



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

ADICIONES SEMI-INDUSTRIALES EN MORTERO DE CEMENTO Y SU EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

**C. Bernabe-Reyes¹, W. Martínez-Molina², J. I. Escalante-García³, E. M. Alonso-Guzmán²,
C. Lara-Gómez², J. A. Arteaga-Arcos⁴, D. J. Delgado-Hernández⁴, F. A. Velasco-Ávalos²,
M. Arreola-Sánchez¹ y S. C. Arguello-Hernández¹.**

¹Ingenieros del Programa de Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040
²Cuerpo Académico Consolidado CAC-147-UMSNH, Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040
³Cinvestav, I.P. N., Unidad Saltillo, Carretera Saltillo-Monterrey, Km 13, Ramos Arizpe, Coahuila, México, 25900
⁴Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México, México, 50130

RESUMEN

Se realizaron sustituciones parciales de 5, 10, 15, 20 y 30% en peso de cemento Portland (CP) por ceniza de elaboración de ladrillo (CEL) y Metacaolín (MK), en morteros, para buscar mejorar sus propiedades físico-mecánicas. Los morteros se probaron en compresión, tensión, flexión y adherencia, también se midió la resistividad eléctrica; las pruebas fueron a 14, 28 y 45 días de edad. Los resultados de los morteros modificados se compararon con los de un testigo con 100% de CP. Se observó que el CEL tuvo comportamiento puzolánico, mejorando las propiedades mecánicas, sin obtenerse los resultados obtenidos con MK. Con la medición de la resistividad se pudo estimar la porosidad del mortero, presentado mayor resistividad con adiciones de MK con respecto a las adiciones de CEL.

Palabras claves: Morteros, Sustitución, Metacaolín, Resistividad, Compresión.

ABSTRACT

Partial replacements of 5, 10, 15, 20 and 30% were by weight of Portland cement (CP) by ash preparation of brick (CEL) and Metakaolin (MK), in mortars, to improve their physical and mechanical properties. The mortars were tested in compression, tension, bending and bonding strengths, also measured the electrical resistivity; the tests were at 14, 28 and 45 days of age. The results of the modified mortars were compared with a witness with 100% of CP. Be noted that CEL had behavior Pozzolanic, improving the mechanical properties, but not as results obtaining with MK. With the measurement of resistivity one could estimate the porosity of mortar, performed greater resistivity with MK additions with respect to additions of CEL

Key Words: mortars, substitutions, metakaolin, resistivity, compression

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la humanidad ha experimentado gran crecimiento demográfico y cambios en los hábitos; como consecuencia, nuestras actividades impactan negativamente al medio ambiente, ya que los hábitos actuales de vida exigen la ocupación de más espacios, y por ende, la destrucción y agotamiento intenso de áreas ecológicas. Aunado a ello la construcción de elementos fabricados a base de cemento Portland (CP) contribuyen a tal deterioro, ya que la producción de una tonelada de CP genera aproximadamente una tonelada de CO₂, lo cual es preocupante por las repercusiones negativas asociadas al efecto invernadero¹. Lo anterior ha despertado la preocupación e interés de la industria y la academia para generar opciones alternativas de materiales y tecnologías de construcción con criterios de sustentabilidad. Para esto, es necesario promover el uso de los recursos cementosos alternativos, ya sea naturales o como subproductos de actividades industriales. Una medida viable para contribuir al cuidado del medio ambiente es la utilización de puzolanas, naturales o sintéticas, como sustitutos minerales del CP en mezclas de mortero.

Un sustituto de CP con alta actividad puzolánica es aquel obtenido de la calcinación de las arcillas caoliníticas de purzas variables, el Metacaolín (MK)^{1,2}; esta es un silicoaluminato que es parte del presente estudio. Otra puzolana con propiedades promisorias es la Ceniza de Elaboración de Ladrillo (CEL), la cual es también un silicoaluminato del que no se han encontrado antecedentes en la literatura, aunque por sus características se espera un comportamiento similar al del MK.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las materias primas se caracterizaron por difracción de rayos X, para determinar cualitativamente las fases presentes y por Fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer la composición química. Los resultados de FRX se presentan en la tabla 1, los resultados de DRX muestran la curva típica, o campana de Gauss, de los materiales criptocristalinos como las puzolanas, sin detección de especies específicas. El mezclado de los morteros se realizó en una cubeta de plástico de 19 litros, utilizando un taladro con potencia de 750w y 3500 RPM con accesorio de espas mezcladoras, el tiempo de mezclado fue de 3 min. Previo a la elaboración de los especímenes se realizaron las pruebas para determinar la cantidad de agua necesaria para obtener una fluidez de 110% ± 5% en los morteros³.

