BOTELLAS PET EN EL HORMIGÓN CICLÓPEO DE LOS CIMIENTOS CORRIDOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS

Luis A. Castro V.
Fernando M. Cerruto A.
Luis Chambi Ch.
Freddy Perez Q.

RESUMEN

El trabajo de investigación fue desarrollado en los laboratorios del Instituto de Ensayo de Materiales y con el mismo, se propone una alternativa tecnológica, para la construcción de viviendas de interés social, más económicas, resistentes, de calidad y durables; se basa en la reutilización (reciclado) de las botellas de plástico Pet, para la fabricación de cimientos corridos, en sustitución de la piedra desplazadora del hormigón ciclópeo. Estos cimientos corridos pueden soportar 3,2 [MPa], resistencia mayor a los 1.0 [MPa] que le transmitiría una vivienda de tres pisos hecha con muros de adobe.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de materiales no convencionales en la construcción de sistemas estructurales, ha sido ampliamente estudiado durante los últimos años, con el propósito de implementar técnicas que permitan el desarrollo de construcciones más económicas y eficientes, que puedan ser aplicadas masivamente en futuras urbanizaciones y proyectos de edificación de índole social.

Debido a su menor costo relativo, el hormigón ciclópeo (H°C°) es un material utilizado para cimientos corridos en la construcción de viviendas tradicionales, muros de contención, graderías y obras de estabilización.

1.1. ANTECEDENTES

En la actualidad, hablar de autoconstrucción supone en algunos casos hablar de autodiseño, autogestión, métodos de autoayuda, bancos de materiales, construcción progresiva y otros, enriqueciendo en algunos aspectos el sistema original por medio de la integración de nuevos elementos y conceptos.

Autoconstrucción es entre otras cosas construcción al ritmo de las posibilidades y necesidades de los usuarios, lo cual obliga al desarrollo de una construcción progresiva, es decir, a la materialización gradual de los ambientes de una vivienda, proceso que muchas veces demora años.

En el país, en áreas periféricas y rurales, se utilizan la piedra y barro como elementos principales para la construcción de viviendas, pero en las áreas tropicales, como en el oriente de nuestro país, no se cuenta con canteras de agregados y piedra cercanas a las poblaciones, obligando a la utilización de otros materiales alternativos, como la madera, para así adaptar la construcción al medio ambiente donde se habita. Por otra parte, el costo de los materiales de construcción incluida la piedra, se ha elevado gradualmente, debido fundamentalmente al costo del transporte, por tanto, para cumplir con el sueño de contar con una vivienda propia, las personas buscan materiales más baratos y durables, que sean accesibles conforme a sus ingresos económicos.

Las proyecciones de urbanización en el mundo para el 2050, indican que el porcentaje de concentración de población

que vive en ciudades alcanzará un 65%, consiguientemente el acceso al suelo se convertirá en un bien escaso, y la necesidad de viviendas será una demanda aún más exigente, la sociedad en su conjunto debe tomar un rol decisivo en este tema, para administrar y proyectar el desarrollo de sus ciudades con equidad e igualdad.

El elevado costo del suelo y de los materiales de construcción tradicionales, así como los altos intereses de los créditos hipotecarios dificultan de forma considerable el acceso a la propiedad de una vivienda. No obstante de haberse desarrollado algunos planes nacionales de viviendas sociales, los mismos, siguen siendo insuficientes y no cubren las demandas de muchos sectores de la población carente de vivienda adecuada técnica y económicamente.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El empleo creciente del hormigón ciclópeo aligerado en base a agregados artificiales tales como los cascotes de ladrillo impulsa la búsqueda de materiales alternativos sin detrimento de la resistencia, la durabilidad y la economía de las obras, principalmente en la construcción de cimientos corridos.

Como se sabe, la piedra en el hormigón ciclópeo cumple la función de desplazar el hormigón, por tanto, ¿porque no emplear otro elemento para tal fin?. Consiguientemente, se plantea el uso de las botellas Pet con la misma finalidad, pero además, las botellas pet actualmente son un agente contaminante del medio ambiente local y nacional.

