

Evaluación De La Durabilidad Del Mortero Para Juntas Con Arcillas Calcinadas Aplicado En Canal Alacranes Pavón

Evaluation Of The Durability Of The Mortar For Joints With Calcinated Clays Applied In The Alacranes Pavón Canal

Autores

MSc. Ing. Jennifer Artiles Cupull¹, Dr. Ing. Yosvany Díaz Cárdenas², Dr. Ing. Fernando Martirena Hernández³

¹Dpto. Ingeniería Civil, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, e-mail: jacupull@uclv.cu

²Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, e-mail: yosvanyd@uclv.edu.cu

³Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, e-mail: martirena@uclv.edu.cu

RESUMEN

Cuba cuenta actualmente con un entramado de canales conformados por losas prefabricadas a lo largo de todo el país, que garantizan el riego de los productos agrícolas. Dichos canales muestran hoy un significativo deterioro, sobre todo las juntas de dilatación. La formulación y aplicación de un nuevo mortero expansivo en un tramo del canal Alacranes Pavón ubicado en el centro de Cuba, logró cumplir con sus dos principales objetivos de funcionamiento: garantizar niveles de expansión para cierre lateral de las juntas con las losas de hormigón sin colapsar por tensión de confinamiento y una alta impermeabilidad durante su vida útil para evitar la filtración de agua. El presente estudio tiene por objetivo evaluar durabilidad del mortero expansivo, compuesto por cemento P35 y una adición de arcillas calcinadas y caliza, al cabo de tres años de su aplicación y comprobar que continúa presentando las propiedades para las cuales fue formulado. La realización de ensayos normados a partir de testigos extraídos in situ y pruebas en el lugar, demostraron que la formulación con base en arcillas calcinadas y calizas aportó mejoras al material aplicado en cuanto a absorción de agua por capilaridad, profundidad de carbonatación y resistividad eléctrica demostrando la efectividad de este mortero expansivo respecto al mortero tradicional aplicado. Este novedoso mortero sustituye importaciones ya que todas las materias primas fueron nacionales, su extensión al resto de los canales existentes en el país podría recuperar pérdidas de agua que garantizarán el riego de más hectáreas de arroz en los planes.

Palabras claves: canales, durabilidad, juntas, mortero expansivo.

ABSTRACT

Cuba currently has a network of canals made up of prefabricated slabs throughout the country, which guarantee the irrigation of agricultural products. These channels today show significant deterioration, especially the expansion joints. The formulation and application of a new expansive mortar in a section of the Alacranes Pavón canal located in the center of Cuba, managed to meet its two main operating objectives: guarantee expansion levels for lateral closure of the joints with the concrete slabs without collapsing. due to confinement tension and high impermeability during its useful life to prevent water seepage. The objective of this study is to evaluate the durability of the expansive mortar, composed of P35 cement and an addition of calcined clays and limestone, after three years of its application and to verify that it continues to present the properties for which it was formulated. The performance of standardized tests based on cores extracted in situ and on-site tests demonstrated that the formulation based on calcined clays and limestone provided improvements to the applied material in terms of water absorption by capillarity, depth of carbonation and electrical resistivity, demonstrating the effectiveness of this expansive mortar compared to the traditional mortar applied. This new mortar replaces imports since all the raw materials were national, its extension to the rest of the existing canals in the country could recover water losses that will guarantee the irrigation of more hectares of rice in the plans.

Keywords: channels, durability, joints, expansive mortar.

Nota Editorial: Recibido: Junio 2024 Aceptado: Julio 2024

1. INTRODUCCIÓN

El cemento es el producto manufacturado más grande de la Tierra en términos masivos, representando alrededor del 6% del total de emisiones antropogénicas de CO_2 [1]. El cemento es también el mayor consumidor de energía industrial y representa el 7% del uso mundial de dicha energía. La forma más eficaz de reducir la huella de CO_2 del cemento Portland Ordinario (CPO) es reducir el factor clínquer. Este ha orientado a la industria hacia una adopción cada vez mayor de cementos mezclados, que hoy en día son más comunes que los cementos Portland puros. Los cementos mezclados incorporan materiales cementosos suplementarios (MCS) reemplazando parte del clínquer, pero su disponibilidad se convierte en el factor limitante [2]. Las arcillas caolínicas y la piedra caliza son únicas entre los MCS debido a su elevada disponibilidad mundial [1] y en ese sentido surge el cemento *Limestone Calcinced Clay Cement* (LC^3). La alúmina de la arcilla calcinada y el carbonato del fíller reaccionan creando una sinergia que posibilita una mayor sustitución de clínquer —hasta un 50%—, con lo cual su producción requiere menos energía que la elaboración de CPO, con grandes beneficios tanto medioambientales como técnicos y económicos [3]. La reacción puzolánica en el cemento LC^3 se produce cuando las arcillas calcinadas reaccionan con el Hidróxido de Calcio (HC) producido con la hidratación del clínquer. El límite de sustitución está dado por la disponibilidad de HC que se produce durante la hidratación del clínquer; para sustituciones de más de un 35% de clínquer las propiedades del cemento se comprometen debido a la pobre disponibilidad de HC. Sin embargo, la adición de carbonato de calcio o magnesio a través de la incorporación de un volumen mayor de caliza permite que la fase aluminica continúe reaccionando para formar carboaluminatos y lograr un rendimiento mecánico similar al del CPO [4].