Se determinó un rendimiento de cementante de 0.47 g/cm³, ya que al seguir la norma ASTM C109 M I, para llenar 6 cubos de 5 cm por lado se desperdicia material. La tabla 2 presenta las cantidades usadas en cada mezcla. Para las sustituciones con 15, 20 y 30% MK fue necesario agregar un aditivo de tipo fluidificante en polvo. La tabla 3 indica el número de especímenes preparados para cada prueba de compresión axial, módulo de elasticidad, flexión y tensión. Adicionalmente se realizaron pruebas de adherencia⁴ y resistividad eléctrica.

Para cada prueba se hizo una comparación con los morteros testigo para determinar la eficiencia de las formulaciones con sustitución del CP.

Tabla 1. Composición química en porcentaje de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por fluorescencia de rayos X.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	SrO	BaO	Cr ₂ O ₃
CEL	12.18	7.52	0.41	3.889	4.612	0.928	33.47	0.398	9.099	1.01	0.211	0.175	26.1
MK	51.09	45.27	1.75	0.487	0	0	0.032	0.219	0.172	0.036	0	0	0.033
CPC 30R RS	23.88	4.997	0.217	2.972	0.88	0.096	54.6	1.23	1.666	3.791	0.061	0	0

Tabla 2. Proporción de materiales con que se elaboró el mortero.

Agregado o característica	Cantidad
Cemento (CPC 30R-RS)	1481 g
Arena	4072g
Agua	1495 ml
Relación agua/cemento(A/C)	1.01
Fluidez	108%

Tabla 3. Cantidades de especímenes que se llenaron con la cantidad de material de tabla 1.

Espécimen	Prueba a realizar	No. de especímenes
Cubos de 5cm x 5cm x 5cm	Compresión axial	15
Cilindros de 10cm Ø x 20cm H	Módulo de elasticidad	7
Prismas de 4cm x4cm x16cm	Flexión	7
Briquetas	Tensión	15

RESULTADOS

Resultados de la Prueba a compresión

La adición de MK al mortero incrementa considerablemente la resistencia a compresión. El resultado mostrado en la ilustración 6 nos indica un aumento de la resistencia conforme aumenta el porcentaje de sustitución, observando el mayor valor para el 30% a los 45 días de edad, el cual representa un aumento del 90% de la resistencia con respecto al testigo.

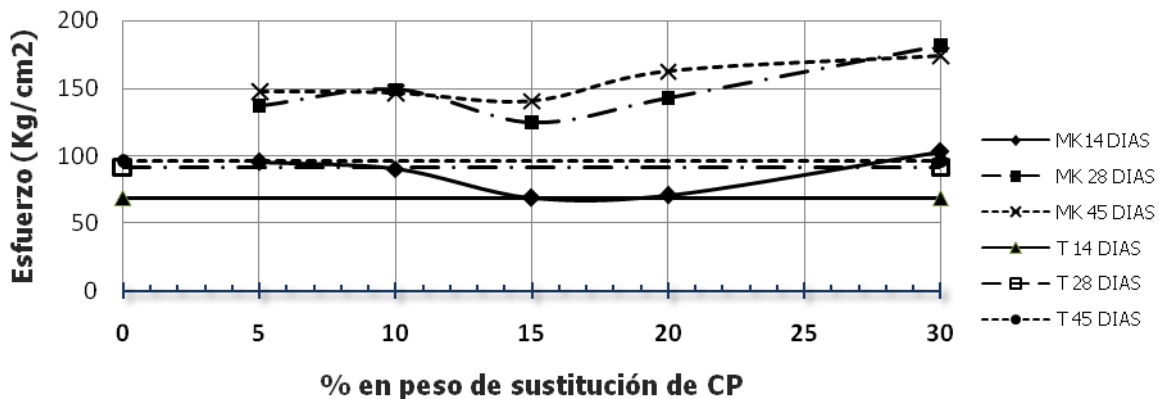


Ilustración 1. Resultados de resistencia a la compresión en función del nivel de sustitución, del tiempo y del tipo de sustituto de CP. MK sustitución con metacaolín, T testigo sin adiciones.

