PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN ADOBES HISTÓRICOS RECUPERADOS EN CONTEXTOS DE DEMOLICIÓN

Juan Antonio Estrella Pozo[1]; Herwing Zeth López Calvo[2]

Facultad de Arquitectura 5 de mayo, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca
[1]antoniopozo.mid@gmail.com, [2]hz.lopez.calvo@gmail.com

Palabras clave: caracterización física, Oaxaca de Juárez, patrimonio vernáculo

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo principal mostrar la posibilidad de uso de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico como una técnica no destructiva para la caracterización de las propiedades físicas de componentes constructivos de tierra (adobes) recuperados en contextos de demolición. Se presentan tres casos de estudio (inmuebles) y, mediante análisis estadístico se observan correlaciones con la finalidad de establecer un caso típico para la localidad de origen. El procedimiento consistió en inspección visual de los adobes; registro de temperatura, humedad relativa y dimensiones; registro fotográfico; campaña experimental; análisis de resultados. Se utilizó la norma UNE-EN 12504-4:2022 con adaptaciones al tipo de material y el estado de conservación. El probador de velocidad de pulso ultrasónico utilizó transductores de 54 kHz, frecuencia de muestreo de 2 Hz, transmisión directa y confirmación de distancia mínima. La posición de los transductores fue regida bajo el principio de tomografía ultrasónica con una malla aproximada de 110 mm x 110 mm de espaciamiento entre puntos en dirección X y Y. Los resultados arrojaron que el valor promedio de velocidad de pulso para los casos de estudio fue de 882.80±77.45 m/s (CoV 0.08), 701.14±180.08 m/s (CoV 0.25), 874.71±106.67 m/s (CoV 0.12); por lo tanto, los tres inmuebles no pueden considerarse como parte de una misma población, existiendo diferencias significativas entre varianzas. Los resultados mostraron valores consistentes con otros estudios similares. El uso de la técnica es viable bajo condiciones muy específicas de carácter procedimental como estadístico.

1 INTRODUCCIÓN

La localidad de Santa Cruz Xoxocotlán, en el estado de Oaxaca (México) muestra una tradición constructiva de arquitectura de tierra desde el periodo prehispánico. Este desarrollo cultural de la construcción de tierra en la localidad fue sostenido hasta el siglo XX, cuando era común construir en adobe incluso nuevos equipamientos asociados a la modernidad y desarrollo del pueblo, como la escuela primaria (1922) que se construyó de adobe, vigas y madera (Velasco; Aguilar, 1999).

De acuerdo con la cronista de la localidad[1], el pueblo de Xoxocotlán estaba lleno de jacales inicialmente; y luego por tejabanes; el jacal era una construcción de carrizo, a veces con embarro en muros, que podían ser transportada ya que, no tenían piso y, en algunos casos solo se componía del pequeño espacio, el bracero de tres piedras y el comal, así, para muchos pobladores, a decir de la cronista, constituye un aspecto de su vida que no quieren recordar; mientras que, los tejabanes eran construcciones formadas por una estructura de cuatro pilares de madera con techo de zacate o rastrojo de milpa.

Con el tiempo y conforme las familias tenían más recursos económicos, construían sus primeras piezas (habitaciones) con muros de adobe, los cuales eran elaborados en el propio solar cuando había patio o en la calle; y a decir de la cronista, se contrataba adoberos; hombres jóvenes que llevaban sus propias herramientas, escarban el terreno y hacían las mezclas con agua de pozo, excremento de res (vaca o toro) para luego moldear las piezas de adobe, dejarlas secar un día y luego apilar las piezas.

[1] Prof. Virginia Alicia Ruiz Medina

En la tradición constructiva local, el adobe xoxeño era por lo general sin fibras; pero, si contenía piedras con cañuelas de zacate de milpa, y en caso de tener fibras estas eran de estiércol de caballo y burro; por otra parte, la tierra debía ser seleccionada, prefiriendo la de color café porque proporcionaba mejor trabajabilidad, mientras que, la de color amarillo era más quebradiza[2].

Como se puede observar, la tradición xoxeña de la elaboración de adobes tiene algunas variantes mínimas y especificidades; así mismo, constituyó una forma de demostrar el desarrollo y prestigio social de ciertas familias, sustituyendo los jacales y tejabanes; hoy día, constituyen parte del patrimonio cultural edificado de la localidad, aunque, se observa un franco proceso de desaparición producto de su sustitución por materiales industrializados. Las construcciones de tierra conforman parte de la historia urbana y social de la localidad y, aún se encuentran presente con excelentes ejemplos de conservación no planificada.

1.1 Objetivo

El objetivo del estudio fue corroborar la posibilidad de uso de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico como técnica no destructiva para la caracterización de las propiedades físicas de componentes constructivos de tierra (adobes), recuperados en contextos de demolición de tres casos de estudio (inmuebles) ubicados en el área fundacional de la localidad de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca; igualmente, mediante análisis estadístico de los resultados, observar sus correlaciones con la finalidad de establecer un caso típico para la localidad de origen.

