

MEJORAMIENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE ADOBE ANTE UNA EXPOSICIÓN PROLONGADA DE AGUA POR EFECTO DE INUNDACIONES (PARTE 2)

**Ángel San Bartolomé, Javier Pereyra, Ibrahin Romero y Daniel Quiun
Pontificia Universidad Católica del Perú**

RESUMEN

La Cordillera de los Andes, la corriente oceánica de Humboldt, el anticiclón del Pacífico Sur y la corriente del Niño son algunos de los principales fenómenos geológicos y climáticos que afectan el territorio peruano. Dichos eventos generan lluvias que, al presentarse en gran medida, ocasionan las inundaciones fluviales de mayores consecuencias en el país. A pesar de ello mucha gente utiliza el adobe para la construcción de sus viviendas por ser un material económico y accesible, pero sin tomar en cuenta que este material pierde su rigidez y resistencia al contacto con agua, desintegrándose prácticamente.

El censo de 1998 colocó al adobe y la tapia como el material predominante en las paredes exteriores de las viviendas en el Perú con 50.3%, las cuales son mayormente hechas sin el uso de fibras o paja. Para esto se puede entender la magnitud del daño que ocasionan las inundaciones en el Perú y, la necesidad de plantear alternativas de protección de las estructuras de adobe ante una exposición prolongada del agua.

Anteriormente, en la primera parte de esta investigación (Huaynate y Cabrera, 2010), se dieron tres propuestas las cuales se basaron en la construcción de un muro de adobe con sobrecimiento de concreto simple, otro con adobes estabilizados con 5% de su peso en cemento y uno con protección de la base con un tarrajeo de mezcla cementicia aplicado sobre una malla de gallinero conectada al muro.

Tomando como referencia las propuestas realizadas en la primera parte de esta investigación, en este trabajo se procede con la misma metodología a evaluar tres nuevas alternativas más económicas que las anteriores. Como son: el reemplazo del sobrecimiento de concreto por otro de concreto ciclópeo y otro hecho con ladrillo de arcilla industrial, mientras que en la tercera alternativa se busca mejorar la solución de tarrajar la base, puliéndola en su superficie y la construcción de un muro patrón (tradicional) para la comparación de resultados.

De manera similar a la primera investigación se procedió al proceso de las pruebas de laboratorio consistentes en ensayos de succión y absorción, pero en unidades de adobe convencional, adobe tarrajeado y ladrillos King Kong Industrial 18 huecos.

Finalmente se realizó la prueba de inundación simulada en los 4 muros, tomando nota de los datos y de toda observación que se pueda apreciar durante el ensayo.

1. INTRODUCCIÓN

Como segunda parte del proyecto “Mejoramiento de las construcciones de adobe ante una exposición prolongada de agua por efecto de inundaciones”, se propusieron 3 alternativas que brinden resultados positivos para la resistencia del adobe ante el efecto erosivo del agua, pero que a su vez sean económicas y sencillas de aplicar, conservándose la idea de evaluarlas experimentalmente mediante ensayos de inundación simulada.

Primero se procedió a la construcción de un sobrecimiento hecho con ladrillos de arcilla industrial (ML), teniendo así un material altamente resistente al agua en comparación con el adobe tradicional. La segunda alternativa repite la propuesta de tarrajeo con mortero de cemento (MT), pero esta vez dándole un acabado pulido, con una superficie lisa que trate de evitar la filtración del agua, principalmente en la parte sumergida del muro. Finalmente se propuso el empleo de un sobrecimiento construido con concreto ciclópeo de baja calidad (MC), usando piedras de tres pulgadas de tamaño máximo que conforman la tercera parte del volumen del sobrecimiento, con el fin de obtener ahorro económico.

Se procedió con las pruebas de absorción y succión en unidades de adobe representativas de las alternativas señaladas, fabricadas con los mismos materiales; con la finalidad de simular las condiciones de una inundación controlada y recopilar datos del desempeño de las diversas variables ante periodos tempranos y prolongados de exposición al agua. Posteriormente se llevó a cabo de ensayo de inundación simulada que sirvió para analizar de manera cuantitativa la capilaridad y la capacidad de absorción de cada muro.

2. CANAL IMPERMEABILIZADO

Esta es una estructura de concreto armado (Fig.1) caracterizada por cuatro secciones de iguales dimensiones formadas con cerámicas cortadas y fijas en los extremos del canal, con la finalidad de obtener canales independientes y de esta forma analizar las variables absorción, capilaridad y desempeño a lo largo del tiempo para cada muro.

