

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DEL ADOBE DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO SOMETIDO A ENVEJECIMIENTO ACELERADO

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF ADOBE FROM THE HISTORIC CENTER OF QUITO SUBJECTED TO ACCELERATED AGING

Diego Escalante¹ & José Luis Piñeiros^{2*}

Recibido: 31 de octubre 2021 / Aceptado: 23 de junio 2022

DOI 10.26807/ia.v10i2.226

Palabras clave: adobe, cohesión, construcciones patrimoniales, envejecimiento acelerado, fricción, resistencia mecánica

Keywords: adobe, accelerated aging, cohesion, friction, heritage buildings, mechanical resistance

RESUMEN

El adobe es una mezcla de suelo limo-arcillosos, fibras vegetales, materia orgánica y agua, la cual es endurecida al aire libre y forma unidades mampostería

¹ Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador (descalante815@puce.edu.ec)

² Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Escuela de Química, Quito, Ecuador (*correspondencia: jlpineiros@puce.edu.ec)

individuales. Estas a su vez en conjunto forman sistemas de muros portantes. Con el objetivo de comprobar la influencia y posibles efectos físicos y mecánicos en ladrillos de adobe del centro histórico de Quito, se realizó un proceso de envejecimiento acelerado de muestras obtenidas del antiguo edificio de Ferrocarriles del Ecuador, en una cámara de simulación climática. Concluido este proceso se realizaron ensayos de caracterización física del material que compone la matriz de suelo del adobe, ensayos mecánicos de compresión y de resistencia al corte mediante ensayos triaxiales U-U, para investigar la existencia de variaciones en sus propiedades físicas o mecánicas. Los resultados mostraron que a pesar de la exposición constante a humedad y radiación las propiedades mecánicas y físicas del suelo que compone la matriz del adobe permanecieron inalteradas. El suelo empleado se clasificó como un ML (limo de baja plasticidad), con una densidad seca de $15,29 \text{ kN/m}^3$ y una humedad natural del 2,90 %.

ABSTRACT

Adobe is a mixture of silty-clay soil, vegetable fibers, organic matter, and water, which is air-dried and molded into individual masonry units. These in turn together form load-bearing wall systems. To test the influence and possible physical and mechanical effects on adobe bricks from the historic center of Quito, an accelerated aging process was carried out on samples obtained from the old Ecuador Railroad Company building, in a climatic simulation chamber. After this process, physical characterization tests of the material that composes the adobe soil matrix and mechanical compression and shear strength tests by means of U-U triaxial tests were carried out to investigate the existence of variations in their physical or mechanical properties. The results showed that despite constant exposure to moisture and radiation, the mechanical and physical properties of the soil that composes the adobe matrix remained unaltered. The soil used was classified as an ML (low plasticity silt), with a dry density of 15.29 kN/m^3 and a natural moisture content of 2.90%.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial aproximadamente un 30 % de la población habita en viviendas construidas a base de tierra, así como un 70 % de las construcciones con tierra en Latinoamérica tienen un carácter histórico y un 50 % de estas tiene una función residencial (Gandreau & Delboy, 2012).

El sistema estructural de las edificaciones patrimoniales construidas con tierra consiste en muros portantes, los cuales resisten la acción de cargas gravitacionales y de servicio, constituidas por unidades de mampostería colocadas en diferentes formas y que funcionan a partir de la trabazón mecánica entre sí (Rivera Torres & Muñoz Díaz, 2005).

Distintas evaluaciones llevadas a cabo por el Municipio de Quito determinan un cambio en los parámetros atmosféricos de la ciudad debido a múltiples factores, entre

ellos el crecimiento de la población, cambios en el uso del suelo y el incremento del parque automotor (Atlas Ambiental Quito Sostenible 2016, 2016).

Estas variaciones de las condiciones atmosféricas y climáticas pueden afectar las capacidades mecánicas e integridad estructural de una edificación. En Colombia se han llevado a cabo investigaciones para la caracterización de unidades de adobe sometidas a radiación UVA cuyo efecto en unidades de adobe viejo es casi inexistente (Uribe Kaffure et al., 2015).

