

FACTIBILIDAD TECNICA ECONOMICA DE LA UTILIZACIÓN DEL METACAOLÍN EN ESTRUCTURAS DE HAD

Autores y filiación: Ing. Juan Francisco Xifra - Ing. Rodrigo Martinez

Universidad Católica/Tecnoedil S.A. Constructora – Av. Sacramento N° 107
juanxifra@tecnoedil.com.py

email:

RESUMEN

Con el presente trabajo se busca obtener un hormigón HAD (Hormigón de Alto Desempeño) de elevada resistencia y durabilidad, superior a otros hormigones convencionales, por medio de la adición del metacaolín (Arcilla calcinada y molida de elevada finura), a fin de hacer un análisis comparativo de costo en dos estructuras de edificios de gran altura, una de ellas con el hormigón HAD de 50 MPa solo aplicado en pilares y muros, y otra con hormigón normal de 24 MPa. Dicho análisis se efectuó por medio de un software, con el cual se calcularon ambas estructuras, arrojando resultados necesarios para el estudio en cuestión, como el volumen total de hormigón utilizado en cada una de ellas, así como también el peso total del acero de refuerzo entre otros. Por último, se analizaron los resultados obtenidos, y se emplearon para determinar costos parciales y totales de ambas estructuras, reflejando así, las ventajas de cada tipo de hormigón para cada edificio en estudio.

Palabras Claves: Metacaolín, software, hormigón.

1.1 Introducción

En la actualidad muchas estructuras de H^o presentan problemas estructurales y estéticos, de carbonatación y corrosión de las armaduras, tornándose muy evidentes en algunos casos produciéndose desde signos evidentes de prematuro deterioro hasta colapsos estructurales. Por esas razones vemos la necesidad de expresar nuestra preocupación especialmente por el tema de durabilidad.

En el siglo XX se verificó un aumento sustancial en la utilización de aditivos y adiciones por parte de la Industria del cemento y H^o estimándose que la tasa de consumo continúe aumentando debido principalmente al desarrollo de superplastificantes y superpuzolanas tales como el **Metacaolín**, Ceniza de cáscara de arroz, escoria de alto horno de elevada finura.

La presencia de aditivos en los H^o acarrea como se sabe una mejoría significativa de trabajabilidad y durabilidad.

Después de los años durante los cuales el H^o de alta resistencia fue apenas considerado como un nuevo material con un futuro limitado a la construcción de columnas en edificios altos o en plataformas marítimas, el Hormigón de Alto Desempeño (HAD) es ahora visto como un tipo H^o emergente, cuyas aplicaciones son crecientes tanto en volumen como en diversidad. El HAD se está convirtiendo en un material de ingeniería de alta tecnología, cuyas propiedades, desempeño y posibilidades continuarán dejándonos maravillados.

Siendo la durabilidad el factor que se consolida cada vez más como indispensable para las obras de ingeniería civil, es esencial el estudio de la aplicación en las estructuras tipo de los edificios altos, de hormigones que asocien una alta resistencia a compresión a elevados niveles de durabilidad, como ocurre con el HAD.

1.2 Planteamiento del tema

Factibilidad de la utilización del metacaolín en HAD (Hormigones de Alto Desempeño), utilizando material de importación y análisis comparativo estructural, técnico y económico con otro H^o convencional.

2.1 Alcance y Límites

Con la presente investigación pretendemos estudiar dosificaciones ya conocidas con un 8% de sustitución en peso del cemento por metacaolín para obtener Hormigones de Alto Desempeño, con la utilización de materiales existentes en plaza y una dosificación ya conocida, intentando alcanzar resistencias superiores a la de los hormigones utilizados convencionalmente en nuestro medio con una variación de ± 5 MPa así como también verificar la trabajabilidad necesaria para su correcta utilización.

Se elaborarán mezclas de hormigones para obtener resistencias aproximadas a 60 MPa con y sin la utilización del metacaolín, basándonos en el método desarrollado por el profesor Ing. Vitervo O'Reilly para confeccionar posteriormente un número necesario de probetas ensayando las mismas a compresión simple a los 7, 28 y 56 días.

Una vez obtenidos los resultados en el laboratorio, de los diferentes trazos con metacaolín, se realizará un análisis estructural y económico mediante la utilización de un programa de última generación utilizando para ello dos estructuras de similares características pero con diferentes Hormigones, en uno será utilizado el HAD y en el otro será usado un H^o convencional de 24 MPa.

