

# **CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS UNIDADES DE ADOBE DEL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO HUACA DE LA LUNA MEDIANTE ENSAYOS DE ULTRASONIDO**

**Rafael Aguilar<sup>1</sup>; Cristhian Saucedo<sup>2</sup>; Mijail Montesinos<sup>3</sup>; Eduardo Ramírez<sup>4</sup>; Ricardo Morales<sup>5</sup>; Santiago Uceda<sup>6</sup>**

Departamento de Ingeniería, Sección Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP  
<sup>1</sup>raguilar@pucp.pe; <sup>2</sup>cgsaucedo@pucp.pe; <sup>3</sup>mijail.montesinos@pucp.pe; <sup>4</sup>jeramirez@pucp.pe

Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú  
<sup>5</sup>rimoga07@yahoo.es; <sup>6</sup>santiago\_ucedahotmail.com

**Palabras clave:** Adobe, ultrasonido, ensayos no destructivos, tomografía, propiedades mecánicas.

## **Resumen**

El complejo arqueológico Huaca de la Luna es una construcción masiva de adobe construida entre los años 100 y 650 D.C. por la civilización Moche y actualmente es considerado como uno de los sitios arqueológicos más importantes del Perú. Dada su ubicación en la costa peruana, este complejo es vulnerable a los efectos de los sismos que se producen constantemente por la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana. Debido a los peligros a los que se encuentra expuesto, la conservación y protección de este monumento requiere un diagnóstico estructural exhaustivo. Esto implica una apropiada identificación de su condición actual, materiales y sistema estructural. El artículo presenta una metodología innovadora para determinar las características mecánicas del adobe mediante la aplicación de ensayos de ultrasonido complementados con ensayos de compresión simple. Mediante esta metodología se logró obtener satisfactoriamente el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de unidades representativas del adobe de Huaca de la Luna. Se realizaron también ensayos de tomografía ultrasónica para evaluar cualitativamente la variabilidad de cada una de las unidades estudiadas. Los resultados de este estudio se usarán para posteriores análisis integrales de la seguridad sísmica del complejo y como una línea base para procesos posteriores de determinación in-situ del estado de daño del sistema de albañilería.

## **INTRODUCCIÓN**

La evaluación estructural de construcciones patrimoniales requiere de un estudio detallado de las propiedades mecánicas de los materiales que componen el sistema estructural. Caracterizar apropiadamente los materiales permite elaborar modelos numéricos representativos, realizar un diagnóstico apropiado y posteriormente plantear medidas de intervención para garantizar la integridad del patrimonio.

Una de las principales dificultades durante la etapa de estudio de construcciones patrimoniales es la obtención de muestras del material que las constituyen. Los principios establecidos en la carta de ICOMOS/ISCARSAH (2005) indican que debe evitarse la alteración de la edificación por lo que la aplicación de técnicas no-destructivas resulta de gran interés.

La presente investigación está centrada en Huaca de la Luna, el cual es un complejo arqueológico que se encuentra ubicado en la costa norte del Perú, a ocho kilómetros de la ciudad de Trujillo, y que fue construido entre los años 100 y 650 D.C. Este monumento fue uno de los templos más importantes de la cultura Moche y destaca por la técnica constructiva de superposición de templos en diferentes periodos (al menos cinco sucesivas etapas se encontraron durante el proceso de excavación). La Huaca tiene una base cuadrada de 87 metros de lado y una altura de 21 metros. En la Figura 1a se muestra la reconstrucción 3D hipotética de la Huaca en su etapa final y además se indican los sectores estudiados en esta investigación. Como se aprecia en la Figura 1b, los relieves en sus pinturas murales de cinco colores son los componentes artísticos más destacados (Uceda; Paredes, 1994).

El presente estudio tiene como objetivo determinar las propiedades mecánicas (resistencia y módulo de elasticidad) de las unidades de adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna. Este trabajo se integró con la campaña de excavación arqueológica que se viene realizando desde inicios de la década de los 90<sub>s</sub> y para esto se extrajo en 2014 un grupo de 80 adobes de la zona denominada como Templo Nuevo. Los adobes fueron recolectados de la parte media de esta construcción y después fueron trasladados cuidadosamente al laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Las Figura 2a y Figura 2b muestran el proceso de extracción y embalaje/transporte de los adobes. Cuatro unidades de este grupo fueron escogidas como representativas para determinar su densidad, contenido de humedad, resistencia a compresión y módulo de elasticidad. Adicionalmente se realizaron medidas de variabilidad dimensional y tomografías ultrasónicas para determinar la homogeneidad de todo el grupo de adobes.