Con una disposición adecuada de las botellas pet inmersas en el hormigón es posible un aprovechamiento de las características físico-mecánicas del hormigón ciclópeo con botellas pet (H°C°P) para su aplicación en la construcción de cimientos corridos de viviendas.

El uso de botellas plásticas desechables en la construcción de cimientos corridos posibilita:

Plantear una solución amigable con el medio ambiente por posibilitar la reutilización de las botellas sin requerimiento de tecnología o gastos energéticos adicionales,

La reducción del precio unitario del ítem, al reemplazarse la piedra manzana desplazadora (costosa, más aún, si debe pagarse transporte) por botellas desperdiciadas regularmente (basura).

El aporte propio, debido a que las botellas pet, se pueden obtener fácilmente en nuestro medio a costo prácticamente nulo, puesto que, toda la familia adjudicataria de una vivienda puede participar del proceso.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Determinar la factibilidad de utilizar las botellas Pet como elemento desplazador, que sustituya la piedra manzana en el hormigón ciclópeo y que posibilite abaratar los costos de la construcción de viviendas y particularmente las de interés social.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Obtener una dosificación del hormigón simple que tenga una resistencia característica de 8 — 11 [MPa].
Con esta dosificación, elaborar bloques de H°C° y determinar su resistencia a compresión a los 28 días, estableciendo la proporción adecuada de piedra.
Sustituir la piedra por botellas Pet y determinar las resistencia del H°C°P a compresión a los 28 días, con diferente separación y disposición entre botellas (en filas y al 3 bolillo), para establecer la disposición más adecuada,
Determinar la resistencia a flexión del H°C° con la proporción adecuada de

piedra y del- H°C°P con la disposición óptima de botellas,

Determinar el precio unitario del H°C°P y del hormigón ciclópeo tradicional H°C°.

2. PROCEDIMIENTO PRÁCTICO

Como resultado de la evaluación, para la investigación se utilizaron los materiales de mayor empleo local:

Inicialmente se realizó una evaluación de obras en las cuales se emplea el hormigón ciclópeo, mediante amasado manual y dosificación por volumen,

Cemento tipo IP-30,

Arena corriente del río Vilaque, en la tabla 2.1 se muestran sus propiedades físicas,

Tabla 2.1. Propiedades físicas de la Arena

Arena Corriente	
Tamaño máximo =	¾"
Modulo de finura M =	2.74
% Gruesos =	38 %
% Finos =	62 %
Peso Específico Gs =	2.403
Peso Unitario suelto =	1639 [Kg/m^3]
Peso Unitario compactado =	1822 [Kg/m^3]
Parte Fina	
Peso Específico Gs =	2.574
Absorción Abs =	1.65%
Peso Unitario suelto =	1377 [kg/m3]
Peso Unitario compactado =	1539 [kg/m3]
Parte Gruesa	
Peso Específico Gs =	2.123
Absorción Abs =	1.72%
Peso Unitario suelto =	1500 (Kg/m3)
Peso Unitario compactado =	1600 (Kg/m3)

Piedras manzana, cuyas características se muestran en la tabla 2.2.

Para la preparación de probetas prismáticas H°C° se emplean dos proporciones de volumen desplazado, para así determinar el porcentaje adecuado de piedra mediante ensayos a compresión.

Botellas Pet descartables de 600 [ml] de capacidad, en la tabla 2.3 se presentan las propiedades de este material.

Para la preparación de probetas prismáticas H°C°P, las botellas se disponen al 3 bolillo y en filas con espaciamientos de 2, 3 y 4 [cm], para así determinar la disposición y espaciamiento óptimos, mediante ensayos a compresión.

Dosificaciones volumétricas con relaciones (C:A) 1:3 y 1:4, en las que se emplearon las correcciones por esponjamiento de la arena, La resistencia a 28 días debe hallarse entre 8 a 11 [MPa], en la tabla 3.1 se presentan las propiedades de este material.