La formulación más investigada del cemento LC^3 en hormigones contiene 50% de clínquer y típicamente 30% de arcilla calcinada y 15% de piedra caliza, el 5% restante es yeso, aunque el contenido preciso de sulfato debe optimizarse para cada combinación. Sin embargo, los cementos LC^3 comprenden toda una familia de diferentes formulaciones que pueden adaptarse para aplicaciones específicas y entornos regulatorios. Se puede lograr mediante dos vías en las que se mezcla el MCS con el clínquer o con el CPO: la intermolienda de todos sus componentes o la molienda por separada, es decir clínquer o CPO que se mezcla posteriormente con la adición mineral LC^2 que contiene arcilla calcinada, caliza y yeso.

La formulación del mortero MORDRY JUNT, con DITEC de idoneidad actualmente, presenta una dosificación volumétrica de 0,5: 1: 4 (cemento P35: extensor de cemento LC^2 : arena) contiene una pequeña dosis de óxido de calcio (CaO) que le confirió una expansión controlada y posibilitó contrarrestar la retracción típica de las primeras 24 horas que pueden presentar los materiales con base cementicia. Cumple según la NC 175: 2018: Morteros de albañilería. Especificaciones como un mortero tipo III y fue formulado totalmente con materias primas nacionales. El empleo de este mortero logra en su formulación reducir al 50% el contenido de cemento Portland que especifica la NC 175: 2018 para mortero por la adición mineral LC^2 cuya arcilla requiere de entre 630-800°C para alcanzar su mayor reactividad, mientras que la producción del clínquer unos 900°C.

El Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) cuenta en la actualidad con un entramado de canales a lo largo de todo el país, que garantizan el riego de los productos agrícolas fundamentalmente del arroz. Dichos canales se encuentran hoy con un elevado deterioro, sobre todo las juntas de dilatación. En diagnóstico presentado por especialistas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) se identificó como problemática mayoritaria la erosión de juntas que presentaban pérdida parcial o total del material que la conformaban siendo la posible causa del deterioro la contracción la de mezcla utilizada según se muestra en la Figura 1.

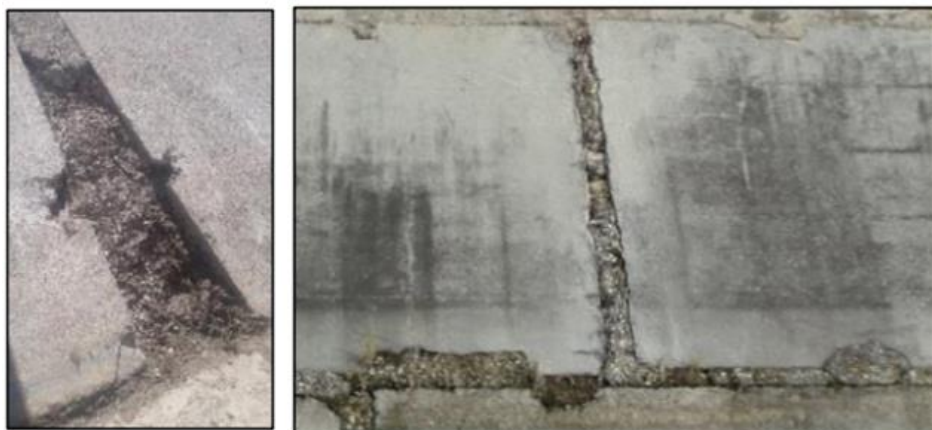


Figura 1: Erosión de juntas en el cuerpo de la estructura.

A raíz de los estrechos vínculos de investigación entre el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas y dicho instituto, se trabajó para reparar dichos canales. La formulación del mortero MORDRY JUNT, se aplicó en 300m del canal Alacranes Pavón ubicado en la zona central del país bajo Prueba Industrial.

En el reporte "Informe sobre el Resultado de la Aplicación del Mortero Expansivo para Juntas en el Canal Trasvase Alacranes-Pavón", preparado por la Delegación INRH, Villa Clara se presentó la evaluación de impacto sobre reducción de pérdidas por infiltración y quedó demostrado que el mortero formulado logró reducir hasta un 75% de las pérdidas por infiltración en el tramo de canal medido. Esto garantiza una mejora sustancial en el uso eficiente del agua embalsada y un incremento de la eficiencia en conducción.