Tomemos en cuenta que para cumplir con los requisitos de impermeabilidad y estanqueidad se le aplicó al canal dos capas de base polímera acrílica "Plasticoat".



Fig.1 y 2 – Características del canal y disposición de los 4 muros ensayados.

3. CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES DE ADOBE Y DE LOS MUROS

Para esta ocasión se tomó la decisión de trabajar con adobes fabricados in situ y sin fibra para darle un aspecto más crítico y realista a la experiencia, pero siempre tratando de conservar las características dimensionales de la primera investigación [1], adecuadas para el uso del canal.

Las dimensiones de los adobes fueron: 125mm de ancho, 253mm de largo y 70mm de alto, los cuales se utilizaran en la construcción del muro patrón (MP). Con relación al muro tarrajado (MT) se aplicó en su base una capa de mortero 2 cm de espesor. Por otro lado para el muro con ladrillos en su base (ML), se utilizó ladrillo King Kong 18 huecos con 126mm de ancho, 231mm de largo y 91mm de alto. Ver la Fig.3.

Se contrató personal capacitado para la fabricación de los adobes y a la vez para la construcción de todos los muros de adobe propuestos.

3.1 Características Comunes de los 4 Muros

- Los adobes fueron elaborados siguiéndose una única técnica.
- La dimensión de todos los muros de adobe fue: 1.50 m de alto, 1.65m de largo y 0.13m de espesor. Solo en el caso del muro tarrajado se modificó el espesor en su base (2cm adicionales en cada cara).
- En la construcción de los muros se usó un amarre de sogas. En el sobrecimiento del

muro ML también se usó un amarre de sogas para los ladrillos King Kong.

- Cada hilada estuvo compuesta de manera intercalada por 6 unidades enteras y 5 unidades enteras con dos medias unidades de adobe.
- Los adobes y muros fueron hechos por el mismo personal, con la finalidad de descartar el factor de incertidumbre por variación de la mano de obra.
- Las juntas verticales y horizontales de los muros tuvieron como promedio 1.50 cm de espesor y el mortero fue hecho con el mismo material de los adobes.
- El ensayo de los muros se dio en canales geométricamente iguales, bajo un mismo nivel de agua.
- Los muros estuvieron expuestos a los mismos factores atmosféricos, tales como temperatura, presión y humedad.

3.2 Características del Muro Patrón MP

El muro patrón MP no tuvo ninguna mejora contra la acción del agua y el mortero utilizado fue de barro hecho con el mismo material con que se fabricaron los adobes.

3.3 Características del muro con sobrecimiento de ladrillos ML

El muro ML fue construido de manera mixta con dos tipos de material. Las primeras 6 hiladas (sobrecimiento) fueron hechas con ladrillo de arcilla industrial King Kong, asentados con mortero 1:4, en una altura total de 0.60m, correspondiente al doble de la zona en contacto directo con el agua. Las 10 hiladas siguientes se construyeron con adobes convencionales, similares al Muro Patrón MP.

3.4 Características del muro con sobrecimiento de concreto ciclópeo MC

El muro MC consta de un sobrecimiento de concreto ciclópeo que abarcó una altura de 60cm, igual al doble de la altura que alcance el nivel de agua producto de la inundación simulada. Este concreto fue encofrado y vaciado por capas, colocando en cada capa las piedras medianas de 3" previamente lavadas

3.5 Características del muro con sobrecimiento tarrajado MT

El muro MT fue construido íntegramente con adobes convencionales, bajo los mismos lineamientos del Muro Patrón MP, pero tarrajado en su base. Dicha barrera está compuesta por una zona tarrajada de 0.60m de altura y 2cm de espesor en todo el perímetro del muro. El tarrajeo se aplicó sobre una malla de alambre electrosoldada, la cual determina que la malla puede ser usada como refuerzo exterior sobre la superficie del muro, anclada adecuadamente y recubierta por la capa de mortero de cemento. La malla se colocó en ambas caras del muro, interconectándolas con alambre #8, dejados en las juntas verticales cada 25cm. Estas mallas fueron protegidas mediante un tarrajeo cemento-arena fina 1:4, el mismo que fue pulido en su superficie, espolvoreando cemento con agua. La idea del pulido fue impermeabilizar al tarrajeo y la idea de las mallas interconectadas fue evitar que la capa de tarrajeo se desprenda al humedecerse el adobe interior.