Se presentarán comparaciones de costos totales y de comportamiento estructural, a partir de los resultados de cálculos de dimensionamiento realizados para los modelos adoptados para un mismo edificio alto, de 23 pisos: el primero con Hormigón de resistencia convencional de 24 MPa, el segundo con HAD (Hormigón de Alto Desempeño) aplicado a elementos comprimidos como son los pilares, y en los demás, un hormigón convencional.

MODELIZACION DE LAS ESTRUCTURAS.

3.1 Modelo 1: Hormigón de resistencia a compresión de 24 mpa para pilares, vigas y losas.

El primer modelo (edificio tipo 1) adoptado para el edificio, se elaboró utilizando hormigón de fck igual a 24 MPa en todos los pisos, y variando las secciones transversales de los elementos estructurales a lo largo de la altura.

El objetivo del modelo I es hacer que las secciones de los pilares, vigas y losas, varíen a lo largo de la altura del edificio, manteniendo una misma sección transversal de las piezas hasta el décimo (10º) nivel. A partir del décimo primer nivel (11º), dichos elementos estructuras fueron sometidos a una reducción de sección transversal, teniendo en cuenta la Normativa Paraguaya de Vientos. Buscando así, disminuir los gastos adicionales con los formas, y también con el consumo de acero y hormigón.

3.2 Modelo 2: HAD de resistencia a compresión de 50 mpa para pilares.

El segundo modelo (edificio tipo 2) adoptado para el edificio, se elaboró utilizando hormigón de fck igual a 50 MPa y con adición del metacaolín para todos los niveles, reduciendo las secciones transversales de los pilares a lo largo de la altura. Para este cálculo estructural, se utilizó la máxima resistencia permitida por software empleado para dicho estudio comparativo, por tanto, el cálculo de dicha estructura, fue realizado con una resistencia de 50 MPa en vez de una de 60 MPa.

El objetivo del modelo II es hacer que las secciones de los pilares disminuyan a lo largo de la altura del edificio. Tomando como premisa las Normas Paraguayas de Vientos [1] , las cuales permiten aplicar una reducción de secciones transversales de pilares en un máximo de 15 mts, lo que en nuestro caso serían aproximadamente cuatro (4) niveles. Por tanto, se adoptaron seis (6) series de cuatro (4) niveles cada uno, variando las secciones de mayor a menor a partir de la primera serie.

METODOLOGÍA

4.1 Procedimiento de trabajo

Se utilizarán los ábacos de dosificación basados en el método del Ing. Vitervo O'Reilly obtenidos en distintos trabajos de investigación. De esta manera se buscarán hallar los trazos necesarios para cada tipo de aditivo, (Aditivo A y Aditivo B) obteniendo así resistencias características cercanas a los 60 MPa.

Tabla 4.1 Dosificaciones utilizadas

Dosificación	Cemento CII-F32 (kg)	Metacaolín (Kg)	Arena (kg)	Piedra 5ta (kg)	Piedra 4ta (kg)	Agua (lts)	Aditivo A (cc)	Aditivo B (cc)
H60-XA	513.4	44.6	553.8	346.5	519.7	156.1	5580	0
H60-YA	558	0	553.8	346.5	519.7	156.1	5580	0

H60-XA = Hº 60 Mpa con adición del metacaolín

H60-YA = Hº 60 Mpa sin adición del metacaolín

Tabla 4.2 Asentamiento inicial, resistencia característica a la compresión, absorción y profundidad máxima de penetración de agua bajo presión. Dosificaciones con aditivo A + metacaolín.

Dosificación (MPa)	Cemento CII-F32	Asentamiento o Requerido (mm)	*Asentamiento Medido (mm)	*Resistencia Característica a 28 días (MPa)	*Absorción (%)	*Profundidad Máxima de Penetración de Agua Bajo Presión (mm)
60	A	120	90	56,8	3,3	36

Tabla 4.3 Asentamiento inicial, resistencia característica a la compresión, absorción y profundidad máxima de penetración de agua bajo presión. Dosificaciones con aditivo A sin metacaolín.

