

# ELABORACIÓN DE HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA UTILIZANDO METACAOLÍN DE PRODUCCIÓN PARAGUAYA

Ing. Acuña, Lorena; Ing. Figueredo, Mercedes  
Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción, Campus Universitario  
San Lorenzo – Paraguay  
tel/fax 595 21 585 581/4 - merfigueredo@ing.una.py - leas\_79@yahoo.es

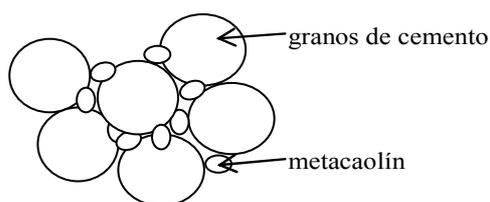
**Palabras claves:** Metacaolín, Índice de Actividad Puzolánico, Hormigones de Alta Resistencia.

## RESUMEN

La utilización cada vez más frecuente de Hormigones de Alta Resistencia (HAR) en obras de construcción civil lleva a un consumo intenso de aditivos químicos y minerales. Este trabajo tiene por objetivo evaluar la potencialidad de una arcilla caolinítica calcinada (Metacaolín) de la República del Paraguay; estableciendo las características técnicas óptimas del Metacaolín a fin de ser utilizado como adición mineral en HAR. De esta forma, después de la extracción, molienda y calcinación, fueron realizados ensayos químicos y físicos, en los laboratorios del Instituto Nacional de Tecnología y Normalización y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (Paraguay); de la Universidad Nacional del Sur y Centro Regional de Investigaciones Básicas y Aplicadas de Bahía Blanca (Argentina). Finalmente el Metacaolín producido fue utilizado en la elaboración de HAR, verificándose las propiedades mejoradas con el empleo del producto.

## INTRODUCCIÓN

El Metacaolín (MC) es una puzolana artificial de uso conocido en hormigones. Es un derivado de la calcinación de arcillas caoliníticas y está constituido básicamente por compuestos a base de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en fase amorfa, proporcionando alta reactividad con el hidróxido de calcio o portlandita -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -, resultante de la hidratación del cemento. La portlandita es un cristal frágil y soluble, y es responsable de la pérdida de resistencia mecánica y durabilidad del hormigón. (1)



**FIGURA 1**

Este efecto lleva a un aumento en la compacidad del hormigón con consecuente reducción de su porosidad, tal como se muestra en la FIGURA 1. (2)

La otra finalidad del Metacaolín (MC), aún más importante, es la reacción con la portlandita, conocida como reacción Puzolánica. Por ser un

Siendo un polvo muy fino, tiene como una sus finalidades situarse entre los granos de cemento, llenando los vacíos dejados por estos (efecto filler).

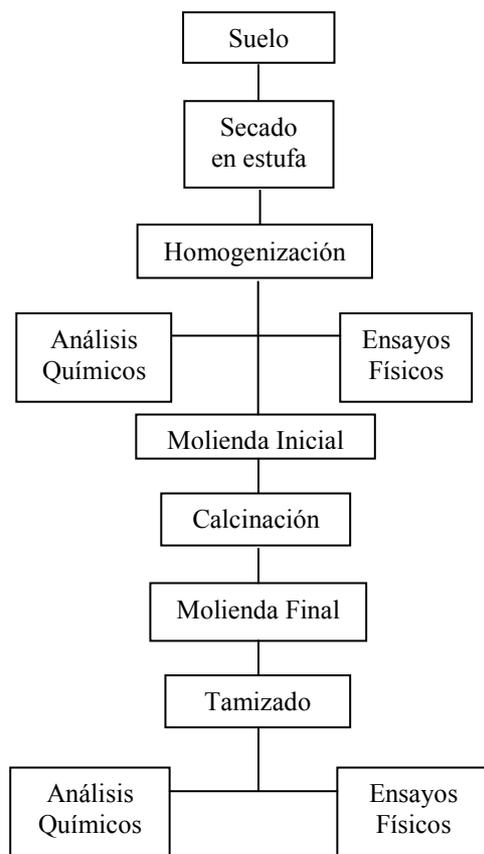
silicato de aluminio, promueve reacciones con el hidróxido de calcio formando cristales de "C-S-H" (Silicato de Calcio Hidratado), y otros cristales resistentes, pertenecientes al grupo de la gelenita, cuya composición es del tipo silicoaluminato de calcio hidratado  $-5\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}-$  (C-A-S-H). Esta función puzolánica de alto desempeño lleva a un incremento en

la resistencia a compresión y en otras

propiedades del hormigón. (2)

## PRODUCCION DE METACAOLÍN

En la FIGURA 2, se puede observar el flujograma de producción utilizado en la fabricación del Metacaolín, estableciendo los procesos a seguir y las relaciones entre los mismos.