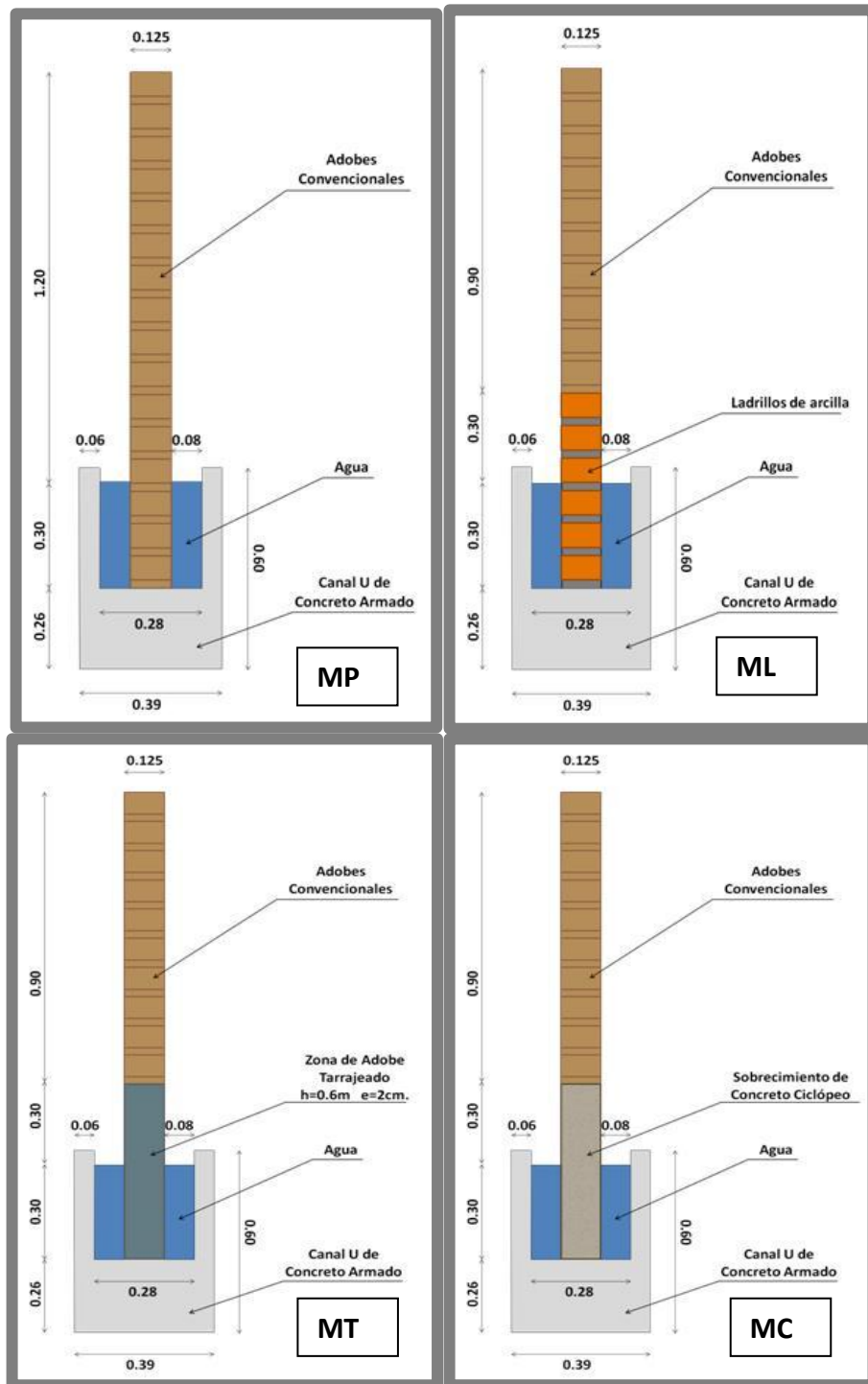


Fig.3 – Secciones transversales de los 4 muros. Dimensiones en metros.

4. PRUEBAS DE HUMEDAD EN LAS UNIDADES DE ADOBE

Buscando un análisis particular de las unidades de adobe se adaptó las pruebas de absorción en 24 horas y succión durante un minuto, indicadas en la norma NTP 399.613 para ladrillos de arcilla cocida; dado que la Norma de Adobe E.080 no especifica procedimientos para estos ensayos.