Este trabajo analizó la influencia y posibles efectos en la resistencia mecánica y características físicas en ladrillos de adobe del centro histórico de Quito, para recomendar posibles medidas de protección, preservación y restauración.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Instituto Nacional de Patrimonio donó los adobes para la investigación

a partir del antiguo edificio de Ferrocarriles del Ecuador, ubicado en la

calle Bolívar Oe5-43, con rumbo oeste-este, cerca de la Plaza de San Francisco, luego de una remodelación a finales del 2017.

Se entregaron cinco bloques iniciales de dimensiones aproximadas de 40x20x10 cm en buenas condiciones y uno más pequeño, el cual media aproximadamente 20x20x10 cm. Para fines de investigación, los cinco bloques corresponden a un mismo lote.

Se procedió a cortar las muestras iniciales en probetas cúbicas de 10x10x10 cm para los ensayos de compresión y para tallas triaxiales. En total, de cada bloque inicial de 40x20x10 cm se obtuvieron ocho muestras de 10x10x10 cm, 40 muestras en total, de las cuales 25 muestras cúbicas se sometieron a ensayos de compresión y 15 para ensayos triaxiales se tallaron de forma cilíndrica, con una relación altura/diámetro igual a dos, con un diámetro de 5 cm aproximadamente.

El material sobrante fue empleado para las caracterizaciones físicas de granulometría, clasificaciones SUCS y gravedad específica.

La Imagen 1 muestra el estado original de los bloques de adobe.



Imagen 1. Muestras originales de adobe

Una vez cortadas y talladas las muestras para llevar a cabo la caracterización de unidades de adobe sometidas a envejecimiento acelerado, se colocaron dentro de una cámara BIO-BASE BJPX-A450 la cual puede ajustar los niveles de humedad, temperatura y radiación ultravioleta en ciclos de ensayo simulando condiciones atmosféricas a las que se expone un material en condiciones de servicio.

Las condiciones y el tiempo de cada ciclo han sido determinados por la investigación previa realizada por Alarcón (2017), mediante el software Solver, que permite programar los diferentes parámetros de temperatura, humedad y radiación de la máquina,

que supondrían un período de exposición a cambios climáticos, en Quito, en un período de 20 años a partir del año 2019 (Pazos Castillo, 2018).

De forma resumida, el proceso de envejecimiento consiste en:

- Primera fase: La temperatura se mantiene constante a 25 °C, con una humedad relativa del 70 % por 1200 minutos (20 horas).
- Segunda fase: La temperatura de la cámara aumenta a 35 °C y la humedad relativa disminuye al 50 % por 800 minutos (13 horas).
- Tercera fase: La temperatura desciende a 20 °C con una humedad relativa del 50 % para mantenerse así durante 1250 minutos (20,83 horas).

Un resumen de la equivalencia cronológica de varios ciclos de estas fases se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Ciclos de envejecimiento acelerado

Tiempo dentro de la cámara (días)	Envejecimiento acelerado simulado (años)
0,00	0
19,25	5
38,50	10
57,75	15
77,00	20

Una vez concluido este proceso, las muestras fueron ensayadas en el Laboratorio de Materiales de la PUCE, de acuerdo con las siguientes normas:

NORMAS:

- Relaciones Fundamentales–ASTM D7263-09.
- Gravedad Específica–Norma ASTM D-854.
- Clasificación SUCS (Unified Soil Classification System)–ASTM D-2487.
- Granulometría por hidrómetro – ASTM D-7928
- Resistencia a la compresión–NTE INEN 3049-5.
- Resistencia al corte–Ensayo Triaxial U-U – ASTM D2850-15.

RESULTADOS

Los materiales encontrados en la caracterización física del adobe se pueden apreciar en las Imágenes 2 a 5.



Imagen 2. Material retenido en el tamiz 4,75 mm (#4)



Imagen 3. Material retenido en el tamiz 2 mm (#10)



Imagen 4. Material retenido en el tamiz 0,425 mm (#40)

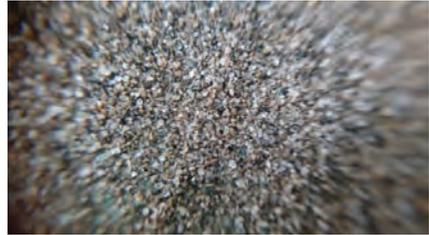


Imagen 5. Material retenido en el tamiz 75 µm (#200)

De acuerdo con los diferentes tamices analizados podemos observar que se tratan de minerales volcánicos -probablemente andesitas y pómez- y ladrillo machacado, en las aberturas de tamiz #4 y #2. Los dos últimos tamices contienen arenas cuarzosas.