Figura 1. Complejo arqueológico Huaca de la Luna: (a) esquema 3D; y (b) mural característico

## CARACTERIZACIÓN FÍSICA

### Ensayos realizados y material utilizado

El tipo de material predominante que conforma los adobes de Huaca corresponde a un suelo areno arcilloso que tiene 85% de arena y un 15% de finos (PHLL, 2008). Para complementar la caracterización física de los adobes de este complejo arqueológico se realizó un estudio de variabilidad dimensional, densidad y contenido de humedad.

Tal y como muestra la Figura 2c, los adobes de Huaca de la Luna presentan un geometría irregular. Para estudiar la variabilidad dimensional se realizó un proceso continuo de medida con cinta métrica en las 80 unidades de adobe. La medición se llevó a cabo por dos meses en laboratorio siendo las temperaturas máxima y mínima registradas de 28,3°C y 22,5°C, respectivamente. Por otro lado, para la determinación de la densidad y del contenido de humedad se seleccionaron cuatro adobes de donde se extrajeron 14 prismas regulares de aproximadamente 110 mm x 51 mm x 45 mm (ya previendo los ensayos posteriores de caracterización mecánica) con un proceso de corte manual, tal y como se muestra en la Figura 2d. La densidad de estos prismas se determinó siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D7263 (2009), mientras que el contenido de humedad se realizó tomando en consideración la norma ASTM D4643 (2008).



Figura 2. Especímenes de adobe de la Huaca de la Luna (a) proceso de obtención (b) protección para el traslado (c) adobe típico; y (d) preparación de especímenes para los ensayos de caracterización

## Resultados y discusión

De la medición del tamaño del grupo total de 80 adobes se obtuvo que en promedio estos tienen un largo de 320 mm con un coeficiente de variación (CV) del 5,2% con un máximo y mínimo de 360 mm y 280 mm respectivamente, un ancho de 220 mm con un CV del 7,4% con un máximo y mínimo de 270 mm y 180 mm respectivamente y una altura de 120 mm con un CV del 11,9% con un máximo y mínimo de 150 mm y 75 mm respectivamente.

La densidad promedio encontrada fue de  $1750 \text{ kg/m}^3$  con un CV del 4% con un máximo y mínimo de  $1941 \text{ kg/m}^3$  y  $1664 \text{ kg/m}^3$  respectivamente. Estos valores son similares a los reportados en informes previos en los cuales se estudia la densidad de los adobes de los sectores conocidos como Frontis Norte, Plaza 2A, Plataforma III y Salas Hipóstilas, encontrándose valores de 1800, 1880, 1830 y  $1970 \text{ kg/m}^3$  respectivamente (PHLL, 2008).

Los valores calculados para el contenido de humedad están en el rango de 1,7% a 2,1% con un promedio de 1,9% y presentan un CV del 14%. Valores similares fueron reportados para los sectores Frontis Norte, Plaza 2A, Plataforma III y Salas Hipóstilas que muestran valores del contenido de humedad de 1,69%, 2,38%, 1,78% y 2,62%, respectivamente (PHLL, 2008).

## CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

### Ensayo de compresión uniaxial

Los ensayos de compresión permiten obtener curvas esfuerzo-deformación del material a partir de las cuales se calculan los parámetros mecánicos de resistencia y módulo de elasticidad. Los datos obtenidos son parte fundamental del diagnóstico de la estructura y

servirán como datos de entrada para la generación de modelos numéricos que ya se vienen implementando con el objetivo de predecir el comportamiento sísmico de la Huaca.

En la configuración de los ensayos de compresión se utilizaron las recomendaciones de la norma ASTM C469/C469M, (2014) y referencias a artículos científicos donde estudian materiales similares (Illampas; Charmpis; Ioannou, 2014; Piattoni; Quagliarini; Lenci, 2011; Adorni; Coisson; Ferretti, 2012; Silveira; Varum; Costa, 2012). Con esta base, se decidió cortar las unidades para obtener especímenes prismáticos regulares con dimensiones promedio de 110 mm x 51 mm x 45 mm. Para corregir imperfecciones en los prismas resultantes, se lijó las superficies para uniformizar y dar paralelismo a las caras que entrarían en contacto con el equipo de ensayo.

Para el ensayo, se utilizó un procedimiento de control de desplazamientos con la finalidad de registrar el comportamiento post pico del material (Vasconcelos, 2005). En la revisión de la literatura se encontraron diferentes criterios para definir la velocidad de aplicación de la carga. Por ejemplo, Silveira, Varum y Costa (2012) utilizan una tasa de deformación de 1,5 mm/min, mientras que Illampas, Charmpis y Ioannou (2014) realizan ensayos de compresión a una tasa de 4,5 mm/min. Por otro lado, Parisi et al (2015) utiliza una tasa de 0,6 mm/min en ensayos de compresión de especímenes cúbicos de adobe de 70 mm de lado. En base a los trabajos mencionados se determinó realizar el ensayo con una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min.