1.2 Selección de casos de estudio

Durante la campaña para la elaboración del inventario de construcciones de tierra de Santa Cruz Xoxocotlán realizada entre noviembre de 2021 y marzo de 2022, se lograron recuperar varias muestras de adobes de inmuebles en proceso de demolición o remodelación; por lo tanto, no fueron afectados inmueble alguno para la obtención de las piezas de adobe; aunque esto no descartó que las muestras fueran reducidas y limitadas por su disponibilidad, integridad y estado de conservación.

Debido a la premura para la recuperación de los adobes en los inmuebles que estaban en proceso de demolición y remodelación, no fue posible tomar muestras de temperatura y humedad relativa del sitio; aunque se tomaron fotografías del área de extracción, ubicación GPS del inmueble, año de construcción facilitada por los propietarios y dimensionamiento de las piezas de adobe.

El proceso de recolección de las piezas de adobe en los inmuebles fue prácticamente por recuperación directa de los escombros (figura 1); se recuperaron adobes completos, fragmentos grandes, medianos y pequeños, que presentaban cierto grado de conservación frente a la humedad e intemperie; las muestras fueron colocadas en contenedores de plástico sellados para su traslado a laboratorio, donde estuvieron en condiciones de humedad relativa y temperatura controladas.

Figura 1 – Imágenes del área de donde se recuperaron los adobes del inmueble L06

[2] Datos proporcionados por entrevista oral a residentes de la localidad

2 METODOLOGÍA

Se evaluaron cinco muestras (adobes) de cada caso de estudio (inmuebles); cada muestra cumplió con el criterio de integridad y representatividad, es decir, eran piezas completas o en su defecto, con un porcentaje mayor al 50% de la pieza tipo. En cada muestra se midió la velocidad de pulso ultrasónico de cuatro a doce puntos diferentes, según la dimensión de la pieza. En cada punto de ensayo se realizaron diez lecturas para efectos de representatividad.

La prueba de velocidad de pulso ultrasónico se empleó como método indirecto para evaluar la compacidad, homogeneidad y la existencia de posibles grietas en el material. De acuerdo con los trabajos de Aguilar et al. (2015), la velocidad de pulso tambien es un parámetro que se puede relacionar con propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad dinámico (Ed) expresado en N/m^2, la densidad (ρ) en kg/m^3 y el módulo de Poisson (v) que es adimensional.

Para la presente investigación se utilizó la norma UNE-EN 12504-4:2022, con adaptaciones que siguen los trabajos de Aguilar et al. (2015). Se empleó un probador de velocidad de pulso ultrasónico (UPV) marca Controls, modelo 58-E4800 con transductores de 54 kHz, a una frecuencia de muestreo de las señales de 2 Hz. El procedimiento consistió en colocar dos transductores o palpadores en caras opuestas del componente constructivo, para efectuar mediciones de velocidad de impulso con transmisión directa; se prefirió este método ya que, otros trabajos como los de Simão et al. (2016), la utilización de métodos indirectos arrojó resultados insatisfactorios (figura 2).

Figura 2 -Toma de datos con pulso ultrasónico en muestra M5 de caso L06

Se utilizaron dos transductores, uno sirvió como palpador receptor (Rx) y otro como palpador transmisor (Tx). De acuerdo con la norma, la distancia mínima entre transductores debe ser de 100 mm o 150 mm dependiendo del tamaño del árido; sin embargo, esta condición es aplicada para pruebas en concreto (hormigón); otras normas como la ASTM D2845-08: 2017 presentan dimensiones mínimas para los ensayos, pero aplicados a roca; como menciona Aguilar et al. (2015), no hay recomendaciones para ensayos en componentes constructivos de tierra; algunas investigaciones tienden a generar confirmaciones de la distancia mínima a partir del principio de que, la longitud mínima de recorrido debe ser el doble de la longitud de onda en el material que, se relaciona con la frecuencia y la velocidad de propagación con la fórmula 1:

$$\lambda = \frac{V_{P.S.}}{f} \qquad (1)$$

donde:

λ: es la longitud de onda (mm).

VP.S.: es la velocidad de onda P o S (m/s).

f: es la frecuencia del transductor (kHz).

La posición de los transductores fue regida bajo el principio de tomografía ultrasónica siguiendo el trabajo de Aguilar et al. (2015); indicando mediante una malla aproximada de 110 mm x 110 mm el espaciamiento entre puntos en dirección X y Y; la malla fue colocada con un margen interno de 30 mm dada la irregularidad de los bordes, así mismo, se ubicó en las caras con dirección natural de trabajo estructural del adobe (figura 3).

