



1

Conservación y mantenimiento de la tapia de la muralla histórica de Pingyao, China

Conservation and maintenance of the rammed earth of the Historic City Wall of Pingyao, China

Dai Shibing & Li Hongsong
Tongji University

Palabras clave: Pingyao, muralla, paramento de tierra, tapia, consolidación con cal, protección con mortero de sacrificio.

Una de las características más destacadas de la antigua muralla de la ciudad de Pingyao, declarada Patrimonio Mundial en 1997, es la estructura de tapia tras la fábrica de ladrillo que recubre el perímetro externo. A pesar de las muchas intervenciones de consolidación y restauración llevadas a cabo durante las pasadas décadas, aún existen tramos de la muralla que corren el riesgo de derrumbarse. Se han realizado ensayos de laboratorio que muestran que el material de construcción principal de las murallas de Pingyao, es pobre en arcillas, y por lo tanto, no es resistente al agua sin un tratamiento previo. A partir de 2011 y tras un examen cualitativo, se ha restaurado la tapia dañada usando exclusivamente la técnica tradicional de la tapia. Sin embargo, la inspección llevada a cabo en septiembre de 2018, ha permitido determinar que el uso de morteros mixtos de cal y arena como capa de mortero de sacrificio puede ser una solución técnica y económicamente más sostenible.

Keywords: Pingyao, City Wall, earthen surface, rammed earth construction, lime consolidation, sacrificial protective plaster.

One of the remarkable characteristics of the Ancient Pingyao City Wall, which has been listed as Cultural World Heritage Site in 1997, is the internal rammed earth face, behind the exterior brick finishing. Although many consolidation and restoration treatments were carried out in the past decades, parts of the city wall are still in danger to collapse. Laboratory tests show that the loess soil, the main construction material of the Pingyao city wall, is poor in clay. It is not water resistant without any treatment. From 2011 after quality examination the damaged earthen finishing has been restored only with traditional ramming technique. However, based on the visual inspection done in September 2018, protective lime-earth plasters as sacrificial layer to rammed earth finishing may be a technically and financially sustainable solution.

*Texto original: chino. Traducción al castellano: autores.

El antiguo recinto amurallado de Pingyao, construido entre el 827-782 AC y restaurado en 1370¹, declarado Patrimonio Mundial en 1997, se ha convertido en una de las principales atracciones turísticas de China. Además de su larga historia, su conservación íntegra y su extraordinario valor documental, una de las características más singulares de las murallas de Pingyao es su construcción en tapia, posteriormente trasdosada por su cara exterior con una fábrica de ladrillo gris recibida con mortero de cal durante la Dinastía Ming (figs. 1, 2). Su paramento interior visto del muro de tapia debe ser conservado. Según fuentes escritas, desde la Dinastía Ming (1368-1644) hasta el final de la Dinastía Qing (1911), la muralla de Pingyao estuvo sometida a continuos trabajos de restauración y mantenimiento. A partir de entonces, su conservación ha sido posible gracias a multitud de campañas y trabajos de restauración, especialmente en las últimas décadas y, sobre todo, tras las inundaciones producidas en el verano de 1977. Sin embargo, existen tramos de la muralla que aún corren el riesgo de derrumbarse (figs. 3, 4, 5). El alto coste de la mano de obra y los estrictos protocolos de conservación tanto nacionales como internacionales no permiten la reconstrucción. Así, debe encontrarse un sistema de seguimiento, evaluación cualitativa y método de conservación con unos costes razonables. Durante el proceso de restauración de la Puerta Este Meridional, que estuvo a punto de derrumbarse tras las fuertes lluvias de 2006, se sacó a la luz la sección tipo de la muralla. El núcleo de la muralla, posiblemente previo a la dinastía Ming, está hecho de tapia sin ningún añadido

Pingyao Ancient City Wall, built 827-782 B.C. and restored around 1370¹, was listed as a Cultural World Heritage site in 1997 and is now becoming a major attractive tourist site in China. Besides its long history, integrity and outstanding documentary value, one of the remarkable authentic characteristics of the Ancient Pingyao City Wall is the internal rammed earth face where the exterior was masonried subsequently in the Ming Dynasty using grey bricks and lime mortar (figs. 1, 2). Such earthen face shall be preserved.

The historical literature from Ming Dynasty (1368-1644) to late Qing Dynasty (ended in 1911) tells us that the City Wall of Pingyao was always continually reconstructed and maintained. It was conserved thanks to many restoration campaigns and activities in the past decades, especially after the summer flooding in 1977. However parts of the city wall are still in danger to collapse (figs. 3, 4, 5). Because of high labor costs and restriction under the national and international conservation principles, reconstruction is not allowed. Therefore a monitoring, qualitative evaluation system and relevant more durable conservation concept with reasonable costs has to be worked out.

During the restoration process of the Lower East Gate, which almost collapsed after the heavy 2006 rains, the typical construction profile of the wall was displayed. The core of the city wall, which might have been constructed before Ming Dynasty, is made of rammed earth without any

1. Antigua Muralla de Pingyao. 10 de septiembre de 2018
1. Pingyao Ancient City Wall on September 10th 2018
2. Muralla de Pingyao. Foto: Camilla Mileto, Fernando Vegas
2. Pingyao City Wall. Photo: Camilla Mileto, Fernando Vegas



2

*Original text: Chinese. Spanish translation: authors.



