

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
ESCUELA DE POSGRADO



**Estudio de las Propiedades Mecánicas y Físicas del Adobe con Biopolímeros de Fuentes Locales**

Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil, que presenta el ingeniero:

José Eduardo Ramírez Caparó

ASESOR

Dr. Rafael Aguilar Velez

San Miguel, 2016

# Agradecimientos

La finalización de la presente tesis fue posible gracias al apoyo de las personas que de diferentes formas contribuyeron con la conclusión exitosa de este trabajo. Entre ellas quiera agradecer a:

- Mi asesor, el Profesor Rafael Aguilar, por todo el apoyo y asesoramiento durante estos años. Le agradezco también por todas las oportunidades que me ha dado.
- Al Prof. Javier Nakamatsu, por la asesoría y aporte en el trabajo.
- Al Prof. Miguel Pando, por su guía y consejos para llevar a cabo el trabajo, así como por su paciencia para la revisión de las publicaciones.
- A la Prof. Suyeon Kim, por su constante apoyo en la revisión de los artículos publicados.
- Al Prof. Guillermo Zavala, por las interesantes discusiones que enriquecieron el trabajo.
- A mis colegas Mariela Elgegren, Jorge Ayarza y Luis Ortega, por su apoyo en la realización de las pruebas experimentales así como la interpretación de resultados.
- Prof. Manuel Olcese, por facilitar las instalaciones del Laboratorio de Suelos en que se realizaron gran parte de los ensayos experimentales.
- A mis colegas de laboratorio Mijail, Saulo, Saúl, Cristhian, Carolina y Mauricio, por el constante apoyo y aliento durante el desarrollo de la tesis.
- Al Ing. César Chácara, por su ayuda y guía durante la etapa inicial de la tesis.
- Al fondo DGI 2013-0061 por brindar los fondos para el desarrollo del proyecto.
- Al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por el financiamiento de los dos años de estudio de la maestría.

Y finalmente, quisiera agradecer de forma especial a mi familia

- A mis padres, por apoyarme en todo momento y su interés en mi trabajo, por sus enseñanzas y valores inculcados, y por ser siempre un ejemplo a seguir.
- A mi hermana, por estar presente en todo momento, incluso en los más difíciles. Le agradezco su constante apoyo y palabras de aliento.

# Resumen

Las construcciones de tierra están constituidas principalmente de tierra cruda como los bloques de adobe y los muros tapiales, también pueden ser sistemas mixtos como la quincha o la albañilería de piedra con mortero de barro. La tierra en general, es un material ampliamente usado por un porcentaje importante de la población mundial para la construcción de viviendas, que generalmente son de bajo costo y sostenibles. Sin embargo, las construcciones de tierra presentan limitada capacidad de resistencia mecánica, que las hace altamente vulnerables a la acción de los sismos. Además ante condiciones ambientales adversas como precipitaciones o alta humedad relativa, el deterioro de este material se ve acelerado. Finalmente, diversas bacterias, insectos y hongos capaces de transmitir algunas enfermedades se albergan en las viviendas construidas con tierra debido a la rápida absorción de agua y agrietamiento superficial, de este material.

Por los motivos anteriores, esta tesis tiene como objetivo el estudio de la mejora de las propiedades de resistencia al agua y comportamiento mecánico de las construcciones de tierra. Para este propósito, se utilizaron biopolímeros naturales obtenidos de fuentes locales para la modificación de las propiedades del suelo. La resistencia al agua fue evaluada mediante ensayos de permeabilidad y erosión en especímenes de tierra que recibieron un tratamiento con soluciones poliméricas. Diferentes técnicas se emplearon para la aplicación de las soluciones de manera que sea posible determinar cuál es la más adecuada para la protección ante los efectos del agua. Por otro lado, se realizaron ensayos de caracterización mecánica para determinar la influencia de los biopolímeros en la resistencia a compresión, tensión y flexión. Para la evaluación de estas propiedades se agregaron las soluciones de biopolímeros en la mezcla de barro durante la fabricación de los especímenes de tierra que luego fueron ensayados.

Los resultados obtenidos muestran que la aplicación de estos polímeros contribuye a la mejora de las construcciones de tierra. Se consiguió modificar de forma positiva el comportamiento de la tierra ante la influencia del agua así como sus características mecánicas. En el primer caso, se logró un efecto impermeabilizante y se incrementó considerablemente la resistencia a la erosión generada por el agua. Con respecto a las propiedades mecánicas, se logró una mejora notable de la resistencia a compresión, tensión y flexión, logrando incluso a duplicar la resistencia inicial en algunos casos.

# Contenido

Agradecimientos.....	i
Resumen.....	ii
Contenido.....	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas.....	vii
1. Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	2
1.2 Objetivos del Trabajo.....	2
1.3 Esquema de la Tesis.....	3
1.4 Resultados.....	3
2. Evaluación preliminar de la influencia de biopolímeros para la modificación de construcciones tradicionales.....	4
2.1 Introducción.....	5
2.2 Materiales.....	6
2.3 Programa de Pruebas para Evaluar la Mejora de la Durabilidad.....	6
2.4 Programa de Pruebas para Evaluar la Influencia en las Propiedades Mecánicas.....	8
2.5 Conclusiones.....	9
3. El uso potencial de la quitosana como un biopolímero aditivo para la mejora de las propiedades mecánicas y resistencia al agua de construcciones de tierra.....	10
3.1 Introducción.....	11
3.2 Caracterización del Suelo.....	13
3.3 Evaluación de las Propiedades de Durabilidad.....	15
3.3.1 Programa Experimental.....	15
3.3.2 Resultados y Discusión.....	17

3.4 Evaluación de las Propiedades Mecánicas.....	19
3.4.1 Programa Experimental.....	19
3.4.2 Resultados y Discusión.....	20
3.5 Conclusiones.....	23
4. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	25
4.1 Conclusiones.....	26
4.1.1 Evaluación de la Resistencia al Agua.....	26
4.1.2 Comportamiento Mecánico.....	26
4.2 Trabajos Futuros.....	26
Referencias.....	28



# Lista de Figuras

<b>Figura 2.1.</b> Esquema de los ensayos realizados: (a) ensayo de ángulo de contacto; (b) prueba de erosión por goteo.....	7
Figura 2.2. Resumen de los resultados del ángulo de contacto.....	7
Figura 2.3. Especímenes de tierra luego de 10 minutos de exposición al ensayo de erosión: (a) mezcla de tierra y agua (después de 2.5 minutos de ensayo); (b) mezcla con quitosana (3%); (c) superficie recubierta con quitosana (3%); (d) recubrimiento con quitosana (1%); y (e) recubrimiento con carragenina (2%).....	8
Figura 2.4. Comparación de los resultados de las pruebas mecánicas.....	9
<b>Figura 3.1.</b> Problemas típicos en viviendas de tierra: (a) estructura de tierra luego del terremoto de Bam del 2003; (b) pared de adobe erosionada; y (c) insecto triatomita que vive en una pared de tierra y porta el parásito que causa la enfermedad de Chagas.....	11
Figura 3.2. Estructura química de la quitosana.....	12
Figura 3.3. Análisis mineralógico de la muestra de suelo: (a) Espectro de fluorescencia de rayos X de la muestra comprimida del suelo; y (b) Patrón de difracción de rayos X de la muestra de suelo.....	14
Figura 3.4. Distribución de tamaño de grano de tierra.....	15
Figura 3.5. Evaluación de las propiedades de durabilidad: (a) ensayo de ángulo de contacto; (b) ensayo de erosión acelerada.....	16
Figura 3.6. Resultados del ángulo de contacto de los especímenes recubiertos.....	17
Figura 3.7. Resultados del ángulo de contacto en matrices tratadas y sin tratar.....	18
Figura 3.8. Resultados de la pruebas de la erosión por goteo de las muestras no tratadas en diferentes momentos del ensayo.....	18
Figura 3.9. Resultados de ensayos de erosión de especímenes tratados.....	19
Figura 3.10. Preparación de los especímenes: (a) mezcla del polímero y la tierra; (b) colocación de la mezcla en el encofrado; (c) especímenes cilíndricos y su encofrado; y (d) especímenes prismáticos.....	20
Figura 3.11. Resumen de los resultados de los ensayos mecánicos en especímenes con y sin tratamiento.....	21

Figura 3.12. Resultados de los ensayos mecánicos.....22

Figura 3.13. Las condiciones físicas de las muestras después de la prueba: (a) el contenido de humedad; y (b) la densidad seca.....23



# Lista de Tablas

Tabla 3.1. Composición mineral de algunos suelos usados para bloques de adobe comparados con la muestra analizada en el presente trabajo. Nótese que las formulas son aproximadas.....	14
Tabla 3.2. Características de los especímenes preparados para los ensayos de durabilidad.....	17
Tabla 3.3. Especímenes preparados para los ensayos mecánicos.....	20





# Capítulo 1

## Introducción



## 1.1 Motivación

La tierra es un material que ha sido empleado para la construcción desde épocas remotas. Dicho material se ha usado en estructuras como viviendas, iglesias, monumentos y otros. En la actualidad, aproximadamente el 30% de la población del mundo vive en estructuras de tierra (Cofirman, et al., 1990). Además, parte importante de los monumentos arqueológicos e históricos fueron construidos con este material. En el Perú, las construcciones de tierra se encuentran principalmente en áreas rurales, siendo aproximadamente el 70% viviendas de adobe y tapial (INEI, 2008). Por otro lado, en los sectores urbanos este porcentaje es de aproximadamente 25% (INEI, 2008).

El uso de este material representa una alternativa para el desarrollo de construcciones sostenibles (Pacheco & Jalali, 2012; Sherin, 2014). La cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente demandada para la fabricación de los bloques de tierra es significativamente menor que los materiales de uso común como el concreto (Morton, et al., 2005). Asimismo, la energía que se requiere para el uso del suelo como material de construcción es menor que materiales como el concreto (Lourenço, 2002). Adicionalmente las construcciones de tierra presentan un buen comportamiento térmico y acústico (Little & Morton, 2001). Por otro lado, su bajo costo y la facilidad de construcción hacen que las estructuras de tierra sean ideales para ser sistemas de construcción masiva.

Desde un punto de vista mecánico, este es un material frágil y con baja resistencia mecánica. Estas características hacen que las construcciones de tierra sean vulnerables ante eventos sísmicos (Blondet, et al., 2003). Otro aspecto negativo que se debe considerar cuando se trabaja con este material es su baja capacidad de resistir condiciones climáticas adversas como las precipitaciones que producen erosión. En cuanto al aspecto sanitario, la aparición de grietas facilita la aparición de plagas como insectos, mosquitos, hongos y bacterias que pueden transmitir enfermedades a los habitantes de estas estructuras (Levy, et al., 2006).

Diversos estudios han buscado mejorar las propiedades de las construcciones de tierra mediante el uso de aditivos. Pineda (Pineda, et al., 2007) propone el uso de agentes poliméricos como la amina catiónica y el asfalto emulsionado para incrementar la resistencia mecánica y reducir la absorción de agua. Por otro lado, Quagliarini y Lenci (Quagliarini & Lenci, 2010) estudian el efecto de la inclusión de fibras de paja en el adobe para controlar el comportamiento plástico del adobe y reducir las grietas por retracción. De forma similar, Aymerich (Aymerich, et al., 2012) indica que la adición de fibras de lana de oveja mejora la ductilidad de los bloques de adobe e incrementa la capacidad de absorción de energía durante la fractura del material.

En el presente estudio se propone el uso de dos biopolímeros extraídos de fuentes naturales peruanas: quitosana y carragenina para modificar algunas características físicas y mecánicas de la construcción tradicional de adobe. Específicamente, se espera una mejora en las propiedades mecánicas y en la protección de las construcciones de tierra a la erosión ocasionada por el agua.

## 1.2 Objetivos del Trabajo

El objetivo general de la tesis consiste en el estudio de las propiedades físicas y mecánicas del adobe cuando se incorporan biopolímeros en su preparación.

Los objetivos específicos son:

- Evaluación de la resistencia del suelo al agua mediante ensayos de erosión y permeabilidad.
- Determinación del comportamiento a compresión haciendo uso del ensayo de compresión simple.
- Caracterización de la resistencia a tensión mediante el ensayo de compresión diametral (split) y de flexión en tres puntos.