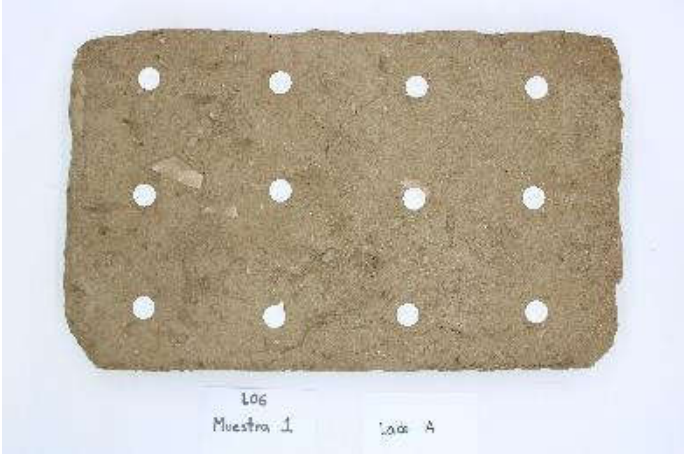

Figura 3 – Ejemplo de distribución de puntos en lado A de muestra 1, para toma de datos en componentes constructivo de tierra tipo adobe recuperado del caso L06.

Para cada posición se realizaron diez lecturas repetidas del tiempo recorrido para obtener un valor mínimo, lo que, indicó que el espesor del elemento de acoplamiento se redujo al mínimo. Debido a la rugosidad del componente constructivo, la superficie se alisó y nivelo con una lija; también se empleó un medio de acoplamiento en gel. Se utilizó un higrómetro para medir T y HR tanto ambiental como del adobe durante la toma de datos. La velocidad de propagación del ultrasonido se calculó como coeficiente entre la distancia entre dos transductores y el tiempo en que es tomado el pulso; se utilizó la fórmula 2:

$$V = \frac{L}{T} \qquad (2)$$

donde:

V: es la velocidad del impulso (km/s)

L: es la longitud de la trayectoria (mm)

T: es el tiempo de recorrido (ms)

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se verificaron los resultados para determinar si el espesor del adobe cumplía con la distancia mínima requerida para validar los ensayos. Se determinó la longitud de onda y la longitud mínima para cada punto de ensayo por muestra, los cuales resultaron menores al espesor del adobe en el punto de ensayo (tabla 1), lo que permitió validar el procedimiento de la prueba.

Se generó una visualización de los puntos de ensayo (v.p.s.n) por muestra y caso de estudio; se empleó una técnica de semaforización que marca los percentiles inferiores en color rojo, superiores en color verde y, en color amarillo los valores cercanos al promedio global (tabla 2); este último definido como la media de todos los puntos de ensayo para cada caso de estudio sin agrupamiento por muestra; se obtuvo un promedio local definido como la media de las cinco muestras por caso de estudio y, un promedio de muestra definido como la media de los puntos de ensayo agrupados por muestra; así mismo, se visualizan con un guion los puntos de ensayo que no obtuvieron lectura durante la ejecución de la prueba, esto por problemas de recepción del equipo o rugosidad de la superficie.

Tabla 1 – Verificación de distancia mínima

Caso de estudio	L06					A02					AD01				
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5
Longitud de onda λ (mm)	16.50	15.98	17.06	16.36	14.82	26.59	12.44	10.43	14.95	11.96	17.21	15.23	16.20	16.62	15.56
Distancia mínima (mm)	32.99	31.97	34.13	32.73	29.64	53.17	24.88	20.87	29.90	23.92	34.43	30.45	32.40	33.24	31.12
Espesor de punto de ensayo (mm)	75.75	78.17	76.92	77.29	82.25	91.00	83.67	87.86	91.67	84.67	85.22	70.86	67.77	74.78	73.50

Tabla 2 – Semaforización de puntos de ensayo de pulso ultrasónico por caso de estudio

	L06					A02					AD01				
Ensayos	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**
Vp.s.1	869.05	804.60	935.96	968.15	830.00	1297.65	-	593.51	780.08	-	860.32	-	980.74	906.98	818.55
Vp.s.2	983.40	926.40	963.41	962.88	805.83	-	881.19	-	972.85	-	860.34	815.88	958.47	797.69	936.07
Vp.s.3	947.37	812.92	796.07	921.20	823.53	1268.82	-	666.67	859.90	683.56	883.98	843.93	970.15	876.80	951.22
Vp.s.4	900.58	833.33	917.55	913.58	741.78	1638.30	397.06	-	-	-	806.28	704.38	924.66	956.52	714.96
Vp.s.5	731.71	872.41	989.85	873.02		1778.95	564.97	430.23	686.20	-	1121.02	752.81	636.28	865.17	697.19
Vp.s.6	922.51	844.77	835.98	812.92		1304.35	843.72	-	737.37	608.1	772.91	966.95	837.50	824.62	1007.09
Vp.s.7	984.25	954.65	842.22	733.86		1415.05		-			-	767.44	934.21	948.17	751.73
Vp.s.8	927.71	839.30	875.74			1346.07					1075.79	904.46	786.27	954.20	845.07
Vp.s.9	714.29	810.54	957.58								1055.21		845.24	946.12	
Vp.s.10	852.71	909.09	1049.1												
Vp.s.11	933.33	895.86	877.78												
Vp.s.12	923.45	852.88	1016.7												
Promedio por muestra (m/s)	890.86	863.06	921.50	883.66	800.29	1435.60	671.74	563.47	807.28	645.84	929.48	822.26	874.84	897.36	840.24
Promedio local (m/s)			**871.874**					**824.784**					**872.836**		
Promedio global (m/s)			**882.806**					**940.696**					**874.716**		