Dosificación (MPa)	Cemento CIII-F32	Asentamiento o Requerido (mm)	Asentamiento Medido (mm)	*Resistencia Característica a 28 días (MPa)	*Absorción (%)	*Profundidad Máxima de Penetración de Agua Bajo Presión (mm)
60	A	120	85	45	4,0	43

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

5.1 Resultados obtenidos en el laboratorio.

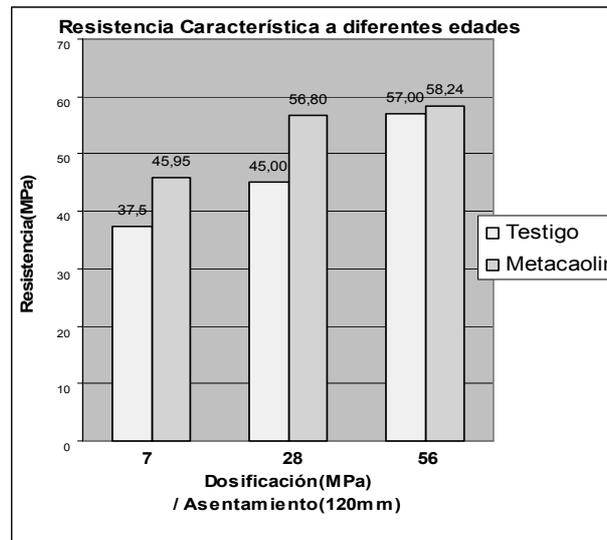


Gráfico 5.1 Resistencia característica a los 7,28 y 56 días.

ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA EN UNA CARA

A (mm ²)	2953	4256
x_i	P_i	P_i
0	4	9
10	8	16
20	13	20
30	15	23
40	24	34
50	30	40
60	33	41
70	35	43
80	33	42
90	33	41
100	25	37
110	22	33
120	16	27
130	11	22
140	7	17
150	6	9
Pmáx. (mm)	35	43
Pmed. (mm)	20	28

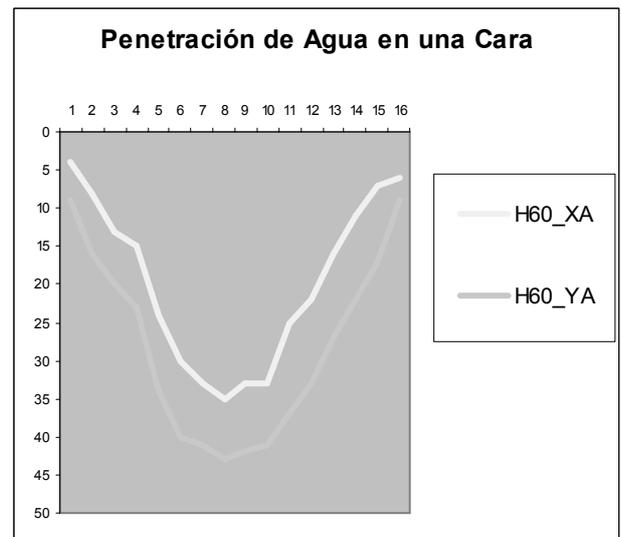


Gráfico 5.2 Profundidad de penetración de agua bajo presión

5.2 Resultados obtenidos en el análisis estructural

En el Modelo II, el volumen total de hormigón es 10% menor al volumen total de hormigón convencional utilizado en el Modelo I (fck 24 MPa), y por tanto, la cantidad de encofrado utilizado es menor para el Modelo II. Así también, la cantidad de acero de refuerzo utilizada en el modelo I es 7% superior que la cantidad utilizada en el modelo II.

En las siguientes tablas se detallan los diferentes datos obtenidos del cálculo estructural para ambos modelos.

Modelo I			
Elemento	Superficie	Volumen	Barras (Kg)
Losas (Fck = 24 Mpa)	19881.67	2982.22	681340
Vigas (Fck = 24 Mpa)	2183.86	1188.90	208592
Encofrado lateral	5325.13		
Muros (Fck = 24 Mpa)	2164.80	324.72	21424
Columnas (Fck = 24 Mpa)	14561.04	2047.87	279907
Total	44116.50	6543.71	1191263
Índices (por m2)	1.608	0.255	48.38

Modelo II			
Elemento	Superficie	Volumen	Barras (Kg)
Losas (Fck = 24 Mpa)	19556.32	3009.82	610852
Vigas (Fck = 24 Mpa)	2011.60	1188.84	175631
Encofrado lateral	5023.20		
Muros (Fck = 50 Mpa)	2164.80	324.72	21424
Columnas (Fck = 50 Mpa)	6186.13	722.27	218223
Total	34942.05	5855.64	1106130
Índices (por m2)	1.759	0.248	46.48

Tabla 5.1 Resultados obtenidos en los modelos I y II.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6.1 Análisis de las resistencias características a la compresión alcanzadas por las dosificaciones teóricas de 60 mpa, en hormigones a base de metacaolín y hormigones testigos, ambos con un aditivo tipo A.