En función de las masas retenidas en los tamices podemos caracterizar al suelo empleado en el adobe como un 3,79 % de grava, 28,6 % arena y 67,61 % finos. Se clasifica como un suelo tipo CL-ML, limo-arcilloso con arena, según la carta de plasticidad y su granulometría de acuerdo con la norma ASTM D-2487, en la Figura 1.

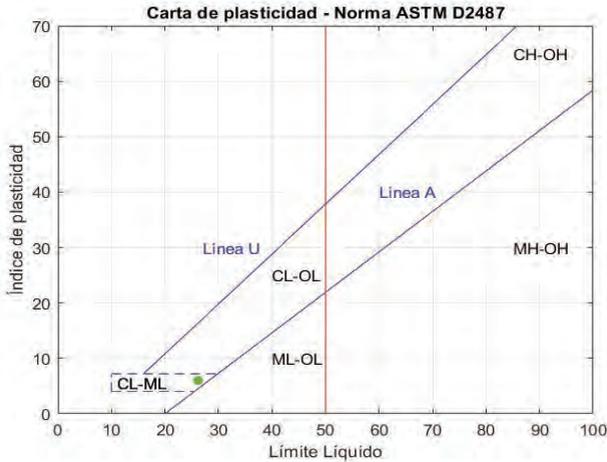


Figura 1. Carta de plasticidad – Norma ASTM D2487

La densidad seca del adobe fue de $15,29 \text{ kN/m}^3$ en promedio, de igual forma la humedad natural promedio del adobe fue de 2,90 %. Por su parte, la gravedad específica de las partículas sólidas que conforman la matriz de adobe fue de 2,65 en promedio, con una relación de vacíos de 0,68.

Los resultados de los límites de consistencia presentaron un límite líquido (LL) promedio de 26,0 %, mientras que el límite plástico (LP)

promedio fue de 20,2 %, teniendo por consiguiente un índice de plasticidad (IP) del 5,8 %.

En el caso de la resistencia a la compresión se aprecia en la Figura 2, una tendencia de aumento de la resistencia a la compresión en los cinco años de envejecimiento acelerado, para luego decaer de forma abrupta y mantenerse a niveles similares a los del material sin exposición al envejecimiento acelerado.

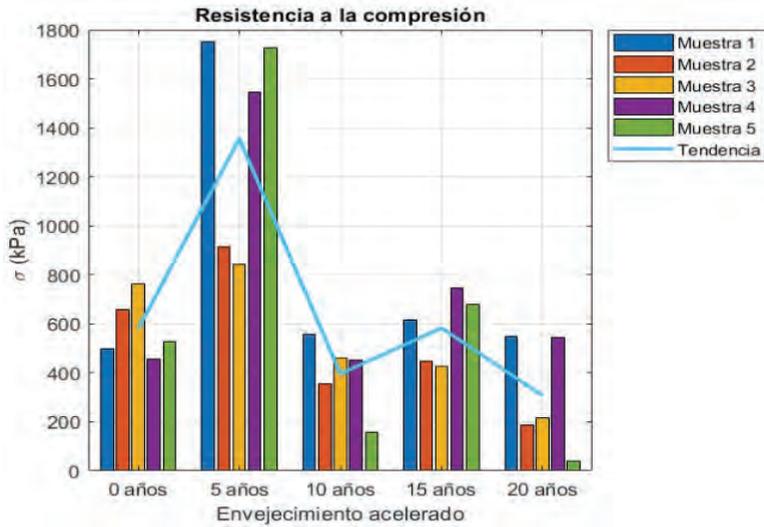


Figura 2. Resistencia a la compresión. Resultados obtenidos

La correlación múltiple realizada, refleja un coeficiente de determinación $R=0,42$, lo que indica una bondad de ajuste baja entre los resultados obtenidos para cada intervalo de envejecimiento acelerado, presentando un esfuerzo de rotura promedio de 644 kPa y una dispersión de 218,6 kPa para las 25 muestras que se sometieron a ensayos de compresión.

En la Imagen 6 podemos observar los ángulos de falla y los tipos de falla - por corte de la muestra- en los ensayos triaxiales realizados en muestras que no se sometieron a envejecimiento acelerado.

