie. Finalmente, los concretos de ultra alto desempeño ofrecen excelentes propiedades frente a la abrasión, aunque su alto costo limita su uso en contextos municipales.

Si bien existe amplia documentación sobre los mecanismos de erosión y las técnicas de reparación, son escasos los estudios aplicados que integren el diagnóstico patológico del daño con la evaluación comparativa de alternativas de intervención compatibles con PTAP en operación continua, especialmente en el contexto colombiano. En este marco, el presente trabajo aporta un enfoque aplicado que articula el análisis del mecanismo de deterioro por abrasión con la selección técnica de soluciones viables para la rehabilitación de cámaras de filtración.

Metodología

La presente investigación se enmarca en un enfoque mixto, al integrar elementos cuantitativos y cualitativos, de tipo descriptivo y analítico, orientado a la identificación, caracterización y análisis de procesos de erosión por abrasión en la cámara de filtración de una planta de tratamiento de agua potable. El estudio es de tipo descriptivo-analítico y se enmarca como un caso aplicado en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en el municipio de Paz de Ariporo, Casanare.

La infraestructura se encuentra en operación, con una cámara de filtración sometida al constante contacto con el agua y partículas sólidas, lo que hace a la estructura susceptible a procesos de deterioro.

6.1. Procedimiento metodológico.

A continuación, se describe el procedimiento metodológico, el cual fue estructurado en 6 fases fundamentadas en lineamientos nacionales e internacionales para evaluación y reparación de estructuras de concreto.

- **Fase 1. Revisión documental**

En esta fase se realizó una revisión de literatura técnica y normativa relacionada con la erosión en estructuras hidráulicas, la durabilidad del concreto y la evaluación patológica. Para ello se tomaron como referencia documentos como ACI, RAS, NRS-10.

Además, se realizó una revisión de la documentación existente de la planta de tratamiento, con el fin de buscar información y contextualizarse con las condiciones constructivas originales, materiales usados y si se ha realizado alguna intervención.

- **Fase 2. Inspección visual y levantamiento de daños**

En esta fase se realizó una visita en sitio donde se realizó una inspección visual detallada de la cámara de filtración, con el fin de identificar la manifestación de lesiones asociadas con la erosión. La evaluación se realizó mediante una observación directa de la superficie del concreto, toma de fotografías, diligenciamiento de fichas de inspección y siguiendo criterios de recomendación de ICRI, NRS-10 y metodologías aportadas por autores como Peter H. Emmons.

Con lo obtenido durante la inspección se llevó a cabo el levantamiento de daños por medio de la identificación, clasificación y localización de las lesiones evidenciadas. Este proceso se apoyó en el diligenciamiento de fichas de inspección y mapeo de las lesiones, lo que permitió establecer los patrones de deterioro en diferentes zonas de la cámara de filtración.

- **Fase 3. Caracterización de del mecanismo de deterioro**

De acuerdo a la fase anterior donde se realizó recolección de información visual, en esta fase se analizaron las zonas afectadas identificando la abrasión como el principal mecanismo de deterioro. Las áreas fueron clasificadas de acuerdo a la pérdida de material, exposición al agua y la textura superficial, con el fin de determinar el tipo de erosión predominante.

La clasificación permitió establecer que el mecanismo de deterioro principal es la abrasión mecánica inducida por las partículas sólidas en suspensión

- **Fase 4. Análisis de causas**

En esta fase se realizó un análisis de las posibles causas del deterioro considerando variables como tipo de erosión, nivel de severidad, ubicación del daño, condiciones hidráulicas y estado superficial del concreto, relacionándolo con los patrones observados.

El enfoque adoptado es el recomendado por el ICRI, en el cual se establecen aquellos factores a considerar como el ambiente, el material y las condiciones de operación.

El análisis permitió establecer la interacción entre las lesiones y propiedades del material como origen del fenómeno observado.

- **Fase 5. Identificación y selección de técnicas de intervención**

De acuerdo a la documentación técnica y artículos, se identificaron técnicas de reparación usadas en ambientes con humedad permanente.