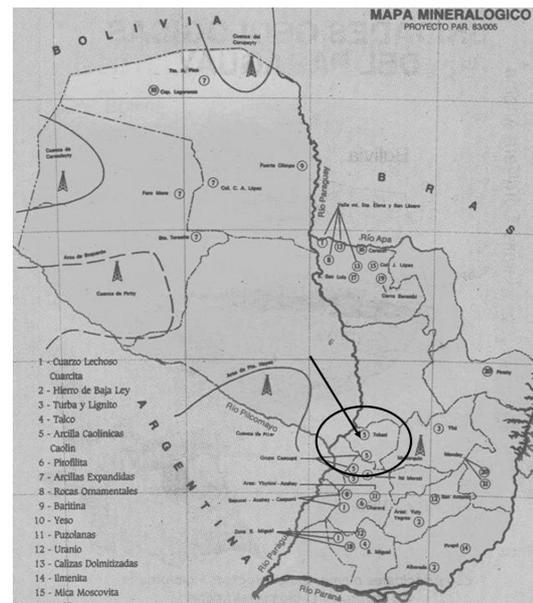


**FIGURA 2**

### Ensayos de caracterización de la materia prima

**Análisis químicos y ensayos físicos.** Tres muestras seleccionadas fueron ensayadas en los laboratorios del Instituto Nacional de Tecnología y Normalización (INTN). La TABLA 1 muestra la presencia predominante de sílice y alúmina en todas las muestras, así como de óxido de hierro en

Los suelos arcillosos seleccionados corresponden a materia prima de la industria cerámica, los cuales fueron sometidos a una extracción, homogenización y estacionado a la intemperie. Los mismos provienen de los distritos de Piribebuy e Ypacarai del Departamento de Cordillera, y Pirayú del Departamento de Paraguari, República del Paraguay. FIGURA 3.



**FIGURA 3**

pequeñas cantidades. La pérdida por calcinación da una idea del contenido de impurezas. Se optó por utilizar el caolín procedente de Piribebuy por contener los más altos porcentajes de sílice y alúmina, compuestos principales de la arcilla caolinítica.

**TABLA I: Análisis químico**

Composición Química	Muestras		
	Pirayu	Ypacarai	Piribebuy
Sílice total SiO <sub>2</sub>	59.35	58.86	58.68

Alumina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.32	26.15	32.90
Hierro Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.97	2.97	0.75
Perdida por Calcinación	9.05	7.64	7.92

Se determinó además la masa específica de la muestra del Caolín seleccionado utilizando el Frasco Volumétrico de Le Chatelier según la metodología descrita en la Norma NBR 6474. El valor obtenido es el siguiente:

$$\delta = 2.639 \text{ g/cm}^3$$

El análisis por difracción de rayos x a la muestra de Caolín, FIGURA 4, se realizó en el Departamento de Geología, de la Universidad Nacional del Sur. Se observa que la muestra está constituida predominantemente por caolinita -Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>- y cuarzo -SiO<sub>2</sub>-, con cantidades muy subordinadas de illita -K<sub>0,7</sub>Al<sub>2</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>-.