3

4



5

6

de cal ni de ningún otro conglomerante, con una densidad desigual. Bajo el pavimento superior, existían dos capas de coronación con una proporción 3/7 (30% cal, 70% tierra) a modo de capa impermeabilizante de tierra y cal. La fábrica exterior de ladrillo trasdosa la tapia, y no está trabada de ningún modo a esta (fig. 6). Bajo el paño de fábrica de ladrillo existe una capa estabilizada con cal con un espesor aproximado de 50 cm, mucho más gruesa que la capa de coronación de la muralla. Esta técnica constructiva era típica de la Dinastía Ming y ha llegado hasta nuestros días. Además de la delimitación o separación entre la fábrica de ladrillo y el núcleo de tapia, existen fisuras en la propia tapia, que principalmente siguen una dirección paralela a la disposición de la muralla. Pero también aparecen grietas verticales y, en los puntos en los que ambos tipos de grietas se cruzan, se forman grandes cavidades producto de las filtraciones de agua. La muralla de Pingyao se ha mantenido en pie durante siglos gracias a la técnica empleada en su construcción y el clima extremadamente seco de la zona pero, sobre todo, a la continua reconstrucción y mantenimiento de la fábrica¹. La cal empezó a usarse en estos trabajos a partir del año 1370 como estabilizante y para asegurar la durabilidad de la muralla a lo largo de los siglos. Entre 2006 y 2007 se creó un equipo de investigación bajo la supervisión del antiguo Chinese Cultural Relics Research Institute (ahora conocido como China Cultural Heritage Academy), el Bureau of Cultural Relics of Shanxi Province y el Pingyao County Cultural Relics Bureau, entre otras instituciones, con el objetivo de desarrollar un método de restauración y mantenimiento

addition of lime or other binders. The rammed earth is unevenly dense. Under the top pavement, two layers of 3/7 (30% lime, 70% loess soil) lime-earth capping were applied as so-called lime-soil impervious layer. The outer side of the brick is applied against the rammed earth masonry, the bricks and rammed earth are not overlapped (fig. 6). Under the parapet brick wall, lime stabilized foundation with a thickness of approximately 50 cm, much thicker than the capping under pavement, has been layered. This was a standard construction technique from the Ming Dynasty until today. Besides delamination or separation between brick masonry and earth core, there are cracks in the internal rammed earth body, the direction of the main cracks being parallel to the city wall direction. But vertical cracks also occur and, where two directions of the cracks intersect, huge cavities form through the leakage.

The Pingyao City Wall stands for centuries not only due to the construction technique, extreme dry climate, but also through repeated reconstruction and maintenance¹. Lime was used since at least 1370 as stabilizer to improve the long life of the Wall.

In order to develop a more effective but sustainable restoration and maintenance method for Pingyao city wall, in 2006 ~2007, a research team has been organized under the guidance of the former Chinese Cultural Relics Research Institute (now China Cultural Heritage Academy), the Bureau of

más sostenible para la muralla de Pingyao. Se realizó un trabajo de investigación integral para llevar a cabo un análisis sistemático del estado de conservación de la muralla^{2, 3, 4}. Uno de los objetivos principales era encontrar un sistema óptimo de estabilización de la tierra y control de calidad correspondiente, que permitiera mantener el color y textura original de su acabado. Se realizaron ensayos en paños del tramo este de la muralla en 2007 y, tras evaluar su resultado, se establecieron especificaciones con pautas para las restauraciones y trabajos de mantenimiento futuros.

OPCIONES DE CONSERVACIÓN DE LA TAPIA

Los ensayos de laboratorio muestran que el loess, el principal material de construcción de la muralla de Pingyao, es pobre en arcilla. Por lo tanto, si no se le incorporan mejoras, no es resistente al agua. La estabilidad de la tapia se ve afectada, en primer lugar, por la erosión de la superficie térrea y del interior de las fisuras. Así, durante épocas de lluvia, el loess se erosiona con facilidad. El segundo factor que influye en el deterioro de la fábrica es la penetración del agua a través de las fisuras, especialmente a lo largo de los parapetos y pavimentos de ladrillo de la coronación. El tercer factor son los daños causados por eflorescencias salinas producto de las humedades por capilaridad. De esta manera, existían tres opciones para la restauración del paramento interior de tapia: emplear fábrica de ladrillo, realizar consolidaciones in situ o compactar tierra contra el paramento existente de tapia degradada.

Cultural Relics of Shanxi Province, Pingyao County Cultural Relics Bureau and other organizations. Comprehensive research works have been carried out to systematically analyze conditions^{2, 3, 4}. One of the targets was to find an optimum receipt and a quality control system to improve the stability of earth for restoration while maintaining the colour and texture of interior finishing. Test areas in Eastern part of the City wall have been completed in 2007. After evaluation of the test areas, specification has been finalized and the endangered areas shall be restored and maintained according to this specification.