### 1.3 Esquema de la Tesis

La tesis está organizada de la siguiente forma:

- **Capítulo 1:** Introducción del trabajo de tesis, con la motivación y objetivos, así como la organización del documento y los resultados obtenidos.
- **Capítulo 2:** Se describen los primeros resultados del estudio de la inclusión de los biopolímeros (quitosana y carragenina) en los especímenes de tierra. Incluye ensayos preliminares de permeabilidad, erosión y caracterización mecánica.
- **Capítulo 3:** Este capítulo presenta el estudio de la influencia de la quitosana en las propiedades de durabilidad y mecánicas del adobe. En este caso también se realizó un estudio de optimización de la concentración de la solución polimérica. Además, se reportan la caracterización mineralógica y física del suelo utilizado para esta investigación.
- **Capítulo 4:** Se presentan las principales conclusiones de la tesis y se proponen trabajos futuros que complementen el presente estudio.

### 1.4 Resultados

A partir de la investigación realizada se publicó un artículo en una conferencia internacional y se ha enviado otro a una revista científica indexada. Estos artículos son los siguientes:

#### **Artículo 1:**

R. Aguilar, J. Nakamatsu, **E. Ramírez**, M. Elgegren, S. Kim and M. Pando, “Preliminary assessment of the influence of biopolymers for the modification of earthen constructions materials”, in Seoul International Conference on Engineering and Applied Science, Seoul, South Korea, 2016.

#### **Artículo 2:**

R. Aguilar, J. Nakamatsu, **E. Ramírez**, M. Elgegren, S. Kim, M. Pando, J. Ayarza, and L. Ortega, “The potential use of chitosan as a biopolymer additive for enhanced mechanical properties and water resistance of earthen construction”, Building and Construction Materials (submitted)

# Capítulo 2

## Evaluación preliminar de la influencia de biopolímeros para la modificación de construcciones tradicionales

### Resumen

En este capítulo, la construcción tradicional se refiere a la construcción de tierra cuyas unidades estructurales como paredes o bloques están hechos principalmente de tierra cruda; algunos ejemplos incluyen el tapial y bloques de adobe. La construcción con tierra es barata y ofrece una alternativa de construcción sostenible, por lo que es usada extensamente en todo el mundo. Los problemas más críticos de las construcciones de tierra son su limitada resistencia mecánica y la facilidad de deterioro cuando se expone a condiciones ambientales adversas, como precipitaciones o alta humedad relativa. Diferentes formulaciones de dos biopolímeros, quitosana y carragenina, se evaluaron en relación a su capacidad de modificar el comportamiento físico (erosión y permeabilidad) y mecánico (compresión y tensión) del adobe. El resultado de este estudio evidencia que el uso de estos biopolímeros puede mejorar positivamente el comportamiento de materiales de construcción de tierra tradicionales. En particular, los polímeros empleados en este trabajo incrementan la calidad de las construcciones de adobe con respecto a la resistencia al agua, y el comportamiento a compresión y tensión.

## 2.1 Introducción

El suelo se ha utilizado como material de construcción desde tiempos antiguos. Actualmente, aproximadamente el 30% de la población mundial vive en construcciones de tierra (Cofirman, et al., 1990). El uso de la tierra como material de construcción para nuevas edificaciones ha recibido mayor atención recientemente debido a que presenta una serie de ventajas, especialmente desde un punto de vista de la sostenibilidad (Pacheco & Jalali, 2012). No obstante, las construcciones de tierra presentan problemas que limitan su aplicación y complican la tarea de preservar estructuras existentes. Desde una perspectiva de la mecánica, es un material anisotrópico, frágil y de poca resistencia a la tensión, lo que hace que este tipo de construcciones sean particularmente vulnerables a los sismos (Blondet, et al., 2003). Efectivamente, durante el terremoto de Maden (Turquía) en el 2011, las estructuras de adobe (albañilería de tierra) fueron las que sufrieron mayor daño (Sayin, et al., 2013). La durabilidad es otro aspecto que se debe considerar cuando se trabaja con este material (Galan Marin & Petric, 2007), especialmente cuando se considera la resistencia al agua, esta erosiona el suelo y la humedad reduce la resistencia mecánica de la estructura (Bui, et al., 2014).

Varios estudios han enfocado su atención en los efectos de algunos aditivos para mejorar las propiedades mecánicas de las estructuras de tierra. Pineda (Pineda, et al., 2007) usó agentes poliméricos (amina catiónica y asfalto emulsionado) para tratar el suelo y consiguió un incremento en la resistencia a compresión y reducir la absorción de agua. Otros autores como Calkins (Calkins, 2008), también consideran el uso de asfalto emulsionado para las construcciones de tierra para estabilizar el suelo cuando el contenido de limos es alto.

En el presente capítulo se propone el uso de dos biopolímeros (quitosana y carragenina) obtenidos de fuentes naturales peruanas para la modificación de las propiedades de bloques de tierra. Estos biopolímeros se disolvieron y fueron usados como aditivos para la fabricación o recubrimiento de especímenes de adobe que luego fueron probados mediante ensayos mecánicos, permeabilidad y erosión.

La quitosana es un biopolímero compuesto de 2-amino-2-desoxi-D-glucosa y 2-acetamido-2-desoxi-D-glucosa unidas a través de enlaces  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4) que se deriva de la desacetilación alcalina de quitina. Debido a la presencia de nitrógeno, la quitosana es de interés comercial comparado con la celulosa sintéticamente modificada (1.25%) (Kumar, 2000). Actualmente, la quitosana se obtiene de cascarones de cangrejos y langostas desechados de las industrias conserveras u otras conchas de crustáceos obtenidos a partir de los residuos de la industria alimentaria (Kumar, 2000). La razón por la que la quitosana ha recibido mucha atención es por sus propiedades, como biodegradabilidad, actividad antibacteriana, no tóxico y alta densidad de carga (Wollina, et al., 2003). Siendo un polímero y un polielectrolito en solución, la quitosana ha sido usada para la modificación de la superficie de materiales y sus propiedades fueron exitosamente transferidas al sujeto de modificación (Zemljic, et al., 2009; Enescu, 2008; Periolatto, et al., 2012).

La carragenina, por otro lado, es un grupo de polisacáridos de cadena lineal naturales sulfatados que están presentes en algas rojas. Las unidades de repetición de estos polímeros son galactosa y 3,6-anhidrogalaactosa, algunos de los cuales están sulfatados. Las unidades están unidas entre sí alternativamente por enlaces  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 3) y  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4) (Silva, et al., 2012). Los grupos sulfatados son responsables por las cargas electrostáticas

de estos polímeros en soluciones acuosas, resultando en un polielectrolito aniónico. Dadas sus excelentes propiedades funcionales físicas como engrosamiento, gelificantes y habilidades estabilizantes, la carragenina se utiliza ampliamente en la industria alimentaria (Campo, et al., 2009).

## 2.2 Materiales

La quitosana fue adquirida de Sigma-Aldrich (1370 kDa, grado de desacetilación 65%), y fue disuelta en un ácido acético al 1%, se prepararon soluciones de quitosana con concentraciones de 1% y 3%. La  $\kappa$ -carragenina (540 kDa) se obtuvo de *Chondracantus chamosoi*, un alga roja loca y suelta en agua.

Con el objetivo de producir muestras representativas, se seleccionó un suelo típico de la costa peruana para la producción de adobes. La distribución del tamaño de granos se obtuvo mediante un tamizado para los granos de mayor tamaño y con un hidrómetro para los finos. Adicionalmente, la plasticidad del suelo se evaluó mediante la determinación de los límites de Atterberg (líquido y plástico). El procedimiento propuesto en la ASTM D4318 (ASTM, 2010) fue considerado para determinar estos límites. El análisis granulométrico muestra que los limos y arcillas (fracción de finos) con un tamaño de grano menor que la malla N°200, representan cerca del 80% del suelo. El índice de plasticidad determinado a partir de los límites de Atterberg fue 16%. En base a estos resultados, y de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM, 2011), el suelo fue clasificado como una arcilla de baja plasticidad (CL).

## 2.3 Programa de Pruebas para Evaluar la Mejora de la Durabilidad

La afinidad de los especímenes de adobe no tratados y tratados al agua se evaluó midiendo el ángulo de contacto de una gota de agua liberada en su superficie (Figura 2.1a). El desempeño ante la erosión se determinó mediante un ensayo de erosión acelerada (Figura 2.1b). El ángulo de contacto se midió a partir de fotografías digitales con un contraste de iluminación apropiado tomadas inmediatamente después de que una gota de agua destilada de 10 $\mu$ L se depositara en la superficie de tierra usando un micro-jeringa. Para el desempeño de la erosión, un ensayo de Swinburne modificado de erosión acelerada, como lo proponen los Estándares Australiano y Español (Walker, 2002; AENOR, 2008), fue realizado. Las modificaciones de este ensayo consistieron en usar especímenes cilíndricos de 5.5 cm de diámetro y 0.7 cm de altura en lugar de bloques de adobe enteros, el resto de parámetros permanecieron como lo especifican los Estándares.

Dos tipos de muestras fueron preparadas para ambos ensayos, un conjunto se hizo mezclando el suelo con una solución de quitosana, y el otro aplicando un recubrimiento superficial regular en los especímenes (hechos de tierra y agua) con una solución acuosa de los biopolímeros, quitosana y carragenina. Para el primer grupo, los especímenes se hicieron mezclando tres partes de tierra con una de una solución al 3% de quitosana, por peso. Las soluciones, usadas como una capa de recubrimiento para el segundo conjunto de especímenes, consistieron en soluciones acuosas de quitosana (1% y 3%), y carragenina (2%). Adicionalmente, especímenes de control fueron preparados usando agua destilada.

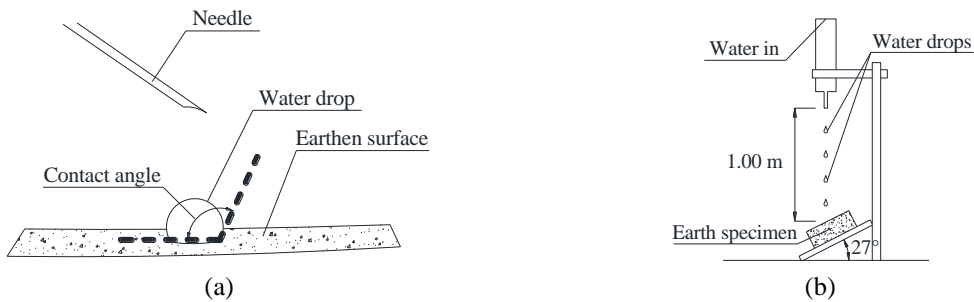


Figura 2.1. Esquema de los ensayos realizados: (a) ensayo de ángulo de contacto (b) prueba de erosión por goteo, adaptado de (Walker, 2002)

Las mediciones de ángulo de contacto se resumen en la Figura 2.2. Como se presenta, los especímenes de control (preparados solamente con agua) mostraron un comportamiento hidrofílico; absorbiendo la gota de agua inmediatamente (no se midió el ángulo de contacto). El espécimen preparado mezclando tierra y solución de quitosana al 3% (en un ratio de 3:1 por peso) absorbió la gota de agua con un ritmo más lento. No obstante, el incremento el ratio de solución de quitosana y tierra a 1:1, resultó en un incremento de la hidrofobicidad de la superficie de la muestra y previno la absorción de la gota de agua, formando un ángulo de  $98^\circ$ . Las muestras de tierra regulares (tierra y agua), recubiertas con soluciones acuosas de quitosana y carragenina presentaron una alta hidrofobicidad. Los especímenes recubiertos con soluciones de quitosana (1 y 3%) produjeron superficies hidrofóbicas, con ángulos de contacto de  $76^\circ$  y  $80^\circ$ , respectivamente. Similarmente, las muestras protegidas con una capa de solución de carragenina también incrementaron su hidrofobicidad; un ángulo de  $88^\circ$  se midió en este caso.