Vaciado de probetas prismáticas con la disposición y espaciamiento óptimos de botellas y porcentaje adecuado de piedra, para ejecutar ensayos a compresión y flexión de 20x20x24 [cm] y 20x24x40 [cm] respectivamente,

Tabla 2.2. Propiedades de la piedra manzana

Geometria de la piedra =	Redondeada
Diámetro medio =	10,9 [cm]
Densidad de la piedra =	2400 [kg/m3]
Peso Unitario =	1050 [kg/m3]

Tabla 2.3 Propiedades de las botellas pet

Peso vacio =	32.2 [g]
Peso con agua =	698.2 [g]
Peso con tierra =	1654.5 [g]
Altura =	24.0 [cm]
Diámetro medio =	6.5 [cm]

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. ELECCIÓN DE LA DOSIFICACIÓN

La selección de la dosificación para el preparado de probetas prismáticas se hizo en base a resultados de ensayos en probetas cilíndricas de hormigón simple con los dos tipos de dosificación en volumen, 1:3 y 1:4 (cemento: arena corriente). Las probetas cilíndricas fueron ensayadas a compresión, a los 28 días de edad y los resultados se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resistencia del hormigón simple

Dosificación C : A	Edad, [días]	fcm [MPa]	fck [MPa]
1:3	7	8.8	7.6
	28	13.1	9.8
1:4	7	5.3	4.1
	28	7.3	5.8

La dosificación 1:3 cumple con el requisito de resistencia a compresión para su utilización en hormigón ciclópeo H°C°.

3.2. RESISTENCIAS A COMPRESIÓN DEL H°C°

Una vez determinada la dosificación, se elaboraron probetas prismáticas de Hormigón Ciclópeo para determinar sus resistencias mecánicas. Para tal efecto, se utilizó piedra en dos porcentajes en volumen: 40% y 60%, los cuales, son utilizados comúnmente en una construcción tradicional.

Las probetas prismáticas de H°C° fueron ensayadas a compresión a 28 días y los resultados se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resistencia del hormigón ciclópeo H°C°

Porcentaje de piedra	Edad, [días]	fcm [MPa]	Fck [MPa]
40%	28	10.7	8.3
60%	28	8.0	7.4

La incorporación de la piedra como elemento desplazador produce una pérdida de resistencia respecto a la del hormigón simple, del orden del 16% y del 25% respectivamente.

3.2.1. TIPOS DE FALLA EN H°C°

En el 90% de los bloques de hormigón ciclópeo ensayados a compresión, se observó que la principal falla se presenta por adherencia entre el hormigón y la piedra, ver Figura 3.1.

Figura. 3.1. Bloques de H°C° con fallas por adherencia

El restante 10% de los bloques tuvo fallas conjuntas entre la piedra y el hormigón, en estos casos, se presentó un aumento relativo en la resistencia a compresión.

3.3. RESISTENCIAS A COMPRESIÓN DEL H°C°P

Para obtener la disposición y separación óptimas de botellas, las mismas fueron distribuidas en posición horizontal, en filas y al 3 bolillo, y con espaciamientos de 2, 3 y 4 cm respectivamente. En las tablas 3.3 y 3.4, se muestran las resistencias a compresión de las probetas prismáticas de H°C°P.

Tabla 3.3. Resistencias del H°C°P al 3 bolillo

Espaciamiento, e [cm]	Edad, [días]	fcm [MPa]	fck [MPa]
2	28	2.5	2.3
3	28	2.5	2.2
4	28	2.7	2.5