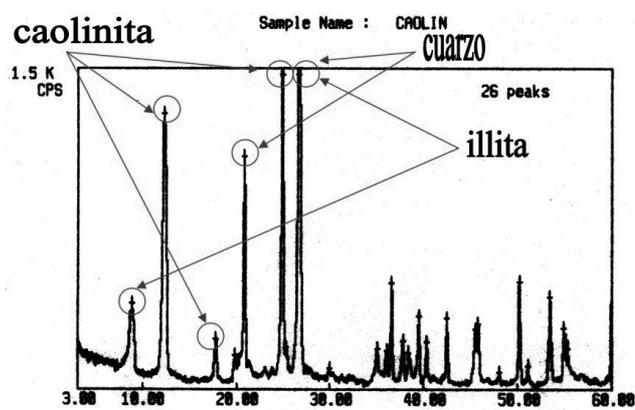


FIGURA 4

**Molienda del caolín.** Esperando verificar la influencia de la finura del Metacaolín en el Índice de Actividad Puzolánica, se procedió a la molienda buscando obtener dos finuras diferentes, en un molino con revestimiento interno y material abrasivo de porcelana, a fin de evitar la alteración del tenor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

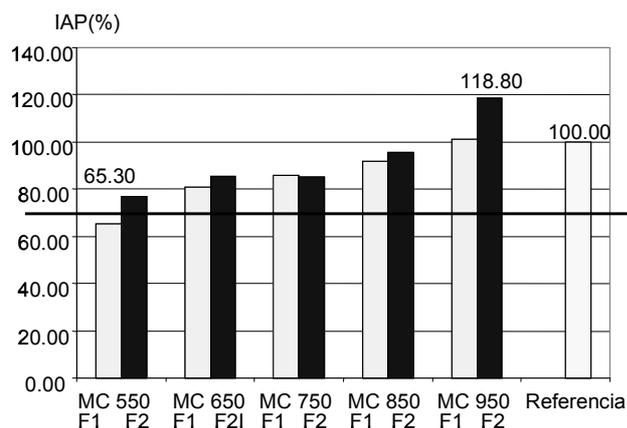
Utilizando el Permeabilímetro de Blaine, se determinó la superficie específica de las muestras de caolín molidas utilizando la metodología descrita en la Norma NBR 7224. Los resultados se muestran en la TABLA II.

TABLA II: Finura Blaine

Molienda	Superficie específica A (cm <sup>2</sup> /g)
1	5531
2	8904

**Análisis térmico diferencial.** Se efectuó en el Departamento de Geología, de la Universidad Nacional del Sur. Se observó con este análisis un efecto endotérmico marcado a 580 °C y un efecto exotérmico a 998 °C que son característicos de la caolinita. El primero está relacionado a la deshidroxilación del mineral y el segundo a un cambio de fase, destrucción de la estructura cristalina del caolín, que involucra un cambio de energía pero no de peso.

**Índice de Actividad Puzolánico.** Para caracterizar el Metacaolín desde el punto de vista de su actividad puzolánica se utilizó el método mecánico, con base en la NBR 5752, a través del cual se evaluó la contribución de la reacción puzolánica en el desarrollo de la resistencia mecánica a compresión de los morteros que contenían Metacaolín obtenido a diferentes temperaturas de calcinación y molido a dos finuras. Se denominaron a las muestras teniendo en cuenta la temperatura de quema y su finura como: MC550F1, MC550F2, MC650F1, MC650F2, MC750F1, MC750F2, MC850F1, MC850F2, MC950F1 y MC950F2, en total 10 combinaciones.



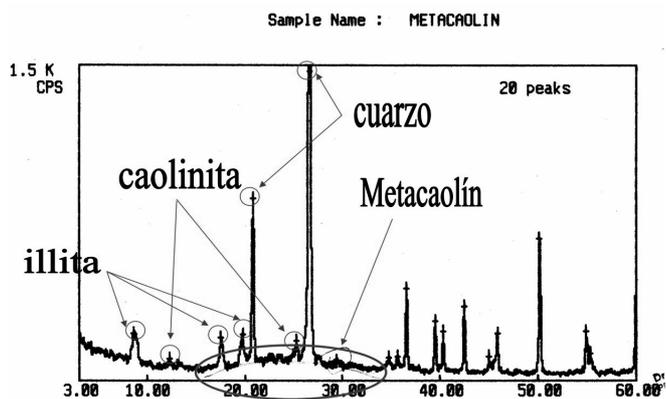
**FIGURA 5**

En la FIGURA 5 puede ser analizada la influencia de la temperatura de calcinación y la finura del material en el Índice de Actividad Puzolánico.