De lo anterior se comenta lo siguiente:

- Existe una clara diferencia entre los promedios globales y locales para los casos L06 y A02; mientras que, el caso AD01 ambos promedios son cercanos. En los tres casos el promedio global resultó mayor. En este sentido se consideró el promedio global como el representativo estadísticamente para cada caso de estudio; sin embargo, el valor resultante para el caso A02 se ve influido por la muestra A02_M1 y A02_M5.
- El caso L06 presentó lecturas en todos los puntos de ensayo. La muestra L06_M5 arrojó en todos los puntos de ensayo valores en el percentil inferior con respecto al valor del promedio global; así mismo, la muestra L06_M3 mostró un promedio local en el percentil superior; ambas muestras parecen ser atípicas.
- El caso A02 presentó en todas las muestras puntos de ensayo sin lectura, indicativo de la dificultad para realizar los ensayos en cada punto. Fue el caso de estudio con menor cantidad de datos; así mismo, se observó una mayor cantidad de datos que se pueden considerar atípicos, se observaron tres muestras (A02_M2, A02_M3 y A02_M5) en el percentil inferior y, una muestra (A02_M1) en el percentil superior; lo cual, permitió inferir que son atípicas atendiendo al promedio global; e hizo suponer de una mayor heterogeneidad del material.

- El caso AD01 presentó únicamente un punto de ensayo sin lectura. La muestra AD01_M1 con su promedio local se ubicó en el percentil superior, mientras que, la muestra AD01_M2 lo hizo en el percentil inferior.

Debido a este análisis preliminar fue necesario determinar si las muestras ensayadas pertenecen estadísticamente a una misma población o caso de estudio, para lo cual, se consideró lo siguiente:

- Los datos de análisis son de razón y continuos; representan la lectura de velocidad de pulso ultrasónico (m/s) en cada punto de ensayo.
- Los puntos de ensayos efectivamente responden a la misma muestra y que los datos atípicos corresponden a la naturaleza heterogénea del componente constructivo.

El procedimiento fue el mismo para los tres casos de estudio y consistió en los siguientes pasos:

- Análisis de estadística descriptiva.
- Revisión de la normalidad por prueba Shapiro-Wilk por muestra.
- Revisión de la homocedasticidad mediante gráficas de caja y bigotes por muestra.
- Determinación de las muestras a una misma población o caso de estudio e identificación de la muestra atípica en caso de existir.

3.1 Análisis de caso L06

Los valores de estadística descriptiva permitieron observar que las cinco muestras presentaron datos similares en su promedio, mediana y moda, con coeficientes de variación (CoV) entre el 5% y 9.8%. La muestra L06_M1 obtuvo un valor de $p < 0.05$ en la prueba de Shapiro-Wilk, por lo que no presentó normalidad en los datos (tabla 3).

Tabla 3. Resultados de prueba Shapiro-Wilk en caso L06

Muestra	L06_M1	L06_M2	L06_M3	L06_M4	L06_M5
Shapiro-Wilk	0.843	0.932	0.977	0.908	0.829
P-value of Shapiro-Wilk	0.030	0.406	0.967	0.382	0.163

La revisión de varianzas no fue homogénea para todas muestras; la muestra L06_M5 no traslapa el grueso de sus datos con las otras muestras (figura 4); así mismo, la muestra L06_M1 presentó dos valores atípicos: V.p.s.5 (731.71 m/s) y Vp.s.9 (714.29 m/s) que responden a valores muy inferiores de velocidad de pulso ultrasónico con respecto al promedio global (882.80 m/s).

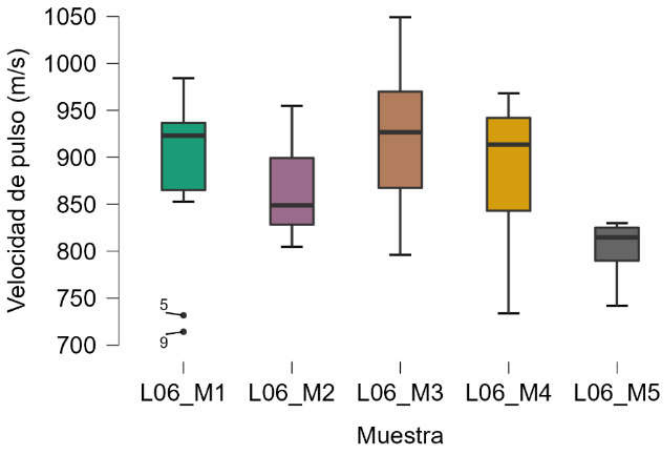

Figura 4. Gráfico de caja y bigotes para caso L06

Debido a las condiciones anteriores se realizó la prueba H de Kruskal Wallis, una prueba no paramétrica (tabla 4). Se obtuvo un valor $p < 0.05$; se puede interpretar que las muestras tienen características que influyen en la velocidad de pulso ultrasónico y, por lo tanto, hay diferencias ligeramente significativas ($p=0.045$) entre algunas muestras. Posteriormente, la prueba Post-Hoc de Dunn permitió identificar diferencias significativas entre los pares de muestra L06_M1 y L06_M5, L06_M2 y L06_M3, y muy significativas entre L06_M3 y L06_M5.