Los esfuerzos obtenidos con mortero a adicionado con CEL son similares a los del testigo, siendo el 5 y 10% superiores. Los porcentajes de 15, 20 y 30% son inferiores al testigo en todas las edades de prueba, con tendencia a seguir disminuyendo como se muestra en la ilustración 7.

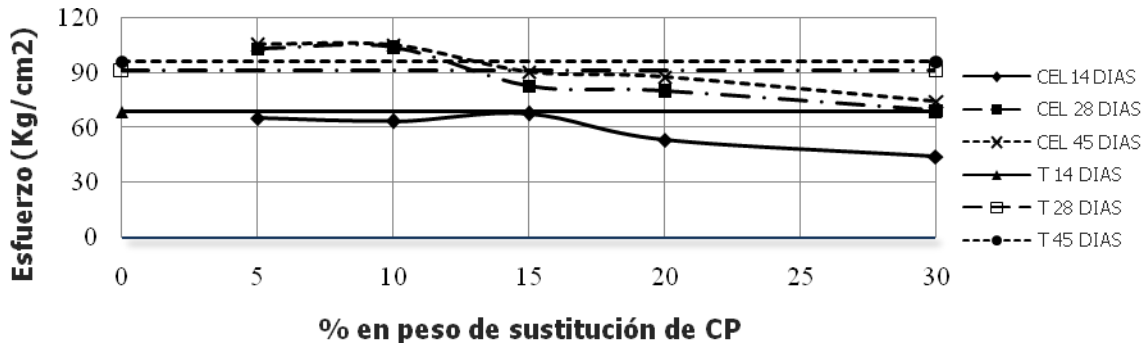


Ilustración 2. Resultados de resistencia a la compresión en función del nivel de sustitución, del tiempo y del tipo de sustituto de CP. CEL sustitución con ceniza de ladrillo, T testigo sin adiciones.

Resultados de la Resistencia a Tensión en Briquetas

Las sustituciones de CEL, para todas las edades y porcentajes de prueba, se encuentran por debajo del testigo hasta los 45 días de edad, como se muestra en la figura 10. Las tendencias de resultados indican una disminución para las edades de 14 y 28 días, sin embargo para la edad de 45 días se nota un incremento entre los porcentajes de sustitución de 20 y 30%, lo que nos da la pauta para seguir realizando el estudio con porcentajes mayores de sustitución y concluir con resultados a edades tardías, esperando a que la reacción de la ceniza se desarrolle.

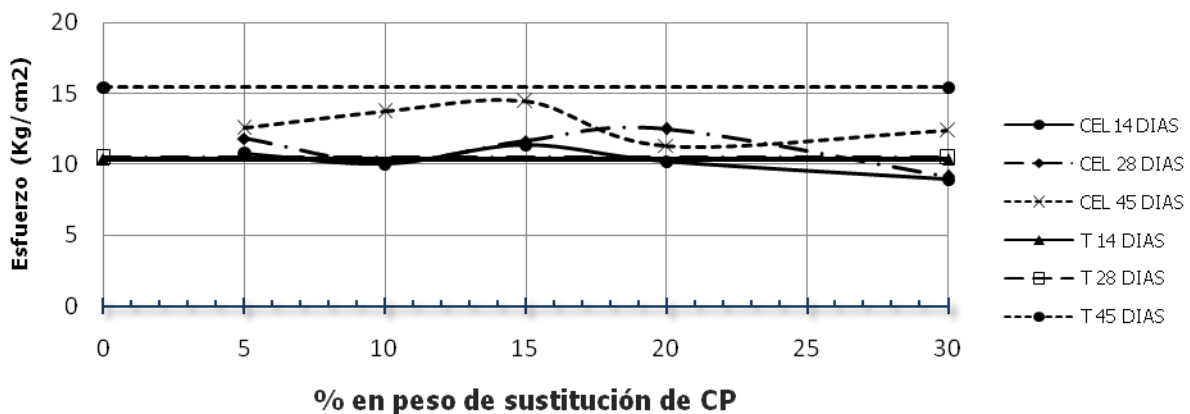


Ilustración 3. Representación gráfica de los esfuerzos a tensión en briquetas para la CEL. CEL especímenes adicionados con ceniza de elaboración de ladrillo y T, especímenes testigo sin adiciones.