A los 7 días se puede apreciar que en las probetas confeccionadas con metacaolín, los valores de resistencia son superiores a los obtenidos con el hormigón testigo, alcanzando 76% en hormigones con metacaolín y 64 % en hormigones testigo (ver tablas). A los 28 días, ambos hormigones continúan reflejando un considerable aumento de resistencia, llegando los hormigones con metacaolín a un 95 % de su resistencia y 75 % en testigos, reduciéndose el margen de resistencia como se puede ver. En tanto que a los 56 días, notamos que ambos hormigones alcanzan aproximadamente el 100 % de su resistencia.

6.2 Análisis del porcentaje de absorción para las dosificaciones teóricas de 60 mpa, en hormigones con adición de metacaolin y hormigones testigos, ambos con un aditivo tipo A.

Analizando el gráfico 5.2 se puede apreciar que los hormigones con metacaolín poseen un porcentaje de absorción menor que los hormigones confeccionados sin metacaolín (testigos).

Según estudios realizados, esa diferencia de absorción de agua, se debe a que el metacaolín presenta una alta actividad puzolánica debido a la gran superficie específica y a su estado amorfo.

Por tanto queda evidenciado el papel que juegan las puzolanas, ya que los mismos, tanto en los ensayos de absorción como de porosidad, los porcentajes son menores en las muestras con adición del metacaolín comparadas con las del testigo. Esto es debido a que las puzolanas inciden en la reacción de hidratación, dando lugar a una reducción de poros logrando mayor compacidad y homogeneidad en la masa. Por esta vía, los mecanismos de resistencias de la micro estructura quedan más reforzadas y de una manera más eficaz.

6.3 Estudio comparativo entre la utilización de hormigones convencionales y de Alto Desempeño en estructuras de edificios altos (HAD).

Cuando uno piensa en el precio para el metro cúbico de hormigón convencional y el hormigón de Alto Desempeño, pronto imagina los “costos elevados”.

La factibilidad económica relacionada al uso del HAD esta íntimamente unido a la creatividad de los proyectistas. Distribuciones bastante inteligentes de fck en las estructuras de edificios son adoptadas en países que utilizan este material hace muchos años, consiguiendo hacer que los costos iniciales elevados del mismo sean absorbidos y compensados con otros factores como: menores volúmenes de hormigón, alivio de las cargas en las fundaciones, la economía con las formas, menor consumo global de acero, economía con la mano de obra y la reducción significativa en el tiempo de ejecución, así como también, mejor aprovechamiento de los espacio en cada planta debido a la reducción de las secciones transversales en pilares y muros.

6.4 Resultados obtenidos para los modelos de edificios.

Se realizaron comparaciones de costos y cantidades totales, a partir de los cálculos de dimensionamiento realizados para los dos modelos, adoptado para un mismo edificio alto de veintitrés pisos, el primero (Modelo I) con un hormigón convencional de 24 MPa. y el segundo (Modelo II) con un hormigón de 50 MPa. aplicado solo en pilares y muros.

La variación de la resistencia a lo largo de la altura en los edificios se especifico de tal forma a generar mayor economía en el consumo del acero y hormigón, con las secciones transversales de los pilares del primero al último piso.

Los resultados mostraron que HAD puede proporcionar economía de costos y suavización de las cargas actuantes en las fundaciones. Sin embargo, problemas relativos a la estabilidad global pueden tener lugar si son reducidas las secciones de los elementos estructurales.

La cantidad de cemento utilizado en el modelo I es 15 % superior a la cantidad utilizada en el modelo II. Esta diferencia en el consumo de cemento, origina un ahorro considerable en el costo global del edificio. Dicha diferencia en consumo y costo, se da debido a la reducción de las secciones transversales de los pilares a lo largo de la altura en el Modelo II, así como también la reducción de los elementos estructurales de la fundación en dicho modelo, el cual se debe a una disminución de cargas por peso propio, cargas permanentes y accidentales.