Tabla 4 – Resultados de la prueba Post-Hoc de Dunn en caso L06

Dunn's Post-Hoc comparación – muestra						
Comparación	z	W_i	W_j	p	p_{bonf}	p_{holm}
L06_M1 – L06_M2	1.362	26.917	19.292	0.172	1.000	1.000
L06_M1 – L06_M3	-0.625	26.917	30.417	0.532	1.000	1.000
L06_M1 – L06_M4	0.305	26.917	24.929	0.760	1.000	1.000
L06_M1 – L06_M5	2.327	26.917	8.500	0.020*	0.200	0.180
L06_M2 – L06_M3	-1.988	19.292	30.417	0.047*	0.469	0.375
L06_M2 – L06_M4	-0.864	19.292	24.929	0.387	1.000	1.000
L06_M2 – L06_M5	1.363	19.292	8.500	0.173	1.000	1.000
L06_M3 – L06_M4	0.842	30.417	24.929	0.400	1.000	1.000
L06_M3 – L06_M5	2.769	30.417	8.500	0.006**	0.056	0.056
L06_M4 – L06_M5	1.912	24.929	8.500	0.056	0.559	0.391

*p< .05; ** p< .01

Teniendo en cuenta toda la información anterior, no fue concluyente si el caso de estudio L06 presenta una muestra atípica; podría considerarse que la muestra L06_M5 sólo es atípica con respecto a L06_M1 y L06_M3; sin embargo, esto puede explicarse por la cantidad reducida de lecturas o puntos de ensayo registrados en dicha muestra, por lo tanto, no es suficiente para descartar la muestra como parte de la población o caso de estudio L06.

3.2 Análisis de caso A02

Los valores de estadística descriptiva permitieron observar que las cinco muestras presentaron datos muy diferentes en su promedio, mediana y moda, con coeficientes de variación (CoV) entre 8.3% y hasta el 34%. La prueba de Shapiro-Wilk mostró que existe normalidad entre los datos de cada muestra por tener valor $p > 0.05$, sin embargo, los datos para la muestra A02_M5 fueron insuficientes para determinar su normalidad (tabla 5).

Tabla 5 – Resultados de prueba Shapiro-Wilk en caso A02

Muestra	A02_M1	A02_M2	A02_M3	A02_M4	A02_M5
Shapiro-Wilk	0.824	0.897	0.954	0.960	NaN
P-value of Shapiro-Wilk	0.070	0.414	0.586	0.807	NaN

La revisión de varianzas no fue homogénea para todas muestras; la muestra A02_M1 no traslapa el grueso de sus datos con las otras muestras; así mismo, la muestra A02_M4 no traslapa el grueso de sus datos con las muestras A02_M3 y A02_M5. Ninguna muestra presentó valores atípicos (figura 5).

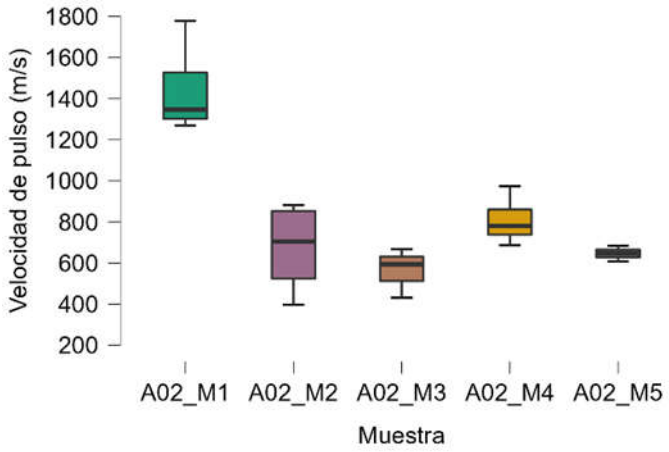

Figura 5 – Gráfico de caja y bigotes para caso A02

Debido a las condiciones anteriores se realizó la prueba H de Kruskal Wallis, una prueba no paramétrica. Se obtuvo un valor $p < 0.05$; se puede interpretar que la muestras tienen características que influyen en la velocidad de pulso ultrasónico y, por lo tanto, hay diferencias muy significativas (p=0.003) entre algunas muestras.

Posteriormente, la prueba Post-Hoc de Dunn permitió identificar diferencias significativas entre los pares de muestra A02_M1 y A02_M4, A02_M1 y A02_M5, y muy significativas entre A02_M1 y A02_M2, A02_M1 y A02_M3 (Tabla 6).

