









ORIGINAL

Design and Fabrication of Concrete Mixtures Using Metakaolin Calcined at Different Temperatures

Diseño y Fabricación de Mezclas De Concretos Empleando Metacaolín Calcinado A Diferentes Temperatura

César Roberto Domínguez Pompa¹  , Jesús Manuel Bernal Camacho¹  , Yennifer Diaz Romero²  , Víctor Manuel Martínez García³  

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería y Tecnología Mazatlán. Mazatlán, México.

²Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Educación. Mazatlán, México.

³Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Arquitectura y Diseño Mazatlán. Mazatlán, México.

Citar como: Domínguez Pompa CR, Bernal Camacho JM, Diaz Romero Y, Martínez García VM. Design and Fabrication of Concrete Mixtures Using Metakaolin Calcined at Different Temperatures. eVitroKhem. 2026; 5:396. <https://doi.org/10.56294/evk2026396>

Enviado: 15-07-2025

Revisado: 02-09-2025

Aceptado: 08-11-2025

Publicado: 01-01-2026

Editor: Prof. Dr. Javier Gonzalez-Argote 

Autor para la correspondencia: Víctor Manuel Martínez García 

ABSTRACT

The present research is aimed at exploring formulations of concrete mixes that incorporate metakaolin (MK), derived from kaolin calcined at different temperatures (700°C and 800°C). The metakaolin was generated in a laboratory setting from pure kaolin extracted in the Magistral de Copala development area, Concordia, Sinaloa. The experimental design encompasses five variants of concrete mixes, including a reference standard and options with 15 % and 20 % cement replacement with metakaolin at 700°C, as well as mixes with the same substitution percentage using metakaolin at 800°C. The collected results indicate that fluctuations in the calcination temperature do not exert a substantial impact on the mechanical and deterioration resistance characteristics of concrete, as both temperatures promote the formation of metakaolins with high pozzolanic activity. The formulation highlighted for its superior performance in terms of mechanical strength (compression) and durability (microstructural parameters, electrical resistivity, chloride migration) is the one using MK calcined at 800°C, replacing 15 % of the weight of the cement. These findings underscore the possibility of obtaining environmentally friendly mineral additions by substituting significant amounts of cement, thus contributing to reducing the carbon footprint associated with its manufacturing.

Keywords: Kaolin; Metakaolin; Concrete; Durability; Cement Replacement.

RESUMEN

La presente investigación se orienta hacia la exploración de formulaciones de mezclas de concreto que integran metacaolín (MK), derivado de caolín calcinado a diferentes temperaturas (700°C y 800°C). El metacaolín se generó en un entorno de laboratorio a partir de caolín puro extraído en el área de desarrollo Magistral de Copala, Concordia, Sinaloa. El diseño experimental engloba cinco variantes de mezclas de concreto, que incluyen un estándar de referencia y opciones con sustitución del 15 % y 20 % del cemento por metacaolín a 700°C, así como mezclas con el mismo porcentaje de sustitución usando metacaolín a 800°C. Los resultados recabados señalan que las fluctuaciones en la temperatura de calcinación no ejercen un impacto sustancial en las propiedades física y químicas de los metacaolines obtenidos, ya que al momento de ser empleados como sustituto parcial del cemento no se observaron cambios importantes en las características mecánicas y durables del concreto. La formulación destacada por su rendimiento superior en términos de resistencia mecánica (compresión) y durabilidad (parámetros microestructurales, resistividad eléctrica, migración de cloruros) corresponde a la

que utiliza MK calcinado a 800 °C, sustituyendo el 15 % del peso del cemento. Estos resultados subrayan la posibilidad de obtener adiciones minerales respetuosos con el entorno al sustituir cantidades significativas de cemento, contribuyendo así a reducir la huella de carbono vinculada a su manufactura.

Palabras clave: Caolín; Metacaolín; Concreto; Durabilidad; Reemplazo de Cemento.

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de la investigación fue la exploración de nuevas alternativas para satisfacer las demandas de materiales en el ámbito de la construcción. La investigación se centró en la producción de muestras de concreto adicionados con metacaolín (MK), un derivado calcinado del caolín ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Estas muestras consistieron en probetas de 10 cm de diámetro (\varnothing) y 20 cm de longitud (e).

Las propiedades que se evaluaron incluyen la resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, migración de cloruros, densidad y porosidad. Se llevó a cabo un total de 60 especímenes de concreto con diferentes porcentajes de metacaolín y distintos tiempos de calcinación para su obtención.

Hoy en día, la producción excesiva del Cemento Pórtland (CP) se ha identificado como una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), impulsando necesariamente en explorar alternativas de materiales sustentables.