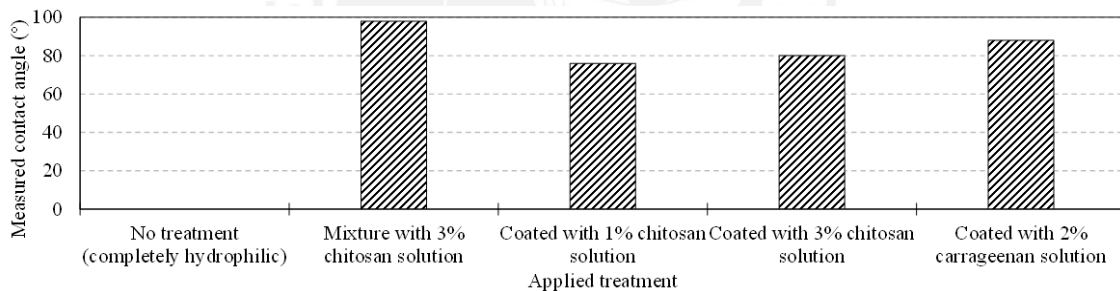


Figura 2.2. Resumen de los resultados del ángulo de contacto

En el ensayo de erosión acelerada, los especímenes de control presentaron poca resistencia al agua. Sólo después de un minuto, la erosión fue catastrófica, y la muestra perdió su consistencia completamente solo luego de 2.5 minutos como se muestra en la Figura 2.3a. Por otro lado, la mezcla preparada con suelo y una solución de quitosana al 3% (proporción de 3:1) no mostró evidencia de erosión como se aprecia en la Figura 2.3b. La misma observación se notó en el caso de las muestras con recubrimiento de quitosana (con soluciones de 1% y 3% de concentración); no presentaron erosión aparente después de 10 minutos de prueba (Figura 2.3c y Figura 2.3d). Las muestras recubiertas con una solución de carragenina al 2% no presentaron erosión luego del ensayo como se ve en la Figura 2.3e; sin embargo, la película del polisacárido se abultó y se desprendió de la muestra de tierra al final del ensayo.

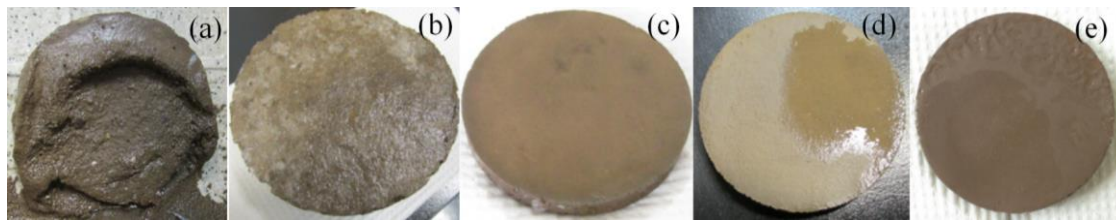


Figura 2.3. Especímenes de tierra luego de 10 minutos de exposición al ensayo de erosión: (a) mezcla de tierra y agua (después de 2.5 minutos de ensayo); (b) mezcla con quitosana (3%); (c) superficie recubierta con quitosana (3%); (d) recubrimiento con quitosana (1%); y (e) recubrimiento con carragenina (2%)

Estos resultados indican que la impermeabilización de los bloques de tierra se produjo debido a la formación de una película de polisacárido en la superficie de la muestra. Es remarcable que, a pesar de que la quitosana y carragenina son polímeros solubles en agua, forman una barrera protectora hidrofóbica que mantiene las partículas de suelo juntas y previene su separación. Esto podría deberse al fuerte puente de hidrógeno dipolo-dipolo, y las interacciones iónicas intra e inter moleculares de las cadenas poliméricas.

## 2.4 Programa de Pruebas para Evaluar la Influencia en las Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de los especímenes fueron evaluadas mediante ensayos de compresión, split y flexión en tres puntos. Especímenes cilíndricos de 34x71 mm fueron usados en la compresión y ensayos de split de las muestras de adobe. Muestras prismáticas de 42x44x125 mm fueron usadas para los ensayos de flexión en tres puntos. El agua o solución polimérica fueron incorporadas gradualmente a la mezcla de barro para obtener una mixtura homogénea. La proporción de tierra y agua (o solución) varió de acuerdo con la consistencia y trabajabilidad de la mezcla. Los polímeros fueron mezclados con el suelo con soluciones de 3% de quitosana y 2% de carragenina con un ratio de 3:1 y 4:1 por peso, respectivamente.

En todos los ensayos, la carga aplicada se controló por desplazamientos, manteniendo una velocidad constante de 1.27 mm por minuto hasta la falla. El contenido de humedad de todos los especímenes también fue controlado y para esto, se secaron las muestras al medio ambiente hasta lograr un 4% de contenido de humedad para reducir la influencia de esta variable en los resultados (Bui, et al., 2014). Los resultados de los ensayos mecánicos presentados en la Figura 2.4 evidencian que las mezclas de carragenina y quitosana permiten un incremento de resistencia remarcable. En todos los casos, los resultados de resistencia a compresión son consistentes, presentando un bajo coeficiente de variación, siendo el más alto 16% en las muestras con quitosana. Estudios similares que se enfocan en determinar las propiedades mecánicas del adobe han reportado coeficientes de variación de hasta 47% de resistencia a compresión (Silveira, et al., 2013), con lo que se confirma que la variabilidad y la dispersión en los datos no es inusual. El ensayo de split y flexión también reportan un incremento de la resistencia, En el presente estudio, el ratio entre estos dos parámetros (split/flexión) varía entre 0.36 y 0.39. De acuerdo con los resultados de otras investigaciones en adobe, esta relación varía entre 0.25 (Silveira, et al., 2013) y 0.70 (Adorni, et al., 2013), que concuerda con los resultados del presente trabajo.



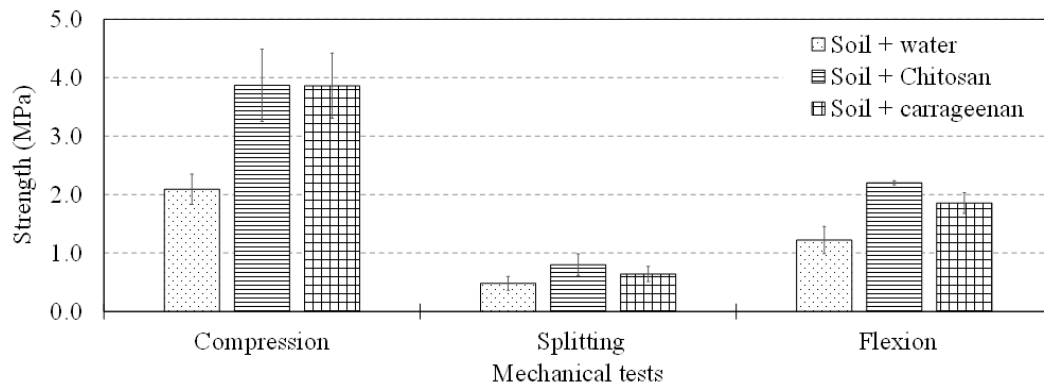


Figura 2.4. Comparación de los resultados de las pruebas mecánicas

## 2.5 Conclusiones

Una protección positiva y considerable ante la erosión del agua se observó con la adición de una lámina de recubrimiento de quitosana y carragenina. Adicionalmente, la incorporación de quitosana durante la preparación contribuye en la impermeabilización de la superficie de la muestra. Aparentemente, la adición de estos polímeros en la mezcla y como recubrimiento incrementa la resistencia a la erosión de la albañilería de tierra. Estos hallazgos pueden tener usos prácticos para las construcciones modernas y la protección de construcciones de tierra históricas en sitios arqueológicos. En el caso de la modificación del comportamiento mecánico, los aditivos también mostraron un comportamiento interesante cuando se incorporaron en la mezcla. En todos los casos, los resultados de las muestras tratadas con estos aditivos casi duplicaron la resistencia original. Más estudios sobre la durabilidad de la lámina de protección y su efectividad deben ser realizados. Los trabajos futuros también deben considerar el uso de otras concentraciones de los aditivos y el estudio de su influencia en el sistema de albañilería.

# Capítulo 3

## El uso potencial de la quitosana como un biopolímero aditivo para la mejora de las propiedades mecánicas y resistencia al agua de construcciones de tierra.

### Resumen

La tierra es un material de construcción tradicional usado desde tiempos remotos y que aún es utilizado por aproximadamente el 30% de la población mundial, principalmente para viviendas. La tierra también es apropiada para la nueva tendencia de la industria de construcciones modernas sostenibles que busca materiales alternativos para incrementar la sostenibilidad. Desafortunadamente, se ha probado que las construcciones de tierra son vulnerables a la acción de los sismos y del medio ambiente. En el siguiente capítulo se exploran alternativas para la modificación de construcciones tradicionales de tierra usando aditivos de quitosana para mejorar su resistencia a las acciones físicas y mecánicas. Ensayos de laboratorio fueron realizados para el estudio del efecto de la durabilidad de especímenes de tierra tratados y sin tratar mediante pruebas de erosión y permeabilidad. La evaluación mecánica evidenció que los aditivos probados pueden modificar positivamente el comportamiento de las construcciones de tierra tradicionales en términos de resistencia al agua, hidrofobicidad, comportamiento a compresión y tensión.

## 3.1 Introducción

La tierra se ha empleado como material de construcción desde tiempos antiguos; casas, monumentos arqueológicos e históricos en todo el mundo han sido construidos usando este material. En la actualidad, aproximadamente el 30% de la población del mundo aún habita viviendas de tierra localizadas principalmente en países en desarrollo en donde otros materiales no son económicamente accesibles (Cofirman, et al., 1990). Recientemente, la tierra está recibiendo mayor atención como un material alternativo para reducir los gases de efecto invernadero de la industria de construcción (Pacheco & Jalali, 2012). Las razones para escoger este material para la construcción son prácticas, desde el proceso de construcción simple y el buen comportamiento térmico y acústico de estas construcciones (Sherin, 2014).

Diferentes técnicas de construcción usando la tierra como el principal material están disponibles dependiendo de la región del mundo en la que se usan. De acuerdo con Houben (Houben & Guillaud, 1994), las técnicas de construcción con tierra se dividen en tres grupos: estructura, monolíticos y albañilería. Los muros tapiales (monolíticos) y la albañilería de adobe (albañilería) son los métodos más conocidos. Como ejemplo, en Perú, 34% de las viviendas se construyeron usando estas técnicas (INEI, 2015).

Desafortunadamente, desde una perspectiva mecánica, la tierra es un material anisotrópico, y presenta un comportamiento frágil y con baja resistencia a los esfuerzos de tensión que hacen que las construcciones de material sean vulnerables a eventos sísmicos (Blondet, et al., 2003). Por ejemplo, como se muestra en la Figura 3.1a, después del terremoto de Bam (Iran) en el 2003, construcciones históricas de adobe fueron severamente dañadas (Langenbach, 2005). Otro aspecto negativo que considerar cuando se trabaja con este material es su resistencia a la exposición al agua (Galan Marin & Petric, 2007). Como se muestra en la Figura 3.1b, la humedad y precipitaciones severas afectan severamente las estructuras, reduciendo su resistencia y afectando su estabilidad (Bui, et al., 2014). Finalmente, las construcciones hechas con este material evidencian patrones de agrietamiento extensos que propician la existencia de insectos y hongos que pueden transmitir enfermedades a sus habitantes. En consecuencia, en Sudamérica y América Central, los insectos transmisores de Chagas fueron encontrados dentro de paredes de adobe (ver Figura 3.1c), siendo una de las causas de la muerte de millones de humanos que esta enfermedad aún produce en estas regiones (Levy, et al., 2006).