Para la selección de documentación se tuvo en cuenta principalmente que las reparaciones a realizar deben ser aquellas que se puedan hacer mientras la estructura se encuentra en funcionamiento, debido a que esta no puede dejar de prestar servicio ya que es de servicio público, otros criterios establecidos para la selección de documentación son donde se hable de compatibilidad con superficies húmedas, resistencia a abrasión y disponibilidad en el mercado colombiano

- **Fase 6. Análisis comparativo**

Como último paso se realizó un análisis comparativo técnico de las técnicas encontradas, evaluando la viabilidad de aplicación en la PTAP de paz de Ariporo, para ello se tuvieron en consideración las condiciones actuales de operación, disponibilidad de materiales en el país, la capacidad técnica y aplicación de la metodología de acuerdo al marco normativo colombiano.

Todo lo anterior permitió determinar cuál de las alternativas es la más adecuada para la aplicación al caso de estudio.

Análisis y Resultados

1. Resultados de la inspección y levantamiento

Durante la inspección técnica realizada en la cámara de filtración de la PTAP se evidenció la presencia de lesiones en los muros laterales y en las zonas inferiores, las cuales se encuentran en constante contacto directo con el flujo hidráulico y la presencia de partículas sólidas en suspensión.

Las lesiones con mayor visibilidad fueron el desgaste superficial de forma uniforme, la exposición de agregados gruesos, reducción del material de recubrimiento y textura rugosa en las superficies. El mapeo de las lesiones permitió identificar que el deterioro tiene mayor concentración en las zonas sometidas al impacto continuo con partículas sólidas.

Por otro lado, no se evidenciaron lesiones asociadas a fisuras o desprendimientos por corrosión, lo que permitió descartar otros mecanismos de afectación.

2. Análisis de mecanismo de deterioro principal y causas

Para la identificación del mecanismo causante del deterioro se realizó un análisis en el que se consideró el desgaste, la profundidad de la lesión, la distribución en la estructura y las condiciones de operación de la estructura.

Todo lo anterior teniendo en cuenta lineamientos técnicos del ACI 210R, ya que en este apartado dan a conocer a profundidad la erosión de concreto en estructuras hidráulicas diferenciando la erosión causada por abrasión de la causada por cavitación o ataque químico.

Para el caso que se está evaluando, la lesión es caracterizada porque se evidencia la pérdida progresiva del material de recubrimiento dejando en una exposición homogénea el agregado grueso y una textura rugosa, sin formación de lesiones más profundas ni patrones de fisuración. Estas características permiten descartar la erosión causada por cavitación y no se evidencia la presencia de ataques químicos causando otro tipo de erosión.

En cuanto a la normativa colombiana NRS-10, se habla de la importancia del recubrimiento y la calidad de este en aquellas estructuras expuestas a exposición permanente, lo que refuerza la interpretación de que la pérdida de material superficial puede comprometer la durabilidad de la estructura.

Por otro lado, la estructura se encuentra en una exposición continua al agua y a partículas sólidas en suspensión que constituyen un ambiente adecuado para el desgaste mecánico.

Finalmente, relacionando los patrones de la lesión con las condiciones hidráulicas y los criterios técnicos de las normas, se concluye que el mecanismo de deterioro observado corresponde a erosión por abrasión causada por las partículas en suspensión, el contacto permanente con el agua y el uso operativo continuo de la cámara de filtración, que aceleran el desgaste de material superficial.

3. Evaluación comparativa de técnicas de intervención reportadas en la literatura

A partir de la documentación revisada y del análisis del mecanismo de deterioro y sus causas se analizaron técnicas utilizadas y planteadas por otros autores para la reparación de la estructura sin necesidad de parar su funcionamiento.

Para determinar aquellas técnicas que podrían ser viables para usar se tuvo en cuenta que fuera aplicable en condiciones de humedad, que fuera resistente a la abrasión, que no fuera necesaria la suspensión de operación de la estructura, compatibilidad del concreto y la disponibilidad y costo en el mercado.