0 años de envejecimiento acelerado



Imagen 6. Ángulos de falla observados en el triaxial U-U

Se midió el ángulo de falla presentado en cada probeta ensayada y finalmente, se trazó la línea de falla con los círculos de Mohr obtenidos

para las presiones de confinamiento de 25, 50 y 100 kPa, (Figura 3), así como la línea del ángulo de falla respectivo para cada grupo.

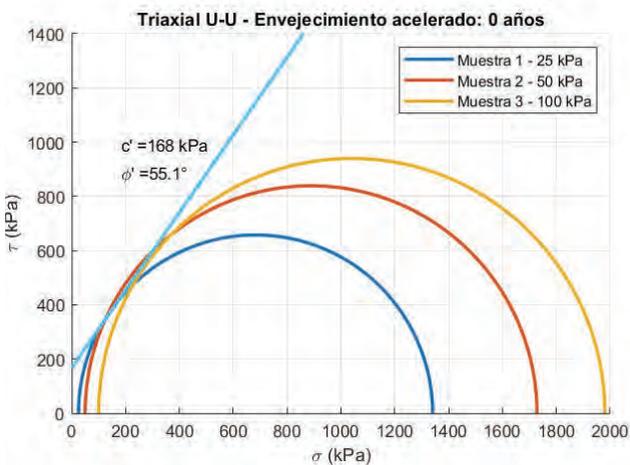


Figura 3. Círculos de Mohr

La tendencia del ángulo de fricción que se presenta en la Figura 3. es de mantener sus valores relativamente constantes en los cuatro primeros ciclos de envejecimiento acelerado, y

aumentar en el último ciclo, como se aprecia en las Figuras 4 y 5, para luego decaer y sufrir una ligera recuperación hasta sus valores iniciales.

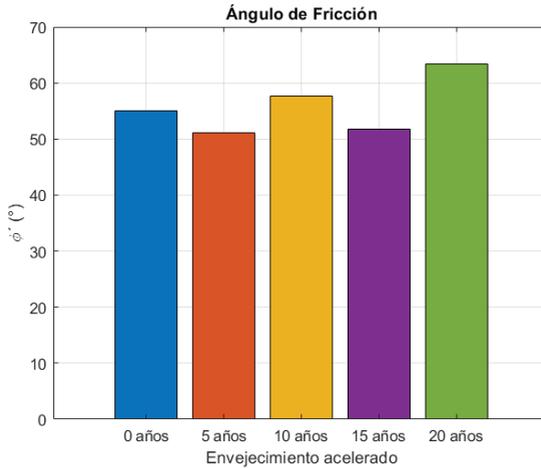


Figura 4. Ángulos de fricción - Resultados

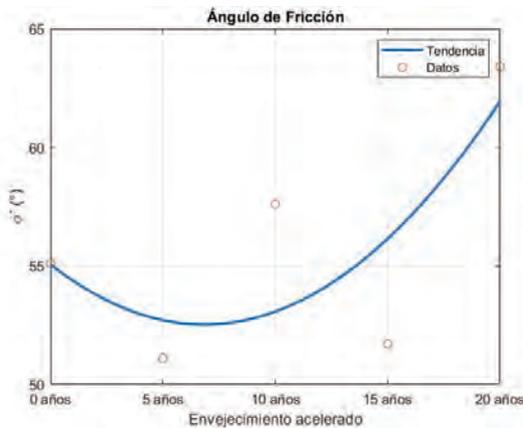


Figura 5. Ángulo de fricción - tendencia

La tendencia en la cohesión del adobe es al descenso como se observa en las Figuras 6 y 7. Finalmente, los resultados de los ensayos triaxiales se resumen en la Tabla 2.