Los especímenes se ensayaron empleando una máquina universal Zwick/Roell Z050 (<http://www.zwick.com>) donde las muestras se colocaron en contacto directo con la máquina. Para medir las deformaciones locales se utilizó un sistema de análisis de deformación óptico Aramis (GOM mbH, 2010). En la Figura 3a se muestra la configuración del ensayo y la forma de falla típica de uno de los especímenes ensayados.

### Ensayos de ultrasonido

El ensayo de ultrasonido es un método no destructivo que permite estimar las propiedades dinámicas de un material así como detectar la existencia de defectos internos. En este ensayo se genera una onda con un contenido de frecuencias mayor a 20 KHz empleando un transductor ultrasónico. La onda viaja a través del material y finalmente es detectada por un receptor como se muestra en la Figura 3b. La velocidad de propagación de la onda está en función al material que atraviesa y es por ello que este parámetro se puede relacionar con propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, densidad y módulo de Poisson (Krautkramer; Krautkramer, 1990).

Existen dos tipos de ondas mecánicas producidas por un pulso ultrasónico: ondas  $P$  y  $S$ . Las ondas  $P$ , u ondas de compresión longitudinal, son ondas que atraviesan el sólido desplazando las partículas del material a lo largo de la dirección de propagación de la onda. Las ondas  $S$ , son ondas de corte y desplazan a las partículas en forma perpendicular a la dirección de viaje de la onda. La velocidad de la onda  $P$  y  $S$  se calcula dividiendo la longitud de recorrido entre el tiempo que toma en llegar al receptor en el extremo opuesto, tal como se muestra en la ecuación (1).

$$V_{P,S} = \frac{L}{t_{P,S}} \quad (1)$$

En la ecuación (1)  $V_p$  y  $V_s$  representan la velocidad de propagación a través del material de la onda  $P$  y  $S$  expresados en  $[m/s]$ . La longitud de recorrido está representada por  $L$  en  $[m]$ , mientras que  $t_p$  y  $t_s$  es el tiempo en  $[s]$  que demora en atravesar la onda el material. Complementariamente, las ecuaciones (2) y (3) consideran que las ondas  $P$  y  $S$  atraviesan un sólido elástico isotrópico y por lo tanto es posible establecer una relación de la velocidad con el módulo de elasticidad dinámico, densidad y módulo de Poisson (Krautkramer; Krautkramer, 1990). En estas ecuaciones el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) está expresado en  $[N/m^2]$ , la densidad ( $\rho$ ) en  $[kg/m^3]$  y el módulo de Poisson ( $\nu$ ) es adimensional.

Finalmente, si  $V_p$  y  $V_s$  son conocidas, el módulo de Poisson se puede estimar con la ecuación (4).

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{\rho 2(1 + \nu)}} \quad (3)$$

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 + \nu)}} \quad (4)$$

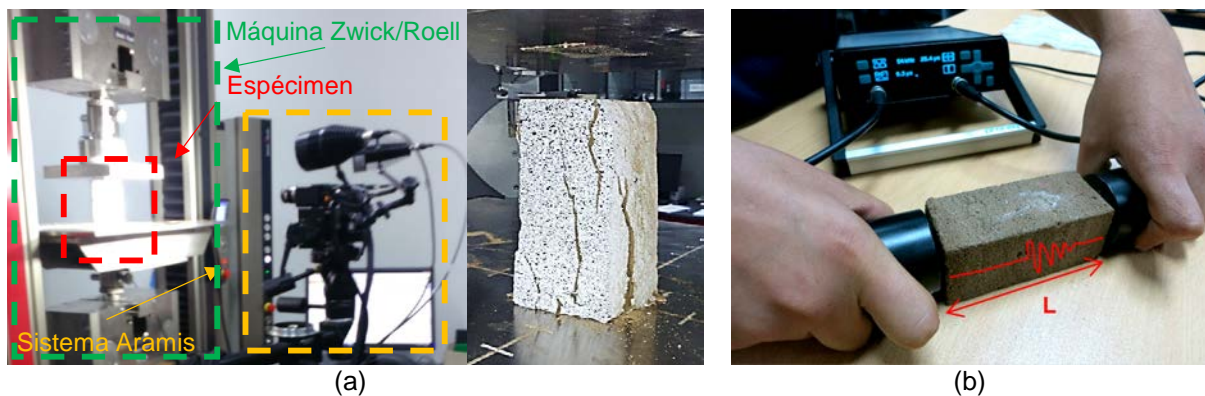


Figura 3. Adobe de Huaca de la Luna, ensayos de caracterización mecánica: (a) configuración del ensayo a compresión y falla típica en prisma sometido a compresión; y (b) procedimiento de ensayo de ultrasonido