Por lo anterior a continuación se realiza un análisis breve de cada una de las técnicas seleccionadas

3.1. Morteros cementicios modificados con polímeros

Esta técnica es documentada por autores e investigadores los como Mohan Malhotra y Kumar Mehta los cuales se destacan por hablar de durabilidad, sostenibilidad del concreto y uso de materiales sostenibles los cuales mejoran de forma significativa características como la adherencia, reducción de la permeabilidad y aumento a la resistencia, favoreciendo su comportamiento en reparaciones superficiales.

Adicionalmente, la ACI 546 establece que los morteros con polímeros presentan mejor compatibilidad con el material base y disminuyen el riesgo de fisuración después de la reparación.

Esta técnica es adecuada cuando existe una erosión leve y no hay una pérdida de material significativa, además funciona en zonas de turbulencia y la disponibilidad del material y su fácil aplicación hace de esta técnica como una alternativa posiblemente viable.

Sin embargo, una vez analizada a profundidad, esta y de acuerdo a la documentación no es resistente a la abrasión severa y en las zonas donde haya alta turbulencia sus características disminuyen, por lo que hace que su viabilidad de aplicación disminuya o podría considerarse su uso como una capa de recubrimiento.

3.2. Morteros con agregados gruesos.

En documentación perteneciente USACE el cual es el departamento del ejército de los estados unidos responsable de la ingeniería civil, en estudios realizados a presas y vertederos, se puede encontrar que al hacer uso de agregados gruesos incrementa la dureza del material y a su vez la resistencia al desgaste por abrasión, además el autor Sidney Mindess en el libro concrete nos permite reforzar esta teoría en su explicación acerca del comportamiento del concreto frente al desgaste, diciendo que la resistencia la aparición de un mortero mejora cuando el agregado tiene mayor dureza que la pasta cementicia.

Esta técnica demuestra tener una alta resistencia mecánica y mejorar la vida útil en las zonas con mayor contacto con partículas sólidas, sin embargo, requiere un tiempo de curado riguroso lo cual, que la viabilidad de aplicación de esta técnica disminuya, pero es una técnica con alta compatibilidad en cuanto al tratamiento en zonas con pérdida de material, exposición continua al agua y el desgaste progresivo.

3.3. Uso de revestimientos epóxico o poliuretanos

Los revestimientos poliméricos han sido usados para la protección de infraestructuras hidráulicas ya que ofrecen alta resistencia química y disminución de la permeabilidad, como lo señala el ingeniero Peter Hemmos en su libro donde habla de la reparación y mantenimiento del concreto en el cual señala que estos funcionan como una barrera protectora y mejoran la durabilidad.

Sin embargo, la lesión identificada corresponde a erosión mecánica, por lo que al estar en constante ataque abrasivo se puede presentar el desgaste progresivo si no se realiza una adecuada preparación de la superficie, se aplica una capa de buen espesor, si la intensidad del flujo y la presencia de partículas sólidas aumentan.

Lo anterior permite entender que esta técnica no es viable ya que su mayor protección es a ataques químicos, no obstante, esta técnica fue tomada en cuenta y analizada ya que en la literatura esta se considera un sistema de protección altamente usado en estructuras hidráulicas, para el

tratamiento de la lesión podría ser tomada en cuenta como una capa de protección, pero la intención del presente artículo no es ese si no el tratamiento de la erosión.

4. Análisis de Viabilidad en el contexto colombiano

En el marco normativo nacional, como el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y la NRS-10, se establecen criterios de durabilidad para estructuras en constante permanente con el agua y a su vez controlan la calidad de los materiales y su protección en ambientes agresivos como los de una PTAP.

Por lo que, considerando la operación continua de la cámara de filtración, el constante ambiente húmedo, el progresivo crecimiento de la lesión y la necesidad que existe de su intervención teniendo en cuenta el contexto del municipio, podemos entender que los morteros modificados con polímeros son adecuados para intervenir lesiones superficiales leves, que los recubrimientos con epóxidos funcionarían como una protección complementaria y no como un tratamiento decisivo y por último que un mortero de alta resistencia con agregados duros sería el más adecuado debido a su buen desempeño frente a acciones como el desgaste mecánico prolongado y al constante contacto con el agua.