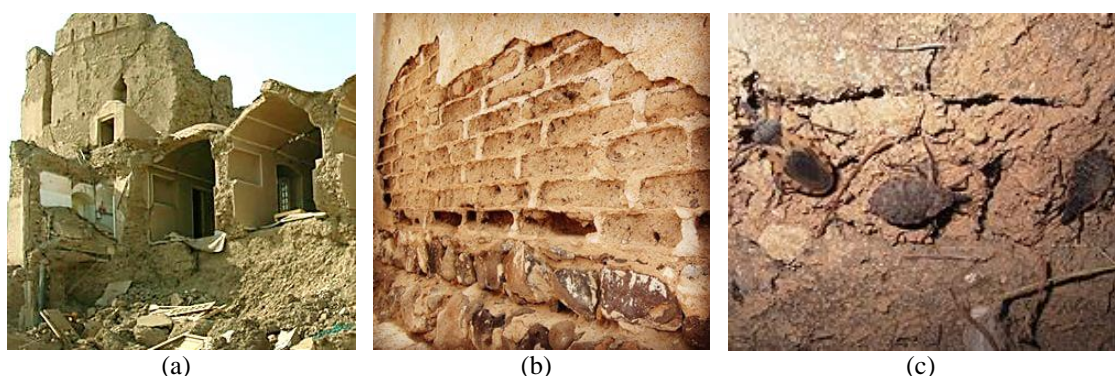


Figura 3.1. Problemas típicos en viviendas de tierra: (a) estructura de tierra luego del terremoto de Bam del 2003 (Langenbach, 2005); (b) pared de adobe erosionada; y (c) insecto triatomita que vive en una pared de tierra y porta el parásito que causa la enfermedad de Chagas

Varios estudios han enfocado su atención en mejorar las propiedades mecánicas de las estructuras de tierra empleando aditivos. Por ejemplo, en (Pineda, et al., 2007), un

incremento en la resistencia a la compresión y una reducción de la absorción de agua se consiguió usando agentes poliméricos: amina catiónica y asfalto emulsionado. Otros estudios, como (Calkins, 2008), también consideraron el uso de asfalto emulsionado para la estabilización de suelos con alto contenido de limos. En (Galán-Marín, et al., 2013), se usó alginato para modificar el comportamiento mecánico de los bloques de adobe, los resultados mostraron que su adición puede mejorar la resistencia a flexión y compresión de los suelos con ciertas características mineralógicas. El uso de fibras naturales para la mejora de las propiedades mecánicas del adobe también ha sido extensamente estudiado. Algunos de estos estudios concluyen en que la inclusión de fibras puede contribuir en controlar el comportamiento plástico de los bloques de tierra y previenen el agrietamiento debido al proceso de retracción durante el secado (Quagliarini & Lenci, 2010). Otros estudios concluyeron de que la adición de fibras puede incrementar la capacidad absorción de energía en este material (Aymerich, et al., 2012).

El presente estudio propone el uso de quitosana para la modificación de construcciones de tierra. La quitosana es un biopolímero compuesto de unidades de 2-amino-2-desoxi-D-glucosa y 2-acetamido-2-desoxi-D-glucosa vinculados a través de enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) y está derivado de la desacetilación alcalina de la quitina, uno de los polisacáridos naturales más abundantes. La estructura química de la quitosana se muestra en la Figura 3.2. Debido a su alto porcentaje de nitrógeno (6.89%), la quitosana es de interés comercial en comparación con la celulosa sintéticamente sustituida (1.25%) (Kumar, 2000). Actualmente, la quitosana se obtiene a partir de células descartadas de cangrejo y camarón procesado de las industrias conserveras, o conchas de crustáceos obtenidos como residuos de la industria alimentaria por formas económicamente viables (Kumar, 2000). La quitosana es atractiva como un potencial aditivo debido a sus propiedades ventajosas probadas tales como la biodegradabilidad, actividad antibacteriana, no toxicidad y de alta densidad de carga (Wollina, et al., 2003). La quitosana ha sido exitosamente aplicada en la modificación de superficies de materiales probando que sus funcionalidades pueden ser transferidas a textiles, láminas y otros (Zemljic, et al., 2009; Enescu, 2008; Periolatto, et al., 2012). Para este trabajo, una solución desarrollada con este polímero se usó como aditivo en el proceso de fabricación de nuevos bloques de tierra. El efecto de esta incorporación fue evaluado en términos del cambio de durabilidad (permeabilidad y capacidad de erosión) y propiedades mecánicas (comportamiento en compresión, tensión y flexión) en especímenes moldeados para este propósito. La solución de quitosana desarrollada también fue evaluada como un agente de recubrimiento para proponer una solución para las construcciones existentes. El efecto de esta adición fue evaluado en términos de la durabilidad (permeabilidad y resistencia a la erosión) cuando se expone al agua.

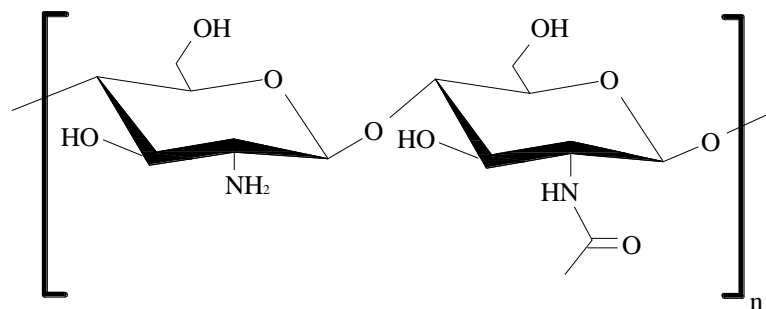


Figura 3.2. Estructura química de la quitosana

## 3.2 Caracterización del Suelo

El suelo usado con fines de construcción tiene alta variabilidad en cuanto a su composición, granulometría, etc. Dado que este material es principalmente usado para la auto-construcción, en la mayor cantidad de casos, se adquiere de los recursos disponibles sin un control de calidad formal. Para el presente estudio, se eligió un suelo típico de la costa peruana usado para construir casas de adobe (un tipo de construcción particular que usa ladrillos de arcilla no cocida y mortero de barro) de un área rural de Lima. Con el propósito de determinar las características mineralógicas y físicas de este suelo, diferentes ensayos de laboratorio fueron realizados. Estos ensayos incluyen fluorescencia de rayos X (XRF), difracción de polvo de rayos X, análisis de granulometría, y la determinación de los límites plásticos.

Primero el suelo se molió con un mortero ágata, peletizado y analizado con un instrumento fluorescente de rayos X portátil (XRF) (Bruker Tracer III-SD), equipado con un tubo de rodio en el modo de vacío a 40 kV y 10,3 mA para delimitar los elementos principales. Como se muestra en la Figura 3.3a, el espectro XRF evidencia la presencia de Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Pb. Los elementos más abundantes son Fe, Ca, Sr, Ti y Si. Ni, Mn, P y Cu que están presentes como trazos, pero no pueden ser cuantificados. Debido a los parámetros de los equipos, los siguientes elementos, típicamente presentes en suelos no pueden ser descartados (elementos ligeros): H, C, N, O, F, Na y Mg.

Los datos de difracción de polvo de rayos X (XRPD) se recogieron en el mismo suelo con un instrumento Bruker D8 en el rango de  $5^\circ < 2\theta < 80^\circ$ , con un paso de  $0.02^\circ$  y un tiempo de integración de 4 s. La identificación de las fases cristalinas se realizó utilizando el software X'Pert High Score 2.0 de Philips Analytical con la base de datos PDF-2. Solo los elementos previamente detectados usando los datos de XRF y los elementos ligeros no detectados por el instrumento (desde H hasta Mg) fueron usados para la identificación. La Figura 3.3b muestra los datos de XRPD junto con la identificación de los picos principales. La cuantificación mineral se realizó con el método Rietveld usando el software GSAS (Larsen & Von Dreele, 1994) y la interface EXPGUI (Toby, 2001). La muestra de suelo parece ser un granitoide en el que las principales fases son de cuarzo, una albita/anortita mezcla (feldespato) y moscovita (mica). Además contiene pequeñas porciones de una anfíbol y minerales cloritos (Clinochloro y vermiculita, un clorito degradado). Fases de menor importancia como calcita y ortoclasa también se identificaron. La Tabla 3.1 resume los principales minerales observados en este ensayo y compara los resultados de otros materiales similares usados para las construcciones de adobe en otras regiones. Debido a la complejidad de la mezcla presentada y las orientaciones preferidas encontradas en algunos minerales, los porcentajes de las masas deben considerarse como aproximados. La moscovita, por ejemplo, podría estar sobreestimada debido a su fuerte (001) orientación preferida.

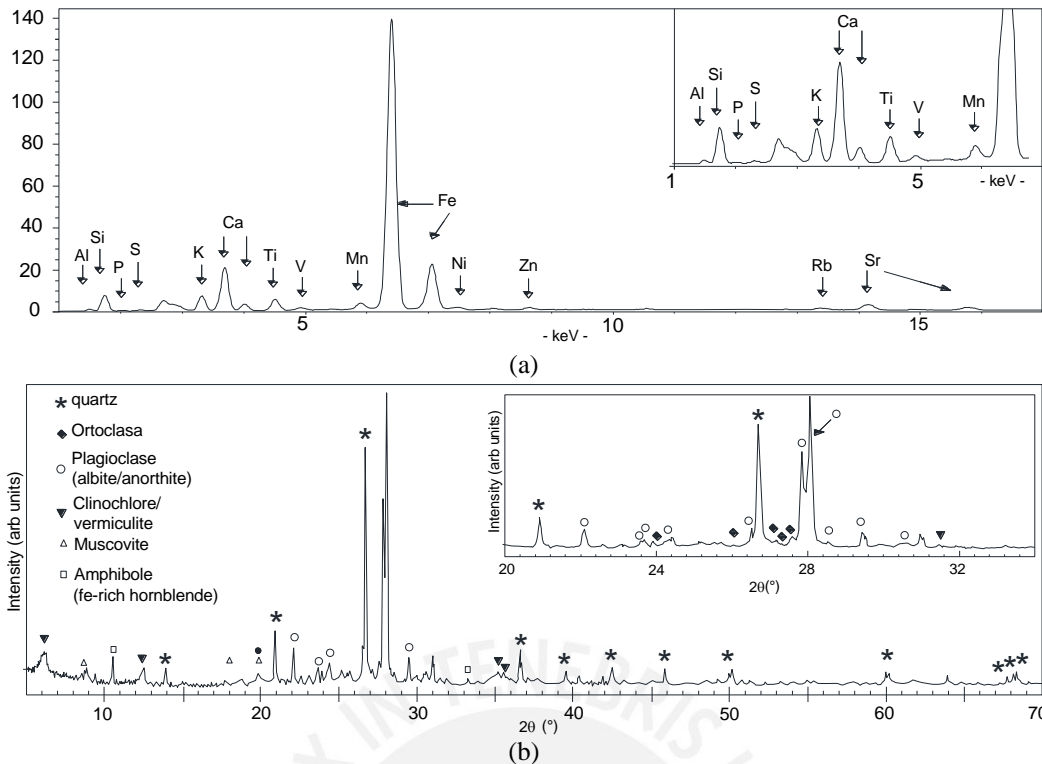


Figura 3.3. Análisis mineralógico de la muestra de suelo: (a) Espectro de fluorescencia de rayos X de la muestra comprimida del suelo; y (b) Patrón de difracción de rayos X de la muestra de suelo

Tabla 3.1. Composición mineral de algunos suelos usados para bloques de adobe comparados con la muestra analizada en el presente trabajo. Nótese que las formulas son aproximadas.

Mineral	Referencia					
	(Adorni, et al., 2013)	(Millo go, et al., 2008)	(Millo go, et al., 2014)	(Calabria, et al., 2009) <sup>(a)</sup>	Este trabajo	
Muscovite-illite ( $K_{1-x}Na_x)(Al_{1-x-y}Mg_xFe_y)_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	15(2)	-	14	-	32(3)	
Kaolinite ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ )	-	30	45	X	-	
Phyllosilicatos Clinocllore/vermiculite ( $(Mg,Fe,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ ) / ( $Mg,Fe^{+2},Fe^{+3}$ ) $_3[(Si,Al)_4O_{10}](OH)_2 \cdot 4H_2O$	-	-	-	-	4(2)/2(1)	
Fe-rich magnesiornblende ( $Ca_2(Mg,Fe^{+2})_4Al(Si_7Al)O_{22}(OH)_2$ )	-	-	-	-	1.0(1)	
Talc ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )	6(1)	-	-	-	-	
Quartz ( $SiO_2$ )	13(3)	65	23	X	32(2)	
Tectosilicatos Feldspars	(Microcline)	6(1)	(2) <sup>(c)</sup>	-	-	
	Potassium (Sanidine)	24(3)	-	-	-	
	(Orthoclase)	-	-	-	-	5(1)
	Plagioclase (Albite)	-	-	-	-	21(4)
Minerales no silicato	Brushite ( $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ )	11(1)	-	-	-	
	Indigirite ( $Mg_2Al_2(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 15H_2O$ )	4(1)	-	-	-	
	Calcite ( $CaCO_3$ )	6,3(6)	-	4	-	3(1)
	Goethite ( $FeO(OH)$ )	-	2	7	X	-
	Gibbsite ( $Al(OH)_3$ )	-	-	-	X	-
Magnetite ( $Fe_3O_4$ )	-	-	-	-	(b)	

<sup>(a)</sup> La cantidad no fue cuantificada en el artículo original.