Notamos que en las muestras con finura F1 se superó el límite inferior de 75% de actividad que indica la norma a partir de los 650 °C para las muestras con finura F2, el límite fue superado a partir de los 550 °C.

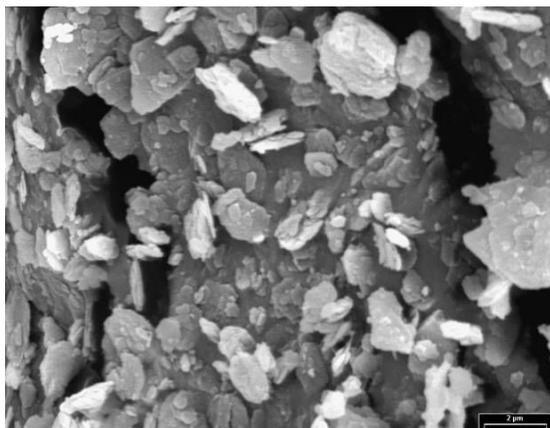
Esto indica que la finura del Metacaolín presenta influencia directa y considerable en su puzolanidad. Se observa además la mayor actividad puzolánica a la temperatura de 950 °C pero a partir de los 650 °C se garantiza el 75% de IAP.

A fin de verificar la efectividad de la calcinación se irradió el caolín calcinado a 950 °C. La muestra analizada está constituida en forma predominante por cuarzo con cantidades subordinadas de illita. Se identificó una reflexión de muy baja intensidad adjudicada a caolinita. La elevación del fondo entre 20 y 30° se debe a la presencia de material amorfo, adjudicado a la transformación de caolinita en Metacaolín. FIGURA 6.

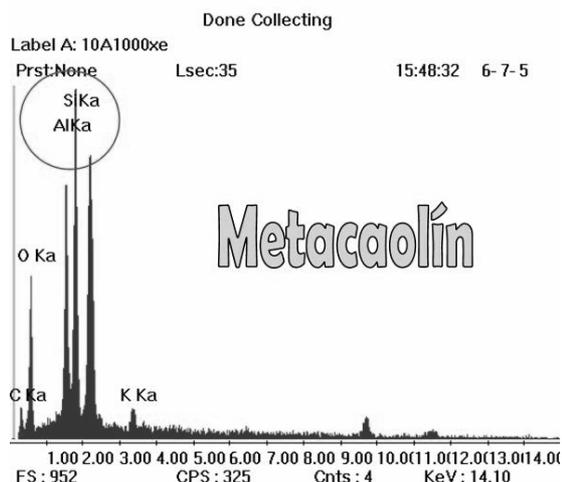


**FIGURA 6**

En la FIGURA 7 se puede observar la estructura del Metacaolín en forma de hojuelas y en la FIGURA 8 se indican los picos de sílica y alúmina característicos del Metacaolín. El análisis por microscopía electrónica de barrido se realizó en el Centro Regional de Investigaciones Básicas y Aplicadas.



**FIGURA 7**



**FIGURA 8**

## ELABORACIÓN DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

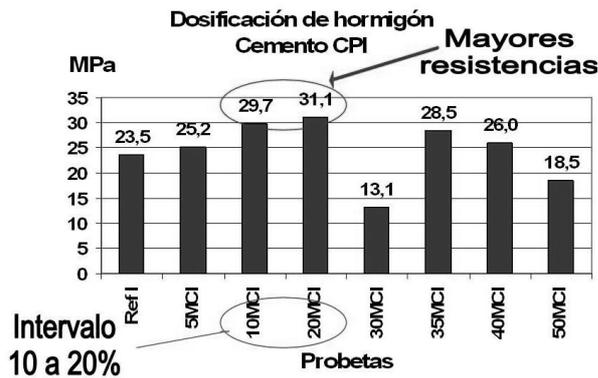
### Materiales utilizados

La durabilidad del hormigón está relacionada a su composición, la calidad de los materiales utilizados, relación agua/aglomerante y empleo de adiciones minerales (3). Por tal motivo se investigó la influencia de la sustitución parcial del cemento por el Metacaolín producido, sobre la resistencia mecánica y la trabajabilidad del hormigón utilizando los siguientes materiales.