La determinación adecuada y precisa del tiempo de propagación de las ondas es de gran importancia en el ensayo de ultrasonido. Sin embargo, cierto grado de incertidumbre es considerado sobre el momento exacto de llegada de la onda cuando se determina manualmente. Granja (2011) reporta que existen casos particulares donde es posible considerar diferentes estimaciones del tiempo de arribo de la onda  $S$  en la señal adquirida. Es por esto que el tiempo de propagación varía en función de la experiencia y conocimiento del operador pues la elección del punto exacto se lleva a cabo de manera subjetiva (Viana da Fonseca; Ferreira; Fahey, 2009).

Cuando se realizan ensayos de ultrasonido para la medición de la velocidad de ondas de corte, las ondas  $P$  generadas por los transductores de ondas  $S$  dificultan la determinación del tiempo de propagación. Este fenómeno se observa en la Figura 4a, siendo en todos los casos la onda  $P$  la primera en ser registrada incluso cuando se usaron transductores de corte. La identificación del tiempo de viaje de la onda  $S$  se determinó realizando un barrido manual de frecuencias que permitió distinguir la llegada de ambos tipos de ondas. Para esto, se asume que dentro del rango de frecuencias utilizadas en este método, el tiempo de viaje se mantiene independiente de la frecuencia de entrada aplicada (Viana da Fonseca et al, 2009). En la Figura 4a la línea punteada vertical a la derecha indica el tiempo de arribo de la onda  $S$  al transductor.

En el presente caso de estudio se realizaron ensayos de ultrasonido directo utilizando el equipo de medición PunditLab+. La frecuencia de muestreo a la cual se registraron las señales fue de 2 MHz con lo se tiene una aproximación en el tiempo a  $0,5 \mu s$ . Se utilizaron transductores de 54 kHz para evaluar la velocidad de onda  $P$  y transductores de 250 kHz para registrar la onda  $S$ . Siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C597 (2009) se utilizó gel acoplante para mejorar el registro.

La longitud de recorrido de la onda usada para los ensayos ultrasónicos fue aproximadamente de 110 mm (longitud del lado largo en los prismas ensayados). Aunque la norma ASTM D2845, (2008) presenta dimensiones mínimas para ensayos de roca, no existen recomendaciones para ensayos de tierra. En este sentido, diversas investigaciones recomiendan que la longitud mínima de recorrido debe ser dos veces la longitud de onda en el material (Santamarina; Klein; Fam, 2001; Leong; Yeo; Rahardjo, 2004), la cual está a su vez relacionada con la frecuencia y la velocidad de propagación por la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{V_{P,S}}{f} \quad (5)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda en [mm],  $f$  es la frecuencia en [kHz] y  $V_{P,S}$  es la velocidad de onda P o S en [m/s].

En ensayos preliminares en adobes de Huaca de la Luna se obtuvo una velocidad de onda P de 1300m/s utilizando una frecuencia de 54 kHz. Utilizando estos resultados y aplicando la ecuación (5), se determinó que la longitud de onda es aproximadamente 24 mm por lo que la longitud mínima de ensayo sería de 48 mm. Este resultado valida los resultados de estos ensayos en los prismas de 110 mm.

Cuando se calculan las velocidades en diversos puntos del elemento en estudio gráficos en 2D o 3D (dependiendo de si se realizan ensayos directos o indirectos) denominados tomografías ultrasónicas. Una tomografía es una herramienta que reproduce la estructura interna de un elemento a partir de mediciones recogidas en su superficie externa (Binda; Saisi; Tiraboschi, 2000). Los resultados de una tomografía pueden ser presentados como mapas de velocidades que están asociadas a la heterogeneidad del material o la presencia de grietas y defectos.

Para el caso de este estudio, se realizaron ensayos con fines de tomografía en el grupo total de 80 adobes disponibles en laboratorio. Debido a la variabilidad de las dimensiones de los adobes, se utilizaron 3 tipos de mallas para realizar los ensayos: tipo 1 (65 mm x 60 mm), tipo 2 (60 mm x 50 mm) y tipo 3 (60 mm x 60 mm) siendo los valores en paréntesis el espaciamiento entre puntos en dirección X y Y respectivamente (ver Figura 4b). En las mallas tipo1 y 2 se graficaron 5 y 4 puntos en dirección X y Y, respectivamente, mientras que en la malla tipo 3 fueron necesarios 5 y 3 puntos para cada eje. La Figura 4c muestra el procedimiento de ensayo en cada punto.