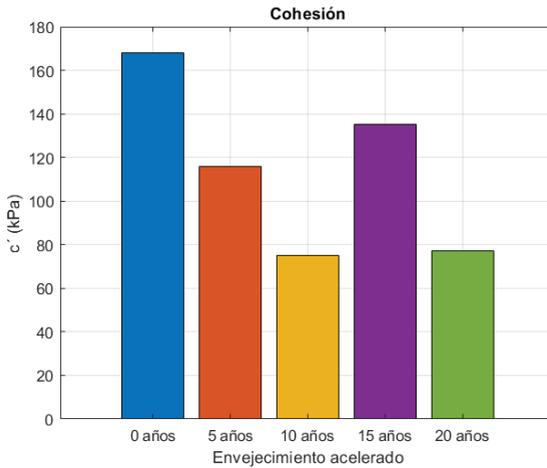


Figura 6. Cohesión - Resultados

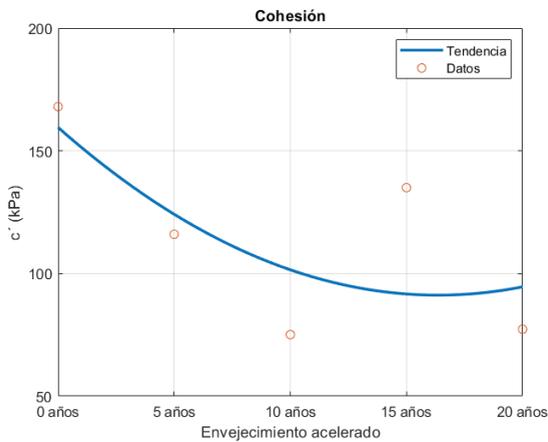


Figura 7. Cohesión - Tendencia

Tabla 2. Resultados ensayos triaxiales

Envejecimiento acelerado simulado (años)	c' (kPa)	ϕ' (°)
0	168	55,1
5	116	51,1
10	75,1	51,6
15	135	51,7
20	77,3	63,4

DISCUSIÓN

La granulometría del adobe presenta una composición mayoritaria de suelos finos, con una porción de arena y gruesos menores, que representan un 32,39 % de su masa seca.

Por otra parte, el comportamiento de la resistencia mecánica a la compresión del adobe es una variable influenciada directamente por su grado de humedad.

Así también, el aumento de la humedad tiende a disminuir la resistencia mecánica del suelo en general (Das & Sobhan, 2014), lo que pudo influir en el comportamiento mecánico a la compresión evidenciado en los últimos ciclos de envejecimiento, por su mayor período de exposición, aun-

que la humedad de las muestras oscilaba en valores cercanos al 3 %.

Se escogió un método de ensayo triaxial U-U (no consolidado-no drenado) y no saturado en el caso de esta investigación, puesto que en condiciones naturales el adobe presenta una muy baja humedad, razón por la cual se puede considerar que el incremento de la presión de poro causado por la fase líquida del adobe es despreciable por su baja humedad, además de que una condición de saturación en el adobe causaría la disgregación del material, y por consiguiente la pérdida de sus propiedades mecánicas (Das & Sobhan, 2014). Otra de las razones por las cuales se realizó el ensayo triaxial U-U, es que, a diferencia del ensayo de

corte directo, el suelo no es forzado a fallar en un plano necesariamente horizontal, ni se presenta una distribución de esfuerzos irregular entre los bordes y el centro de la muestra sometida a un corte directo.

El ángulo de fricción del suelo determinado por las pruebas de laboratorio está influenciado por dos factores principales. La energía aplicada a un suelo por la carga externa se utiliza tanto para superar la resistencia a la fricción entre las partículas del suelo como para expandir el suelo contra la presión de confinamiento. Los granos del suelo tienen forma irregular y deben levantarse uno sobre otro para que se produzca el deslizamiento.

Este comportamiento se llama dilatación. El otro factor que afecta el ángulo de fricción del suelo es el grado de acomodación o entrelazamiento de las partículas, dado por la densidad relativa del material.

De aquí podemos inferir, que la fricción entre las partículas granulares del adobe sufre poca o ninguna alteración, ya que la estructura básica de los compuestos de sílice permanece

relativamente constante durante el envejecimiento acelerado, dada la buena tolerancia de los silicatos a condiciones climáticas extremas de acuerdo a investigaciones previas realizadas (Salgado Gaspar, 2020).

Sin embargo, los ciclos consecutivos de humedecimiento, secado y gradientes térmicos que se generan en las condiciones *in-situ* del adobe generan grietas y fisuras locales en el material que afectan el grado de acomodación entre partículas separadas por las grietas o fisuras del adobe. Así también la localización del adobe en la estructura durante su vida útil puede generar efectos de mayor concentración de esfuerzos por el uso de la edificación, cambios de temperatura, eventos naturales, entre otros, los que a su vez generan fisuras y grietas internas en la matriz de suelo.