Un aspecto a tener en cuenta en los morteros, especialmente uno formulado con cemento LC³, es su durabilidad. Un mortero durable retendrá su forma original, su calidad y servicio cuando se exponga al medio ambiente. Actualmente el mortero MORDRY JUNT lleva aplicado 3 años en el tramo de canal y requiere evaluar su capacidad para resistir la acción del tiempo y los ataques propios del proceso de deterioro. Este trabajo presenta los resultados de evaluar la durabilidad del mortero aplicado en las juntas del tramo de prueba del canal Alacranes Pavón. Para ello se siguió un protocolo de trabajo regido por las normas cubanas vigentes para evaluar por ciento de absorción de agua por capilaridad, profundidad de carbonatación y resistividad eléctrica a partir de la extracción de testigos en el lugar y pruebas in situ respectivamente.

2. DESARROLLO

La durabilidad de morteros y hormigones depende de manera importante de la facilidad con la cual los fluidos, tanto líquidos como gases, pueden introducirse. El transporte de fluidos, que pueden introducirse en el material cementante, a saber: agua, dióxido de carbono y oxígeno dependerá de la permeabilidad del material. Este fenómeno puede suceder por el flujo a través del sistema de poros, por la difusión y la absorción.

Según la NC 175:2018, la durabilidad de la albañilería que resiste la penetración del agua, en general no presenta serios problemas. Lo cual, para el caso que se analiza es de suma importancia haberlo logrado en la formulación ya que el mortero para juntas de canales se encuentra sumergido en agua y puede experimentar una serie de cambios que afectan su durabilidad. Estos cambios pueden incluir la expansión y contracción con sus consiguientes fisuras y grietas y la degradación de la matriz cementante.

El objetivo de este trabajo es evaluar mediante ensayos de durabilidad el estado actual del mortero expansivo aplicado en las juntas del canal Alacranes Pavón y comprobar que continúe con las propiedades para las cuales fue formulado. Los resultados demuestran la efectividad del empleo de una adición mineral activa compuesta por arcillas calcinadas y caliza como material cementicio suplementario que contribuye a mejorar las propiedades físicas y de durabilidad de los morteros.

2.1. Características De Las Materias Primas.

Las materias primas usadas en la fabricación del mortero MORDRY JUNT para su aplicación (excepto la adición expansiva de base calcárea) fueron suministradas por la Empresa de Materiales de la Construcción de Sancti Spíritus (ECMSS). El cemento P-35, proveniente de la fábrica "Siganey", cumple con lo establecido en la NC 95: 2011 Cemento Portland. Especificaciones. La adición mineral LC² (producción experimental) contiene 60% de arcilla calcinada, 35% de caliza y 5% de yeso (Tablas 1-3) y siguió como criterio de molienda un 10% de retenido en el tamiz de 90 µm, criterio similar al empleado a escala industrial en la obtención de Cemento Portland según la NC 980:2013 Determinación de la finura y la superficie específica.

Tabla 1: Composición química caliza. Guayos, Sancti Spíritus.

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaCO ₃
Por ciento	4,12	1,15	51,59	1,21	40,92	92

Tabla 2: Composición química del yeso. Punta Alegre, Ciego de Ávila.

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PPI	RI
Por ciento	5,24	4,7	30,36	1,96	31,95	21,67	9,07

Tabla 3: Composición química de las arcillas caoliníticas. Manifestación Yaguajay.

Comp	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	Otros	PPI
%	46,58	20,06	14,41	2,94	0,74	0,04	0,11	0,06	1,12	0,13	0,73	0,14	12,74

El árido tipo polvo de piedra proviene de la cantera "Nieves Morejón", municipio Cabaiguán, Sancti Spíritus. Es un árido de granulometría continua, y cumple con los requisitos exigidos en la norma cubana NC 657:2008 Áridos para morteros. Especificaciones. La muestra fue seleccionada en el proceso de cuarteo normado. El Módulo de Finura es de 3,19, dentro de los valores especificados. La Figura 2 muestra su curva granulométrica.