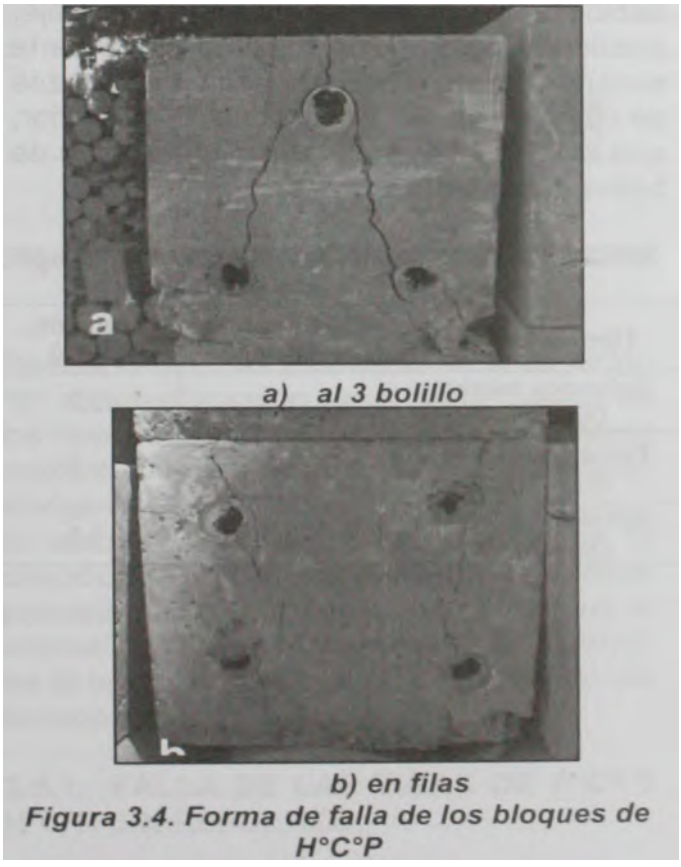
Tabla 3.4. Resistencias del H°C°P en filas

Espaciamiento,	Edad, [días]	fcm [MPa]	fck [MPa]
2	28	3.4	3.2
3	28	3.7	3.4
4	28	4.2	3.8

En base a un análisis de cargas de una vivienda de tres plantas con muros de adobe, se ha establecido que la carga que se le trasmitiría a los cimientos corridos es de 1.0 [MPa]. Las disposiciones en filas proporcionan mejores resistencias que al 3 bolillo.

3.3.1. TIPOS DE FALLA EN H°C°P

Como puede observarse en la *figura 3.4 a) y b),* la falla en los bloques sujetos a compresión, se inicia por el agrietamiento vertical en los planos de alineación de las botellas PET, siendo éste, un plano débil del bloque, debido a que tiene la menor área de hormigón y la parte lateral es empujada por el esfuerzo producido al deformarse las botellas, sin embargo, aún después de presentarse este agrietamiento, el bloque de hormigón mantuvo su capacidad de carga e inclusive ésta se incrementó hasta llegar a la carga máxima. Este comportamiento fue similar en todos los bloques ensayados, tanto para la disposición de botellas en filas como al 3 bolillo.



a) al 3 bolillo

b) en filas

Figura 3.4. Forma de falla de los bloques de H°C°P

3.4. RESISTENCIA A FLEXIÓN

Con la disposición y espaciamiento óptimo determinados mediante ensayos a compresión, se elaboraron 6 vigas para el ensayo a flexión (por cada tipo), el procedimiento de la elaboración fue idéntico a los bloques de compresión, las vigas se curaron sumergidas en agua durante 28 días, hasta el momento de su ensayo.

Un cimiento corrido ocasionalmente puede sufrir asentamiento diferencial, consiguientemente, pueden presentarse solicitaciones por tracción. Para el análisis del comportamiento de las probetas a flexión se prepararon probetas con y sin refuerzo de acero.

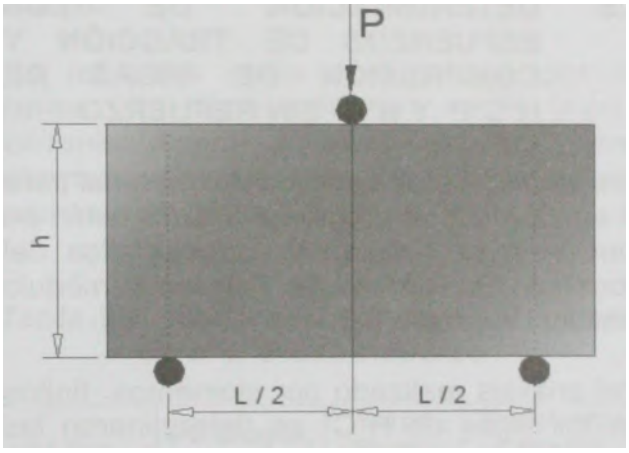


Figura 3.5. Disposición esquemática para el ensayo a flexión

3.4.1. CARGA DE ROTURA EN VIGAS DE H°C°P Y H°C° SIN REFUERZO

Las probetas (vigas) tienen dimensiones de 20x20x40 [cm] y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resistencia a flexión de vigas