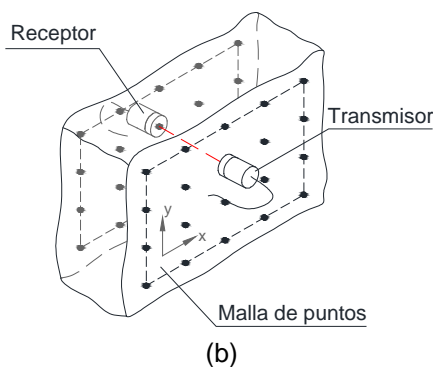
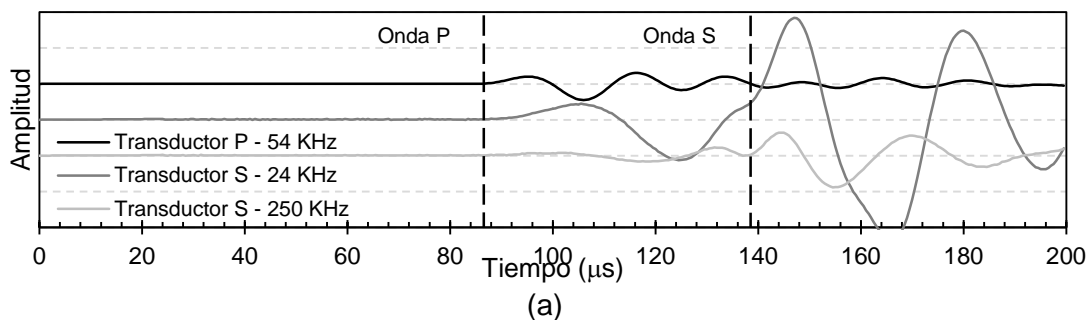


Figura 4. Ensayos de ultrasonido (a) Resultados de onda P para 54 kHz y onda S para 24 kHz y 250kHz (b) configuración de ensayo de tomografía ultrasónica (c) Toma de datos para la tomografía

## Resultados y discusión

### a) Ensayos de compresión uniaxial

De los ensayos realizados se construyeron las curvas esfuerzo-deformación a partir de los cuales se pudieron obtener parámetros mecánicos como la resistencia a compresión y módulo de elasticidad. En la Tabla 1 se muestran los resultados correspondientes al presente estudio. Como se muestra, la resistencia promedio a compresión obtenida fue de 1,28 MPa con un CV del 18%. Este valor de resistencia es coincidentemente similar al obtenido por Adorni, Coisson y Ferretti (2012) quien obtiene un valor aproximado de 1,04 MPa en adobes de una antigüedad de 2000 años del centro arqueológico de Nisa Partica en Turkmenistán. Asimismo, los resultados coinciden con el estudio realizado por Silveira, Varum y Costa (2012) en adobes de mediados del siglo XX de la ciudad de Aveiro en Portugal, quien determinó una resistencia a la compresión de 1,18 MPa. Los resultados también coinciden con informes internos del grupo de trabajo de Huaca de la Luna (PHLL, 2008, 2010) que reportan resistencias parecidas en adobes del Frontis Norte los cuales muestran una resistencia de 1,15 MPa. Sin embargo no concuerdan con el promedio hallado, el cual proporciona un valor de resistencia de 0,63 MPa. Este es un indicador de la heterogeneidad del material que constituye la Huaca.

El módulo de elasticidad secante ( $E_{\text{Secante}}$ ) se estimó haciendo uso del criterio propuesto por Silveira, Varum y Costa (2012) que establece que es igual a la pendiente de la recta trazada desde el origen al tercio de la resistencia máxima a compresión. El  $E_{\text{Secante}}$  promedio obtenido en este estudio fue de 901 MPa con un CV del 43%. El estudio de este parámetro en otras investigaciones de adobe reporta CV similares (ej. Almeida, 2012).