Para los resultados de tensión en morteros utilizando MK, la resistencia máxima se alcanza con la sustitución del 15% a los 45 días de edad, logrando superar al testigo en un 20% de su resistencia. En la ilustración 11 se muestra como los valores decrecen conforme aumenta el porcentaje de sustitución, lo que predice valores inferiores para mayores porcentajes de sustitución.

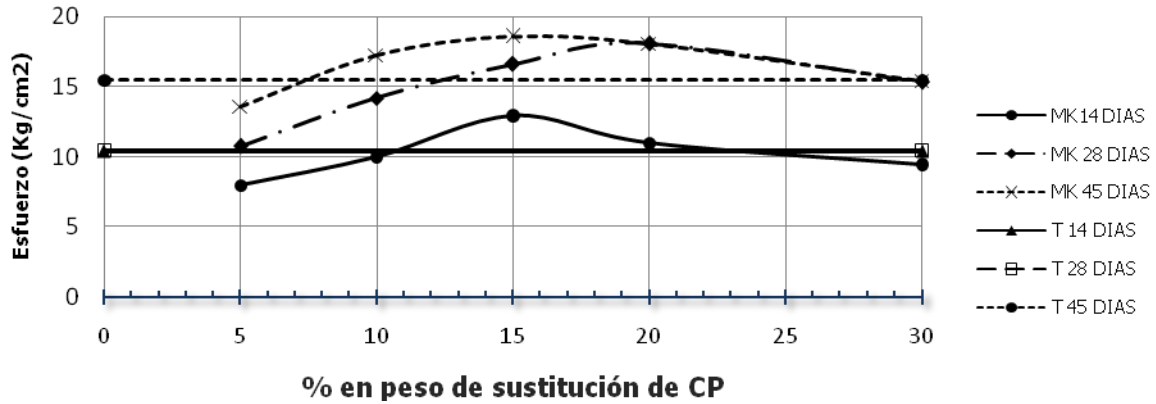


Ilustración 4. Resultados de tensión en briquetas en morteros: MK especímenes adicionados con metacaolín y T, especímenes testigo sin adiciones.

Resultados de Flexión Estática en Prismas

Los valores sobresalientes obtenidos de la prueba de flexión corresponden al porcentaje de sustitución del 20% de MK y del 20% de CEL, los cuales superan al testigo en un 68 y 20% de su resistencia respectivamente a los 45 días de edad.

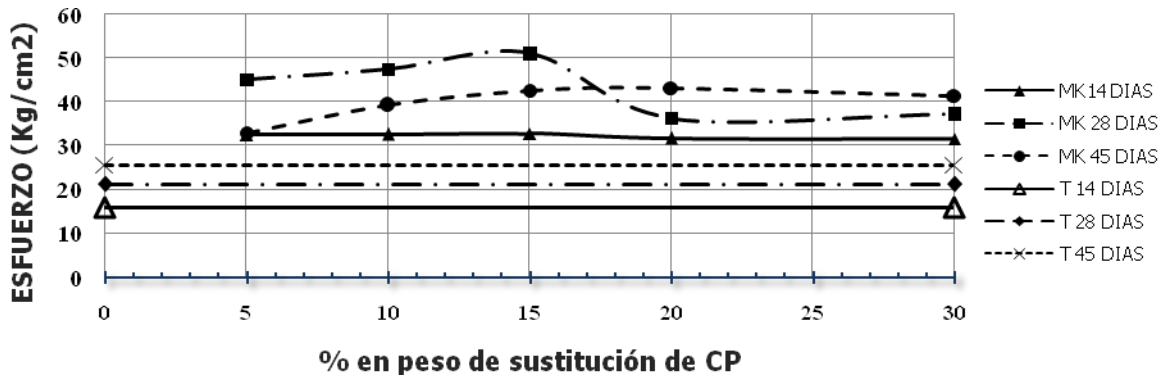


Ilustración 5. Resultados de flexión estática en prismas de mortero: MK especímenes adicionados con metacaolín y T, especímenes testigo sin adiciones.