Se empleó como mínimo 3 especímenes por tipo de muestra, siendo las muestras de adobe convencional, ladrillo King Kong 18h y adobe recubierto totalmente de mortero de cemento pulido aplicado sobre una malla de alambre electrosoldado.

EL adobe convencional sufrió desprendimiento de partículas durante el ensayo de succión y desintegración del prisma durante el ensayo de absorción. Ambas reacciones a las distintas pruebas imposibilitaron la cuantificación de resultados y solo reafirmaron la alta vulnerabilidad del adobe a la acción del agua (ver las figuras 4 y 5).



Fig.4 – Prueba de absorción (izquierda) y Absorción a las 24 horas en adobe tarrajado (arriba-derecha) y en adobe tradicional (abajo-derecha).



Fig.5 – Prueba de succión en adobe tarrajado (izquierda) y ascenso de agua capilar tras la prueba de succión en los 3 tipos de unidad (derecha).

4.1 Resultados Promedios de las Pruebas de Succión y Absorción

En la Tabla 1 se presenta los resultados promedios de las pruebas de succión y absorción para los especímenes que aprobaron las pruebas.

Tabla 1. Resultados de Succión y Absorción			
Tipo de muestra	Muro	Succión (gr/min/200cm ²)	Absorción
Ladrillo King Kong 18h	ML	43	12.5%
Adobe tarrajado	MT	17	9.5%

El adobe tarrajado presentó un mejor comportamiento ante la exposición de agua durante las pruebas de succión y absorción, en comparación al adobe convencional que se desintegró e invalidó su ensayo; sin embargo, se debe distinguir las características coccionada y la cohesión de las partículas del ladrillo, las que le permiten un mejor control del agua para una inmersión a un largo plazo.

Es interesante señalar que terminada la prueba de absorción en 24 horas, se cortaron por la mitad a los adobes tarrajados, notándose un núcleo de tierra estable (Fig.6).



Fig.6 – Recorte del adobe tarrajado (izquierda) y núcleo de tierra estable (derecha).

4.2 Ascenso Capilar en la Prueba de Succión

Al finalizar la prueba de succión (contacto de la base del adobe con una película de agua de 3mm de altura durante 1 minuto), pudo observarse un ascenso capilar del agua en una altura de 1.7cm para el adobe convencional, 1.5cm para el adobe tarrajado, 2.2cm para el ladrillo, en una proporción 3.5:3:4.5, respectivamente, por lo que nuevamente el adobe tarrajado superó al ladrillo y éste al adobe convencional (Fig.5).

5. PRUEBA DE INUNDACIÓN SIMULADA EN LOS MUROS

5.1 Técnica de Ensayo

El método de ensayo es el mismo para los 4 especímenes, además de ser el método usado en el primer ensayo de esta investigación [1]; con el fin de comparar, de manera precisa, el comportamiento entre los muros de ambas partes de la investigación.

El método se realiza de manera paralela en los cuatro muros de la siguiente manera:

- Se utilizó un canal cuadrado con sección interior en forma de U.