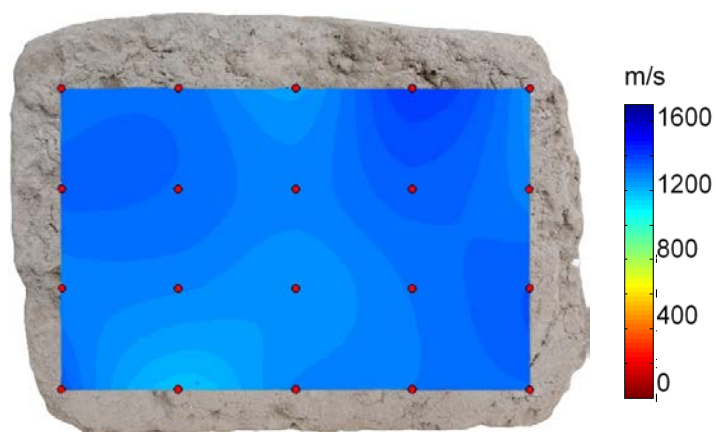
### b) Ensayos de ultrasonido

El resumen de los resultados de los ensayos de ultrasonido se presenta también en la Tabla 1. Como se ve, la velocidad promedio de la onda  $P$  tiene un valor de 1350 m/s con un CV de 3,5% con valores mínimos y máximos de 1270 m/s a 1450 m/s, respectivamente. Por otro lado, la velocidad de onda  $S$  promedio fue de 850 m/s con un CV de 5,6%, en este caso la velocidad mínima fue de 750 m/s y la máxima de 950 m/s. Los bajos coeficientes de variación obtenidos confirman la robustez del método. Haciendo uso de la ecuación (4) se calculó el módulo de Poisson para cada una de las muestras. En este caso, el valor promedio hallado fue de 0,16 con un CV de 22%. Además, haciendo uso de la ecuación (2) y el valor de densidad promedio de 1750 kg/m<sup>3</sup>, se calculó que  $E_{\text{dinámico}}$  promedio es de 2960 MPa con un CV de 9%.

Por otro lado, los ensayos directos de ultrasonido en las caras de las unidades de adobe permitieron generar imágenes 2D de velocidades. En la Figura 5 se muestran los resultados de dos unidades, la primera representativa de la mayoría de especímenes ensayados y la segunda representativa de un espécimen con problemas de heterogeneidad. La Figura 5a representa a un adobe con velocidades de onda  $P$  que varían entre 1250 m/s y 1350 m/s. La imagen indica que el adobe es homogéneo y que posiblemente se encuentra en buen estado ya que no presenta diferencias significativas de velocidades. Por otro lado, en la Figura 5b se observa un cambio notable en la parte superior derecha del adobe. Este cambio indica que en dicha zona existen defectos internos que provocan una atenuación de la velocidad de onda. Este tipo de información evidenciaría la existencia de un daño parcial en esta región de la unidad. Los resultados de estos ensayos muestran que, a excepción del adobe que se muestra en la Figura 5b, la velocidad máxima registrada fue igual a 1650 m/s y la velocidad mínima fue 900 m/s. Las velocidades más comunes registradas en los puntos ensayados en todos los adobes estuvieron en el rango de 1300 m/s a 1400 m/s. Se determinó que un 25% de los adobes tienen valores promedio de velocidad de entre 1000 m/s y 1200 m/s, el 66% varía entre 1200 - 1400 m/s y solo el 10% presenta velocidades mayores a 1400 m/s.

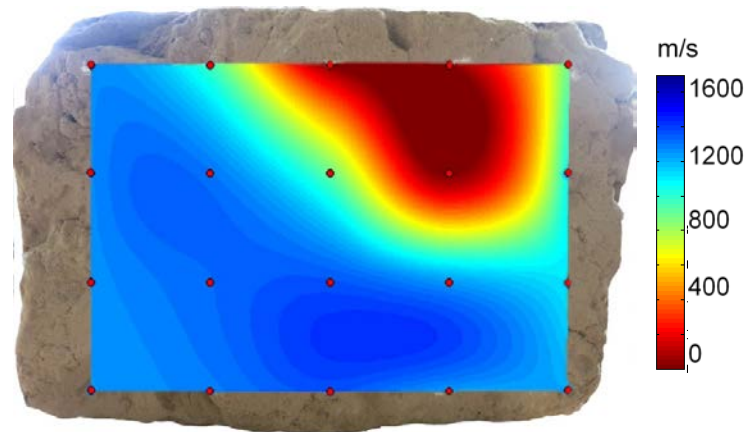
Tabla 1. Resumen de las propiedades mecánicas de los adobes ensayados de Huaca de la Luna