OPTIONS TO PRESERVE THE RAMMED EARTH WALL

Laboratory tests show that the loess soil, the main construction material of the Pingyao city wall, is poor in clay. It is not water resistant without any improvement. The stability of the rammed earth wall is affected first of all by erosion on the surface or along cracks. During rainy seasons, the loess soil can easily be eroded. The second deterioration factor is the leakage through cracks especially along parapet walls and pavements. The third factor is the salt damages by rising dampness. There were three options to restore the interior earthen face: masonry with brick, in situ consolidation or re-ramming "or earth on earth". Rebuilding the earth core with brick masonry would have changed the entire earthen

3-4. Muralla de Pingyao. Fotos: Camilla Mileto, Fernando Vegas

3-4. Pingyao City Wall. Photos: Camilla Mileto, Fernando Vegas

5. Documentado de la zona de peligro para el público y trabajos de mantenimiento posteriores

5. Documentation of the endangered area for public and further maintenance works

6. Perfil de la muralla mostrando las distintas técnicas constructivas y sus patologías típicas (fotografía tomada en marzo 2007)

6. Profile of the construction technique and typical defects (photo taken in March 2007)



5

6



La reconstrucción del núcleo de tapia con fábrica de ladrillo supondría un cambio muy sustancial en el aspecto exterior de la muralla. Con anterioridad se había optado por esta medida únicamente en actuaciones urgentes realizadas en la temporada de invierno cuando no es técnicamente posible ejecutar tapia. No se consideraba por tanto una opción sostenible y efectiva de mantenimiento pues afectaría a la autenticidad de la muralla de Pingyao. Además, el agua puede seguir filtrándose por las juntas de la fábrica de ladrillo y llegar hasta la tapia causando mayores daños, tal y como ocurre en la separación entre ambos elementos en la cara exterior, que no es fácilmente detectable.

La segunda opción consistía en la consolidación del paramento de tapia in situ usando conglomerantes de alta permeabilidad, como el silicato de etilo u otros silicatos al agua^{5, 6}. Esta técnica ha dado buen resultado a la hora de proteger construcciones de tierra sin carácter estructural en yacimientos arqueológicos en climas áridos⁵, pero los experimentos de campo llevados a cabo sobre el acabado sobre las estructuras de Pingyao han demostrado que la profundidad máxima de penetración del agente impregnante de refuerzo (silicato etílico en una concentración del 99%), es solo de 150 mm, insuficiente para poder proteger a superficie de la tapia existente, además de no ser una solución económica, dada la envergadura y extensión de la muralla. La tercera opción, la técnica denominada como “tierra con tierra”, consiste en adosar un nuevo estrato de tierra apisonada para proteger el núcleo de la tapia existente al mismo tiempo que mantener

face tremendously. It was used previously only as an emergency measure in the winter season when new rammed earth was not technically applicable. It was not considered as an effective sustainable maintenance option because this would have changed the authenticity of Pingyao City Wall. Further water can still penetrate through the brick joints into earth construction and cause damages, like delamination between brick layer and earth core, which are not so easily detachable.

In situ reinforcement is also possible with highly permeable consolidants, like ethyl silicates or other water-based silicates^{5, 6} of the existing rammed earth surface. This technology has been successful in the protection of non-structural archaeological earthen sites under arid climate⁵, but the field experiments in Pingyao inner earth finishing showed that the maximum penetration depth of the impregnation reinforcement agent (ethyl silicate in 99%-concentration) is only 150 mm, which is insufficient to protect the existing rammed earth surface. And it is also non-economical.

The third option, “earth on earth”, consists of ramming a new layer of earth construction to protect existing core wall at the same time, to maintain the earth colour and the texture of loess soil. Historically, especially during the 1977-1999 period, most collapsed walls were restored using this system “earth

el color y la textura de la tierra con el uso del loess. Históricamente y especialmente entre 1977 y 1999, la mayoría de los tramos de la muralla que se derrumbaron fueron restaurados usando esta técnica. Pero la investigación deberá permitir prescribir la fórmula óptima para mejorar la tierra a emplear, el sistema de control de calidad pertinente, el seguimiento de su eficacia y los criterios de mantenimiento. La proporción tradicional 3/7 de cal/tierra (una mezcla tradicional compuesta por un 30% de cal aérea y un 70% de tierra de loess) sólo funciona para la cimentación o para la subcapa del pavimento de coronación. Como capa superficial, la mezcla tradicional “tres / siete cal / tierra” no endurece adecuadamente. Esto requiere de una explicación científica.

FORMULACIÓN ÓPTIMA DE LA TIERRA MEJORADA CON CAL **Características del loess de Pingyao**

El análisis de la composición de la tierra del entorno de Pingyao ha demostrado que es pobre en arcillas. Mineralógicamente está compuesta de illita/esmectita(10-14%), illita (2-5%), clorita (1-2%) y caolinita (aprox. 1%). El contenido en arcilla varía del 7 al 16%. Así pues, está compuesta mayoritariamente por limos y arena fina. Se puede compactar fácilmente, sin embargo, una vez compactada, no es resistente al agua, y se deshace a los pocos minutos una vez humedecida incluso antes del punto de saturación. Así pues, requiere de una estabilización de algún tipo para alcanzar un nivel aceptable de resistencia al agua y a las heladas.

on earth”. But the research works should clarify the optimized formula for improving earth, the system of quality control, the tracking of the effectiveness and the maintenance monitoring criteria. The traditional 3/7 lime/earth formulation (a traditional lime earth mixture composed of 30% air lime, 70% loess soil) formulation works only in the foundations or as supporting layer under the pavement. As final surface the traditional “three seven lime earth” does not harden properly. This needs also scientific explanations.