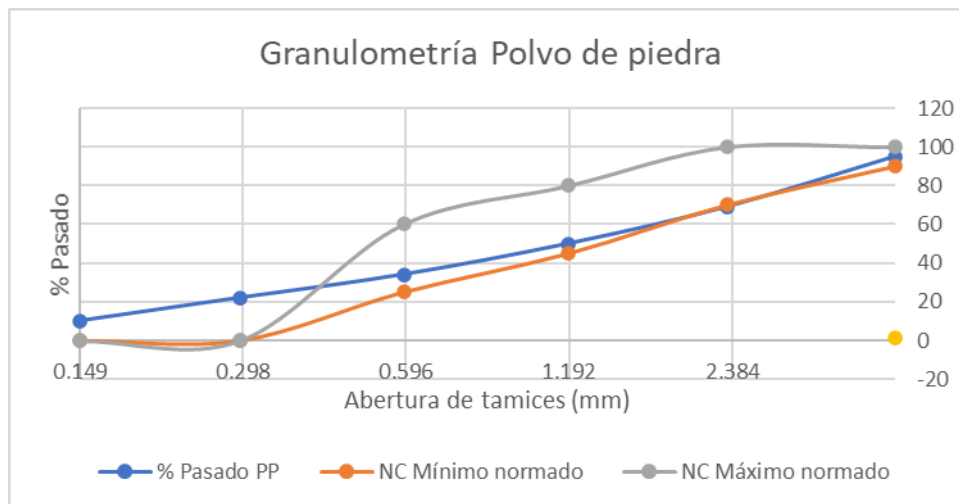


Figura 2: Curva granulométrica polvo de piedra cantera Nieves Morejón.

El material empleado en la fabricación industrial del mortero fue cal viva producida y comercializada en Palenque. Para evaluar la pureza del CaO se empleó como técnica analítica la termogravimetría que permite determinar los por cientos de humedad, de hidróxido de calcio y de carbonato de calcio.

Del saco que contenía la cal viva se tomaron tres muestras y cada una fue evaluada. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Caracterización del CaO por vía termogravimétrica.

No(c)	m(c)	m ₀ (m)	m(c+m) 200	% hum	m(c+m) 460	m(c+m) 560	% Ca(OH) ₂	m(c+m) 850	m(c+m) 950	% CaCO ₃	dm f.d.r.	% dm f.d.r	% CaO
1	69,9	9,9	79,8	0,0	79,2	78,2	41,6	77,3	77,1	4,6	1,5	15,2	38,7
2	88,5	10,0	98,5	0,0	97,9	96,9	41,2	95,8	95,7	2,3	1,7	17,0	39,6
3	103,5	10,0	113,5	0,0	113,4	112,3	45,3	111,0	110,7	6,8	1,4	14,0	33,9
$\bar{x}$				0,0			42,7			4,6	1,5	15,4	37,4
s				0,0			2,3			2,3	0,15	1,5	3,0

Del material deshidratado, se estima un contenido de CaO de $37,4 \pm 3,0$ %m (que responde a un material de baja calidad), acompañado de un contenido de Ca(OH)₂ del $42,7 \pm 2,3$ %m y de CaCO₃ de $4,6 \pm 2,3$ %m. Basado en los cálculos anteriores se estima que el aditivo expansor presenta una reactividad media y expansión media-baja. Puede deberse al proceso de calcinación poco eficiente o a un dilatado almacenamiento en condiciones inadecuadas, en presencia de una alta humedad y amplio contacto con el aire.

2.1.2. Preparación Del Mortero

Para el estudio, se preparó el mortero MORDRY JUNT según la formulación evaluada a nivel de laboratorio. La Tabla 5 presenta, para una cantidad de 130 kg de material, las proporciones empleadas para una relación a/c=0,98 y 4% de CaO con relación al peso del aglomerante (P35+LC²).

Tabla 5: Mezclado y dosificación del mortero.

	Peso vol.	Densidad	Dosif. volumétrica	% partes	Peso fijo kg
P35	1200	3150	0,5	9,09%	9,80
LC ²	900	2800	1	18,18%	14,70
CaO	650	2200	0	0,00%	0,98
Polvo de piedra	1600	2700	4	72,73%	104,52
			5,50	100%	130,00

Las propiedades físico mecánicas del mortero producido en obra para su aplicación se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Propiedades físico-mecánicas del mortero MORDRY JUNT.

Diseño de mezcla	Esgurrimiento	Resistencia a compresión			Absorción capilar	Expansión
		3d	7d	28d		
MORDRY JUNT (0,5: 1: 4)	190±5mm	1,42	2,44	6,4	AC-1 (0,68 g/cm ²)	0,04%

2.2. Protocolo Experimental: Evaluación De La Durabilidad Del Mortero.

La zona de estudio es el Trasvase Alacranes – Pavón y se extiende a lo largo de la parte alta de la llanura costera del Norte de Villa Clara en un rumbo aproximado Este – Sureste entre los Ríos Sagua la Grande y Sagua la Chica, está construido hasta el III Tramo con una longitud de 33 km revestido con losas de hormigón. Tiene su Obra de Toma en el dique derecho de la Presa Alacranes y culmina en el Nudo La Palma a la altura del P – 7 del Canal Magistral Calabazar, cerca del poblado El Purio.

Desde el punto de vista de su explotación se divide en tres tramos:

- I y II pertenecen al Complejo Hidráulico Sagua la Grande (0+00:71+73); (71+73:258+06).
- III Tramo al Complejo Hidráulico Sagua la Chica. (258+06:329+18).

El trabajo experimental se dividió en dos etapas:

1.Trabajos realizados en el tramo de canal:

- Preparación del canal para la realización de las pruebas in situ y la toma de testigos.
- Inspección visual del estado actual de las juntas.
- Ensayo de resistividad in situ.
- Toma de testigos o muestras de sección cilíndrica en puntos escogidos.