| Unidad              | Espécimen | Dimension<br>mm <sup>3</sup> | $\sigma_{\text{máx}}$<br>(MPa) | $E_{\text{Secante}}$<br>(MPa) | $V_p$<br>(m/s) | $V_s$<br>(m/s) | $E_{\text{Dinámico}}$<br>(MPa) | $\nu$ |
|---------------------|-----------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|--------------------------------|-------|
| Adobe 1             | 1-3       | 90x50x41                     | 1,57                           | 915                           | 1364           | 903            | 3167                           | 0,11  |
|                     | 1-4       | 98x47x42                     | 1,08                           | 697                           | 1384           | 916            | 3261                           | 0,11  |
|                     | 1-5       | 99x45x42                     | 1,30                           | 453                           | 1443           | 952            | 3536                           | 0,11  |
|                     | Promedio  |                              | 1,32                           | 688                           | 1397           | 924            | 3321                           | 0,11  |
| Adobe 2             | 2-1       | 102x50x50                    | 0,93                           | 398                           | 1272           | 816            | 2680                           | 0,15  |
|                     | 2-2       | 109x49x46                    | 1,00                           | 857                           | 1296           | 836            | 2797                           | 0,14  |
|                     | 2-3       | 109x49x48                    | 1,27                           | 860                           | 1312           | 857            | 2898                           | 0,13  |
|                     | 2-4       | 108x49x42                    | 1,07                           | 958                           | 1273           | 746            | 2411                           | 0,24  |
|                     | 2-6       | 109x47x44                    | 1,41                           | 433                           | 1330           | 814            | 2783                           | 0,20  |
|                     | Promedio  |                              | 1,14                           | 701                           | 1296           | 814            | 2714                           | 0,17  |
| Adobe 3             | 3-3       | 112x48x46                    | 0,98                           | 1299                          | 1371           | 857            | 3032                           | 0,18  |
|                     | 3-5       | 110x50x46                    | 1,24                           | 1399                          | 1361           | 891            | 3126                           | 0,12  |
|                     | 3-7       | 111x46x46                    | 1,50                           | 1009                          | 1345           | 856            | 2972                           | 0,16  |
|                     | Promedio  |                              | 1,24                           | 1236                          | 1359           | 868            | 3043                           | 0,15  |
| Adobe 4             | 4-2       | 109x63x49                    | 1,58                           | 871                           | 1370           | 802            | 2788                           | 0,24  |
|                     | 4-3       | 110x64x49                    | 1,46                           | 1782                          | 1344           | 845            | 2931                           | 0,17  |
|                     | 4-4       | 110x65x49                    | 1,52                           | 684                           | 1386           | 872            | 3121                           | 0,17  |
|                     | Promedio  |                              | 1,52                           | 1112                          | 1367           | 840            | 2947                           | 0,19  |
| Promedio            |           | 104x51x45                    | 1,28                           | 901                           | 1346           | 854            | 2965                           | 0,16  |
| Desviación estándar |           |                              | 0,23                           | 389                           | 47             | 52             | 277                            | 0,04  |
| CV (%)              |           |                              | 18%                            | 43%                           | 4%             | 6%             | 9%                             | 22%   |



(a)





(b)

Figura 5. Tomografías ultrasónicas (a) Unidad de adobe con velocidades típicas (b) Adobe con características heterogéneas

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El presente trabajo muestra la caracterización mecánica de unidades de adobe de un sector del complejo arqueológico Huaca de la Luna con el uso complementario de técnicas tradicionales de carácter destructivo e innovadoras de carácter no-destructivo. Se desarrollaron satisfactoriamente ensayos de compresión uniaxial controlados por desplazamiento que fueron complementados con medidas de un sistema de video-correlación lo cual permitió caracterizar el comportamiento mecánico del material incluso después de alcanzar el rango no lineal. Se desarrollaron también ensayos de ultrasonido que permitieron caracterizar cuantitativamente el comportamiento dinámico y que sirvieron también para un análisis cualitativo de homogeneidad de las unidades de adobe.

Los resultados del módulo de elasticidad dinámico obtenidos a través del ensayo de ultrasonido muestran que existe una relación de alrededor de 3,3 veces en relación a los resultados estáticos obtenidos con los ensayos de compresión uniaxial. Además, se evidencia una pequeña variabilidad de los primeros ensayos de alrededor de 10% lo cual indica la confiabilidad y repetitividad del método y abre las puertas para futuras aplicaciones incluso para verificación in-situ.

El trabajo futuro debe estar orientado a la caracterización sistemática de los diferentes sectores de la Huaca de modo que se pueda obtener un diagnóstico completo del complejo arqueológico. Es importante además integrar los resultados de este estudio con los de caracterización de morteros y los de caracterización del sistema de albañilería completo. Además, en el campo de ensayos de ultrasonido, es importante explorar las técnicas de ensayos indirectos lo cual permitirá evaluar incluso elementos y subsistemas estructurales tales como muros, columnas y pilares.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adorni, E.; Coisson, E.; Ferretti, D. (2012). In situ characterization of archaeological adobe bricks. *Construction and Building Materials*, 40, 1-9.
- Almeida, J. (2012). Mechanical characterization of traditional adobe masonry elements (M.Sc. thesis ed.). Guimarães. University of Minho.
- ASTM C469/C469M. (2014). Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression.
- ASTM C597. (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concret.
- ASTM D2845. (2008). Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.