- b) El canal fue seccionado en cuatro segmentos impermeabilizados, los cuales permitan analizar por separado cada espécimen ante una prolongada inundación.
- c) Cada muro fue construido por separado, sobre su respectivo segmento en el canal. Un muro de tipo tradicional (patrón) y los otros con tres propuestas distintas de mejora en sus sobrecimientos.
- d) Una vez construidos los cuatro muros se dejaron secar a humedad ambiental durante un tiempo de 3 semanas.
- e) Para medir la cantidad de agua absorbida por cada muro, se colocaran reglas metálicas graduadas en cada uno de los cuatro segmentos del canal.
- f) Se colocaron niveles topográficos en cada muro, el primero a una altura de 30 centímetros de la base del muro y el último a una altura de 50 centímetros, con separaciones cada 5cm para distinguir los cambios de nivel del agua.
- g) La inundación de los cuatro segmentos del canal se realizó de manera simultánea, cuidando que el llenado con agua sea rápido y constante.
- h) Desde el momento inicial de inundación se definieron 2 periodos:
 - Periodo Corto de Inundación (PCI). Hasta cumplir las 72 horas de inundación.
 - Periodo Prolongado de Inundación (PPI). Desde el final del PCI hasta cumplir dos semanas de inundación.
- i) Durante el Periodo Corto de Inundación se entiende que la base del muro pasará de un estado de humedad natural a un estado de saturación, tanto las unidades como el mortero sufrirán un ambiente, agresivo de absorción continua de agua. De no soportar este tipo de ambiente se considerará que el muro no es resistente al ensayo de inundación y que es necesaria una mejora considerable al sistema usado. Este periodo intenta representar una inundación por crecida de ríos en la cual la reposición de agua es constante.
- j) Durante el Periodo Prolongado de Inundación se entiende que la base del muro se encuentra saturada y que ya sobrevivió al ambiente agresivo. De colapsar un muro durante este periodo se considerará que es resistente al ensayo de inundación, pero, como producto de ésta, sufre daños irreparables por desgaste que podrían conllevar a descartar la solución empleada. Este periodo intenta representar la evaporación paulatina del agua y el desaguado de la inundación. Cualquier muro que se mantenga en pie luego de este periodo, se considerará como exitoso en cuanto a la mejora empleada.
- k) Durante el Periodo Corto de Inundación se realizaron mediciones horarias y cada 24 horas se repuso el volumen de agua perdida por absorción de los muros. Para el muro patrón, se contó con una filmadora en toda esta fase para apreciar el momento exacto del posible colapso del muro.
- l) Durante el Periodo Prolongado de Inundación se realizaron mediciones de absorción y capilaridad cada 24 horas y al cabo de cada semana se repuso el volumen de agua perdida por absorción de los muros, para no cortar el ascenso de agua por capilaridad.
- m) De este ensayo se obtuvieron:
 - Tiempo de resistencia de cada muro a la inundación.
 - Gráficas Tiempo vs. Altura de ascenso por capilaridad.
 - Gráficas Tiempo vs. Volumen de agua absorbida.
- n) Finalizado el ensayo se derrumbó cada muro hilada por hilada, desde la hilada superior, llevando un registro fotográfico de una unidad representativa por cada 2 hiladas, y revisando su consistencia al tacto, humedad presente en el núcleo al partirla las piezas en dos.

5.2 Comportamiento de los Muros

El muro patrón (MP) resistió 73 minutos, unos 50 minutos más que el muro patrón del primer ensayo. Luego de este tiempo colapso de manera abrupta. Los muros con sobrecimiento de concreto ciclópeo (MC), de ladrillo (ML) y tarrajado (MT), se mantuvieron en pie durante los 24 días previos a su derrumbe (Fig.7).



Fig.7- Estado final de los muros MC, ML y MT tras 24 días de inundación y estado de los adobes localizados en la base de los muros.

5.3 Cuantificación de Resultados

Con la finalidad de comparar los resultados de las 3 técnicas que tuvieron comportamiento satisfactorio en el ensayo de inundación, se consideraron los siguientes factores:

- Grado de Absorción y de Capilaridad en el ensayo de inundación de los muros.
- Grado de humedad de los adobes al terminar el ensayo de inundación simulada.
- Consistencia de los adobes de la base al terminar el ensayo de inundación.

Estos factores fueron cuantificados en proporciones relativas a la mejor técnica (ML) para tratar de obtener un “Índice Comparativo de Daño” ante inundaciones (acápites 5.4).

Factor “Grado de Absorción”

En la Fig.8 (izquierda) se muestra la absorción de agua (en litros) que tuvo cada muro durante los 24 días de ensayo. Allí puede notarse una rápida absorción de agua durante

el período corto de inundación, prácticamente en una proporción 1.11: 1.0: 1.12 para los muros ML, MT y MC, respectivamente. Pasado ese lapso, la absorción se estabiliza y es pequeña para el muro ML, en comparación con MT y MC, que absorben agua linealmente y casi en la misma proporción.

Factor “Grado de Capilaridad”

En la Fig.8 (derecha) se muestra el ascenso capilar (en milímetros) por encima del nivel del agua que tuvieron los muros durante los 24 días de inundación. Allí se aprecia que este ascenso para MC fue de 330mm, alcanzando aproximadamente el día 20 el nivel máximo por lo que al terminar la prueba la relación por ascenso capilar fue 2: 3: 7, para los muros ML, MT y MC, respectivamente.