Código	PU Bloque, [kg/m3]	Carga Prom,	Resistencia a flexión, [MPa]
H°C°	2465	60.2	3.3
H°C°P	1695	34.5	1.9

Además, con el programa MIDAS simulando las vigas como bloque en tres dimensiones se ha realizado el modelado mediante elementos finitos,.

Tabla 3.6. Datos de entrada para el modelado en software

Propiedad	Observaciones
f_{ck} del hormigón (1:3) = 9.8 [MPa]	Resistencia característica a los 28 días (Tabla 3.1.)
Módulo de Poisson = 0,2	Característico del hormigón
Módulo elástico = 15500.0 [MPa]	Según norma ACI $44.05 \cdot (Pu[l^n])^2 - fck$
PU del hormigón = 2330 [kg/m^3]	Peso del hormigón simple en laboratorio
PU del HºCº = 2412 [Kg/m^3]	Peso del HºCº en laboratorio

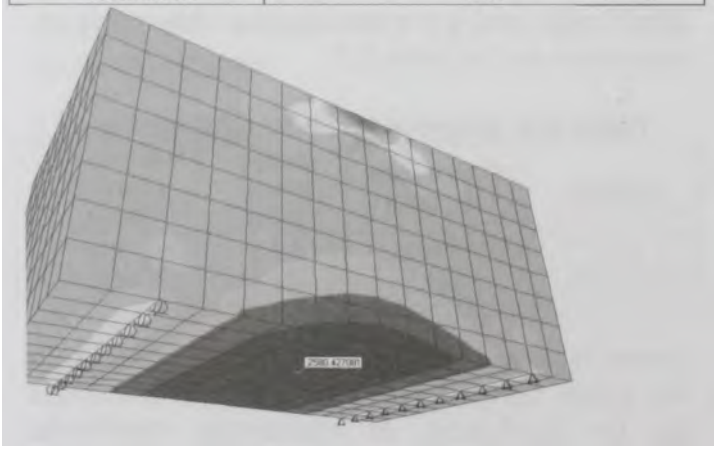
3.5. DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN DE VIGAS DE H°C°P Y H°C° SIN REFUERZO

Los valores característicos del material para el análisis con el programa MIDAS están en función a la resistencia característica del hormigón, el módulo de Poisson y módulo elástico, ver tabla 3.6.

Del análisis realizado por elementos finitos en las vigas de H°C° se determinaron las tensiones máximas de tracción y compresión mostradas en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Resultados de esfuerzos máximos

Tipo de esfuerzo	Esfuerzos máximos, [MPa]
Compresión	6.2
Tracción	2.6



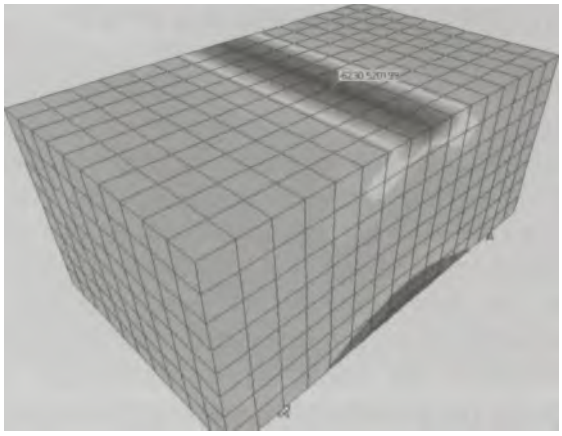


Figura 3.6. Modelación de vigas del hormigón ciclópeo

De los resultados obtenidos mediante el software, para el H°C° se determinó que la mayor tracción se encuentra en el centro de la viga en la dirección longitudinal (XX), debido a la carga lineal aplicada en el eje, existiendo compresión máxima en la parte superior, además se evidencian esfuerzos de compresión diagonales al plano superior, que empiezan a actuar como un sistema de bielas y tirantes.