- ASTM D4643. (2008). Standard test method for determination of water (moisture) content of soil by microwave oven heating.
- ASTM D7263. (2009). Standard test method for laboratory determination of density.
- Binda, L.; Saisi, A.; Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*, 199-233.
- GOM mbH (2010). ARAMIS User Information Hardware, Braunschweig, Germany
- Granja, J. (2011). Experimental evaluation of the elastic modulus of cementitious materials at early ages. University of Minho: MSc Thesis. <http://www.zwick.com/en/products/static-materials-testing-machines/testing-machines-from-5-kn-to-250-kn/proline-testing-machine.html>
- ICOMOS/ISCARSAH Committee. (2005). Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. Disponible en <http://www.icomos.org>. Acceso en 08/05/2015
- Illampas, R.; Champis, D.; Ioannou, I. (2014). Laboratory testing and finite element simulation of the structural response of an adobe masonry building under horizontal loading. *Engineering Structures*, 80, 362-376.
- Krautkramer, H.; Krautkramer, J. (1990). *Ultrasonic testing of materials*. Berlin: Springer Verlag.
- Leong, E.-C.; Yeo, S.-H.; Rahardjo, H. (2004). Measurement of wave velocities and attenuation using an ultrasonic test system. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 844-860.
- Parisi, F.; Asprone, D.; Fenu, L.; Prota, A. (2015). Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers. *Composite Structures*, 300-307.
- Piattoni, Q.; Quagliarini, E.; Lenci, S. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behavior of earthen bricks. *Construction and Building Materials*, 2067-2075.
- Proyecto Arqueológico Huaca de la Luna. (2008). Informe técnico. Universidad Nacional de Trujillo: Facultad de Ciencias Sociales.
- Proyecto Arqueológico Huaca de la Luna. (2009). Informe técnico. Universidad Nacional de Trujillo: Facultad de Ciencias Sociales.
- Proyecto arqueológico Huaca de la Luna. (2010). Informe técnico. Universidad Nacional de Trujillo: Facultad de Ciencias Sociales.
- Santamarina, J.; Klein, A.; Fam, M. (2001). Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring. *Journal of Soils and Sediments*, 1, 130.
- Silveira, D.; Varum, H.; Costa, A. (2012). Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks. *Construction and Building Materials*, 40, 719-728.
- Uceda, S.; Paredes, A. (1994). Arquitectura y función de la Huaca de la Luna. *Revista Cultural des Indes*, 42-46.
- Vasconcelos, G. (2005). Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls (PhD. Thesis ed.). Portugal: University of Minho.
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C.; Fahey, M. (2009). A framework interpretig bender element tests, combining time-domain and frequency-domain methods. *Geotechnical Testing Journal*, 1-17.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Gestión de la Investigación DGI PUCP por el financiamiento del proyecto de investigación 89-2014 dentro del cual se enmarca este trabajo. Se agradece también a CONCYTEC por el financiamiento de los alumnos de maestría (segundo, tercer y cuarto autor) a través de su programa de becas para estudios de posgrado. Finalmente, se agradece al Laboratorio de Estructuras y al Laboratorio de Materiales de la PUCP por la disponibilidad de sus instalaciones y equipos.

## AUTORES

Rafael Aguilar es Doctor en Ingeniería Civil y profesor asociado del Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP. El profesor Aguilar dirige el grupo de investigación

de monitoreo e instrumentación de construcciones históricas - Engineering & Heritage – en la PUCP cuyas áreas principales de investigación son el diagnóstico y conservación del patrimonio histórico con tecnologías modernas, análisis estructural avanzado de edificaciones existentes y monitoreo de estructuras.

Cristhian Saucedo, Mijail Montesinos y Eduardo Ramírez son estudiantes de la Maestría en Ingeniería Civil de la PUCP y miembros del grupo de investigación Engineering & Heritage.

Ricardo Morales es docente de la Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT). Con estudio de maestría y doctorado con mención en Ciencias Ambientales en la UNT. En la actualidad trabaja en programas de conservación y puesta en valor del complejo arqueológico huacas del Sol y de la Luna (Huacas de Moche).

Santiago Uceda es docente del Departamento de Arqueología y Antropología de la Universidad Nacional de Trujillo. Con estudios de doctorado en Francia. En la actualidad trabaja sobre la sociedad Mochica, en los temas de urbanismo y arquitectura pública y doméstica. Adicionalmente trabaja en programas de conservación y puesta en valor del complejo arqueológico huacas del Sol y de la Luna (Huacas de Moche).