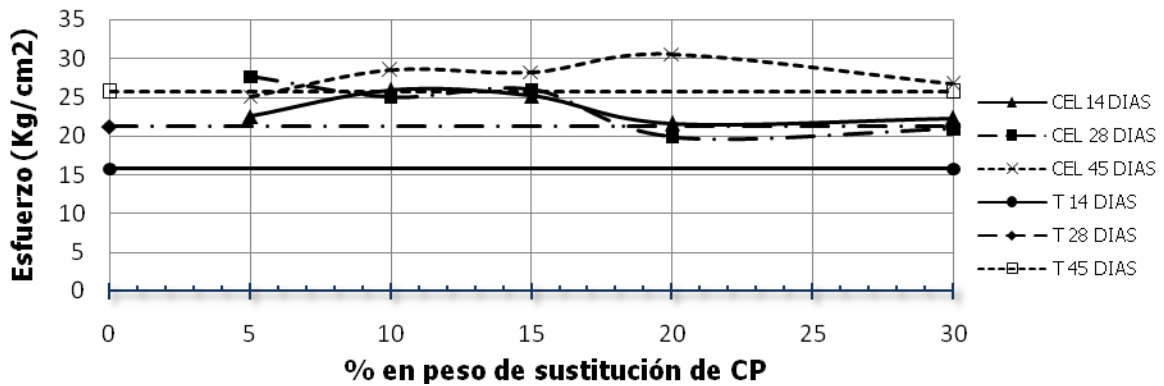


Ilustración 6. Resultados de las pruebas de flexión estática en prismas de mortero: CEL especímenes adicionados con ceniza de elaboración de ladrillo y T, especímenes testigo sin adiciones.

Resultados de las Pruebas de Adherencia

El mejor comportamiento en la prueba de adherencia se tiene con la sustitución de 10% de CEL y del 20% de MK para la edad de 45 días, haciendo notar que todos los porcentajes superan al testigo en todas las edades de prueba. Como se muestra en la ilustración 12, la utilización de CEL en sustituciones de mayor porcentaje no predice buenos resultados, ya que la tendencia es negativa, al igual que el MK mostrado en la ilustración 13.

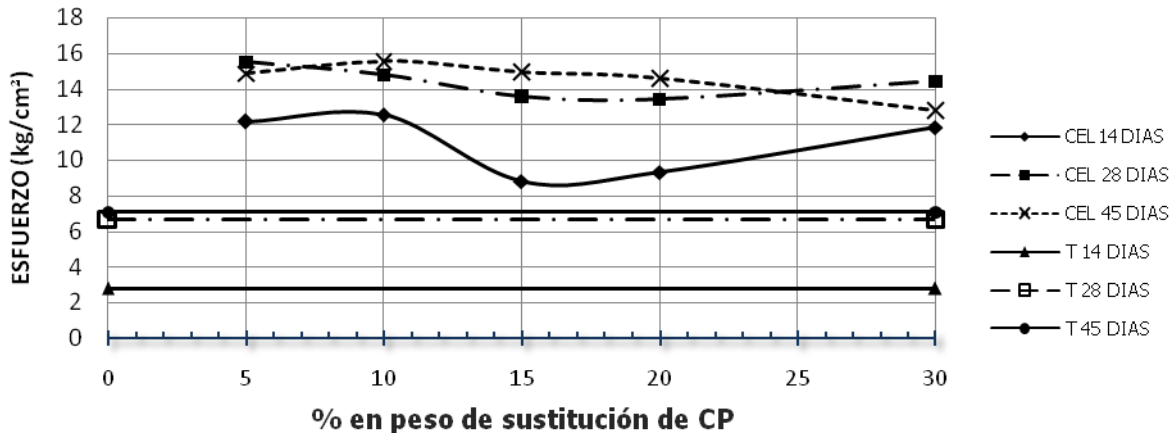


Ilustración 7. Resultados de la adherencia del mortero: CEL, con ceniza de elaboración de ladrillo y T, especímenes testigo sin adiciones.