El tramo de 300m fue seleccionado por ser el trayecto más deficiente del canal, dentro de él se seleccionó una zona para la realización de los trabajos en el terreno (Figura 3).



Figura 3: Tramo de canal de prueba

Una vez hecha la selección de la zona, se cerraron las puertas reguladoras y se evacuó el agua para trabajar en el canal en fase seca (Figura 4).



Figura 4: Cierre del tramo de canal.

En la inspección visual de las juntas con el mortero expansivo no se apreciaron grietas o fisuras significativas de un alto deterioro.

Los testigos extraídos tuvieron 100mm de diámetro y 100mm de altura, el patrón para su extracción tuvo en cuenta los extremos superiores, inferiores e intermedios de las juntas seleccionadas (Figura 5). Las muestras fueron retractoriladas y llevadas para ser analizadas en el laboratorio de materiales.

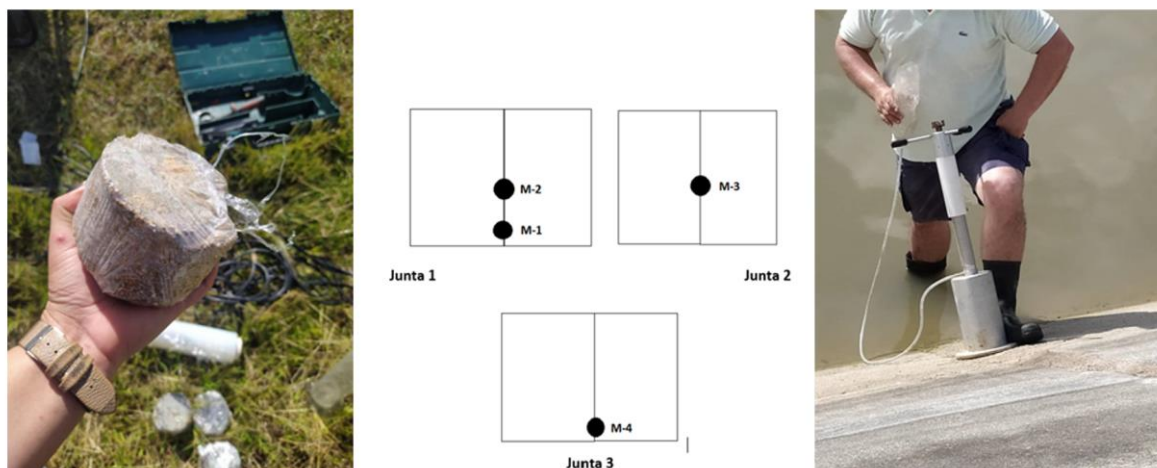


Figura 5: Selección y toma de testigos in situ.

El ensayo de resistividad eléctrica in situ se realizó en las zonas escogidas para la toma de testigos según la UNE 83988-2: 2008. Resistividad in situ. En esta investigación para las mediciones en el campo se empleó un Resipod (Figura 6), que aplicando lo especificado es una sonda Wenner de 4 puntos completamente integrada para medir la resistividad superficial. Su principio de medición consiste en aplicar una corriente a dos sondas exteriores y medir la diferencia de potencial entre las dos sondas interiores. La corriente es transportada por iones en el líquido en los poros. La resistividad calculada depende de la distancia entre las sondas [5-6].



Figura 6: Ensayo de resistividad in situ

2. Trabajos realizados en el laboratorio de materiales de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas:

- Ensayo de absorción capilar según NC 171: 2018. Mortero endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.

Para la determinación de la absorción capilar los testigos fueron aserrados como una lámina delgada de mortero de 25mm de espesor y se preconditionaron a un equilibrio de humedad con un secado de 60°C por 48 horas (hasta un peso constante) para posteriormente ser enfriados en un desecador. La superficie de succión fue la parte aserrada de la muestra que está libre de carbonatación y otras impurezas y se recubrió con parafina las áreas laterales curvas del espécimen. Las probetas ya preconditionadas se colocaron en un recipiente estanco a una separación del fondo de no más de 10 mm de espesor sobre listones de madera. Las probetas fueron pesadas antes de ser colocadas en el agua y se siguieron pesando a las edades establecidas según la normativa para morteros.

- Ensayo de profundidad de carbonatación según NC 355: 2004. Determinación de la profundidad de carbonatación.