Tabla 3.8. Resultados de esfuerzos máximos de las vigas de H°C°P

Tipo de esfuerzo	Compresión, [MPaJ	Tracción, [MPa]
Esfuerzos máximos Dirección ZZ	7,7	3,2
Esfuerzos máximos Dirección XX	8,8	5,0
Esfuerzos máximos Dirección YY	2,8	1,3

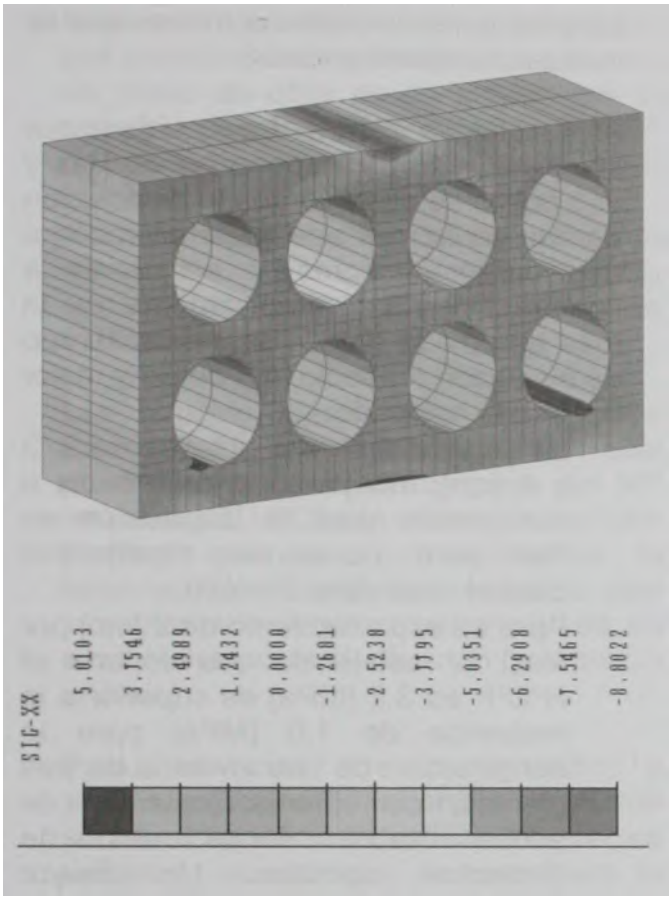


Figura 3.9. Modelación de vigas de H°C°P en filas (dosificación 1:3)

Para el H°C°P, los esfuerzos en la dirección "X" denotan tracción en la parte inferior de los huecos (de 3 a 5 [MPa]) teniendo como máximo valor en la parte inferior central de la viga con 5.0 [MPa].
El esfuerzo máximo a compresión en la dirección X (8.8 [MPa]) se debe principalmente a la flexión de la viga, de la misma manera, el esfuerzo en Z (7.7 MPa]), se debe especialmente a la compresión en los apoyos de la viga.

3.5.1. FALLA DE LAS VIGAS DE H°C° Y H°C°P SIN REFUERZO

Las vigas de H°C° describen una falla por tracción del hormigón, misma que se origina en la parte inferior central de la viga, no describe fisuras previas antes de la falla por adherencia entre el hormigón y la piedra.

Las vigas de H°C°P presentan falla por tracción del hormigón. La falla se produce próxima al plano de alineación de las botellas.

3.6. RESISTENCIAS A FLEXIÓN DE VIGAS DE H°C°P CON REFUERZO

Se ensayaron 6 probetas con refuerzo, con el fin de analizar la influencia del acero de refuerzo dentro del comportamiento del bloque a flexión. El refuerzo se plantea como una de las alternativas de análisis comparativo respecto a una viga sin refuerzo.