6.4 Costo total de cada edificio

Estos costos totales finales, corresponden a la sumatoria de los análisis de costos totales del hormigón, acero y encofrado, el cual refleja una considerable diferencia en el costo total de la estructura.

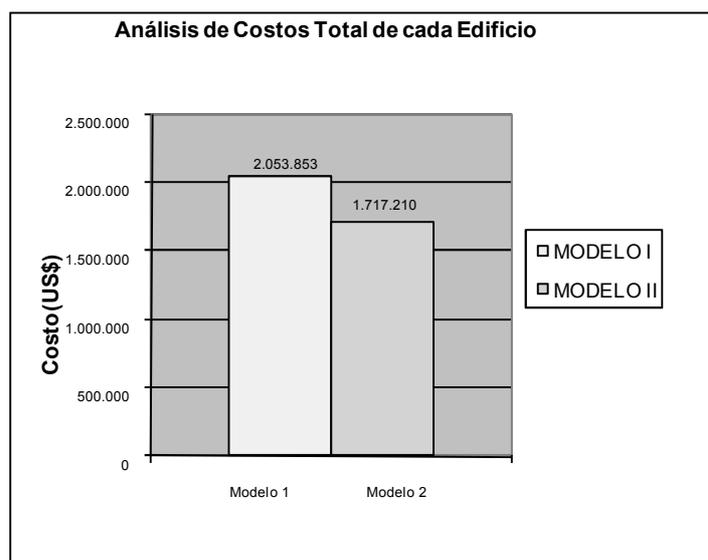


Grafico 6.1 Análisis de Costo Total de cada Edificio.

CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones finales

- Como se esperaba, se puede concluir que mediante la utilización del metacaolín y aditivos superplastificantes se obtienen mayores resistencias a la compresión a tempranas edades en comparación a los hormigones elaborados sin metacaolín.
- Podemos concluir también que la elaboración de hormigones con adición del metacaolín, presentan un menor índice de absorción y menor permeabilidad que los que se elaboraron sin la adición de este.
- El HAD produjo economía de consumo de materiales en el edificios en que fue empleado, así como también, abarató costos en la mano de obra.
- El edificio con HAD aplicado a pilares y muros, presentó una disminución apreciable de cargas en las fundaciones debida al propio peso y a las cargas máximas actuantes (peso propio + las cargas permanentes + las cargas accidentales), en la relación al modelo con el hormigón convencional.
- Podemos concluir finalmente, que el empleo HAD en los edificios tiene beneficios tanto desde el punto de vista de la economía del costo como de la garantía de la durabilidad de las estructuras y sería recomendable que se haga mayor inversión de tiempo en la fase de proyecto, analizando diferentes alternativas de solución lo que generalmente deriva en una inversión mas rentable técnica y económicamente.

7.2 Recomendaciones para investigaciones posteriores

- Para encontrar mejores limites de efectividad y optimización en estructuras de edificio, se recomienda repetir tales análisis ya estudiados, para alturas mayores y menores, buscando un mejor equilibrio, tanto técnico como económico.
- Ensayar a mayores edades el Hormigón de 60 Mpa para estudiar su comportamiento a largo plazo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Norma Paraguaya NP N° 196, Acción de vientos en las construcciones.
- [2] TESIS “Dosificación de Hormigones de Elevada Resistencia”, Alberto Acevedo – Edgar Ahrens, 2003.
- [3] TESIS “Evaluación del Método de Dosificación de Hormigones de Elevadas Prestaciones en Base a la Forma de los Agregados”, Felipe Burró – Norman Dumot, 2002.
- [4] INSTITUTO CHILENO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN, Manual del Hormigón, Tercera Edición, 1988.
- [5] O'REILLY DÍAZ VITERVO A., Métodos Para Dosificar Mezclas de Hormigón, Artes Gráficos Sagitario, La Paz, Bolivia, 1997.
- [6] INTN, Norma Paraguaya NP N° 150, Postes de Hormigón Armado, Asunción 1977.
- [7] PETRUCCI ELADIO G. R., Concreto del Cimento Pórtland, 9ª Edición, Editora Globo, Río de Janeiro 1982.
- [8] NEVILLE A. M., Tecnología del Concreto, Tomo I y II, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México 1984.
- [9] NEVILLE A. M., Tecnología del Concreto, Tomo 2, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México 1984.