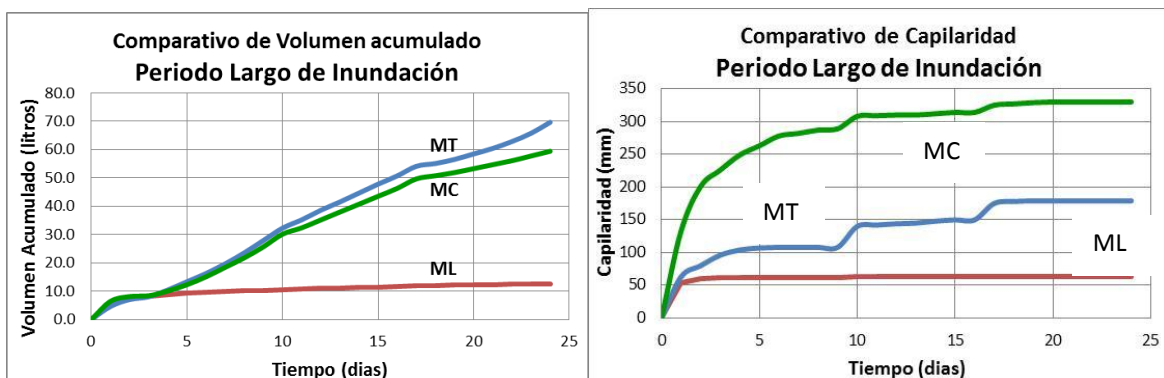


Fig.8 – Volumen de agua absorbida por los muros (izquierda) y ascenso capilar (derecha)

Factor “Grado de Humedad de los Adobes”

Luego de terminar la prueba de inundación en los muros, se desmontaron sus 15 hiladas, notándose que las 3 primeras hiladas de ML y las 4 primeras de MT estaban saturadas, mientras que los primeros 35cm (equivalente a 3.5 hiladas) de MC estaban saturados, por lo que la proporción por grado de humedad puede fijarse en 3: 4: 3.5 para los muros ML, MT y MC, respectivamente.

Factor “Consistencia de los Adobes de la Base”

Al tacto se comprobó que los adobes localizados en la base del muro MT estaban en un estado de inestabilidad parcial, mientras que los adobes de MC y ML estaban secos, por lo que la proporción puede fijarse en 0:1:0 para los muros ML, MT y MC, respectivamente.

5.4 Índice Comparativo de Daños ante Inundaciones (ICD) y Costos

De acuerdo a la importancia de los 4 factores (indicados en el acápite 5.3) en generar daños en el muro por inundación, se asignaron pesos que luego se multiplicaron por los factores y se sumaron para determinar el ICD de cada muro. Los resultados aparecen en la Tabla 2, donde además aparece el costo de cada muro por unidad de área.

Tabla 2. Índice Comparativo de Daños (ICD) y Costos						
base \	Capilaridad	Absorción	Saturación del Muro	Inconsistencia de la Base	ICD	Costo (S/. m ²)
Pesos	10	30	10	50	100	
Patrón	El muro patrón colapsó a los 73 min					36.91
Ladrillo	2	1.11	3	0	83.3	60.55
Tarrajeado	3	1	4	1	150	62.44
Ciclópeo	7	1.21	3.5	0	141.3	59.04

La tabla 2 y la Fig.9 indican que en relación a costos, las soluciones propuestas aumentan entre 60% y 70%, mientras que el índice comparativo de daños pone al muro de ladrillos (ML) como el menos afectado, en tanto que el muro tarrajeado (MT) y el muro de concreto ciclópeo, aumentan en un 80% y 70% ICD respecto a ML.

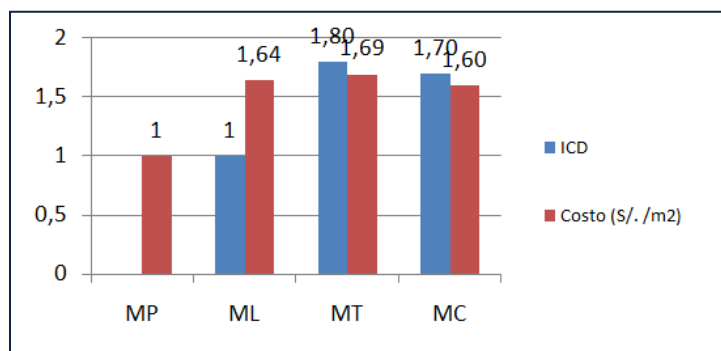


Fig.9– Índice Comparativo de Daños (ICD) normalizado al muro menos dañado (ML) y costos normalizados al muro patrón (MP).