Los refuerzos están conformados por 2 barras de acero de ø = 6 [mm], convenientemente anclados en los extremos. El resultado del ensayo se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Resistencia a flexión de vigas de H°C°P con refuerzo

Código	PU Bloque, [kg/m^3]	Carga Prom, [KN]	Resistencia a flexión, [MPa]
VR	1705	37.1	2.0

El uso de refuerzos en las vigas, no aumentó significativamente la resistencia del elemento, debido a que el bloque comienza a actuar por bielas y tirantes. Se pudo observar las fisuras de forma diagonal hacia la parte traccionada. La carga aumentó tan sólo en un 8% en comparación a la carga de las vigas de H°C°P

3.7. ANÁLISIS DE COSTOS

De acuerdo al análisis de precios unitarios, se presenta en la tabla 3.10 un resumen de costos comparativos, incluyendo los precios que pagaba la alcaldía de nuestra ciudad (sep-09). Para procesos de autoconstrucción, dichos costos serían menores.

Tabla 3.10. Costos comparativos de H°C y H°C°P (disposición óptima por filas)

Tipo de Material	Precio unitario, [Bs/m3]
H°C° 50% Piedra (G.M.L.P.)	413
H°C° Tradicional 60% piedra	390
H°C°P en filas (llenas de tierra))	380
H°C°P (botellas vacias)	366

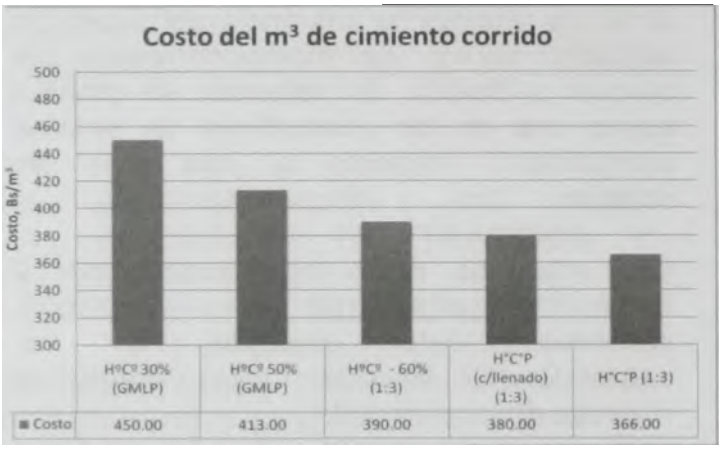


Gráfico 4.1. Comparación de costos H°C y H°C°P (sep -2009)

En el grafico 4.1 se puede apreciar que, comparativamente el H°C°P resulta más económico que el H°C° elaborado en nuestra ciudad, sin embargo, en regiones en las que el transporte a grandes distancias de la piedra deba considerarse, el precio del H°C° se incrementará notablemente, por tanto, el H°C°P adquiere mayores ventajas desde el punto de vista económico.

4. CONCLUSIONES

La dosificación volumétrica 1:3 permite obtener una resistencia de 9.8 [MPa] a los 28 días, por tanto, cumple con el requisito (8.0 a 11.0 [MPa]).

En el H°C°, a medida que se incrementa el contenido de piedra como material desplazador la resistencia disminuye. Habiéndose determinado que con el 60% de piedra se obtiene una resistencia de 7.4 [MPa], se concluye que este H°C° está sobredimensionado para las construcciones comunes que se realizan en nuestro medio.

Al sustituir la piedra desplazadora por las botellas Pet y disponerlas en filas y al 3 bolillo se observó que la disposición en filas es la más adecuada en razón a que proporciona mayor resistencia a compresión y constructivamente es la más apropiada debido al menor tiempo de ejecución respecto al 3 bolillo y mejor control de colocado.

La separación entre botellas de 2, 3 y 4 [cm], influye en la resistencia a compresión para la disposición en filas, pero no es muy significativo para el caso de al 3 bolillo.

Para un espaciamiento de 2 [cm] por filas, la resistencia que soporta el H°C°P es 3.2 [MPa] es superior a la requerida de 1.0 [MPa] para la construcción de una vivienda de tres plantas, con muros portantes de adobe sobre fundaciones de cimientos corridos. Un mayor espaciamiento entre botellas significaría mayor consumo de hormigón.