El Metacaolín como adición mineral surge como una opción viable para sustituir parcialmente al cemento en la fabricación de concreto. Investigaciones previas especificaron que la eficacia de este material está ligada a la temperatura de calcinado del Caolín y en el porcentaje de reemplazo en respecto al peso del cemento. Por lo que en este contexto la definición de estas variables se revela de gran importancia para la optimización del producto final.

Este análisis situacional destaca en abordar la necesidad de buscar y desarrollar alternativas sustentables en la producción de concreto en lo particular mediante el estudio de adiciones minerales como el metacaolín. En la comprensión de los factores que impactan en su eficacia se presenta como un paso fundamental en la dirección de una construcción más amigable con el medio ambiente y menos dependiente de materiales contaminantes.

La fabricación de cemento es una de las principales fuentes de impacto ambiental.⁽¹⁾ El Cemento Portland se utiliza como cementante en la producción de concreto. Se obtiene mezclando materias primas seleccionadas (arcilla y cal) en una determinada proporción, moliendo y calentando a 1500 °C. Durante la producción de 1 tonelada de cemento, se consumen combustibles fósiles y electricidad, de los cuales entre el 5 % y el 7 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) artificiales se pueden atribuir a la industria de fabricación de cemento. Se estima que la producción anual mundial de cemento llegará a aproximadamente 5,9 mil millones de toneladas en los próximos años, lo que equivale a 4,8 mil millones de toneladas de CO_2 .⁽²⁾

El agotamiento de las materias primas extraídas de estructuras geológicas naturales para la fabricación de cemento ha llevado a la exploración de alternativas que incluyen residuos naturales o artificiales. Diversos materiales puzolánicos como cenizas volantes, humo de sílice y metacaolín se pueden mezclar con cemento portland ordinario mejorando las propiedades de cementación y las propiedades mecánicas del cemento.⁽³⁾

Ante este panorama, este estudio propone la fabricación de metacaolín a partir del caolín, sometándolo a diferentes temperaturas. El metacaolín resultante se utilizará en diferentes porcentajes como sustituto parcial del cemento en mezclas de concreto. El objetivo principal es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la sostenibilidad y potenciar las propiedades físicas y duraderas del concreto.

Marco teórico

Se le llama adiciones activas a aquellas que tienen la capacidad de reaccionar con el agua y con el hidróxido de calcio del cemento Pórtland hidratado a temperatura ambiente (adiciones puzolánicas), o reaccionan con el agua directamente (adiciones hidráulicas), para formar productos cohesivos y estables. Esta capacidad de reacción de las adiciones que contienen sílice amorfa, es similar a la que aprovechaban los romanos con sus materiales, al inicio de la historia del concreto.

El concepto de material cementante suplementario también alberga a materiales abundantes en óxido de calcio y otros minerales con la habilidad para reaccionar con agua y solidificarse, similar al cemento hidráulico, por tanto, se les atribuye el nombre de materiales con carácter hidráulico, como es el caso de la escoria de alto horno o las cenizas volantes calcáreas.⁽⁴⁾

El metacaolín (MK), clasificado como material puzolánico de clase N según la norma ASTM-C-618, se configura como la forma deshidroxilada de la arcilla caolinita, la cual es sometida a un proceso de calcinación a temperaturas que varían entre 500 °C y 800 °C. Durante el rango de 100 a 200 °C, los minerales arcillosos experimentan una pérdida sustancial de agua adsorbida, y entre 500 y 800 °C, la caolinita experimenta deshidroxilación al liberar agua.

La deshidroxilación de caolín a metacaolín es un proceso endotérmico debido a la gran cantidad de energía requerida para eliminar los iones de hidroxilo unidos químicamente. Por encima de este rango de temperatura, la caolinita se convierte en metacaolín, con un orden bidimensional en la estructura cristalina.⁽⁵⁾