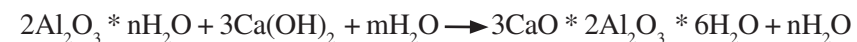
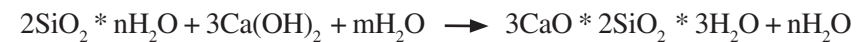
FORMULATION OPTIMIZATION OF THE LIME MODIFIED EARTH **Characteristics of loess soil in Pingyao**

The analysis on earth composition has showed that the earth from surrounding Pingyao is poor in clay. It is composed mineralogically of illite/smectite(10-14%), illite (2-5 %), chlorite(1-2%) kaolinite (app. 1%). The clay content ranges from 7-16%. It is then mostly composed of silt and fine sand. It can be easily compacted; however, the compacted Pingyao loess soil is not water resistant, and the compacted Pingyao Loess Soil will be decomposed within few minutes once it is moistured even before saturation. It needed to be stabilized to reach an acceptable level of water and frost resistance.



¿Funciona la cal aérea por sí misma?

El mecanismo para la estabilización de la tierra mediante la incorporación de cal aérea es químicamente el siguiente^{7, 8, 9}.

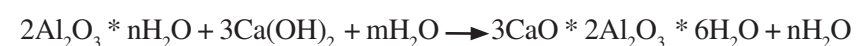
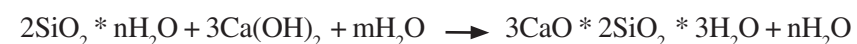


De manera simplificada, se podría resumir que la “arcilla” es destruida por la cal aérea para formar un nuevo conglomerante de refuerzo que es estable ante el ataque de la humedad.

Sin embargo, a corto plazo la cal aérea por sí sola no es suficiente para reforzar la mezcla en el proceso de restauración por razones económicas. Esto se debe al bajo contenido de arcillas del loess de Pingyao y al largo tiempo necesario para la reacción química. Para mejorar la tierra de Pingyao y que adquiera más dureza y resistencia al agua, se requieren componentes hidráulicos. Esto no sólo está científicamente probado, sino que se puede observar en las propias murallas. La zona de ensayo realizada en 2007 sin cal hidráulica natural se encuentra muy deteriorada (fig. 7). Así pues, la durabilidad de esta técnica de mantenimiento no es satisfactoria. Tras hacer una comparación entre el cemento Portland y la cal

Will air-lime alone work?

The mechanism of soil stabilization with air lime is chemically known as follows^{7, 8, 9}:



It could be simply stated explaining that the “clay” is destroyed by air lime and form new cementing reinforcement which is stable under moisture attack. However, the air lime alone is not sufficient to improve the strength in short time for economical process of restoration work due to low content of clay minerals in Pingyao Loess soil and very long chemical reaction time.

Hydraulic components are needed in order to improve Pingyao soil and reach higher strength and water resistance. This is not only scientifically proven but also observed on Pingyao site. The test area done in 2007 without natural hydraulic lime was heavily deteriorated (fig. 7). The durability of such maintenance is not satisfying.

After comparison between Portland cement and natural hydraulic lime (NHL), natural hydraulic lime has been chosen as the stabilizer to meet the requirements. The natural hydraulic limes have 30-50% hydraulic

hidráulica natural (NHL) se ha escogido la cal hidráulica natural como el estabilizante que cumple los requisitos necesarios. La cal hidráulica natural tiene entre un 30% y un 50% de componentes hidráulicos, el más importante de los cuales es la belita, que reacciona con el agua para formar silicatos cálcicos hidratados. La belita reacciona muy lentamente al agua, pero puede alcanzar una dureza final muy alta.



Comparada con el cemento, la cal hidráulica natural también tiene menos sales solubles. Además, la mezcla de cal-tierra con cal natural hidráulica tiene un mayor tiempo de retracción debido a la lenta reacción de la belita. Hoy en día, y debido al “blue sky action”, un programa que comenzó en 2016 a nivel nacional para reducir la contaminación aérea, toda preparación y mezcla de cal y tierra tiene que hacerse fuera de los límites de la antigua ciudad de Pingyao. Después de hacer pruebas tanto en el laboratorio como in situ, la dosificación óptima para las tierras de Pingyao sería: 3-4% de cal viva (con una granulometría menor de 0.420 mm), 3-4% NHL2 o NHL5. Dicha mezcla procura una dureza y color similares a la tierra sin modificar. Después de mezclar con agua limpia, dicha mezcla se puede compactar antes de 24 horas con un tiempo de retracción aproximado de 2 horas.

components, most important belite, that reacts with water to form calcium silicate hydrates. Belite reacts very slowly with water, but it can research very high final strength.



Compared to cement, natural hydraulic lime has also less water soluble salts. Besides the mixed lime-earth with natural hydraulic lime has long hold back time due to slow reaction of belite. Today due to “blue sky action”, which was started in 2016 as a national campaign to lower the air-borne pollution, all preparation and mix of lime-soil shall be done outside the Pingyao Ancient City. After testing both in laboratory and on site, optimal dosage for earth from Pingyao is: 3-4% quick lime powder (the particle size shall less than 40 mesh), 3-4% NHL2 or NHL5. Such mixture provides the strength and similar colour to non-modified earth. After mixing with clean water, such mixture can be rammed within 24 hours after a hold back time of app 2 hours.

As known, quick lime will generate heat once it contacts with water. The using of quick lime instead of slaked lime is to use the “heat” to “destroy” clay colloids, which occur very often in loess soil.