Tabla 6 – Resultados de la prueba Post-Hoc de Dunn en caso A02

Dunn's Post-Hoc comparación – muestra						
Comparación	z	W_i	W_j	p	p_{bonf}	p_{holm}
A02_M1 – A02_M2	2.828	18.000	7.000	0.005**	0.047*	0.042*
A02_M1 – A02_M3	3.270	18.000	4.000	0.001**	0.011*	0.011*
A02_M1 – A02_M4	2.037	18.000	10.600	0.042*	0.417	0.292
A02_M1 – A02_M5	2.412	18.000	6.000	0.016*	0.159	0.127
A02_M2 – A02_M3	0.633	7.000	4.000	0.527	1.000	1.000
A02_M2 – A02_M4	-0.865	7.000	10.600	0.387	1.000	1.000
A02_M2 – A02_M5	0.186	7.000	6.000	0.852	1.000	1.000
A02_M3 – A02_M4	-1.457	4.000	10.600	0.145	1.000	0.827
A02_M3 – A02_M5	-0.353	4.000	6.000	0.724	1.000	1.000
A02_M4 – A02_M5	0.886	10.600	6.000	0.376	1.000	1.000

*p< .05; ** p< .01

Los análisis anteriores corroboraron estadísticamente que la muestra A02_M1 es una muestra atípica para el caso correspondiente. La falta de ensayos validos suficientes en A02_M5 (únicamente 2 de los 6 correspondientes a dicha muestra) permitió descartar la muestra al no considerarse significativa del caso de estudio A02.

3.3 Análisis de caso AD01

Los valores de estadística descriptiva permitieron observar que las cinco muestras presentaron datos cercanos en su promedio, mediana y moda, con coeficientes de variación (CoV) entre 6.6% y el 14.4%. La prueba de Shapiro-Wilk mostró que existe normalidad entre los datos de cada muestra por tener valor $p > 0.05$ (tabla 7)

Tabla 7 – Resultados de prueba Shapiro-Wilk en caso AD01

Muestra	AD01_M1	AD01_M2	AD01_M3	AD01_M4	AD01_M5
Shapiro-Wilk	0.877	0.973	0.866	0.883	0.934
P-value of Shapiro-Wilk	0.175	0.916	0.113	0.170	0.552

La revisión de varianzas fue homogénea para todas muestras; sin embargo, la muestra AD01_M3 presentó un valor atípico en Vp.s.5 (636.20 m/s) que responden a un valor muy inferior de velocidad de pulso ultrasónico con respecto al promedio global (874.71 m/s) (figura 6).

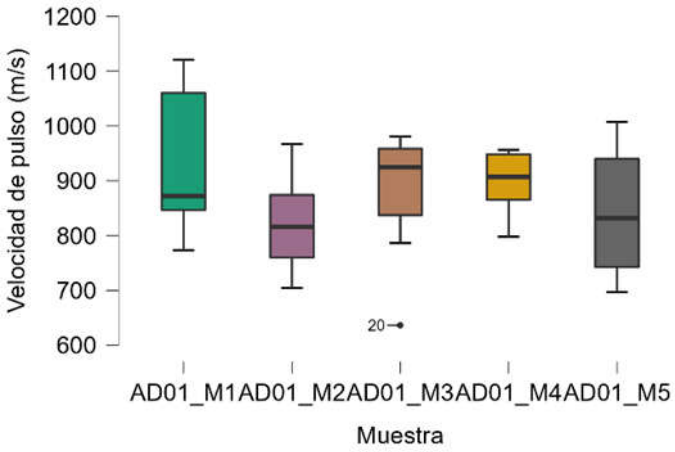

Figura 6 – Gráfico de caja y bigotes para caso AD01

Debido a las condiciones anteriores se realizó la prueba H de Kruskal Wallis, una prueba no paramétrica. Se obtuvo un valor p > 0.05 (figura 8); por lo tanto, no hay diferencias entre las muestras.

Tabla 8 – Resultados de la prueba Kruskal-Wallis en caso AD01

Kruskal-Wallis test			
Factor	Statistic	df	p
Casi AD01	4.376	4	0.357

Se corroboró lo anterior con la prueba Post-Hoc de Dunn (tabla 9), ya que no presentaron pares de muestras con diferencias. Después de la corroboración de la pertenencia de las muestras a sus respectivas poblaciones (casos de estudio), la eliminación de las muestras atípicas (A02_M1) y muestras no significativas (A02_M5), se procedió con la misma lógica de análisis para determinar si los tres casos de estudio pueden ser considerados una misma población.