El efecto que tiene el confinamiento aplicado en el adobe se puede describir por el comportamiento curvilíneo de la envolvente de los círculos de Mohr (Figura 3) pues al aplicar una presión de confinamiento mayor, se tiende a obtener ángulos de fricción más reducidos (Das, 2008).

Sin embargo, la variabilidad de los materiales empleados en la elaboración del adobe sobre todo las partículas mayores al tamiz # 10, (Imagen 3), la manipulación de las muestras y el método de ensayo aplicado pueden explicar las variaciones de los ángulos de fricción observadas entre períodos de envejecimiento acelerado.

La tendencia de los valores de cohesión obtenidos (Tabla 2) podría tener una explicación similar al caso de los ensayos de compresión simple,

donde la cohesión química de los óxidos de calcio y magnesio presentes en la fracción de finos que tiene el adobe (67,61 %) puede verse modificada con la presencia de humedad que modifica su atracción electromagnética (Salgado Gaspar, 2020), por lo cual el parámetro de control para evaluar y comparar la cohesión sería el grado de humedad y saturación de la muestra ensayada. En forma general, los ensayos triaxiales se realizaron en muestras con un 2 % a 3 % de humedad y una saturación entre el 7 % y 10 %.

CONCLUSIÓN

Los análisis de bondad realizados en los resultados obtenidos para los ensayos de resistencia mecánica y resistencia al corte, mostraron que las propiedades mecánicas del adobe no fueron influenciadas por el proceso de envejecimiento, por la baja correspondencia entre la pérdida de resistencia mecánica por efectos del envejecimiento acelerado.

Al adoptar un criterio de falla de Mohr-Coulomb se pudo determinar que la resistencia al corte viene dada por la cohesión del material, puesto

que el ángulo de fricción no mostró variaciones significativas entre las muestras antes y después del envejecimiento acelerado.

Las propiedades mecánicas del adobe estudiado en este presente trabajo no son extrapolables a ninguna otra estructura y/o investigación, puesto que el adobe es un material elaborado artesanalmente con materiales *in-situ*, sin un procedimiento, ni proporciones estandarizadas.

Se recomienda profundizar el estudio respecto al comportamiento del módulo elástico del adobe y resistencia mecánica, en función de la humedad y el grado de saturación de la muestra.

LISTA DE REFERENCIAS

- Atlas Ambiental Quito Sostenible 2016*. (2016). Municipio de Quito. <http://www.quito.ambiente.gob.ec/ambiente/index.php/atlas-ambiental>
- D18 Committee. (2020a). *Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D2166_D2166M-16
- D18 Committee. (2020b). *Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0854-14>
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). *Principles of geotechnical engineering*. Cengage learning.
- Gandreau, D., & Delboy, L. (2012). *Inventory of earthen architecture* (1.^a ed.). Unesco.
- INEN. (2020). *NTE INEN 3049*. INEN. <http://apps.normalizacion.gob.ec/download/index.php/buscar>
- López Alarcón, J. E. (2017). *Análisis, diseño y desarrollo de un solver para variables climáticas. Datos de estudio: Quito Distrito Metropolitano*. <http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/14549>
- Pazos Castillo, C. A. (2018). *Determinación del grado de deterioro producido por la acción del clima en diferentes materiales de construcción utilizados en edificaciones de la ciudad de Quito* [Grado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Rivera Torres, J. C., & Muñoz Díaz, E. E. (2005). Caracterización Estructural de Materiales de Sistemas Constructivos en Tierra: El Adobe. *Revista Internacional de Desastres naturales, accidentes e infraestructura civil*, 5(2), 135-148.

Salgado Gaspar, B. (2020). *Estudio del grado de deterioro por envejecimiento en materiales de construcción (adobe, ladrillos y tejas) del Centro Histórico de Quito*. <http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/18073>

Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). (s. f.). Recuperado 27 de abril de 2022, de <https://www.astm.org/d2487-17.html>

Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. (s. f.). Recuperado 27 de abril de 2022, de <https://www.astm.org/d7928-21e01.html>

Uribe Kaffure, C., Ramos Cañón, A. M., & Camacho Tauta, J. F. (2015). Caracterización de unidades de adobe sometidas a radiación UVA. *Apuntes. Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 28(1), Article 1. <https://doi.org/10.11144/javeriana.apc28-1.cuas>