The above-mentioned mix is also economically affordable due to a lower lime content, as a higher content of lime, like traditional three/seven earth mixture.

7. La durabilidad de la tierra mejorada con cal aérea. (A la izquierda la restauración llevada a cabo en 2007 con tierra compactada pero con sólo cal aérea como estabilizante. A la derecha la restauración llevada a cabo en 1997, usando tierra compactada sin ningún aditivo de cal.)

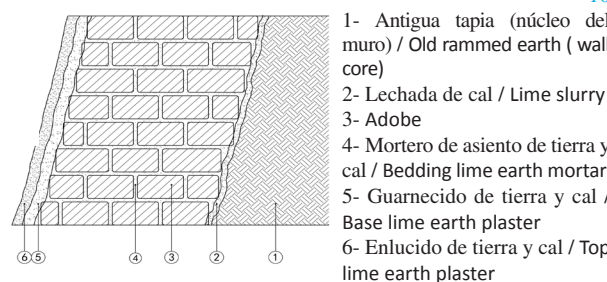
7. The durability of air-lime improved earth. (Left side shows the restoration done in 2007 with rammed earth but only with air lime as stabilizer. Right side shows the restoration done in 1997 using rammed earth without lime addition.)



8



10



Como se sabe, la cal viva genera calor cuando entra en contacto con el agua. Se usa cal viva en vez de cal apagada para que ese “calor” “destruya” los coloides de arcilla que existen a menudo en el loess. La mezcla mencionada es además económicamente asequible debido al bajo contenido de cal, frente a aquellas con un alto contenido de cal como la tradicional mezcla 3/7.

Criteria of quality

La calidad de la tapia hecha con cal no depende solamente de una dosificación óptima, sino también de la homogeneidad de la mezcla de la cal y la tierra^{10, 11}. La inclusión de un componente rico en arcillas (coloides de arcilla) requiere cal para su modificación, pues de lo contrario se producirán “uniones débiles” en toda la estructura (fig. 8). El contenido de humedad juega un papel crucial a la hora del curado y endurecimiento de la tierra modificada con cal. La reacción química que se verifica entre la cal (tanto aérea como hidráulica) y la tierra sólo ocurre con el uso de agua líquida o en ambientes de mucha humedad. La alta humedad también ayuda a prevenir la carbonatación de la cal. Así pues, el añadido de agua también debe ser controlado. El contenido de humedad durante el mezclado y transporte desde la planta, localizada a unos kilómetros de las murallas de Pingyao, también debe ser monitorizado. Se prescribirá el mantenimiento de la humedad de la mezcla durante el proceso de compactado.

Quality criteria

The quality of the rammed lime earth is not only related to optimal dosage, but also to homogeneity of the lime-soil mix^{10, 11}. The inclusion of clay-rich component (clay colloids) need to be modified by lime otherwise it will work as a “soft link” to the entire construction (fig. 8).

Moisture plays the key role during the setting and strength development of lime modified soil. The chemical reaction between lime (both air and hydraulic lime) can only happen under liquid water or high moisture content. High moisture can also avoid carbonation of lime. The mixing water shall be exactly controlled. The moisture content during mixing and transportation from the mixing plant, which is located a few kilometers away from the city wall of Pingyao, shall be monitored as well. Keeping the mix wet during the ram working interval shall be warranted.

EVALUATION AND IMPLEMENTATION OF THE CONCEPT FROM 2011 TO 2018

Test area

After comprehensive research works two mock-ups of “earth on earth” were done in 2007 in the eastern Wall to test practical implementation and durability of developed formulation and quality controlling factors. The first mock up wall was rammed with lime improved earth. The deteriorated earth was removed to a depth of approx. 800 mm to the

EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN ENTRE 2011 Y 2018

Zona de ensayo

Después de una serie de rigurosas investigaciones se realizaron dos muestras de reparaciones “tierra con tierra” en 2007 en el paño este para ensayar en la práctica la implementación y durabilidad de la formulación desarrollada, además de los procesos de control de calidad.

La primera prueba se hizo usando tierra mejorada con cal. La zona deteriorada fue demolida hasta una profundidad de 800mm hacia el núcleo de la muralla. Se usó nueva tierra cribada. Esta tierra cribada se pre-mezcló en seco con polvo de cal viva y cal hidráulica en una fábrica cercana y fue transportada a la zona de trabajo. Se añadió *in situ* un 15-16% de agua a la mezcla para conseguir una adecuada compactación. La mezcla de tierra y cal se compactó usando técnicas tradicionales (fig. 9) pero se saturó con agua fresca periódicamente para asegurar un curado adecuado.

La segunda prueba se realizó con adobes de tierra y cal (figs. 10, 11a, 11b). Como acabado se aplicó un revestimiento de mortero en un espesor de 30mm en una dosificación de 25-30% de cal aérea y 70-75% de tierra de loess, a modo de capa de protección o de sacrificio. Los adobes se produjeron en una fábrica de ladrillos, no se hicieron a mano. La tierra se mezcló con la cal siguiendo la misma dosificación que la usada para la tapia, posteriormente las

core of the city wall. The fresh soil was excavated and sieved. The sieved soil was premixed dry with quick lime powder and hydraulic lime in a factory near the site and transported to the site. On site, 15-16wt% water was added to the lime earth mixture to get optimum compaction. The lime-earth mixture was rammed using the traditional technique (fig. 9) but saturated with fresh water during the intervals to warranty the setting.