Por ello tomando un punto de vista técnico y la disponibilidad de materiales en el país, los morteros de alta resistencia serían la alternativa más coherente para rehabilitar las zonas afectadas en la cámara de filtración.

5. Discusión de resultados

La revisión de literatura técnica centrada en reparación de estructuras hidráulicas permitió evidenciar que las técnicas de intervención para concreto con lesiones de erosión por abrasión requieren superficies totalmente secas o control de la humedad para garantizar adecuada adherencia, lo cual implica suspensión del flujo hidráulico en las zonas a intervenir.

De la misma manera, documentos técnicos acerca de mantenimiento de estructuras hidráulicas bajo flujo constante son muy limitados y los que hay se restringen a soluciones de emergencia o uso de sistemas de inyección que no resultan apropiados para el tratamiento de la lesión a tratar. En consecuencia, no se identificaron técnicas que puedan aplicarse con la presencia de un flujo continuo en las cámaras de filtración de la PTAP.

Por lo anterior, frente a la condición operativa, la normativa existente y la lesión identificada, la alternativa seleccionada es morteros de alta resistencia con agregados gruesos, ya que esta se fundamenta en criterios técnicos asociados a mecanismos de deterioro causados por abrasión, dándole propiedades al concreto que mejoran su resistencia y dureza frente al desgaste en comparación con las otras alternativas.

En el caso analizado, la pérdida de material observada es consistente con un mecanismo de desgaste progresivo por fricción de partículas finas transportadas en flujo continuo, más que con cavitación o ataque químico y Autores como Neville y Mindess, coinciden en que el uso de agregados duros contribuye significativamente a la resistencia superficial frente a desgaste mecánico, lo que resulta coherente con el tipo de lesión identificado en la cámara de filtración, donde el deterioro corresponde principalmente a pérdida progresiva de pasta superficial y exposición parcial del agregado por acción abrasiva del flujo con sólidos en suspensión.

Desde el punto de vista normativo, el Reglamento Colombiano de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) establece la necesidad de garantizar la continuidad de la prestación del servicio y de la misma manera la importancia de las condiciones estructurales adecuadas en las unidades de tratamiento. Bajo este marco, la implementación de una intervención requiere minimizar la afectación operativa. Por ello, además de la técnica de reparación seleccionada, se plantea una estrategia de sectorización temporal de la unidad, permitiendo intervenir por tramos sin suspender completamente la operación de la planta.

La sectorización es una práctica reconocida en mantenimiento de infraestructura hidráulica, especialmente en tanques, canales y cámaras de tratamiento, donde se instalan tabiques provisionales, compuertas o desvíos internos para aislar zonas específicas mientras se mantiene el funcionamiento parcial del sistema. Manuales operativos y lineamientos técnicos para rehabilitación de estructuras hidráulicas como manuales de operación de PTAP en diferentes territoriales, que recomiendan transferencia de flujo a unidades vecinas para intervenir una unidad o el uso de compuertas, también se puede hacer apoyo a literatura extranjera como AWWA Manual M20 o Manual M42 donde se describen procedimientos de aislamiento parcial, el uso de tabiques temporales para permitir operación parcial o estrategias de sectorización para tratamiento de lesiones con el fin de garantizar continuidad del servicio durante procesos de mantenimiento.

La sectorización permite controlar el flujo en el área intervenida, garantizar condiciones adecuadas de adherencia y curado del mortero, mantener la prestación del servicio de abastecimiento y reducir el riesgo sanitario asociado a la interrupción total del tratamiento.

En síntesis, la discusión técnica demuestra que, aunque la literatura no reporta soluciones aplicables bajo flujo constante permanente para lesiones por abrasión extendidas, la combinación de morteros de alta resistencia con agregados gruesos, junto con una estrategia operativa de sectorización, constituye la alternativa más viable técnica y funcionalmente para la cámara de filtración de la PTAP de Paz de Ariporo. Esta decisión se sustenta tanto en criterios de desempeño del material frente al mecanismo de deterioro identificado como en la normativa colombiana que prioriza continuidad del servicio y seguridad estructural.