<sup>(b)</sup> La muestra de suelo es ligeramente magnética por lo que se presume que la magnetita existe pero no fue detectada en los datos de XRPD

<sup>(c)</sup> Los datos están dados como "potasio feldespato", sin especificar el mineral exacto

La distribución de tamaños de granos del suelo se obtuvo por dos métodos: un análisis de granulometría se utilizó para determinar la distribución de los granos más grandes (mayores a la malla N 200) y la distribución de partículas finas se evaluó usando un hidrómetro. La curva granulométrica resultante, presentada en la Figura 3.4, se dividió en dos partes que corresponden a las arenas y partículas finas. Los resultados evidencian que existe alto contenido (80%) de finos (arcillas y limos) y solo un poco de arena (20%). Con motivos de comparación, los límites típicos para la producción de adobe (Jiménez & Cañas, 2007) se presentan en la Figura 3.4. Como describen Houben & Guillaud (1994), estos límites tienen gran variabilidad y encontrarse ligeramente fuera es solo referencial.

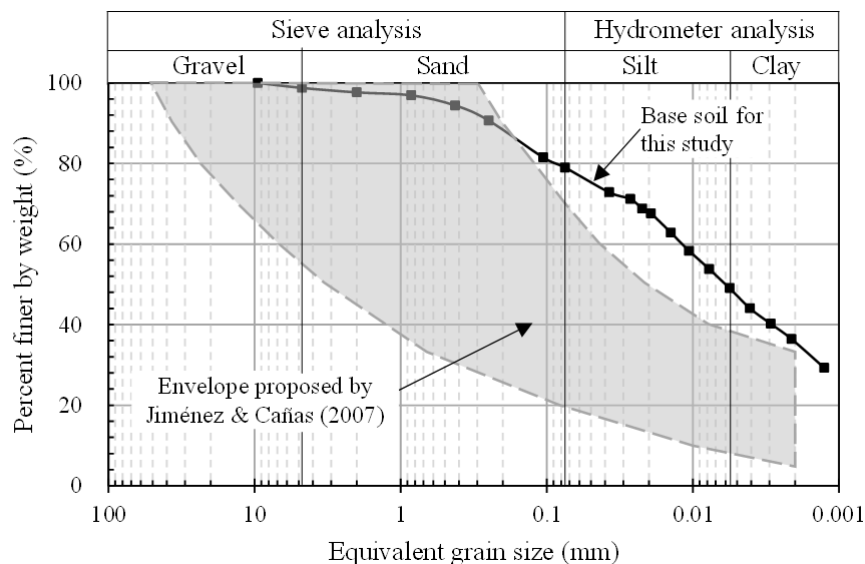


Figura 3.4. Distribución de tamaño de grano de tierra

Finalmente, la plasticidad del suelo se estudió a través de la determinación de los límites de Atterberg, como lo sugiere la ASTM D4318 (ASTM, 2010). Los resultados de este ensayo muestran que los límites líquido y plástico fueron 33% y 17%, respectivamente. Con estos resultados, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM, 2011), el suelo fue clasificado como una arcilla de baja plasticidad (CL).

## 3.3 Evaluación de las Propiedades de Durabilidad

### 3.3.1 Programa Experimental

Las construcciones de tierra presentan poca durabilidad cuando están sujetas a la erosión y penetración del agua. Algunos estudios, como (Minke, 2005), muestran que las precipitaciones pueden causar erosión significativa a la albañilería de tierra. Los problemas de permeabilidad también deben ser abordados porque la penetración del agua y la humedad atrapada pueden afectar negativamente al rendimiento estético, biológico y estructural de los edificios de barro; por ejemplo, eflorcencias, moho y daños por congelación/descongelación (Galitz & Whitlock, 1998).

Los efectos del agua en la durabilidad de los especímenes de tierra se evaluaron en este trabajo a través del ángulo de contacto y la prueba de erosión por goteo como se propone en el estándar Español (AENOR, 2008) y Australiano (Walker, 2002). Con este propósito, especímenes cilíndricos, con tratamiento y sin tratamiento, de 55 mm de diámetro y 7 mm de altura se fabricaron y secaron en condiciones ambientales. El ángulo de contacto se midió de fotografías digitales tomadas con el contraste de luz apropiado

inmediatamente luego de que una gota de 10  $\mu\text{L}$  de agua destilada se depositó en la superficie de tierra usando una micro-jeringa (Figura 3.5a). En el caso de los ensayos de erosión, los especímenes de tierra se colocaron en una superficie inclinada 27°. Encima de la muestra, se colocó un recipiente lleno con agua y esta goteaba con una velocidad constante (Figura 3.5b). En este ensayo, el tiempo de exposición para producir un daño significativo fue la variable medida.

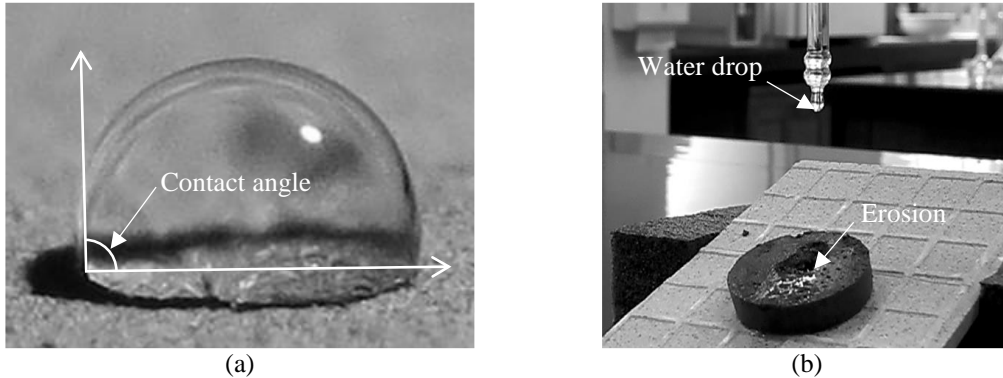


Figura 3.5. Evaluación de las propiedades de durabilidad: (a) ensayo de ángulo de contacto; (b) ensayo de erosión acelerada.

Los aditivos basados en quitosana fueron formulados considerando dos concentraciones: 0.5% (Solución A), y 3% (Solución B) de quitosana disuelta en agua con ácido acético al 1%. La aplicación de estas soluciones en los especímenes de tierra se realizó usando dos técnicas diferentes. La primera consistió en la aplicación del biopolímero en la superficie como un recubrimiento, llevado a cabo por inmersión de las muestras fabricadas en las soluciones. La otra técnica consistió en mezclar el suelo y las soluciones con la finalidad de producir matrices de tierra y biopolímero. En este segundo caso, la proporción de tierra y solución estuvo alrededor de 3:1 que fue escogida por la trabajabilidad de la mixtura resultante. La Tabla 3.2 resume las consideraciones y el número de ensayos realizados. Como se muestra, en ambas pruebas, ángulo de contacto y ensayos de erosión, también se ensayaron muestras sin tratamiento con el propósito de realizar una comparación.



Tabla 3.2. Características de los especímenes preparados para los ensayos de durabilidad.

Ensayo realizado	Tipo de aplicación	Características	N° de especímenes
Ángulo de contacto	Recubrimiento	Concentración de la solución: Solución A	3
	Recubrimiento	Concentración de la solución: Solución B	3
	Matriz (Muestra control)	Proporción de la mezcla 4:1 (tierra/agua)	1
	Matriz	Concentración de la solución: Solución A Proporción de la mezcla 3:1 (tierra/solución)	1
	Matriz	Concentración de la solución: Solución B Proporción de la mezcla 3:1 (tierra/solución)	3
	Matriz	Concentración de la solución: Solución A Proporción de la mezcla 3:1 (tierra/solución)	3
Erosión por goteo	Recubrimiento	Concentración de la solución: Solución A	3
	Recubrimiento	Concentración de la solución: Solución B	3
	Matriz (Muestra control)	Proporción de la mezcla 4:1 (tierra/agua)	1
	Matriz	Concentración de la solución: Solución A Proporción de la mezcla 3:1 (tierra/solución)	3
	Matriz	Concentración de la solución: Solución B Proporción de la mezcla 3:1 (tierra/solución)	3

Proporción de la mezcla por peso

Solución A: quitosana al 0.5% disuelta en ácido acético al 1%

Solución B: quitosana al 3% disuelta en ácido acético al 1%

### 3.3.2 Resultados y Discusión

Como se presenta en la Figura 3.6, las mediciones del ángulo de contacto de los especímenes sin tratar (muestras de control) evidencian un comportamiento altamente hidrofílico pues la gota de agua se absorbe inmediatamente. Esto indica que las muestras de tierra sin tratamiento absorben el agua y el cambio solo se ve reflejado en un incremento en el contenido de agua. En contraste, la aplicación de las soluciones desarrolladas (A y B) como recubrimiento fue muy eficiente para repeler el agua. Los especímenes cubiertos con las soluciones produjeron superficies hidrofóbicas, con ángulos de contacto de  $94^\circ (\pm 9^\circ)$  para la Solución A, y  $85^\circ (\pm 5^\circ)$  para la Solución B. Esto demuestra que, incluso si se usan soluciones de quitosana de baja concentración, los compuestos resultantes tienen una alta hidrofobicidad.

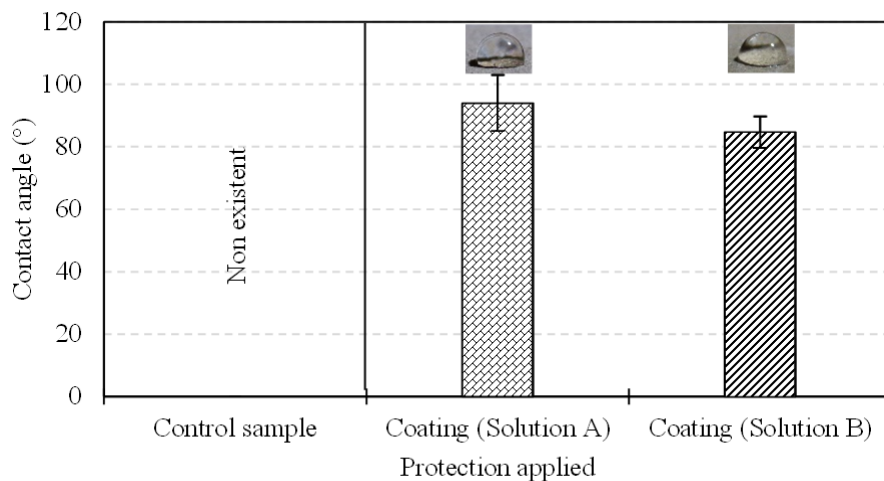


Figura 3.6. Resultados del ángulo de contacto de los especímenes recubiertos

Como se muestra en la Figura 3.7, los resultados de los ensayos en los especímenes tratados preparados mezclando tierra y biopolímeros (matrices) indican que

bajas concentraciones no son suficientes para dar impermeabilidad. En este caso, a una baja concentración del biopolímero (Solución A), la gota de agua fue absorbida rápidamente y no se midió el ángulo de contacto. Por otro lado, para una alta concentración (Solución B), un ángulo de contacto promedio de  $65^\circ (\pm 10^\circ)$  fue registrado. Para confirmar estos resultados, nuevos grupos de soluciones fueron ensayados considerando dos concentraciones adicionales: 1% y 2% (Soluciones C\* y D\*, respectivamente). Los resultados del ángulo de contacto en este caso, volvieron a confirmar lo obtenido previamente, indicando que la influencia hidrofóbica se obtiene solo de soluciones con concentraciones del biopolímero de al menos 3%.

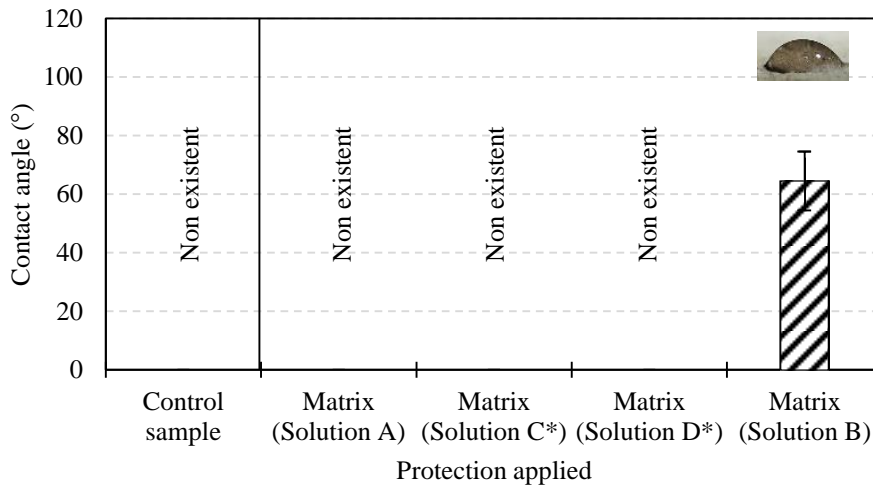


Figura 3.7. Resultados del ángulo de contacto en matrices tratadas y sin tratar.