**TABLA III: Materiales utilizados**

Material	Características
Cemento	CPI 32 – INC
Agregado grueso Valor recomendado entre 10 a 20 mm (3)	Piedra triturada basáltica-TMA 12,5 mm
Agregados finos Valor recomendado entre 2,7 a 3 (3)	Piedra triturada basáltica-MF 2,91 Arena natural del Rio Paraguay-MF 1,09
Superplastificante	Reductor de agua de alto rango
Agua	Potable de red local
Metacaolín	MC950F2

Para determinar el intervalo óptimo de porcentaje de sustitución de Metacaolín por cemento, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple de argamasas con Metacaolín, moldeadas en probetas cilíndricas 5 x 10 cm. Los porcentajes de adición mineral como sustituto del cemento utilizados fueron: 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50%.



**FIGURA 9**

De la FIGURA 9 se puede observar que los porcentajes de sustitución óptimos en argamasas, se encuentran en el intervalo de 10 a 20 %; por lo que se adoptaron 10%, 15% y 20% como porcentajes de sustitución en la elaboración de hormigones. Con los medios disponibles no se ha podido determinar las causas del fenómeno de la caída de resistencia con la sustitución de 30% de MC.

## Programa de experiencias

### Parámetros independientes

Sistema cementicio

Relación agua/aglomerante

Superplastificante

Cantidad de agua

Cantidades de cemento

### Parámetros dependientes

Consistencia del hormigón masa

Resistencia del hormigón a la compresión simple y a la tracción

90% Cemento + 10% MC

85% Cemento + 15% MC

80% Cemento + 20% MC

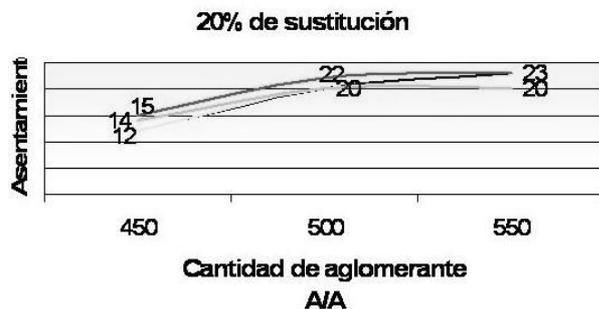
$0,40 \geq a/agl \geq 0,30$

5% en peso del volumen total de aglomerante

≈ 160 litros por m<sup>3</sup> de hormigón

450, 500 y 550 kilogramos por m<sup>3</sup> de hormigón

## Ensayo de hormigón fresco



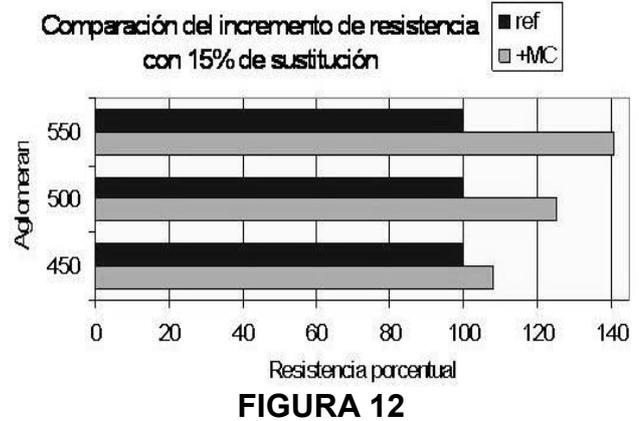
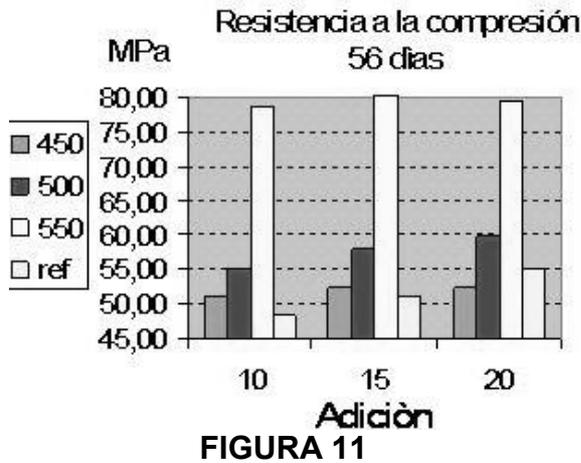
**FIGURA 10**

El asentamiento medido en el Cono de Abrams FIGURA 10, que da una idea de

## Ensayo de hormigón endurecido

la trabajabilidad, disminuye con el aumento de la relación A/Agl., además aumenta con el porcentaje de sustitución, esto se debe al efecto físico que el Metacaolín ejerce en la pasta de cemento (las curvas son producto de varias pruebas realizadas con la misma dosificación, verificando el grado de dispersión de los resultados).