No es preciso colocar armadura de refuerzo, puesto que, sólo se incrementa la resistencia a flexión en un 8%.

El H°C°P técnica y económicamente puede reemplazar al H°C° convencional en construcciones de viviendas de hasta tres niveles, así mismo, la reutilización de las botellas pet, resulta en un proceso amigable con el medio ambiente. Particularmente, la utilización de esta tecnología tendría un impacto significativo en la construcción de viviendas de interés social y también en aquellas regiones del país donde la piedra es escaza o inexistente.

Se comprobó la factibilidad de utilizar las botellas Pet como elemento desplazador, ya que aparte de lo mencionado anteriormente, la técnica de

fabricación es fácilmente reproducible por personal no especializado, el costo de mano de obra no es mayor que el requerido para fabricar un H°C° tradicional.

Adicionalmente se logró incrementar la resistencia a compresión, en un 67% cuando se colocó las botellas verticalmente.

Las botellas fueron colocadas vacías (caso más desfavorable), lo cual produce una reducción de peso del 30° respecto del H°C°, sin embargo, también pueden rellenarse con suelo de la excavación, escombros o agua, lo cual incrementaría el peso unitario y en su caso el tiempo de dedicación (y el precio unitario).

Para el caso de autogestión y autoconstrucción de viviendas de interés social, el beneficiario, reduce los precios unitarios, puesto que se considera la recolección de botellas y el llenado como aporte propio de acuerdo a lo establecido en el Programa de Vivienda Social y Solidaria (PVS)

5. RECOMENDACIONES

El H°C°P técnica y económicamente puede reemplazar al H°C° convencional, por ello, se recomienda ampliamente su uso en la construcción de cimientos corridos y otros elementos estructurales tales como muros de contención, o mampuestos para muros portantes o de cerramiento y otros.

Para lograr un uso adecuado de este material, es recomendable realizar un diseño estructural apropiado, caso contrario, se corre el riesgo de una sobrevaloración (o subvaloración) de las capacidades estructurales del H°C°P que conllevarían a riesgos para la edificación y en su caso, afectarían negativamente al costo, a la calidad y a la durabilidad de la construcción.

Al no requerirse de mano de obra calificada o con conocimientos especiales, este sistema puede aplicarse para procesos de autoconstrucción, por lo que, el PVS debiera considerarlo para su aplicación.

Con el propósito de profundizar los conocimientos de este tipo de elemento estructural sería conveniente:

- Replicar esta investigación mediante dosificaciones con el uso de mezcladoras mecánicas.
- Realizar investigaciones, variando la posición de las botellas, sean estas echadas, invertidas, inclinadas en diferentes ángulos y direcciones del espacio, o combinadas entre estas posiciones.
- Realizar la construcción de viviendas piloto en zonas geográficas que muestren la factibilidad para la aplicación de esta tecnología principalmente en aquellas que tengan un escaso o ningún banco de acopio de agregados, en las cuales la piedra puede tener un costo igual o mayor a Bs 200 por m3.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM - Anual Book of ASTM Standars volumen 04.02 - Concrete And Aggregates.

Acevedo Catá Jorge - Materiales y Metodologías Alternativas - 2001.

Aruquipa Hugo, Huanca Mauro, Osinaga Igor - Influencia del Tiempo de Curado Húmedo sobre la Resistencia a Compresión del Hormigón a largo Plazo.

Cerruto A. Fernando M. - Introducción al Diseño de Mezclas de Hormigón - 2005.

Cerruto A. Fernando M. - Guía de Ensayos (Agregados-Hormigón) - 2005.

(6) Cerruto A. Fernando M. documentación del Curso Control de Calidad del Hormigón Puesto en Obra – 2008.
(7) Chambi Luis, Peréz Freddy – Proyecto de Grado Estudio de Hormigón Ciclópeo Aligerado con Botellas Plásticas Pet (dic-09).
(8) García Carlos – Metodología de la Investigación y Diseño Estadístico de Experimentos.
(9) Ministerio de Urbanismo y Vivienda – Norma Boliviana del Hormigón Armado, CBH-87.