Los resultados del ensayo erosión evidencian lo que se esperaba para los especímenes sin tratamiento con respecto a su capacidad de resistir la erosión del agua. Como se muestra en la Figura 3.8, el espécimen sin tratamiento fue severamente afectado después de solo un minuto de evaluación. Luego de 5 minutos, el espécimen estaba casi completamente desintegrado.

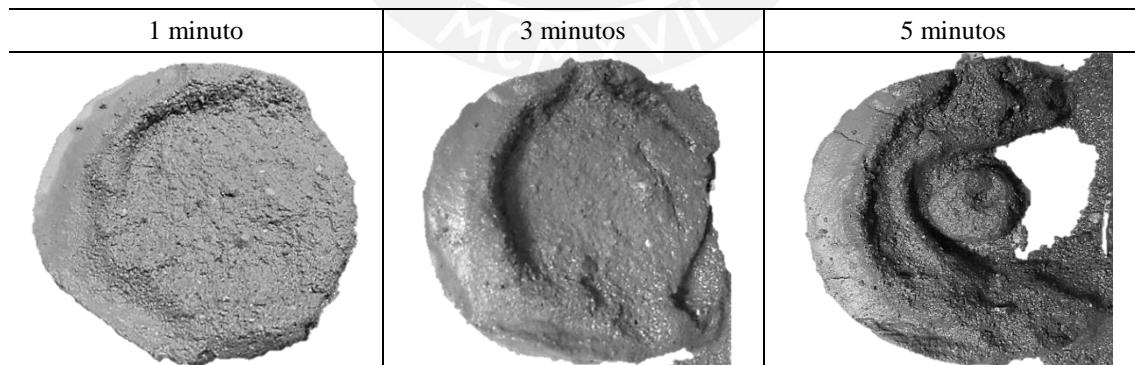


Figura 3.8. Resultados de la pruebas de la erosión por goteo de las muestras no tratadas en diferentes momentos del ensayo

En contraste con esto, como se muestra en la Figura 3.9 los resultados de estos ensayos en los especímenes con recubrimiento presentan una considerable resistencia a la erosión del agua, incluso si solo se usa la solución con 0.5% de concentración. Estos resultados también se confirmaron usando un grupo considerando concentraciones de biopolímero ligeramente más altas (Solución C\* con una concentración de 1%). En el caso de los ensayos en la matriz, los resultados con bajas concentraciones (Solución A) evidencian que a pesar de que la consistencia se mantiene luego de 10 minutos, se puede

apreciar erosión localizada. Nuevamente, los resultados del ensayo de erosión en los especímenes con la solución al 3% (Solución B) demostraron que este valor puede representar el límite para proveer protección completa. Para confirmar esto, concentraciones intermedias de 1% se probaron (Solución C\*) y los resultados probaron que este es el límite para obtener la protección a la erosión. En los ensayos con Soluciones B y C\*, se observó que los especímenes de tierra fueron impermeabilizados debido a la formación de una lámina de polisacárido en la superficie de los especímenes de tierra. Incluso a pesar de que la quitosana es un polímero soluble en agua, forma una barrera hidrofóbica manteniendo las partículas de suelo juntas y evitando que se rompan. Este fenómeno puede ser resultado de los fuertes enlaces de hidrógeno dipolo-dipolo e intra iónicos y las interacciones moleculares entre otras cadenas poliméricas (Aguilar, et al., 2016).

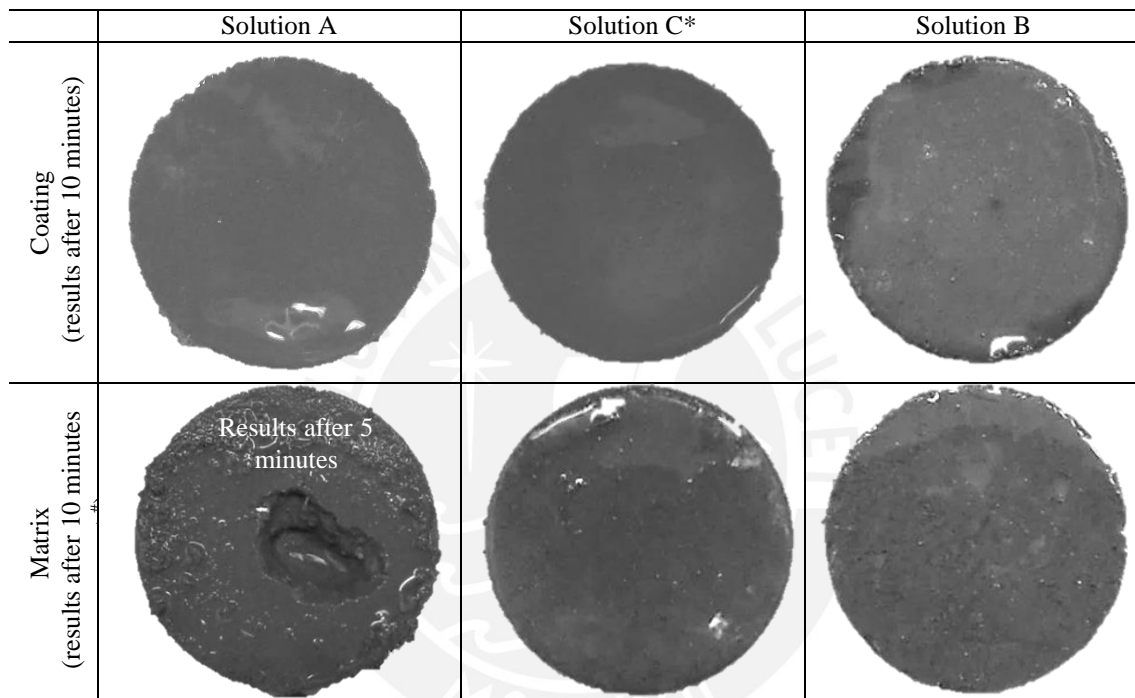


Figura 3.9. Resultados de ensayos de erosión de especímenes tratados

## 3.4 Evaluación de las Propiedades Mecánicas

### 3.4.1 Programa Experimental

La influencia de los aditivos basados en quitosana en las propiedades mecánicas de los especímenes de tierra modificados fue evaluada mediante ensayos de compresión, split, y flexión en tres puntos. Para la evaluación mecánica, solo la Solución B se consideró debido a que en los ensayos previos de ángulo de contacto y erosión, ese probó que esta concentración provee de protección completa contra el agua (hidrofobicidad e impermeabilización).

Para los ensayos mecánicos, las cargas aplicadas fueron controladas por desplazamientos, manteniendo una velocidad constante de 1.27 mm por minuto hasta la falla. Para los ensayos de compresión, una fina capa de arena se colocó en ambos extremos del espécimen para evitar la concentración de esfuerzos y reducir la fricción (Piattoni, et al., 2011). En todos los casos, los desplazamientos de las placas de carga se registraron utilizando un Transformador Diferencial de Variación Lineal (LVDT). Antes de fabricar las muestras, el suelo se tamizó usando la malla número 4 (4.75 mm). Luego,

las muestras se prepararon manualmente; el suelo y agua (o solución) se mezclaron gradualmente empleando una paleta metálica, como se presenta en la Figura 3.10a. El proceso continuó cerca de 5 minutos hasta obtener una matriz homogénea (Figura 3.10b). Las proporciones de tierra y agua (o solución) se mantuvieron constantes como en los ensayos de durabilidad. Para la compresión y split, se fabricaron especímenes cilíndricos de 34 mm de diámetro y 71 mm de altura (Figura 3.10c). Vigas prismáticas de 42x44x125 mm<sup>3</sup> se fabricaron para los ensayos de flexión en tres puntos (Figura 3.10d). Antes de los ensayos, los especímenes se dejaron secar naturalmente bajo condiciones ambientales hasta obtener un contenido de humedad de aproximadamente 4% para reducir la influencia de esta variable (Bui, et al., 2014). El contenido de humedad se confirmó después secando las muestras ensayadas en un horno por 24 horas a 110°C. Adicionalmente, antes del ensayo, se determinó la densidad pesando y midiendo las dimensiones de los especímenes. En la Tabla 3.3 se resumen las consideraciones tomadas para la fabricación de los especímenes así como el número de ensayos realizados.

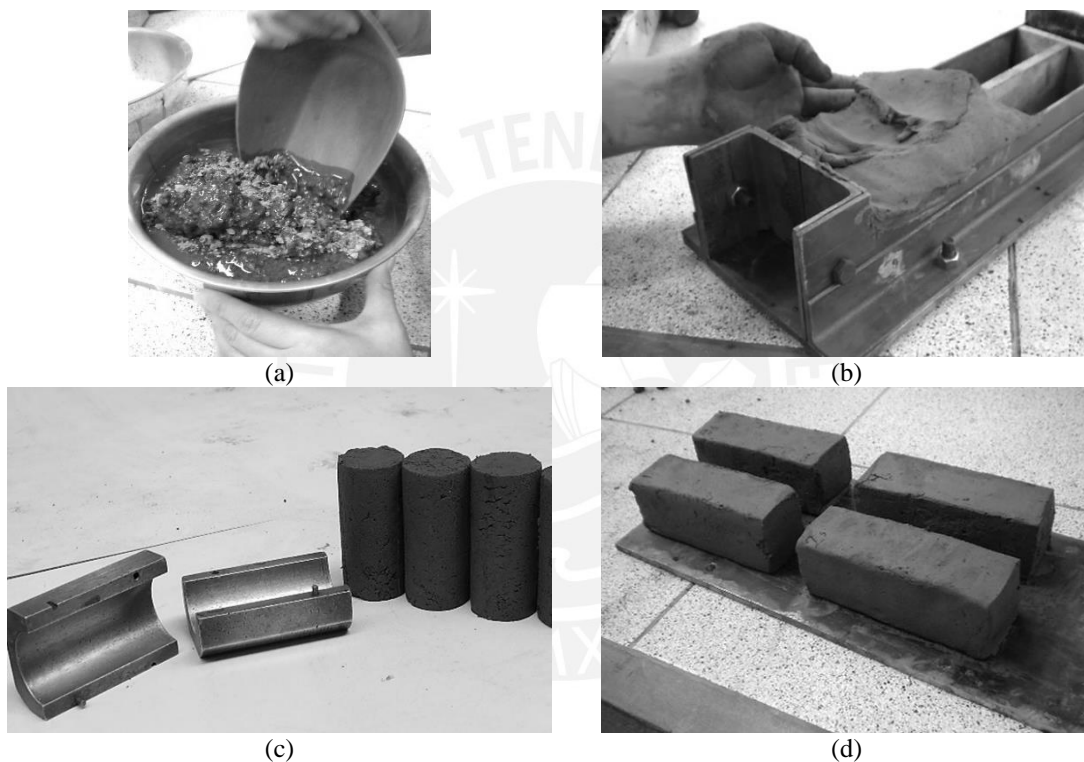


Figura 3.10. Preparación de los especímenes: (a) mezcla del polímero y la tierra; (b) colocación de la mezcla en el encofrado; (c) especímenes cilíndricos y su encofrado; y (d) especímenes prismáticos

Tabla 3.3. Especímenes preparados para los ensayos mecánicos

Tipo de espécimen	Características	Ensayos realizado	N° de especímenes
Matriz (Muestra de control)	Proporción de la mezcla 4:1 (tierra/agua)	Compresión	8
		Split	6
		Flexión	8
Matriz	Concentración de la solución: Solución B Proporción de la mezcla 3:1 (tierra/solución)	Compresión	10
		Split	6
		Flexión	4

Proporción de la mezcla por peso

Solución B: quitosana al 3% disuelta en ácido acético al 1%

### 3.4.2 Resultados y Discusión

Los resultados de los ensayos mecánicos en los especímenes con y sin tratamiento se presentan en la Figura 3.11, incluyendo los modos de falla típicos. Como se muestra, la adición de la Solución B contribuye favorablemente la resistencia de la matriz. Los resultados de compresión evidencian un incremento de hasta 170% de resistencia. En los ensayos de split y flexión en tres puntos, el incremento es hasta 250% y 175%, respectivamente. En promedio, el incremento en estos ensayos fue de 85%, 65% y 80%. Posiblemente el incremento de la resistencia se deba a la modificación del proceso de secado ocasionado por el incremento del biopolímero. Esto se puede apreciar cuando se analiza la retracción de los especímenes en el proceso de curado que fue medido observando la variación de su volumen. Los resultados de este análisis muestra que los especímenes sin tratamiento presenta en promedio una reducción del 10.5% de su volumen, mientras que los especímenes tratados solo reducen su volumen un 8.7%. La disminución de esta variación puede resultar en una reducción del micro-agrietamiento como se reporta en (Quagliarini & Lenci, 2010) y por lo tanto se pueden obtener valores más altos de la resistencia. Esta hipótesis se debe corroborar con mayores estudios.