The second mock up wall was built with lime-earth adobe (figs. 10, 11a, 11b). As a finishing, a 30 mm lime mortar composed of 25-30wt% air lime and 70-75wt% loess soil, was applied as “protective” or “sacrificial plaster”. The adobe was produced with a conventional brick production line not by hand. The earth was mixed with lime as the same formulation for compaction and then extruded and stored for 2 weeks under high humidity within a plastic sheet. The bedding mortar of adobe wall was composed of 30% air lime and 70% local soil (fig. 10)

Immediately after finished construction of adobe, protective plasters were applied onto the entire adobe surface. The base plaster was composed of 30% air lime and 70% soil, while the top plaster 10% air lime and 90% soil. The plaster first was dry-mixed, afterwards water was added to to the plaster paste, and finally the mortar splashed onto the wall with hand. The rough plaster was trowelled to flat. The top layer of lime-earth plaster was impregnated with 5wt% Isooctyltrimethoxysiloxane solution one week after completion of plastering (fig. 12a, 12b) with intention to improve the rain water resistance.



11a

11b



8. Detalle de la mezcla de cal y tierra usada en una restauración realizada alrededor de 1979, mostrando un alto contenido en cal y grumos en una composición no homogénea, evidenciando la falta de dureza y por lo tanto la poca durabilidad de la tapia, además de un color no satisfactorio. Así, el añadido tierra rica en arcillas ha sido erosionado con facilidad por la lluvia

8. Restoration using lime earth mix estimated done in 1979, high lime content and lumps (not homogeneously mixed) shows no strength and less durability besides of colour. The clay-rich inclusion can be easily eroded by rain

9. Área de prueba de apisonado con mezcla optimizada de tierra y cal

9. Test area of re-ramming with optimized lime earth mixture

10. Sección de la muestra realizada con adobes de tierra y cal y mortero de tierra como revestimiento de protección. Composición del mortero de asiento (4) y del mortero base de protección de cal (5): 30%P/P cal aérea y 70%P/P tierra local. Composición del mortero de revestimiento (6): 10%P/P cal aérea y 90%P/P tierra local

10. Section of the test area with lime-earth adobe and earth plaster as protective surface. Composition of Bedding lime mortar (4) and base lime earth mortar (5): 30wt% air lime and 70wt% local soil; Composition of top lime mortar (6): 10wt% air lime and 90wt% local soil

11a-11b. Construcción en 2007 de la pared de adobe protectora del núcleo de tapial

11a-11b. Construction of adobe wall to protect the earth core in 2007



12a
12b



piezas se desmoldaron y se almacenaron durante dos semanas en condiciones de alta humedad bajo una envoltura de plástico. La dosificación del mortero de asiento fue de un 30% de cal aérea y un 70% de tierra del lugar (fig. 10).

Inmediatamente después de finalizarse el paño de adobe, se aplicó el revestimiento a la totalidad de la superficie. El guarnecido estaba compuesto por un 30% de cal aérea y un 70% de tierra, mientras que el enlucido de acabado de un 10% de cal aérea y un 90% de tierra. Primero se mezclaron estos morteros en seco y después se les añadió agua. Con la mezcla final se enfoscó la pared a mano, primero lanzando pelladas de mezcla a y luego acabándolo con una llana. El revestimiento final se impregnó con un 5%P/P de una solución de iso-octyltriethoxysilano aplicada una semana después de haberse acabado el enfoscado (figs. 12a, 12b) con el objetivo de mejorar su resistencia al agua de lluvia.

Evaluación visual de las pruebas

Después de cuatro años de exposición a la intemperie, en noviembre de 2011 se realizó una inspección visual de las pruebas. Además, se tomaron dos muestras de tapia de tierra mejorada con cal para ensayar su resistencia mecánica y a la acción del agua. Los resultados de la primera muestra a una profundidad 30 y 50 mm de espesor, mostraron que tenía una resistencia superficial de 0.2 Mpa . Mientras, la segunda muestra, tomada a una profundidad de 30-50mm, demostró tener una resistencia de 3,8 Mpa. Se puede deducir que la tierra mejorada con cal en el interior de la estructura tiene una resistencia aún mayor, pudiendo llegar a los 5 Mpa. Los resultados arrojaron que la superficie de la nueva tapia sí se había deteriorado, pero sólo hasta los 50 mm de profundidad. La prueba realizada con adobes no fue evaluada en noviembre 2011 porque una vez finalizada no se consideró adecuada para el mantenimiento global de la muralla.

Visual evaluations of mock ups

After 4 years natural weathering, in November 2011, visual inspection has been taken to the mock-ups. Also 2 samples of lime-improved rammed earth had been taken to test the strength and water resistance. First sample showed that the compressive strength of the surface (10-30mm) was 0.2 Mpa, while the second sample with a depth of 30-50 mm showed compressive strength of 3.8 MPa. It can be assumed that the inside lime improved earth could have higher strength up to 5 Mpa. The results show the surface of new rammed earth was deteriorated but within the depth of 50 mm. The mock up with adobe was not evaluated in November 2011 because it was not considered as a good option to maintain the entire city wall shortly after the mock up was completed.