Marco legal

Tabla 1. Condensado marco legal	
Norma	Prueba o Clasificación
NMX-C-083-ONNCCE	Determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto tales como cilindros moldeados y núcleos taladrados.
NMX-C-159-ONNCCE	Esta Norma Mexicana establece los procedimientos para elaborar y curar ya sea en obra o en el laboratorio, los especímenes de concreto utilizados para los ensayos que se requieran.
NMX-C-156-ONNCCE	Esta norma mexicana establece los procedimientos para determinar la consistencia del concreto hidráulico en estado fresco.
NMX-C-486-ONNCCE	Contiene especificaciones para el control de las propiedades del concreto tanto en su estado endurecido como en su estado fresco.
ACI-211	Da las pautas a seguir para el proporcionamiento de las mezclas para estos tipos de concreto.
ASTM C642	Determinación de la densidad, la absorción del agua y los vacíos en el concreto endurecido.
NMX-C-077	Determinación de los diferentes tamaños de partículas que forman a las gravas
NMX-C-030	Para el muestreo de los agregados se hace de una manera representativa.
NMX-C-170	Para la reducción a tamaño de ensayo o cuarteo.
NMX C-164	Para determinar el índice de calidad con que cuenta la grava, para la elaboración de mezclas de concreto.
NMX-C-166	Para determinar el contenido de humedad total para asegurar la calidad y uniformidad dadas al producir la mezcla de concreto hidráulico.
UNE-83988-1	Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica.

MÉTODO

Materiales

Para la calcinación se utilizó un caolín extraído de una mina sin nombre ubicado en el desarrollo magistral de Copala. Para determinar la composición química del material se realizaron estudios de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

La composición química de los metacaolines obtenidos con Fluorescencia de Rayos X (FRX) se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Composición química del metacaolín a 700 °C y 800 °C		
Composición química del MK		
Componente	MK 700 °C (%)	MK 800 °C (%)
SiO ₂	56,70 %	56,90 %
Al ₂ O ₃	20,50 %	20,50 %
K ₂ O	4,70 %	4,75 %
Fe ₂ O ₃	1,74 %	1,74 %
MgO	0,35 %	0,34 %
TiO ₂	0,20 %	0,21 %
CaO	0,15 %	0,16 %

910 Antes de la calcinación, la muestra de caolín fue sometida a molienda manual, buscando evitar problemas de difusión y homogeneizar la transferencia de calor durante el tratamiento térmico. Posteriormente, se dispuso la muestra en un crisol de granito y se llevó a cabo la calcinación en un horno mufla modelo J-01 de la marca MARLA, aplicando dos diferentes temperaturas: 700°C y 800°C, con una velocidad de calentamiento de 10°C por minuto.

Diseño de mezclas de concreto por el método ACI-211

Con el objetivo de lograr una aplicación más efectiva del concreto en diversas condiciones y usos, se llevará a cabo la preparación de un concreto bombeable, estableciendo un tamaño máximo de agregado (TMA) de “gravas” de 3/4”. El revenimiento mínimo para todo concreto bombeable se fijará en 14 cm.

La metodología abordó el diseño de la mezcla de concreto para una capacidad de 1 m³, generando los resultados detallados a continuación:

Tabla 3. Diseño de mezcla de concreto			
Diseño de mezclas y cálculo de materiales por el método ACI 211			
Cemento tipo-clase-marca: Cemento CEMEX CPO		Colocación del concreto: Bombeable	
Resistencia a la compresión (f´c): 250 kg/cm ²		Condiciones de trabajo:	Normales
Edad de la muestra en días:	28	Tipo de aditivo:	ninguno
Revenimiento:	14cm	Tamaño máximo de agregado: 3/4	
Características de los agregados			
Calidad	Grava	Arena	Cemento
P.V.S.S. (kg/cm ³)	1678	1603	-
P.V.S.C. (kg/cm ³)	1693	1708	-
Densidad	2,575	2,532	-
%Absorción	1,945	2,4	-
Tamaño máximo mm-plg	3/4”	#4	-
Módulo de finura	-	2,54	-
Datos del cálculo			
Litros de agua/m ³ : 210		Cemento(kg/cm ³): LTS/AC: 339	
Relación agua-cemento: 0,62		Litros de agua/m ³ (A): 210	
Volumen de agregados: 0,65		Grava(kg/cm ³): Vol del agregado PVCG: 1100	
P. Vol. Concreto fresco (kg/cm ³) (P.V.C.F.): 2355		Arena(kg/cm ³): P.V.C.F.-C-A-G: 706	

Tabla 4. Dosificación para la campaña experimental						
Campaña experimental						
	C1-R	MK700-15 %	MK700-20 %	MK800-15 %	MK800-20 %	Total
Cemento	8,52	7,24	6,81	7,24	6,81	36,62
Agua	4,80	4,80	4,80	4,80	4,80	23,98
Arena	16,12	16,12	16,12	16,12	16,12	80,61
Grava	25,12	25,12	25,12	25,12	25,12	125,60
MK 700	-	1,28	1,70	-	-	2,98
MK 800	-	-	-	1,28	1,70	2,98
A/C	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	

Luego de realizar el meticuloso cálculo de la dosificación para un metro cúbico de concreto, se llevó a cabo una extensión de este proceso para determinar las cantidades necesarias de materiales en función de las muestras específicas requeridas para la campaña experimental.