En coherencia con los resultados discutidos previamente, relacionados con las limitaciones de la literatura técnica, el marco normativo vigente y las restricciones operativas propias de la PTAP, la ficha de caracterización patológica (Anexo 1) adquiere un papel interpretativo clave en la discusión de los hallazgos. Su análisis integrador permitió contrastar las manifestaciones del daño observado con el mecanismo de deterioro identificado, confirmando que la lesión presente en la cámara de filtración responde a un proceso de erosión por abrasión asociado al flujo hidráulico continuo con presencia de sólidos en suspensión. Esta correspondencia entre morfología del daño, causa y severidad refuerza la validación de los resultados obtenidos y respalda la selección de morteros de alta resistencia con agregados gruesos como alternativa de intervención, en concordancia con la literatura especializada. Asimismo, en cumplimiento de la exigencia normativa de mantener la continuidad operativa del sistema de tratamiento, la discusión evidencia que la estrategia de sectorización temporal no constituye únicamente una medida operativa, sino un componente técnico fundamental para viabilizar la intervención propuesta bajo condiciones reales de funcionamiento. En este sentido, la ficha de caracterización no solo sintetiza los resultados del diagnóstico, sino que permite fundamentar de manera objetiva la solución adoptada, integrando el desempeño del material, condiciones de servicio y criterios de durabilidad.

Conclusiones

Los resultados de la inspección visual y análisis del estado de la cámara de filtración permitieron identificar que el mecanismo de deterioro corresponde a una erosión por abrasión con pérdida progresiva de recubrimiento, exposición de los agregados y desgaste en las zonas con mayor circulación hidráulica, lo que la califica como una lesión mecánica; esta lesión se asocia directamente al flujo constante de agua, la operación permanente y la presencia de partículas sólidas. La caracterización de la lesión permitió establecer que el deterioro viene de un proceso acumulativo influenciado por las condiciones a las que se expone. Por consiguiente, este comportamiento pudo relacionarse con lo reportado en literatura técnica donde se habla de estructuras hidráulicas sometidas a un flujo constante con presencia de partículas sólidas.

Con la revisión técnica de diferentes intervenciones reportadas se evidenció que existen diferentes técnicas para la rehabilitación de superficies de concreto afectadas por erosión por abrasión, de las cuales se escogió morteros cementicios con polímeros, morteros de alta resistencia con agregados gruesos y recubrimientos con polímeros; estas técnicas son aquellas que podrían ser más viables en su aplicación y que ofrecieran una solución.

Con el análisis de las técnicas escogidas, la posible viabilidad de acuerdo a la normativa colombiana se permitió establecer que los morteros de ultra alta resistencia con agregados duros presentan el desempeño deseado frente a las condiciones de la cámara de filtración debido a su alta resistencia a la abrasión, compatibilidad con el sustrato y la fácil implementación para el tratamiento de la lesión.

Finalmente, se concluye que la selección de la técnica adecuada no se basa solamente en el tipo de material, sino también en las condiciones reales de la estructura y de su operación, que garantice la durabilidad de la reparación y la continuidad funcional del sistema de tratamiento. Asimismo, desde la perspectiva de gestión de infraestructura pública, el estudio aporta un modelo de diagnóstico aplicable a otras plantas de tratamiento en operación y la metodología empleada permite priorizar intervenciones con base técnica y normativa, reduciendo riesgos de falla progresiva y garantizando la continuidad del servicio.

Recomendaciones

Con base en el análisis comparativo de las técnicas de intervención reportadas, se recomienda el tratamiento de la lesión mediante un sistema de reparación superficial usando morteros de alta resistencia con agregados gruesos, ya que estos mejoran la dureza y el módulo elástico de la pasta cementicia, mejorando la resistencia ante procesos de erosión por abrasión en la cámara de filtración.