Tabla 9 – Resultados de la prueba Post-Hoc de Dunn en caso AD01

Dunn's Post-Hoc comparación – muestra						
Comparación	z	W_i	W_j	p	p_{bonf}	p_{holm}
AD01_M1 – AD01_M2	1.679	25.125	14.714	0.093	0.931	0.931
AD01_M1 – AD01_M3	0.441	25.125	22.556	0.659	1.000	1.000
AD01_M1 – AD01_M4	0.193	25.125	24.000	0.847	1.000	1.000
AD01_M1 – AD01_M5	1.351	25.125	17.250	0.189	1.000	1.000
A D01_M2 – AD01_M3	-1.299	14.714	22.556	0.194	1.000	1.000
AD01_M2 – AD01_M4	-1538	14.714	24.000	0.124	1.000	1.000

AD01_M2 – AD01_M5	-0.409	14.714	17.250	0.683	1.000	1.000
AD01_M3 – AD01_M4	-0.256	22.556	24.000	0.798	1.000	1.000
AD01_M3 – AD01_M5	0.911	22.556	17.250	0.362	1.000	1.000
AD01_M4 – AD01_M5	1.160	24.000	17.250	0.246	1.000	1.000

Los valores de estadística descriptiva permitieron observar que los tres casos de estudio presentaron valores diferentes en su promedio, mediana y moda, en especial el caso A02 con respecto a los otros dos; así mismo, el coeficiente de variación (CoV) es mucho mayor para el caso A02, es el doble que el caso AD01 y el triple del caso L06. La prueba de Shapiro-Wilk mostró que existe normalidad entre los datos de cada muestra por tener valor p > 0.05 (tabla 10).

Tabla 10 – Resultados de prueba Shapiro-Wilk para los tres casos de estudio

	A02	AD01	L06
Shapiro-Wilk	0.963	0.990	0.982
P-value of Shapiro-Wilk	0.827	0.969	0.666

Se observó mayor homocedasticidad entre los casos L06 y AD01; sin embargo, si se apreció un traslape entre el grueso de los datos del caso A02 con respecto a los otros dos (figura 7).

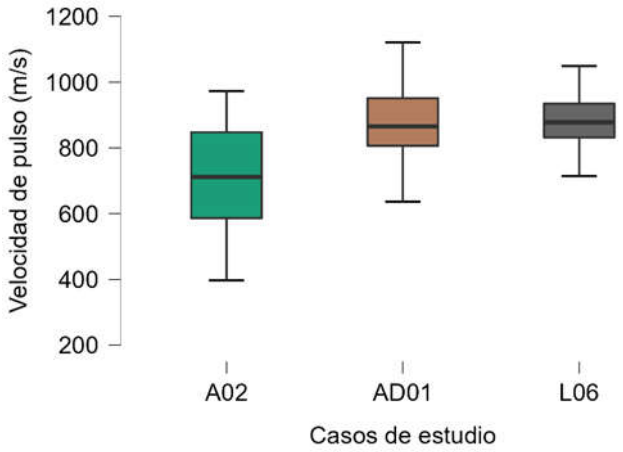

Figura 7 – Gráfico de caja y bigotes comparando los tres casos de estudio

Si bien los tres casos presentaron normalidad y homocedasticidad en sus datos, se decidió realizar la prueba H de Kruskal Wallis, una prueba no paramétrica, ya que, para el caso A02 la cantidad de datos es mucho menor respecto a los otros dos casos de estudio. Los resultados arrojaron un valor p < 0.05; por lo tanto, hay diferencias entre las muestras. Posteriormente, la prueba Post-Hoc de Dunn permitió identificar diferencias muy significativas entre el caso A02 con respecto a los casos L06 y AD01 (tabla 11).

Tabla 11 – Resultados de la prueba Post-Hoc de Dunn para los tres casos de estudio

Dunn's Post-Hoc comparación – caso de estudio						
Comparación	z	W_i	W_j	p	p_{bonf}	p_{holm}
A02 – A D01	-3.012	24.250	52.927	0.003**	0.008**	0.005**
A02 – L 06	-3.286	24.250	55.085	0.001**	0.003**	0.003**
AD01 – L06	-0.348	52.927	55.085	0.728	1.000	0.728

** p < .01

4 CONSIDERACIONES FINALES

- El valor promedio de velocidad de pulso de onda P para los casos de estudio L06, A02 y AD01 fue de 882.80±77.45 m/s (CoV 0.08), 701.14±180.08 m/s (CoV 0.25), 874.71±106.67 m/s (CoV 0.12) respectivamente.
- Los tres casos de estudio no pueden considerarse como parte de una misma población, ya que, hay diferencias muy significativas entre varianzas de los adobes (muestras) del caso A02 con respecto a los casos L06 y AD01.
- Es posible considerar que los casos L06 y AD01 presentan similitudes significativas en cuanto a la velocidad de pulso ultrasónico, y podrían representar casos típicos de esta propiedad para la localidad de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.
- El caso L06 presenta muestras (adobes) más homogéneos que los otros dos casos.
- El caso A02 presenta muestras (adobes) más heterogéneos que los otros dos casos. La muestra A02_M1 con valor promedio de velocidad de pulso ultrasónico de 1435.59±196.42 m/s (CoV 0.13) es una muestra atípica no solo dentro de su caso de estudio, sino tambien con los otros casos, sin embargo, parece indicar que es posible encontrar valores tan altos para la velocidad de pulso ultrasónico, lo cual es un indicativo de una muestra más compacta y menos porosa.