Implementation

From July 2012 part of the inner earth wall classified of “dangerous portion” has been restored with the lime earth mixture rammed in the traditional way, following the quality control system applied in the mock up wall built in 2007 (fig. 13). There are however still quality

12a. Preparación de la superficie de la capa protectora de mortero de cal y tierra (rallado de la superficie)

12a. Surface preparation of the protective lime-earth plaster to adobe (roughing)

12b. Preparación de la superficie de la capa protectora de mortero de cal y tierra (impregnación con siloxano)

12b. Surface preparation of the protective lime-earth plaster to adobe (impregnation with siloxane)

13. Tramo de muralla restaurada en 2015 por dos contratistas distintas. Los trabajos se llevaron a cabo usando la misma dosificación y el mismo proceso de control de calidad. Aun así el paño de la izquierda muestra menos grietas que el paño de la derecha

13. Restored wall in 2015 by two contractors according to developed formulation and quality control system. Nevertheless the left part seemed to have less cracks than the right part

14. Trabajos de restauración iniciados en septiembre de 2018

14. Restoration work started in September 2018

Implementación

En julio de 2012, una sección de la cara interior de la muralla fue declarada “peligrosa”, y se procedió a su restauración usando la mezcla de tierra y cal compactada de manera tradicional, siguiendo los mismos mecanismos de control de calidad aplicados a la prueba realizada en 2007 (fig. 13). Aun así, en los resultados, realizados por empresas distintas, se aprecian diferencias de calidad notables, sin que se hayan clarificado los motivos de ello.

En 2018 comenzaron nuevos trabajos de mantenimiento (fig. 14). Se retiró una capa de tapia antiguo hasta una profundidad no afectada por problemas de estabilidad. Así, se han preservado al máximo los componentes originales del núcleo de la muralla.

PERSPECTIVAS DE FUTURO

Se concluye que la dosificación óptima necesaria para estabilizar la tierra de Pingyao implica añadirle cal viva y cal hidráulica natural. La cal aérea no es eficaz por sí misma a la hora de compactar la tierra y alcanzar los umbrales de resistencia y durabilidad que se requieren.

El contenido total de cal no deberá superar el 10% para poder asemejarse en color a las zonas no estabilizadas. La dosificación óptima depende del contenido de arcillas de la tierra. Mientras más alto sea el contenido en limos o más bajo el contenido de arcillas, se necesitará un mayor contenido de cal hidráulica natural en la mezcla para conseguir la necesaria resistencia mecánica y a la acción del agua. Asimismo, un alto contenido de agua garantiza un curado adecuado y un aumento de la resistencia de la mezcla de cal y tierra. La comparación entre distintos métodos de refuerzo ha mostrado que el compactado es un método efectivo a la hora de proteger la tapia de las murallas

differences among contractors. The reasons are not clarified. In 2018, new maintenance works started (fig.14). The deteriorated earth has been excavated only to the area where the stability of wall was affected. The original historic earthen substances in the wall core have been preserved as much as possible.

PROSPECTS

It has been concluded that the optimum dosage to stabilize Pingyao Soil is the mix of quick lime and natural hydraulic lime. Air lime alone is not effective enough to consolidate the soil to reach the required strength and durability.

The total lime content shall be not higher than 10% to match the colour of not stabilized soil. The optimum dosage depends on the clay of the soil. The higher silt content or the lower the clay content, the higher content of natural hydraulic lime is needed to be mixed to reach sufficient strength and water resistance. High content of water guarantees the setting and strength development of lime-soil. The comparison of different reinforcing methods showed that ramming is an effective method to



13
14





15



16

15. Aspecto de las pruebas tras aproximadamente 12 años de exposición a la intemperie. En ambos casos lo más notable es la durabilidad del revestimiento protector de tierra y cal (foto de Shao Shuai)

15. Mock ups after approximately 12 years exposure, what is remarkable is the durability of protective lime-earth plaster (photo by Shao Shuai)

16. Detalle de las superficie erosionadas de tierra compactada (izquierda) frente a la de revestimiento de mortero de tierra y cal sobre adobe (derecha) tras 12 años de exposición a la intemperie (foto de Shao Shuai tomada en septiembre de 2018)

16. Details of eroded rammed earth surface (left) and earth plaster on adobe (right) after 12 years exposure (photo by Shao Shuai in September 2018).

históricas y mantener la integridad interna de la estructura. Sin embargo, los paños en los que se han completado trabajos de restauración muestran signos de deterioro y fisuración a los pocos años de su finalización, como demuestran las inspecciones visuales realizadas en septiembre de 2018. Estos defectos puede que no sean tan graves como para afectar a la estabilidad de la muralla en sí, pero muestran la necesidad de un estudio más profundo de los métodos de restauración. Desde nuestro punto de vista, quizá sea necesaria alguna medida de mantenimiento adicional. Aunque la opción de usar adobes para conservar la muralla fue rechazada por varios factores, en particular por su coste, el revestimiento de mortero de tierra y cal se ha conservado sorprendentemente bien, sólo perdiéndose entre un 20% y un 30% del revestimiento por erosión ambiental a lo largo de los 12 años pasados desde su realización (fig. 15). La delaminación ocurre principalmente entre el adobe y el guarnecido, aunque también sucede entre el guarnecido y el enlucido final (fig. 16).