Teniendo en cuenta la literatura, la resistencia por abrasión mejora cuando el agregado presenta mayor dureza superficial y módulo de elasticidad que la pasta de recubrimiento, ya que el desgaste se centra en la pasta de recubrimiento y no en el agregado. Por lo anterior, el mortero de reparación debe incorporar agregados triturados de alta resistencia como piedras basálticas y una relación cemento/agua baja

Para la implementación de la técnica en la cámara de filtración se recomienda realizar una sectorización de cada unidad que se va a tratar, para permitir la intervención de cada tramo sin tener que detener totalmente la operación de la PTAP. Posteriormente realizar la remoción del

concreto deteriorado hasta alcanzar un material sano, para esto lo ideal es el uso de técnicas mecánicas que no generen fisuración adicional, dejando una superficie rugosa sin partículas sueltas.

El mortero, una vez preparado, debe colocarse en espesores compatibles con el nivel de pérdida del material identificado, lo que garantiza una educada compactación y un curado controlado evitando retracción plástica o fisuración.

Una vez realizada la rehabilitación, se recomienda complementar la intervención con sistemas de protección superficial en zonas de alto flujo hidráulico, evaluando la aplicación de recubrimientos poliméricos como medida de protección secundaria, siempre que las condiciones de humedad y adherencia lo permitan.

Por otra parte, se sugiere establecer un programa periódico de inspección y monitoreo de la cámara de filtración, con el fin de detectar de forma temprana procesos de deterioro superficial y evitar la progresión del daño hacia niveles que comprometan la funcionalidad de la estructura.

Finalmente, se propone que futuras investigaciones incluyan el análisis del comportamiento del concreto en condiciones de flujo continuo con carga de partículas en suspensión, con el fin de optimizar el diseño de mezclas y mejorar la durabilidad de las estructuras hidráulicas en plantas de tratamiento de agua potable en contextos similares.

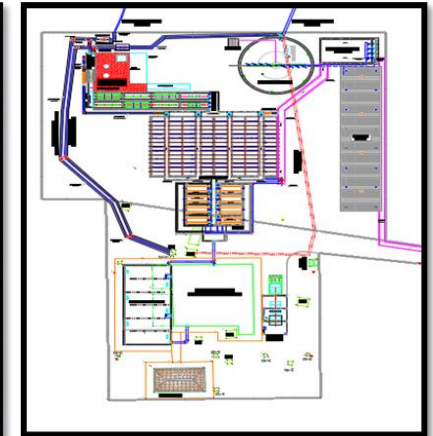
Bibliografía

- Broto, C. (2005). *Enciclopedia Broto de patologías de la construcción* (Vol. 5). Links International.
- Gonzales Martínez, C. J. (2019). *Guía de manejo administrativo de la planta de tratamiento de agua residual del municipio de Paz de Ariporo (Casanare) basado en la metodología del PMI*. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia - RIUCaC. Retrieved septiembre, 2025, from <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/684a9f8f-4606-4058-bc32-38a6b1e270a2>
- Hidrotec. (S.f). *Elementos de una Planta Potabilizadora de Agua*. Hidrotec. Retrieved September 5, 2025, from <https://www.hidrotec.com/blog/planta-potabilizadora/>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Retrieved septiembre, 2025, from <https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>
- Moreno Moreno, D. S., & Vivas Cardenas, G. A. (2023, junio). *Análisis investigativo del control y tratamiento de agua potable (PTAP) del municipio de Apulo-Cundinamarca*. Repositorio Institucional Universidad Piloto de Colombia. Retrieved septiembre, 2025, from <https://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/12715/ANALISIS%20INVESTIGATIVO%20DEL%20CONTROL%20Y%20TRATAMIENTO%20DE%20AGUA%20POTABLE%20%28PTAP%29%20DEL%20MUNICIPIO%20DE%20APULO-CUNDINAMARCA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- American Concrete Institute. (2008). *Guide to erosion and abrasion of concrete surfaces (ACI 210R-03)*. American Concrete Institute.
- Emmons, P. H. (1994). *Concrete repair and maintenance illustrated*. R.S. Means Company. Recuperado en marzo de 2026, from <https://es.scribd.com/document/620761655/415636246-Concrete-Repair-and-Maintenance-Illustrated-PH-Emmons-pdf>
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Hager, W. H. (1999). *Hydraulics of stepped spillways*. A. A. Balkem