Para la determinación de la profundidad de carbonatación, el ensayo se realizó con muestras de 25mm de espesor medidas desde la cara superior del testigo (cara expuesta al medio) las cuales fueron cortadas (en seco) por la mitad para observar el avance de carbonatación desde la parte superior. El indicador utilizado fue una disolución de fenolftaleína al 1% y alcohol etílico al 70%. Luego de la aplicación, pasados uno o dos minutos, se procedió a la medición de la profundidad de carbonatación (zona incolora) en varias mediciones a cada muestra teniendo en cuenta que el indicador, al entrar en contacto con el mortero, se torna de un color púrpura para valores de pH superiores a 9.5 (pH de morteros no carbonatados) e incolora en valores inferiores a 8 (mortero carbonatado). Según se observa en la figura 7 la carbonatación presentó un frente homogéneo como el indicado en el anexo A de la NC 355:2004, por lo que la profundidad de carbonatación se expresa como pc.

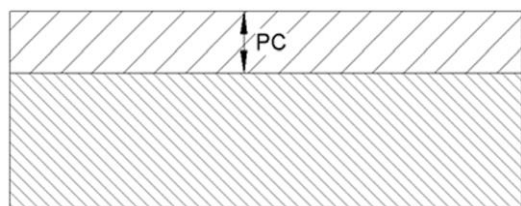


Figura 7: Carbonatación en mortero expansivo MORDRY JUNTA endurecido y puesto en servicio. Izquierda: Pc homogéneo según Anexo A de la NC 355: 2004. Derecha: testigo cortado a 25mm y con fenolftaleína aplicada.

3. RESULTADOS

- Resistividad eléctrica (in situ).

El uso de puzolanas en la preparación de morteros se ha convertido en una práctica habitual porque mejoran las propiedades mecánicas y aumentan su durabilidad. Estas mejoras se atribuyen a dos procesos: i) la formación de productos hidratados adicionales debido a la reacción de la puzolana con el hidróxido cálcico derivado de la hidratación del cemento y ii) la reducción de la permeabilidad por el efecto del llenado de los poros con los productos formados en la reacción puzolánica [7]. Estos procesos deberían reflejarse en las propiedades eléctricas. [7].

La medición de la resistividad superficial proporcionó una información extremadamente útil acerca del estado del mortero aplicado (Tabla 7). Se ha comprobado que este ensayo no sólo está directamente relacionado con la probabilidad de corrosión y la velocidad de corrosión del hormigón; también existe una correlación directa con la permeabilidad del material [8]. Por lo que el objetivo de realizar este ensayo fue medir la conectividad del sistema de poros y de forma indirecta caracterizar la porosidad del sistema, ya que la resistividad del material saturado de agua, es una medida indirecta de la conectividad y tamaño de sus poros [9].

Tabla 7. Resistividad eléctrica del mortero expansivo en puntos seleccionados

PUNTOS SELECCIONADOS	RESISTIVIDAD (kΩ.cm)
P1	28,9
P2	26,1
P3	26,1
P4	26,1
P5	35,8
P6	33,5
P7	35,8
$\bar{x}$	30,3

También se realizaron mediciones en juntas con el mortero antiguo aplicado (Figura 8) y se evidencian los altos valores de resistividad del mortero expansivo en comparación con el del mortero control sin adiciones. Esto se debe a la presencia de las arcillas calcinadas que influyen de forma significativa en la estructura de poros, produciendo un importante refinamiento de los mismos. De aquí las transformaciones que ocurren en las propiedades de transporte de agua hacia el interior del material [10]. La proporción de poros de gel aumenta, mientras que los capilares disminuyen. Se considera que esta es la causa de la disminución de la permeabilidad en morteros fabricados con materiales cementicios suplementarios y debido a que el valor de la resistividad eléctrica (ρ) se identifica con la fase porosa conectada del mortero, una mayor resistividad indica una estructura de poros menos conectada, con menor transporte de iones [11].

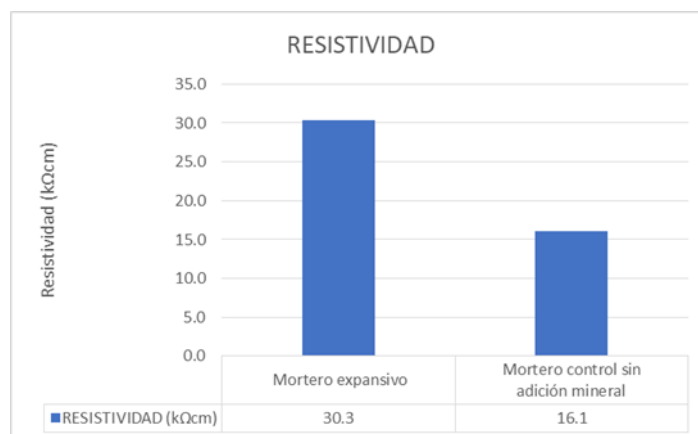


Figura 8: Comparación de valores de resistividad eléctrica in situ entre el mortero expansivo y el mortero antiguo sin adiciones minerales.