6.0 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

- En la primera parte de esta investigación, el muro patrón comprobó la alta vulnerabilidad ante la acción erosiva del agua, además indicó que los factores que determinan la resistencia ante el colapso son el grosor del muro y la consistencia del adobe. En esta segunda parte se percibió la presencia de otros factores los cuales son determinantes para la estabilidad del muro antes de su frágil colapso, los cuales son la selección del material y la preparación del mismo para formar adobe. Si se hace la comparación del precio del muro patrón del primer ensayo con el de la presente tesis, se admite que es más factible económicamente trabajar con adobe hecho en fábrica que con adobe in situ; pese a que el actual muro patrón presentó un tiempo más prolongado de resistencia a la inundación.
- La propuesta cuyos resultados indicaron mayor capacidad de resistencia ante una inundación prolongada fue el muro de adobe con sobrecimiento de ladrillos de arcilla (ML), con un peralte que sea 30 cm mayor que la altura de agua esperada como parte de un factor de seguridad. Su capilaridad alcanzó un promedio de 5cm. durante el periodo corto de inundación y se mantuvo invariable en el periodo largo, lo propio ocurrió con la cantidad de agua absorbida por este muro. Esta opción llegó a ser más conveniente que la del proyecto anterior, debido a que la construcción con ladrillos es más económica que con concreto puro, aparte que ha tenido éxito en inundaciones reales pasadas.

- En términos generales, el muro con sobrecimiento de concreto ciclópeo (MC) fue considerada por otros investigadores como la mejor alternativa. En esta investigación esta alternativa quedó en segundo lugar, por el gran ascenso capilar, por lo que se recomienda la aplicación de una capa de un material aislante entre el sobrecimiento y el adobe, el cual evitará el libre ascenso del agua por capilaridad.
- La propuesta de tarrajeo puede ser aplicable para las casas actualmente erigidas con muros de adobe. La solución de tarrajeo pulido ofrece buenos resultados porque no solo protege a la estructura frente a la acción erosiva del agua estancada, sino también porque mantiene el volumen de los adobes fabricados, dando la opción al muro de recobrar su capacidad portante una vez transcurrida la inundación, con el secado del muro. Por último, el sobrecimiento de tarrajeo pulido, con el que cuenta el tarrajeo de la presente propuesta, brinda a la estructura un máximo de 9.6 cm de capilaridad, mejorando los 38cm de capilaridad que presentó el muro de la Ref.1 de adobe tarrajado sin pulir durante el periodo corto de inundación.

Bibliografía

- Huaynate W. y Cabrera D. (2010). Mejoramiento de las construcciones de adobe ante una exposición prolongada de agua por efecto de inundaciones. Tesis PUCP.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, Perú. Reglamento Nacional de Edificaciones (2006). "Norma Técnica de Edificación E.080 Adobe".
- Unidades de Albañilería. Métodos de muestreo y ensayos en ladrillos de arcilla usados en albañilería. "Norma Técnica Peruana NTP 399.613 2005". Comisión de Reglamentos Técnicos y comerciales. INDECOPI. Lima, Perú.
- San Bartolomé, A. (1994). "Construcciones de Albañilería - Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural - ". Fondo Editorial PUCP 1994 Lima, Perú.
- Tejada Schmidt, U. (2001). "Buena Tierra – Apuntes para el diseño y construcción con Adobe". Centro de Investigación, Documentación y Asesoría Poblacional. Lima, Perú.
- Ministerio de agricultura del Perú - Centro de Servicios en Pedagogía Audiovisual para la Capacitación, CESPAC, Perú. "DIAGNOSTICO CONSTRUCCIONES EN ADOBE" 1985
- Casabonne, Ch. "Ciencias de la Tierra" - Ediciones Eneva. Caracas, 1976.
- Baschini Miria, "Minerales Arcillosos": Un Enfoque Químico, Monografías.com
- "Agua en el suelo" – <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Agua%20en%20el%20suelo.pdf>
- "Resistencia de las construcciones de adobe" - <http://www.youtube.com/watch?v=SvpvfubiA9A&feature=related>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). 2009. "Censos Nacionales 2009: XI de Población y VI de Vivienda". Instituto Nacional de Estadística e Informática. Lima, Perú.