ANEXO 1. Ficha de caracterización patológica

1.INFORMACIÓN GENERAL

Proyecto:	Diagnóstico y clasificación de patologías constructivas
Infraestructura:	Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)
Elemento evaluado:	Cámara de filtración
Ubicación:	Municipio de Paz de Ariporo, Casanare (Colombia)
Uso:	Infraestructura hidráulica – servicio público esencial
Estado operativo:	En operación continua
Material principal:	Concreto reforzado
Normativa de referencia:	NSR-10 (Colombia) RAS – Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable ACI 210R – Erosion and Abrasion of Concrete ICRI – Concrete Repair

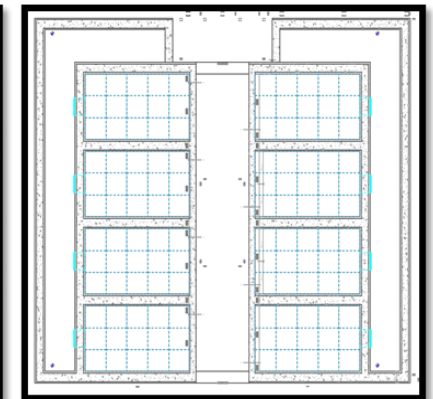
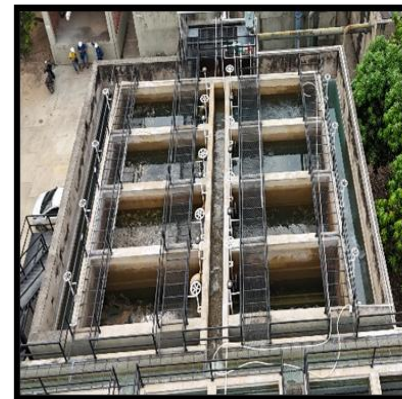


2.DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO

La cámara de filtración hace parte del proceso final de tratamiento del agua potable y se encuentra sometida a:

- Flujo hidráulico continuo
- Presencia de partículas sólidas en suspensión
- Ambiente de humedad permanente
- Acción mecánica por fricción y arrastre de sedimentos

Los muros laterales e inferiores están en contacto directo con el agua tratada y reciben el mayor impacto del flujo.



3.TIPO DE LESIÓN IDENTIFICADA

Patología: erosión del concreto por abrasión

Clasificación:

Lesión mecánica

Deterioro superficial progresivo

Nivel de severidad: moderado

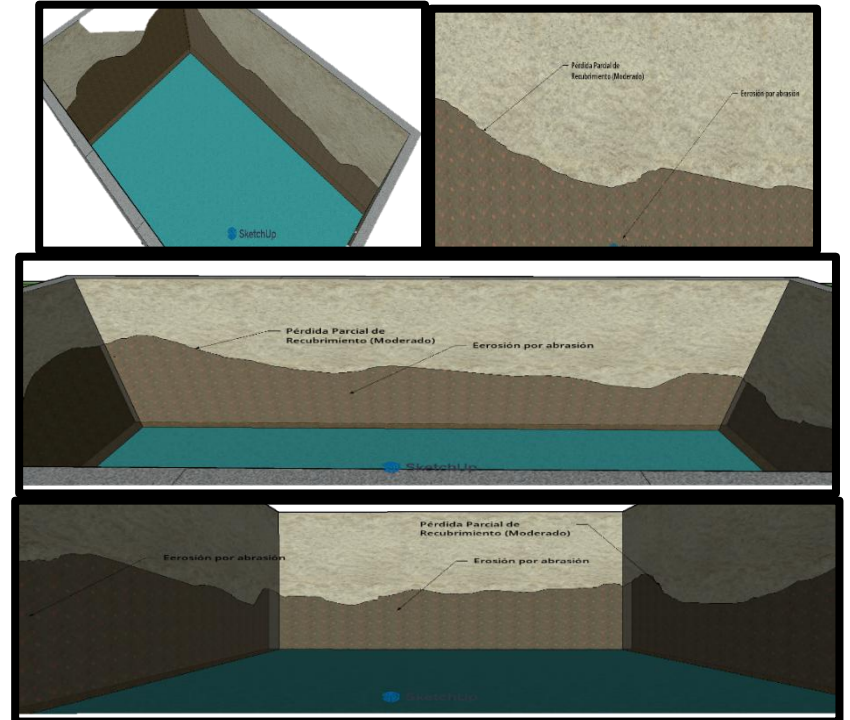
Pérdida parcial del recubrimiento de concreto