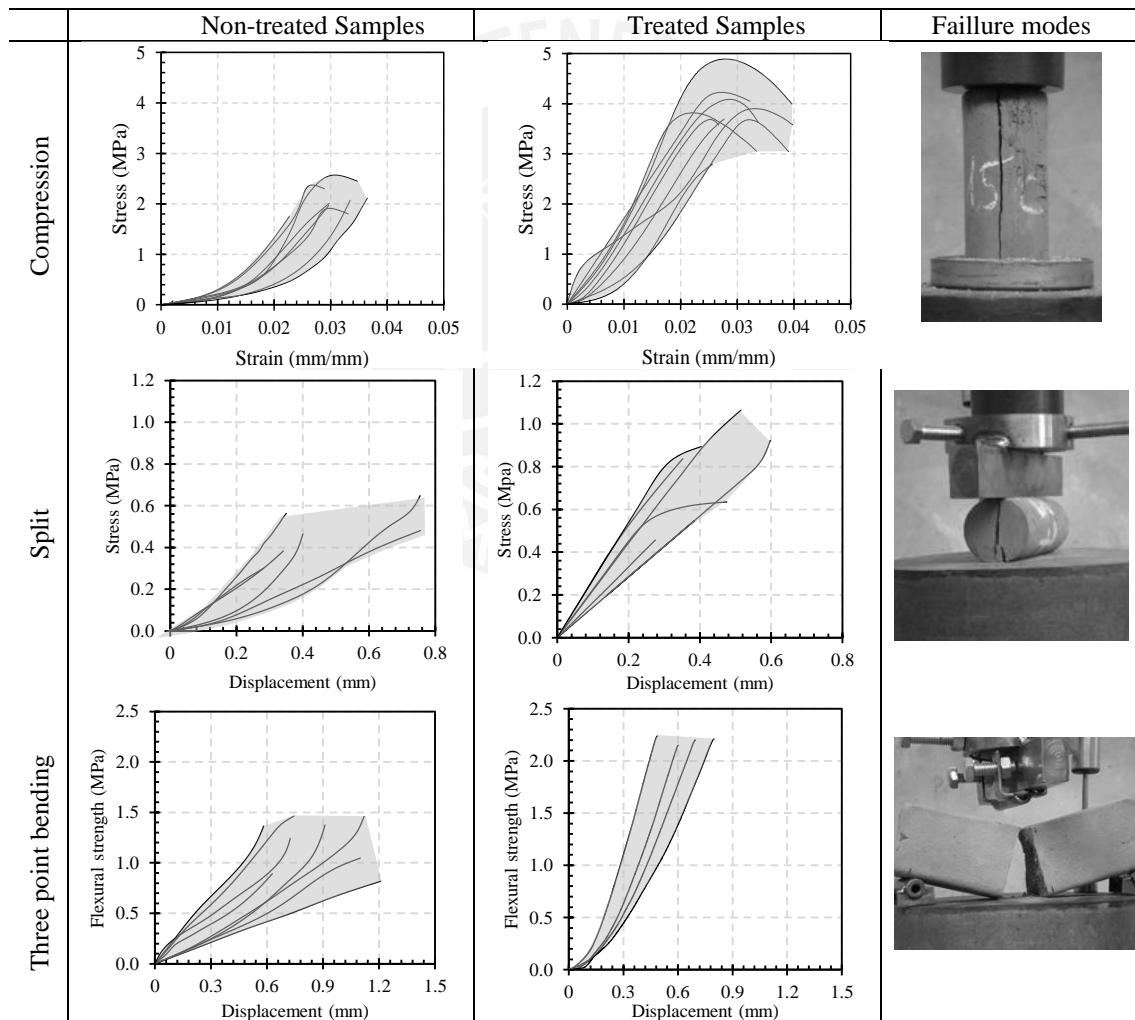


Figura 3.11. Resumen de los resultados de los ensayos mecánicos en especímenes con y sin tratamiento

La Figura 3.12 presenta la comparación estadística de los resultados de los ensayos mecánicos. Como se muestra, los resultados de los ensayos de compresión tienen coeficientes de variación bajos para la resistencia (12% y 16% para los especímenes sin y con tratamiento la matriz, respectivamente). Otros estudios sobre el comportamiento a

compresión del adobe como (Silveira, et al., 2013) y (Illampas, et al., 2014) reportan coeficientes de variación de hasta 47%. Estos estudios confirman que los resultados obtenidos se encuentran dentro de un rango aceptable y que cuando se trabaja con este material se espera alta variabilidad y dispersión. Los resultados del ensayo de split y flexión en tres puntos presentan valores similares de coeficiente de variación de sus resistencias promedio (desde 2% hasta 24%). A pesar de que ambos ensayos miden de forma indirecta el comportamiento a tensión, los resultados del ensayo de flexión son mayores lo que es consistente con lo reportado por otros autores como (Miccoli, et al., 2014; Sherin, 2014). El ratio promedio entre la resistencia de estos dos parámetros (split/flexión) varía entre 0.36 y 0.39. De acuerdo con los resultados de otras investigaciones en adobe, es común encontrar valores que varíen entre 0.25 (Silveira, et al., 2013) y 0.70 (Adorni, et al., 2013).

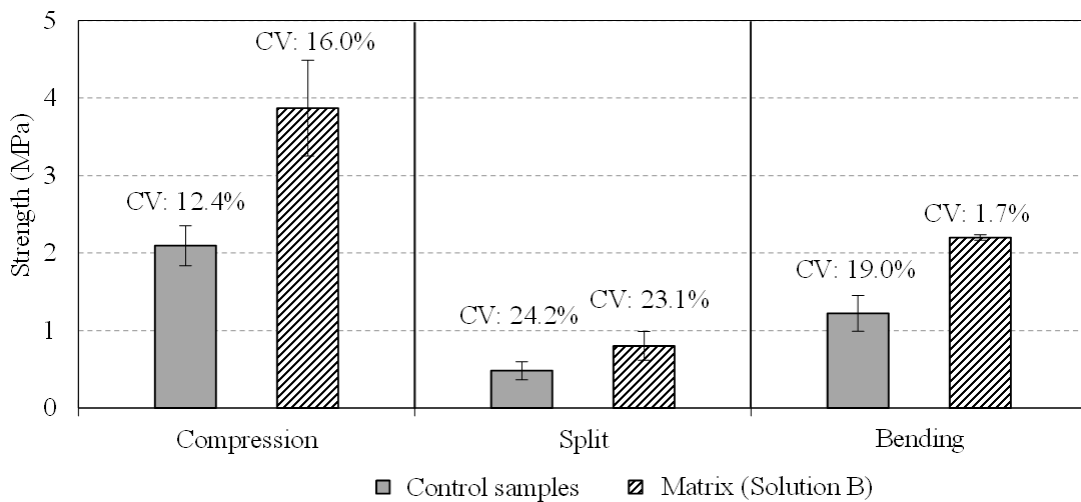


Figura 3.12. Resultados de los ensayos mecánicos

Una verificación adicional se realizó para evaluar la influencia del contenido de agua en la resistencia final de los especímenes evaluados. Como se sabe, el contenido de agua puede tener una influencia importante en las propiedades mecánicas de este material. Por ejemplo, (Bui, et al., 2014) reporta que un pequeño incremento de 2% en el contenido de humedad puede provocar un decremento de la resistencia a compresión en un rango de 5% a 20%. No se encontraron referencias en la literatura que indiquen esta influencia en los resultados de split y flexión en tres puntos. Los resultados del contenido de agua para todos los especímenes se presentan en la Figura 3.13a. Como se muestra, los valores registrados del contenido de humedad varían entre 4% y 6% y la diferencia en los ensayos correspondientes es pequeña (+1% en compresión, +1.5% para split y -1.3% para la flexión en tres puntos en especímenes tratados). Esta es una clara muestra de la influencia positiva de la solución desarrollada (Solución B) para mejorar las propiedades mecánicas independientemente del contenido de humedad.

Finalmente, la homogeneidad de la mezcla antes de realizar los ensayos también fue estudiada para descartar la influencia en los resultados de los ensayos mecánicos. Esta variable fue estudiada siguiendo las recomendaciones de (Adorni, et al., 2013) midiendo la densidad seca de los especímenes fabricados antes del ensayo. Los resultados de la densidad seca presentados en la Figura 3.13b evidencian que las mezclas preparadas tienen alta homogeneidad en todos los ensayos. Como se observa, pequeñas diferencias en los correspondientes ensayos fueron registradas (10% para compresión, 5% para split y 15% para la flexión en tres puntos). Esto confirma que la solución desarrollada

(Solución B) tiene un efecto positivo para incrementar las propiedades mecánicas en las mezclas de tierra.

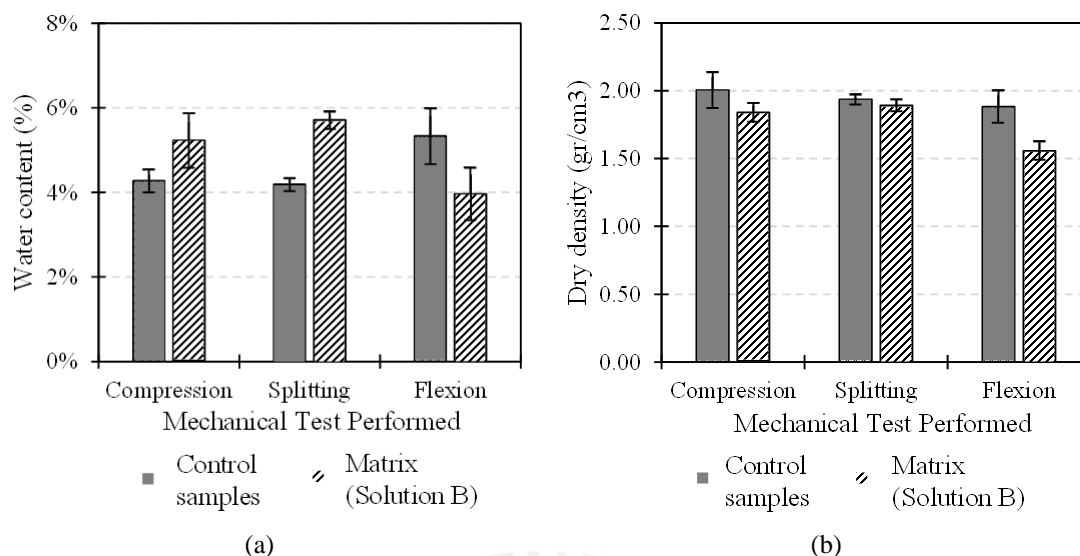


Figura 3.13. Las condiciones físicas de las muestras después de la prueba: (a) el contenido de humedad; y (b) la densidad seca

### 3.5 Conclusiones

En este capítulo se describe la investigación realizada para modificar las propiedades físicas y mecánicas de la tierra como material de construcción usando biopolímeros naturales. Se usó quitosana comercial para la formulación de las soluciones que fueron probadas en términos de proveer resistencia al agua y mecánica en las muestras de suelo. La posibilidad de usar las soluciones desarrolladas como recubrimiento y aditivos en la mezcla fue evaluada y se obtuvieron resultados favorables.