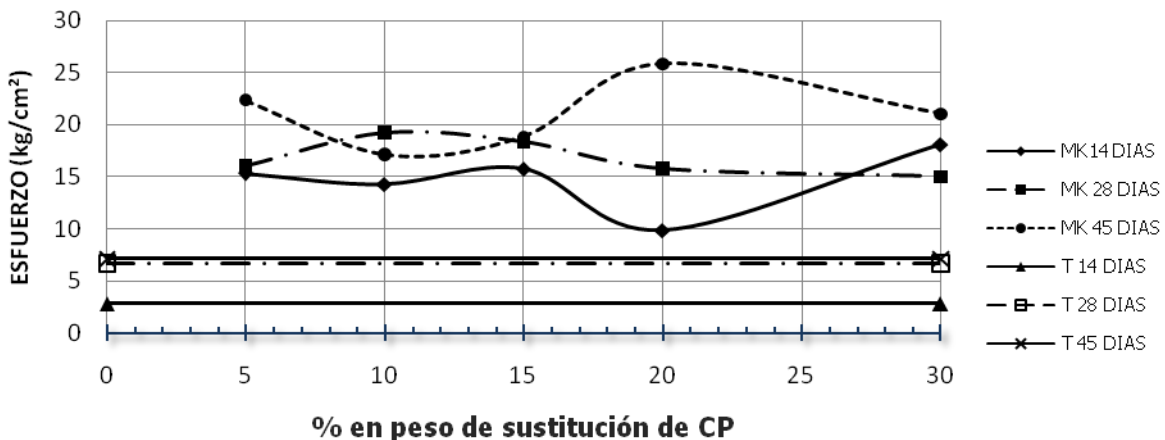


Ilustración 8. Resultados de la prueba de adherencia de morteros: MK, adicionados con metacaolín y T, especímenes testigo sin adiciones.

Resultados de la Resistividad Eléctrica

Los resultados de la prueba de resistividad para las adiciones de CEL muestran un comportamiento similar al testigo, notando que a la edad de 45 días solo los porcentajes de sustitución de 5 y 30% presentan un ligero incremento en las mediciones, como se muestra en la Ilustración 14. Caso contrario a lo que muestra la Ilustración 15, en la que todas las sustituciones de MK superan considerablemente al testigo, siendo la sustitución de 30% la que presenta el resultado más alto.

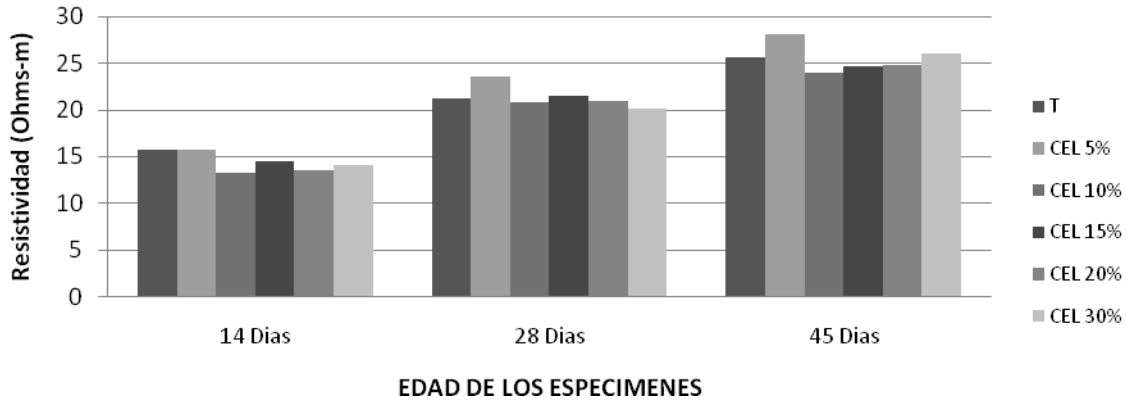


Ilustración 9. Resultados de resistividad eléctrica del para los morteros: CEL especímenes adicionados con ceniza de elaboración de ladrillo y T, especímenes testigo sin adiciones.