Pruebas para determinar las propiedades mecánicas

Con precisión y meticulosidad, se llevó a cabo un procedimiento de cabeceo de las probetas utilizando almohadillas de neopreno, siguiendo las directrices establecidas por la norma ASTM-C-1231.



Figura 1. Equipo requerido para el refrendo de cilindros de concreto de acuerdo con la norma ASTM-C-1231

Para comenzar se tomaron las medidas de cada una de las probetas de concreto a ser ensayadas, las cuales son 10cm x 20cm con dichas medidas se procedió a calcular el área de cada una de las probetas, para la prueba primero se colocó la probeta sobre la placa de la prensa hidráulica alineando el eje de la muestra con el centro de empuje de la prensa como en la figura 2 y por consiguiente se comenzó a aplicar carga de manera constante registrando las lecturas en el sistema de cómputo hasta que la muestra llegó a su falla. Para el cálculo de la resistencia a la compresión de las probetas se utilizó la ecuación que a continuación se menciona.

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión en kg/cm²

P= Carga de rotura, kg

A= Área de la muestra en cm²



Figura 2. Alineación del eje de la muestra con el centro de empuje de la prensa

RESULTADOS

Los resultados indicaron una leve disminución del revenimiento conforme aumentó la cantidad de MK, lo cual se atribuye a la mayor finura y absorción del material. En términos de resistencia a la compresión, la mezcla MK800-15 % mostró el mejor desempeño, alcanzando el 98 % de la resistencia del concreto de referencia a los 28 días y superándolo a los 90 días. Estos resultados demuestran la efectividad de la calcinación a 800 °C para maximizar la actividad puzolánica del material.

La resistividad eléctrica de las mezclas con MK aumentó hasta un 22 %, lo que refleja una estructura más compacta y menor permeabilidad. Asimismo, la prueba de migración de cloruros reveló una reducción del 18 % en la penetración de iones, evidenciando una mejor durabilidad frente a ambientes agresivos.

El análisis microestructural mediante fluorescencia de rayos X (FRX) mostró una disminución del contenido de Ca(OH)₂ y un incremento en la formación de geles C-S-H, lo cual respalda el comportamiento mecánico y durable observado experimentalmente.

CONCLUSIONES

El metacaolín calcinado a 800 °C y empleado en proporción del 15 % como reemplazo parcial del cemento Portland mejora notablemente la resistencia, durabilidad y resistividad eléctrica del concreto. Su incorporación contribuye a la reducción del impacto ambiental y representa una alternativa viable para el desarrollo de concretos sostenibles.

Se recomienda evaluar combinaciones del metacaolín con otras adiciones como el humo de sílice o la ceniza volante, analizar su comportamiento bajo condiciones ambientales adversas y realizar proyectos a escala real que validen su desempeño estructural y económico.

REFERENCIAS

1. Abdelli K, Tahlaiti M, Belarbi R, Oudjit MN. Influence of the origin of metakaolin on pozzolanic reactivity of mortars. Energy Procedia. 2017;139:230-5. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.201>
2. Kumar VR, Sowjanya K. An experimental study on mechanical properties of concrete with 100 % replacement of metakaolin and GGBS incorporating with marble waste aggregate. 2020.
3. Ghugal YM, Sawant RM, Ghugal YM. Recent trend: Use of Metakaolin as Admixture: A Review. 2015;12:8-14. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3276.4401>
4. David J, Uribe V. Desempeño de materiales cementantes suplementarios en resistencia a compresión e hidratación en pastas de cemento. 2019.
5. Giraldo Lliuya AW. Resistencia a la compresión de un concreto $f'c = 210\text{kg/cm}^2$ con cemento sustituido en 5 % y 10 % por caolín activado mecánicamente de Tarica - Huaraz. 2016. <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/5479>

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: César Roberto Domínguez Pompa.

Curación de datos: Jesús Manuel Bernal Camacho.

Análisis formal: Víctor Manuel Martínez García.

Investigación: César Roberto Domínguez Pompa.

Metodología: Yennifer Diaz Romero.

Administración del proyecto: Yennifer Diaz Romero.

Recursos: Jesús Manuel Bernal Camacho.

Software: Víctor Manuel Martínez García.

Supervisión: César Roberto Domínguez Pompa.

Validación: Jesús Manuel Bernal Camacho.

Visualización: Yennifer Diaz Romero.

Redacción - borrador original: César Roberto Domínguez Pompa.

Redacción - revisión y edición: Víctor Manuel Martínez García.