La disminución de la permeabilidad y de la porosidad conectada se debe a la densa matriz de poros que se forma en sistemas con arcillas calcinadas y la alta capacidad de relleno que tiene estos sistemas, [12], [13]. Los poros más finos son rellenados por una C-A-S-H de baja relación Si/Ca, rica en aluminio, que es responsable de la baja conectividad del sistema. Los poros más grandes son rellenados principalmente por productos del tipo Afm (mono y hemi carboaluminatos), que se forman con el aluminio proveniente de la arcilla calcinada. [12]

A partir de la Tabla 8 se demuestra que el mortero expansivo aplicado se encuentra en bajo o inexistente riesgo de corrosión mientras que el mortero antiguamente aplicado presenta un moderado riesgo.

Tabla 8: Riesgo de corrosión estimado en función la resistividad eléctrica. [14]

Resistividad (kΩ.cm)	Riesgo de corrosión
<5	Muy alto
5-oct	Alto
oct-20	Moderado-Bajo
>20	Bajo o inexistente

- Determinación de la absorción de agua por capilaridad según NC 171:2018 para mortero endurecido.

Los resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad de los testigos extraídos se presentan en la Figura 9.

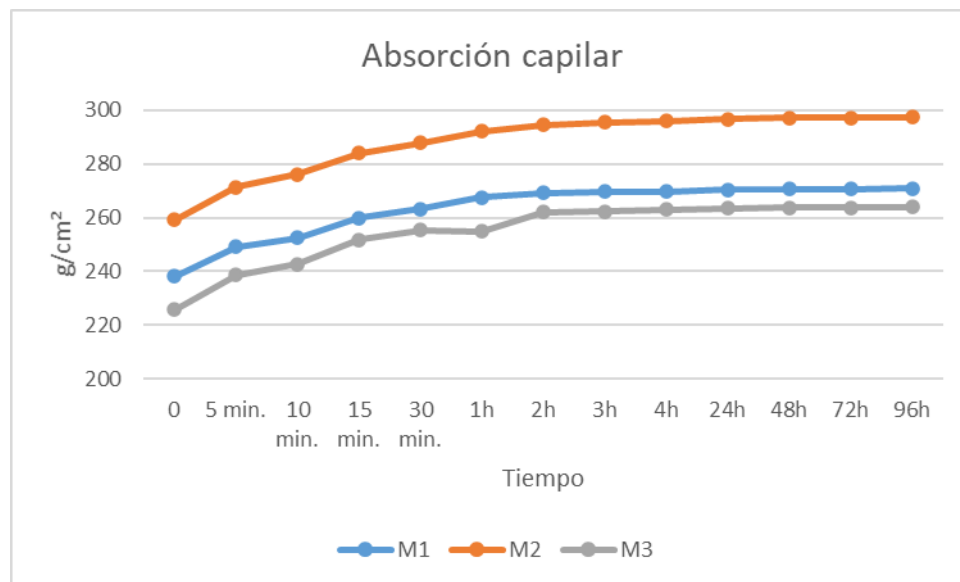


Figura 9: Absorción Capilar de mortero expansivo con tres años de aplicación en juntas de canales.

Los resultados obtenidos al cabo de tres años de su aplicación y según la expresión que plantea la NC: 171:2018:

$$\text{Absorción por capilaridad} = \frac{P_{\text{final}} - P_{\text{inicial}}}{16}$$

Las mediciones dieron como resultado una absorción de agua promedio de 2.26 g/cm² correspondiendo a un mortero tipo AC-II, es decir que el mortero absorbe cantidades de entre 1.5 y 4 g/cm².

Estos resultados demuestran la baja absorción de agua y la alta impermeabilidad que presenta el mortero expansivo. Coinciden con los estudios reportados en la literatura, que refieren que la arcilla calcinada en el sistema confiere una alta densidad de la estructura de poros y es responsable de la alta impermeabilidad de la matriz cementicia generada en estos sistemas [15].

- Ensayo de carbonatación según NC 355: 2004. Determinación de la profundidad de carbonatación.

El mortero presenta muy poca carbonatación al cabo de tres años de exposición al observarse mayoritariamente una coloración púrpura en casi toda la superficie e indicando un pH superior a 9.5. La medición realizada según Figura 10 presentó una $P_c = 2.5\text{mm}$, la que se considera mínima. Esto puede deberse a la alta humedad relativa a la que se encuentra expuesto ya que se encuentra en juntas sumergidas en el agua lo que dificulta el ingreso de los componentes ácidos de la atmósfera: dióxido de carbono (CO_2) y de azufre (SO_2) y permite que la velocidad de la carbonatación sea más lenta. También se debe a la acción puzolánica de las arcillas calcinadas y su adicional reducción de poros, suministrando al mortero una mayor compacidad y por ende una disminución de la entrada de cloruros y sulfatos lo que aumenta la durabilidad de las estructuras incluso sometidas a zonas ambientales de agresividad alta.



Figura 10: Medición del frente carbonatado.