Un revestimiento similar de mortero de tierra y cal aplicado a una superficie de tierra compactada podría ser una solución sostenible para el mantenimiento de la muralla en su conjunto y a unos costes muy bajos. Este revestimiento de tierra y cal funciona como capa de sacrificio para poder proteger la superficie de la tapia de la erosión y regular el equilibrio de humedad. Debido a la llamada “acción de protección medioambiental”, una campaña a nivel nacional encaminada a restaurar el medio ambiente

protect the historical earth walls while retaining the internal compaction. But the completed areas show certain surface deterioration or cracking after a few years’ exposure based on visual inspection done in September 2018. Those kind of surface defects might not be so extensive to affect the stability of the entire wall, but needs to be further studied. From our point of view, a maintenance measurement might be necessary.

Although adobe option to preserve the wall was discarded mostly because of costs and other factors, the lime-earth plaster to adobe wall in the test area was surprisingly well preserved, only 20-30% earth plaster has been peeled off after 12 years exposure to natural climate (fig. 15). The delamination occurs both between adobe and base plaster, some delamination has occurred between the base and top plasters (fig. 16). A protective lime-earth plaster to rammed wall surface could be a sustainable solution to maintain the entire wall with very low cost. This lime-earth plaster works as sacrificial layer to protect the entire surface against erosion and to regulate the moisture balance. Due to so called “environmental protection action”, which is a national campaign to restore

mediante el cierre de industrias muy contaminantes, puede que en un futuro no dispongamos de cal de alta calidad para su uso en arquitectura y restauración. Tanto la cal aérea como la cal hidráulica natural tienen que ser horneadas a baja temperatura (no inferior a los 1.200°C), además de ser apagadas o molidas. Sin cal de alta calidad no se pueden garantizar trabajos de restauración de calidad.

Los trabajos de restauración y mantenimiento necesitan tierra como materia prima, pero la tierra está protegida como recurso agrícola. De hecho, en un principio, no está permitida la extracción de tierras para la conservación de las murallas de la ciudad de Pingyao.

Toda esta actuación para la consolidación y conservación de las murallas de Pingyao deberá ser regulada a través de un marco de colaboración entre los distintos departamentos de conservación cultural, planeamiento urbano y protección ambiental a nivel nacional.

AGRADECIMIENTOS

Queremos dar las gracias especialmente a Dr. Oliver Kuhl y Dr. Wilmers del Soil and Building Materials Center en Alemania por su apoyo técnico tanto en el laboratorio como en las evaluaciones in situ. Los autores agradecen la colaboración Mr Zhang Qidong de la Shanxi Province Cultural Relics Bureau, y de Mr Jia Zhongzhao y Mr Li Shucheng de la Pingyao County Cultural Relics Bureau.

environment through shutting down industries with high emissions, lime with high quality for architecture and restoration may not be available in the future. Both air lime and natural hydraulic limes have to be kilned at low temperature (not higher than 1200°C) and slaked or grinded. Without high quality lime no quality restoration work can be warranted.

Restoration and maintenance works need soil as raw material, but soil is under protection as agricultural resources. It is actually illegal to mine soil for Pingyao city wall conservation. This all has to be regulated within a collaboration framework of cultural conservation departments, urban planning and environmental protection bureaus at the national level.

ACKNOWLEDGEMENTS

Special thanks to Dr. Oliver Kuhl and Dr. Wilmers from Wetzlar Soil and Building Materials Center in Germany for their technical supports during both laboratory and site researches. The authors appreciate the collaboration works from Shanxi Province Cultural Relics Bureau, Mr Zhang Qidong, the Pingyao County Cultural Relics Bureau Mr Jia Zhongzhao and Mr Li Shucheng.

NOTAS / NOTES

1. 晋中市史志研究院编. 平遥古城志[M]. 北京: 中华书局, 2002.
2. 中国文化遗产研究院. 山西省平遥古城城墙结构加固工程总体设计方案[R]. 北京: 中国文化遗产研究院, 2007.
3. 中冶集团建筑研究总院. 平遥古城墙可靠性鉴定报告[R]. 北京: 中冶集团建筑研究总院, 2005.
4. 总装备部工程设计研究总院. 山西省平遥古城城墙现状补充调查报告[R]. 北京: 总装备部工程设计研究总院, 2006.
5. 王旭东. 中国干旱环境下土遗址保护关键技术研究新进展[J]. 敦煌研究2008(6):6-12.
6. 孙满利 王旭东 李最雄. 土遗址保护初论[M]. 科学出版社, 2010.
7. KUHL O. Untersuchungen zur Bodenverfestigung mit Kalk[J], Band 59, OBERHESSISCHE NATURWISSENSCHAFTLICHE Zeitschrift, ISSN 0340-4498, 1997:73-77.
8. SCHADE H-W. Untersuchungen Zum Reaktionsverhalten von Mischbindemitteln zur Bodenbehandlung (05.130/2002/DGB)[M]//Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschaft, 2006:1-40.
9. KRAJEWSKI W., KUHL O. Eignung Frostempfindlicher Boeden Fuer die Behandlung mit Kalk[M]// Berichte der Bundesanstalt fuer Strassenwesen. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, 2005, 7-45.
10. HOUBEN H. GUILLAUD H. Earth Construction – A Comprehensive Guide[M]. Rugby, ITDG Publishing, 1994 (reprint 2005), 124-126.
11. Merkblatt ueber Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemittel[S]. Köln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, 2004.