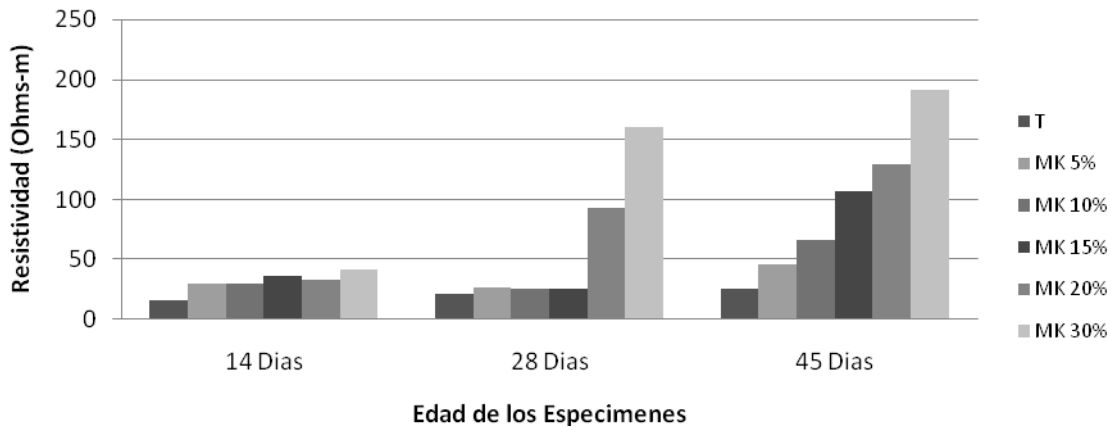


Ilustración 10. Resultados de la resistividad eléctrica para los morteros: MK especímenes adicionados con metacaolín y T, especímenes testigo sin adiciones.

CONCLUSIONES

Las sustituciones minerales de MK y CEL presentan características puzolánicas en presencia de la hidratación de cemento portland, ya que mejoraron la resistencia a diferentes tipos de esfuerzos mecánicos (compresión, flexión y tensión) con respecto al mortero testigo elaborado solamente con cemento pòrtland.

La adherencia mostrada por los morteros de MK y CEL a los 45 días de edad es recomendable, los valores registrados fueron superiores a los del mortero convencional. Los valores más adecuados de sustitución fueron 20% MK y 10% CEL, los cuales pueden ser utilizados como recubrimiento en estructuras cuya superficie este expuesta a fuerzas de tracción.

La sustitución mineral más favorable para la resistencia mecánica de los morteros fue la de MK, con tendencias positivas que sugieren que es posible utilizar mayores porcentajes de sustitución que los utilizados en este estudio. Esto da la pauta para realizar un estudio posterior con sustituciones mayores al 30%, en concordancia con estudios previos.

Los resultados de tensión del mortero con sustitución de MK, nos dan una alternativa de solución para los problemas de agrietamientos en zonas sísmicas, en las que se requiera un mortero que absorba las deformaciones causadas por la sismicidad, manteniendo el confort y seguridad para los usuarios de la estructura.

Adicionalmente a las mejoras en la resistencia a la compresión al utilizar el MK, tiene otras ventajas. Una es la coloración, que en este caso, para un mineral de alta pureza es de color blanco, que es ventajoso para su uso en obras arquitectónicas. Otra ventaja es que se la reacción puzolánica consume el hidróxido de calcio que produce la hidratación del CP, densificando la microestructura y reduciendo la permeabilidad, lo anterior se puede notar en las graficas de resistividad, en las que el MK presenta mejor comportamiento, con lo cual se puede inferir una menor porosidad; esto repercute en un incremento en la durabilidad de los morteros y concretos que incorporan MK. Sin embargo, es necesario considerar que el costo del MK de alta pureza es 300% mayor que el costo del CP. Así, el uso de MK deberá definirse en base a la ponderación de una serie de criterios de costo económico, propiedades y características deseadas, así como impacto ambiental.

Las propiedades de los morteros con CEL son promisorias. Se requiere un estudio de este material a edades tardías para poder comprobar sus propiedades puzolánicas. El uso del CEL es factible donde la producción de ladrillos forma parte de la vida económica de la región. Esto ayudaría a reducir problemas de manejo del subproducto y se evitaría su confinamiento en espacios que podrían ser útiles para otras aplicaciones. Considerando que existen otros cerámicos como las tejas u otros productos que se fabrican mediante cocción de arcillas, será interesante promover investigaciones adicionales con otro tipo de subproductos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el soporte financiero del CONACYT, de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y del Proyecto de Red Promep-SEP Red Temática Promep para la Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico.

REFERENCIAS

1. Escalante, J.I., Navarro, A.,Gómez, L. Y. (2011). “Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza”. Revista ALCONPAT, (2011): pp. 156-169.
2. CALDARONE, A. G.High-Reactivity Metakaolin: A New J. ACI Mat., (1994): pp.37-41.
3. ASTM C 109M, I. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). (2002). U.S.A.
4. ASTM International, Designation: C 1583, Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method).(2004). U.S.A.