Este resultado tiene correlación con los altos resultados obtenidos en el ensayo de resistividad eléctrica ya que sus valores dependen directamente del índice de poros y de la humedad relativa, este es un parámetro del control del mortero y su durabilidad y valora la resistencia a la carbonatación. Se puede establecer que cuanto mayor sea la resistividad, menor es la porosidad del mortero. (11)

4. CONCLUSIONES

El mortero MORDRY JUNT cumple con el objetivo de su funcionamiento y para el cual fue formulado: lograr una alta impermeabilidad durante su vida útil para evitar la filtración de agua.

Los resultados medidos en el ensayo de resistividad eléctrica in situ en diferentes puntos donde se aplicó el mortero expansivo y siguiendo el protocolo de la UNE 83988-2: 2008, mostraron altos valores de resistividad en comparación con el mortero antiguo aplicado anteriormente. Esto demuestra el principio de acción de las arcillas calcinadas de reducir la permeabilidad por el efecto del llenado de los poros con los productos formados en la reacción puzolánica.

Las mediciones de absorción de agua clasifican al mortero como tipo AC-II con valor promedio de 2.26 g/cm² por lo que es un mortero de baja absorción. Esta propiedad es causada por la presencia de arcilla calcinada en el sistema, responsable de la creación de una matriz cementicia de alta impermeabilidad.

El mortero presentó muy poca carbonatación al cabo de tres años de exposición debido a la alta humedad relativa y la reducción de poros de la matriz cementicia producto de la acción puzolánica. Este resultado tiene correlación con los altos resultados obtenidos en el ensayo de resistividad eléctrica que cuanto mayor sea la resistividad, menor es la porosidad del mortero.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de los especialistas de la Delegación del INRH que apoyaron en la investigación.

1. F. A. Zunino Sommariva, (2020). Limestone calcined clay cements (LC3): raw material processing, sulfate balance and hydration kinetics. EPFL, Thèse n° 8173.
2. G. Rodríguez, (2023). Hacia una industria cementera más sustentable. Textos de Tecnología. ISSN: 2730-5007; pp 71-79. <https://revistas.udelar.edu.uy/OJS/index.php/RdT/article/view/1514>
3. Abrao, P. C., Cecel, R. T., Cardoso, F. A. y John, V. M. (2022). Comparing the ecoefficiency of cements containing calcined clay and limestone filler. En S. Bishnoi (Ed.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete* (pp. 245-255). Singapur: Springer. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2806-4_28
4. K. Scrivener; F. Martirena, (2019). Hacia la sostenibilidad en la producción de cemento en América Latina: Cemento en base a arcillas calcinadas y caliza (LC3). *Revista Cemento y Concreto*, 6, 94.
5. B. Díaz, L. Freire, X. R. Nóvoa, B. Puga, and V. Vivier (2010). Resistivity of cementitious materials measured in diaphragm migration cells: The effect of the experimental set-up. *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 10, pp. 1465–1470, <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.05.004>
6. M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, K. Scrivener, (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cem. Concr. Res.* 42 1579–1589. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>
7. [J. M. Cruz; J. Payá; L. F. Lalinde; I. C. Fita (2011). Evaluación de las propiedades eléctricas de morteros de cemento con puzolanas. *Materiales de Construcción* Vol. 61, 301, 7-26; <http://doi.org/10.3989/mc.2010.53709>
8. Q. D. Nguyen, S. Afroz, and A. Castel (2020). Influence of Calcined Clay Reactivity on the Mechanical Properties and Chloride Diffusion Resistance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Concrete. <http://doi.org/10.3390/jmse8050301>
9. R. G. Carcaño. (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Vol. 20 No. 40. ISSN 2594-0732; <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.039>
10. A. Favier, C. De Wolf, K. Scrivener, And G. Habert (2018). ETH Library A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry. Technology assessment for full decarbonization of the industry by 2050. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000301843>
11. E. Chaves Ulloa (2013). Deterioro de estructuras de concreto para carbonatación en medio ambiente marino tropical y cámara de carbonatación acelerada. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia*, Vol. 36 No. 2, ISSN 0254-0770
12. Visser, J. (2012). Accelerated carbonation testing of mortar with supplementary cement materials: limitation of the acceleration due to drying. *HERON Journal*, Vol. 57, No. 3, 231-247.
13. J. F. Garcés-Vargas, Y. Díaz Cárdenas and F. Martirena Hdez (2024). Evaluation of the Durability of Concrete with the Use of Calcined Clays and Limestone in Salinas, Ecuador. *Journal Minerals*, 14, 460. <https://doi.org/10.3390/min140504460>
14. DURAR (2000). Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en Estructuras de Concreto Armado. CYTED. Tercera edición. Agosto, ISBN 980-296-541-3
15. Y. Dhandapani and M. Santhanam, (2019). Investigation on the microstructure-related characteristics to elucidate performance of composite cement with limestone-calcined clay combination. *Cem. Concr. Res.*, vol. 129, <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105959>