Exposición homogénea del agregado pétreo

Superficie irregular y aumento de la rugosidad

Desgaste uniforme sin presencia de fisuración

Mayor afectación en zonas de alto flujo y turbulencia



4.MECANISMO DE DETERIORO

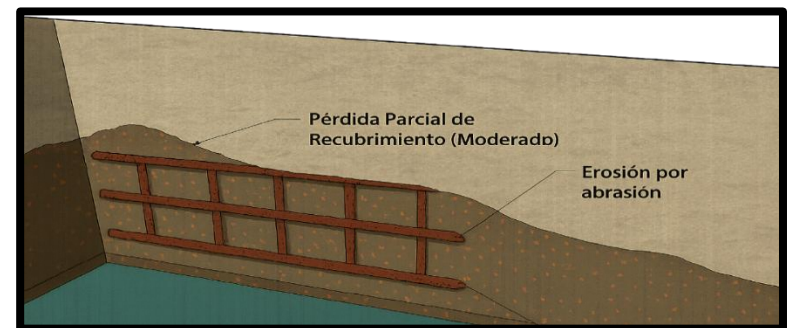
Mecanismo principal: erosión por abrasión

Descripción:

Desgaste progresivo del recubrimiento superficial del concreto producido por la fricción constante entre el flujo de agua y partículas sólidas en suspensión, lo que ocasiona la remoción de la pasta cementicia y la exposición del agregado grueso.

Mecanismos descartados:

- Corrosión del acero de refuerzo
- Ataque químico
- Cavitación



5. CAUSAS IDENTIFICADAS	6. CONSECUENCIAS POTENCIALES
Operación continua de la PTAP Flujo hidráulico permanente Presencia de sólidos en suspensión Recubrimiento de concreto expuesto a desgaste mecánico Condiciones hidráulicas que inducen fricción y turbulencia	Reducción progresiva del recubrimiento protector Aceleración del desgaste superficial Alteración de las condiciones hidráulicas internas Incremento en la frecuencia de mantenimiento Disminución de la vida útil del elemento si no se interviene oportunamente

7. DIAGNÓSTICO TÉCNICO

El deterioro identificado corresponde a una erosión por abrasión de carácter superficial a moderado, sin comprometer actualmente la capacidad estructural del elemento, pero con riesgo de evolución progresiva si no se implementan medidas correctivas compatibles con la operación continua de la PTAP.

8. RECOMENDACIÓN GENERAL DE INTERVENCIÓN

Tipo de intervención recomendada:

Reparación superficial con **morteros de alta resistencia con agregados duros**, compatibles con ambientes húmedos y con elevada resistencia al desgaste mecánico.

Estrategia operativa:

Sectorización de la cámara de filtración para permitir la intervención por tramos sin suspender la operación de la totalidad de la PTAP.

Medidas complementarias:

Preparación mecánica del sustrato

Control del curado

Evaluación de recubrimientos protectores como capa secundaria en zonas críticas



9. ESTADO GENERAL DEL ELEMENTO

Condición actual:	Deterioro moderado
Prioridad de intervención:	Media – Alta
Riesgo estructural inmediato:	No
Riesgo de progresión del daño:	Alto si no se corrige