Por otra parte, cuando se compararon los valores promedio de velocidad de pulso ultrasónico de los tres casos de estudio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, con valores obtenidos por otros autores con metodologías similares (tabla 12); se observó que los resultados tienden a ser análogos con los casos donde se evaluaron estructuras correspondientes a viviendas vernáculas; es posible suponer que existen circunstancias para estos contextos que guardan relación con la velocidad de pulso ultrasónico; esto se nota evidente cuando se compara el valor promedio para contextos arqueológicos vs. contexto vernáculo, el primer caso muestra velocidades muy superiores, lo cual, permite considerar los efectos que tiene el tiempo en el proceso de compactación de los componentes constructivos de tierra.

Tabla 12 – Comparación de velocidad de pulso ultrasónico

Autor(s)	Año	Sistema constructivo	Temporalidad	Contexto	Velocidad onda P promedio (m/s)	CoV (%)
Caso L06	2022	adobe	S. XIX-XX	vernáculo	882.80±77.45	8.00
Caso A02	2022	adobe	S. XIX-XX	vernáculo	701.14±180.08	25.00
Caso AD01	2022	adobe	S. XIX-XX	vernáculo	874.71±106.67	12.00
Aguilar et al.	2015	adobe	100-650 d.C.	arqueológico	1350	3.50
Silva et al.	2020	adobe	S. XX	vernáculo	808±23.5	29.08
Silva et al.	2020	adobe	S. XX	vernáculo	720±171	25.13
Silva et al.	2020	adobe	S. XX	vernáculo	647±275	42.50
Silva et al.	2020	adobe	S. XX	vernáculo	723±66	9.12
Sánchez et al.	2021	adobe	-	vernáculo	634.58	ND

Finalmente, se debe extender en el futuro un estudio más amplio para la caracterización de la vivienda vernácula de Santa Cruz Xoxocotlán, los Valles Centrales y el Estado de Oaxaca con el objetivo de obtener una caracterización más precisa y generar un banco de datos que contribuya al entendimiento de este patrimonio construido en tierra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, R.; Saucedo, C.; Montesinos, M.; Ramírez, E.; Morales, R.; Uceda, S. (2015). Caracterización mecánica de las unidades de adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna mediante ensayos de ultrasonido. Seminário Ibero-americano de Arquitectura y Construcción con Tierra (15). Memorias. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca/PROTERRA p. 22-32. https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/07/15-SIACOT-Ecuador-2015.pdf

ASTM D2845-08 (2017). Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. USA: ASTM International

Sánchez, A., Alonso, E., Martínez, W., Navarrete, M., Ruvalcaba, J., Navarro, A., & Mitrani, A. (2021). Characterization of Adobe Blocks: Point-Load Assessment as a Complementary Study of Damaged Buildings and Samples. Heritage, 4, 864-888. doi:10.3390/heritage4020047

Silva, A., Oliveira, I.; Silva, V.; Mirao, J.; Faria, P. (2020). Vernacular Caramel's adobe masonry dwellings-material characterization. International Journal of Architectural Heritage, 1-18. doi:10.1080/15583058.2020.1751343

Simão, M.; Penido, M.; Cruz, L. (2016). El empleo del ultrasonido en tapia de tierra apisonada. Terra Lyon 2016 (pp. 1-9). Lyon: CRAterre.

UNE-EN 12504-4 (2022). Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. España: Asociación Española de Normalización y Certificación.

Velasco, G.; Aguilar, H. (1999). Monografia de Santa Cruz Xoxocotlán, Centro, Oaxaca. Oaxaca: IPN-CIIDIR.

AGRADECIMIENTOS

Al Concejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por la beca 787615, sin la cual no se hubiera llevado a cabo el proyecto de investigación "Caracterización de las propiedades físico-mecánicas y químicas de la construcción de tierra en Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca"; cuya presentación del artículo es parte de los resultados.

Al Laboratorio de Materiales de Tecnologías Sustentables (TechSus) con sede en la ciudad de Oaxaca de Juárez y al Arq. Rolando Barrita por las facilidades otorgadas para el uso de los espacios e instrumental necesario.

A la Dra. Heidy Gómez Barranco y al cuerpo académico de TechSus de la Facultad de Arquitectura “5 de mayo” de la UABJO por las facilidades en el instrumental de pulso ultrasónico.

AUTORES

Juan Antonio Estrella Pozo, maestrante en ciencias de la construcción con acentuación en intervención sustentable del hábitat, por la Universidad Autónoma “Benito Juárez” de Oaxaca; especialista en restauración de sitios y monumentos por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; arquitecto por Universidad Autónoma de Yucatán. Consultor en patrimonio cultural edificado.

Herwing Zeth López Calvo; doctor en ingeniería civil con especialidad en durabilidad en concretos de alto desempeño, por la Universidad de New Brunswick, Canadá; maestro en ingeniería en construcción, por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; arquitecto por la Universidad Autónoma “Benito Juárez” de Oaxaca. Miembro del Cuerpo Académico de Tecnología y Sustentabilidad de la Facultad de Arquitectura “5 de mayo” de la UABJO. Profesor e investigador por la UABJO.