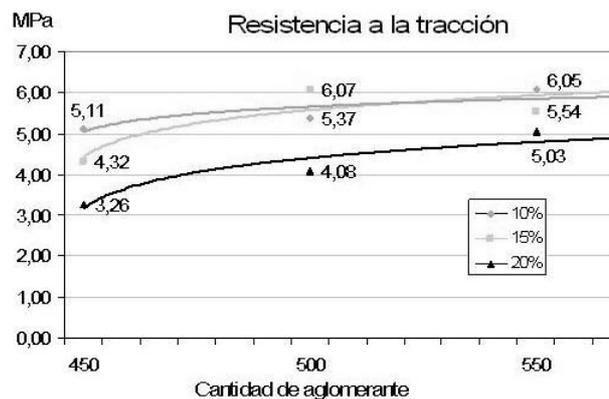
Los cuerpos de prueba, fueron ensayados a compresión axial a las edades de 28 y 56 días en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Facultad de Ingeniería de la UNA. El procedimiento adoptado se ajusta a la norma NBR 7215.



Los valores obtenidos para la resistencia a compresión axial de hormigón con sustitución parcial de Metacaolín oscilaron entre 50 MPa y 70 MPa a los 28 días; y hasta 80 MPa (FIGURA 11) a los 56 días. La resistencia aumentó con el porcentaje de sustitución de cemento por Metacaolín.

Comparando cuerpos de prueba de hormigón con adición de Metacaolín y sin ella se evidenció el incremento de resistencia a la compresión axial en hormigones con Metacaolín, en el orden del 5 y 40%, siendo mayor el incremento cuanto mayor fue el porcentaje de sustitución. (FIGURA 12)

La rotura a tracción por compresión diametral de cuerpos de prueba cilíndricos se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la NBR 7222. La resistencia a tracción aumenta con el aumento de la cantidad de aglomerante FIGURA 13 y disminuye con el porcentaje de sustitución.



Los valores obtenidos cumplen con los valores medios esperados en HAR, Este hecho se debe a que las adiciones puzolánicas promueven reacciones químicas que reducen el tamaño y la concentración de cristales de hidróxido de calcio en la zona de transición, uno de los puntos de fragilidad del hormigón a tracción.

## CONCLUSIONES

✓ La finura y la temperatura de calcinación del Caolín presentan influencia directa y considerable en la puzolanidad del Metacaolín.

✓ Se observa mayor actividad puzolánica a temperatura de 950 °C pero a partir de los 750 °C se garantiza el 75% de Índice de Actividad Puzolánico, valor mínimo establecido por la norma utilizada para considerar un material como puzolánico.

✓ Se constató que una sustitución de 20% de cemento por Metacaolín, en hormigón, produjo los mayores incrementos de resistencia a la compresión.

✓ Los hormigones con sustitución parcial de cemento por Metacaolín presentan resistencias a la compresión axial superiores a los hormigones sin sustitución.

✓ En todos los cuerpos de prueba ensayados a compresión axial se verificaron resistencias mayores a 50 MPa, a las edades de 28 y 56 días.

✓ El Metacaolín producido es apto para la elaboración de hormigón de alta resistencia.

✓  
**REFERENCIAS**

1. Luercio Scandiuzzi, Francisco Rodriguez Andriolo "Concreto e seus materiais – Propiedades e ensaios", Editora Pini Ltda (Edición 1.986).
  2. METACAULIM do Brasil Indústria e Comércio Ltda. Eng. Marco Rabello "Estúdio da influencia do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland", Relatório final, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dezembro 2003.
  3. Pierre-Claude Aïtcin (2000) "Concreto de alto desempenho", Associação brasileira de cimento portland, Editora Pini Ltda.
-