La evaluación física consistió en el estudio de la mejorar de la durabilidad, en particular la resistencia a la penetración del agua y erosión en muestras tratadas y sin tratar. Los resultados de los ensayos realizados con respecto a la penetrabilidad del agua evidencian una influencia positiva en las adiciones elaboradas. Cuando las soluciones fueron usadas como recubrimiento, los resultados indicaron que una baja concentración (0.5%) de quitosana es suficiente para proveer hidrofobicidad. En el caso de la solución incorporada como aditivo en la matriz, los resultados indican que concentraciones más altas (3%) de quitosana se requieren para proveer una protección similar. En lo que respecta a la resistencia a la erosión del agua, los resultados en los especímenes con recubrimiento muestran nuevamente que con bajas concentraciones del polímero natural (0.5%) se puede proveer de resistencia a la penetración del agua. Los resultados de ensayos en las muestras con aditivos incorporados en la matriz muestran que se requiere una concentración ligeramente mayor (1%) para proveer de protección adecuada.

La evaluación mecánica probó que existe una influencia positiva del aditivo con una concentración del 3% de la solución cuando se incorpora a la matriz. Los resultados de la compresión muestran que la resistencia tiene un incremento promedio de 85% cuando se emplea la solución desarrollada. En el caso de los resultados de tensión en los ensayos de split, estos muestran un incremento promedio de 65%. En lo que respecta a los ensayos de flexión, los resultados presentan un incremento de 80% cuando se aplica la solución. La comparación de los especímenes con y sin tratamiento demostró también

ser coherente puesto que muestras con similar homogeneidad y contenido de humedad fueron probadas en todos los casos.

Estudios posteriores con respecto a la durabilidad y estabilidad de las soluciones desarrolladas deben ser desarrollados. El trabajo futuro debe considerar también la influencia de su introducción en el sistema de albañilería de tierra. Adicionalmente, dadas las propiedades biológicas de la quitosana, su influencia en la actividad antimicrobiana en las construcciones de tierra también debe ser evaluada.





# Capítulo 4

## Conclusiones y Trabajos Futuros



## 4.1 Conclusiones

La presente tesis describe la investigación realizada para la modificación de la resistencia de la tierra como material de construcción a los efectos del agua y de sus propiedades mecánicas mediante el uso de biopolímeros naturales. El trabajo consistió en la ejecución de ensayos de laboratorio que permitieran evaluar los efectos de los biopolímeros en las características mencionadas. Se presentan las conclusiones más importantes en base a los resultados encontrados.

### 4.1.1 Evaluación de la Resistencia al Agua

Las soluciones con biopolímeros (quitosana y carragenina) desarrolladas fueron aplicadas en los especímenes de tierra y se tuvieron resultados favorables. Se observó que ambos polímeros generan un efecto impermeabilizante en las muestras evitando que se produzca daño por los efectos del agua. Particularmente, la aplicación de los biopolímeros en forma de lámina sobre la superficie de tierra resultó ser más eficiente para la impermeabilización, incluso con soluciones de baja concentración. Cuando se adicionó el biopolímero (quitosana) en la mezcla, fue necesaria una solución polimérica de mayor concentración para conseguir una protección efectiva.

Por otro lado, en cuanto a la resistencia a la erosión, se observó que la aplicación de los biopolímeros genera un efecto positivo para mantener las partículas de suelo juntas y evitar que los especímenes pierdan su consistencia. En este caso la aplicación de los biopolímeros como recubrimiento fue completamente efectiva para proteger las muestras ya que no se apreció ningún indicio de erosión. La adición de los biopolímeros en la mezcla (quitosana) también evitó que los especímenes se degraden debido al efecto del agua. Sin embargo, las concentraciones más bajas no protegieron completamente la muestra, en las que se observó erosión.

### 4.1.2 Comportamiento Mecánico

El comportamiento mecánico de las probetas modificadas con los biopolímeros presentó una mejora en sus características mecánicas. Mediante los ensayos de caracterización mecánica se probó que los biopolímeros generan un incremento de las propiedades de compresión y tensión de la mezcla de tierra. Ambos polímeros incrementaron la resistencia a compresión del suelo en porcentajes similares. Por otra parte, la quitosana generó un aumento ligeramente superior en la resistencia a tensión y flexión de los especímenes de suelo ensayados.

## 4.2 Trabajos Futuros

A partir de los hallazgos del trabajo realizado, se recomienda seguir las siguientes líneas de investigación.

- Factibilidad del uso de los biopolímeros en la protección de construcciones modernas y de estructuras de tierra históricas y arqueológicas en forma de recubrimiento para la protección contra la erosión.
- Análisis de la durabilidad de la lámina de protección ante condiciones medio ambientales (exposición a la radiación solar, lluvia ácida, etc).
- Estudio de la efectividad de las láminas de protección debe ser estudiada con mayor profundidad para optimizar la cantidad de biopolímero usado. Estos

trabajos además deben considerar el uso diferentes concentraciones de las soluciones poliméricas.

- Con respecto a la modificación del comportamiento mecánico, se debe considerar realizar un estudio más amplio que considere el estudio de la influencia de los biopolímeros en el sistema de albañilería. En particular se debe enfatizar el estudio de la interface entre las unidades de albañilería y mortero con biopolímero
- Estudio de la factibilidad del uso de los biopolímeros para ser aplicados como adición en el mortero de refuerzo en la reparación de construcciones de albañilería de tierra (ej. Mampostería de adobe) o con mortero de barro (ej. Mampostería de piedra con mortero de barro).
- Evaluación de la influencia de los biopolímeros en la reducción de la actividad antimicrobiana en las viviendas de tierra.



# Referencias

## A

Adorni, E., Coisson, E. & Ferretti, D., 2013. In situ characterization of archaeological adobe bricks. *Construction and Building Materials*, Volume 40, pp. 1-9.

AENOR, 2008. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques: Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Madrid, España: s.n.

Aguilar, R. et al., 2016. *Preliminary assessment of the influence of biopolymers for the modification of earthen constructions materials*. Seoul, South Korea, s.n.

ASTM, 2010. ASTM D 4318, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. En: *Annual Book of ASTM standards*. West Conshohocken, PA: s.n.

ASTM, 2011. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken: s.n.

Aymerich, F., Fenu, L. & Meloni, P., 2012. Effect of reinforcing wool fibers on fracture and energy absorption properties of an earthen material. *Construction and Building Materials* 27, pp. 66 - 72.

## B

Blondet, M., Villa, G. & Brzev, S., 2003. Construcciones de adobe resistentes a terremotos: Tutor. *Earthquake Engineering Research Institute, Tech. Rep*, p. 208.

Bui, Q., Morel, J., Hans, S. & Walker, P., 2014. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials* 54, pp. 163 - 169.

## C

Calabria, J. A., Vasconcelos, W. L. & Boccaccini, A. R., 2009. Microstructure and chemical degradation of adobe and clay bricks. *Ceramics International*, 35(2), pp. 665-671.

Calkins, M., 2008. *Materials for sustainable sites: a complete guide to the evaluation, selection, and use of sustainable construction materials*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Campo, V. L., Kawano, D. F., Dílson Braz da Silva Jr., D. B. & Carvalho, I., 2009. Carrageenans: Biological properties, chemical modifications and structural analysis - A review. *Carbohydrate Polymers*, 77(2), pp. 167-180.

Cofirman, R., Agnew, N., Auiston, G. & Doehne, E., 1990. *Adobe mineralogy: characterization of adobes from around the world*. Las Cruces, s.n.

## E

Enescu, D., 2008. Use of chitosan in surface modification of textile materials: mini review. *Roumanian Biotechnological Letters*, 13(6), pp. 4037-4048.

## G

Galan Marin, C. & Petric, J., 2007. Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials* 21, pp. 303 - 309.

Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C. & Bradley, F., 2013. Ultrasonic, Molecular and Mechanical Testing Diagnostics in Natural Fibre Reinforced, Polymer-Stabilized Earth Blocks. *International Journal of Polymer Science*.

Galitz, C. L. & Whitlock, A. R., 1998. The Application of Local Weather Data to the Simulation of Wind-Driven Rain. *ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION*, Volume 1314, pp. 17-32.

## H

Houben, H. & Guillaud, H., 1994. *Earth construction: A comprehensive guide..* s.l.:ITDG Publishing.

## I

Illampas, R., Ioannou, I. & Charmpis, D. C., 2014. Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation. *Construction and Building Materials*, Issue 53, pp. 83-90.

INEI, 2008. *"Perfil Sociodemográfico del Perú"; Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda*, s.l.: Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú, 2da edición, Agosto.

INEI, 2015. *Instituto Nacional de Estadística e Informática*. [Online] Available at: [www.inei.gob.pe](http://www.inei.gob.pe)

## J

Jiménez, M. C. & Cañas, I., 2007. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review, *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 237-251.

## K

Kumar, M. R., 2000. A review of chitin and chitosan applications. *Reactive & Functional Polymers* 46, pp. 1-27.

## L

Langenbach, R., 2005. *Collapse from the inside-out. The impact of the 2003 Bam, Iran earthquake on the earthen architecture of the Arg-e Bam*. s.l., s.n.

Larsen, A. C. & Von Dreele, R. B., 1994. *GSAS, General Structure Analysis System*. s.l.:LANSCHE, MS-H805, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.

Levy, M. et al., 2006. Periurban Trypanosoma cruzi-infected Triatoma infestans, Arequipa, Peru. *Emerging infectious diseases*, 12(9), p. 1345.

Little, B. & Morton, T., 2001. *Building with earth in Scotland: Innovative design and sustainability*, Edinburgh, UK: Scottish Executive Central Research Unit.

Lourenço, P., 2002. *Earth constructions. Master thesis, UTL-IST*, Lisbon, Portugal: s.n.

## M

Miccoli, L., Müller, U. & Fontana, P., 2014. Mechanical behavior of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials* 61, pp. 327 - 339.

Millogo, Y., Hajjaji, M. & Quedraogo, R., 2008. Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. *Construction and Building Materials*, 22(12), pp. 2386-2392.

Millogo, Y., Morel, J. E. & Ghavami, K., 2014. Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 52, pp. 71-78.

Minke, G., 2005. *Manual de construcción en tierra*. Uruguay: Editorial fin de siglo.

Morton, T., Stevenson, F., Taylor, B. & Smith, C., 2005. *Low Cost Earth Brick Construction: Monitoring and Evaluation*. Arc. Architects, s.l.: s.n.

## P

Pacheco, F. & Jalali, S., 2012. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials* 29, pp. 512-519.

Periolatto, M., Ferrero, F. & Vineis, C., 2012. Antimicrobial chitosan finish of cotton and silk fabrics by UV curing with 2-hydroxy-2-methylphenylpropane-1-one. *Carbohydrate Polymers*, 88(1), pp. 201-205.

Piattoni, Q., Quagliarini, E. & Lenci, S., 2011. Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. *Construction and Building Materials*, Issue 25, pp. 2067-2075.

Pineda, J. et al., 2007. Enhancement of mechanical and hydrophobic properties of adobes for building industry by the addition of polymeric agents. *Building and Environment* 42, pp. 877 - 883.

## Q

Quagliarini, E. & Lenci, S., 2010. The influence of natural stabilizers and natural fibers on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage* 11, pp. 309 - 314.

## S

Sayin, E., Yön, B., Calayir, Y. & Karaton, M., 2013. Failures of masonry and adobe buildings during the June 23, 2011 Maden earthquake in Turkey. *Engineering Failure Analysis* 34, pp. 779 - 791.

Sherin, H., 2014. Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt. *Journal of Cleaner Production* 65, pp. 362-373.

Silva, T. y otros, 2012. Marine algae sulfated polysaccharides for tissue engineering and drug delivery approaches. *Biomatter*, 2(4), pp. 278-289.

Silveira, D., Varum, H. & Costa, A., 2013. Influence of the testing procedures in the mechanical characterization. *Construction and Building Materials*, Volume 40, pp. 719-728.

## T

Toby, B., 2001. EXPGUI, a graphical user interface for GSAS. *Journal of applied crystallography*, 34(2), pp. 210-213.

## W

Walker, P., 2002. *Australian earth building handbook*. Australia, Sydney.: s.n.

Wollina, U. et al., 2003. Functional textiles in prevention of chronic wounds, wound healing and tissue engineering. *Journal of current problems of dermatology* 31, pp. 82-97.

## Z

Zemljic, L. F., Strnad, S., Sauperl, O. & Stana-Kleinschek, K., 2009. Characterization of amino groups for cotton fibers coated with chitosan. *Textile Research Journal*, pp. 219-226.