



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
Laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”



CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE ADOBES DE LA HUACANA Y TURICATO, REGIÓN TIERRA CALIENTE, MICHOACÁN, MÉXICO

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA CIVIL

PRESENTA:
MELISSA RUIZ MENDOZA

ASESOR DE TESIS:
M.I.T. ERNESTO ALBERTO NÚÑEZ GUZMÁN

CO-ASESORA INTERNA DE TESIS:
ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

CO-ASESOR EXTERNO DE TESIS:
ADRIÀ SÁNCHEZ CALVILLO

Morelia, Michoacán, México, a abril de 2022



DEDICATORIAS

Esta tesis y este título de Ingeniera Civil se lo dedico a mi mamá, Edelmira Mendoza Pérez.

Para ti, mamá, que has sido un modelo a seguir para mí, porque has sabido luchar contra la adversidad, porque te atreviste a luchar contra una sociedad prejuiciosa y machista y lograste sacar adelante los negocios y a tus tres tesoros.

Esto es para ti, que a pesar de no ser la carrera que te hubiera gustado para mí, respetaste mi decisión y la apoyaste.

¡TE AMO!



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la vida y los recursos que me permitieron cumplir esta meta, y que me ha bendecido con todas las personas que han formado parte de este camino.

Gracias a mi familia que son la parte más importante de mi vida y mi soporte. A mi mamá Edelmira Mendoza Pérez, por tu amor y apoyo incondicional, por mantenernos unidos a pesar de las dificultades, por esa fuerza que tienes y nos impulsa a mí y a mis hermanos para mejorar y superarnos. Gracias por llenar mi vida de alegría y risas. A mi papá Rafael Ruiz Silva, gracias por compartirme tu sabiduría, tu apoyo económico y tu amor. A mis hermanos Rafael Ruiz Mendoza y Alejandro Ruiz Mendoza por el amor que me dan, la paciencia que tienen con mi mal carácter y por enseñarme esa humildad que a veces me falta. Gracias por la unión tan fuerte que tenemos y de la cual muchos se sorprenden y admiran.

A mi tío Erasto Mendoza Pérez y mi tía Andrea Alvarado Aguilar, por ese apoyo incondicional que siempre me han dado desde que llegue a Morelia, por abrirme las puertas de su casa y recibirme con tanto amor.

A mis abuelos, tíos y primos, por ser parte de este camino que me ha traído hasta aquí y que me ha formado como persona y mujer.

A mi novio Adrián Patiño Mejía que tiene una fe ciega en mi capacidad a pesar de lo difícil que puede ser esta profesión para una mujer, gracias por el apoyo y el amor.

A mis amigos, compañeros y profesores del kínder, primaria, secundaria, preparatoria y universidad, por ser parte de este camino de arduo trabajo, desveladas, risas, diversión y más. Y sobre todo gracias a todos mis amigos que a pesar de la distancia, tiempo o circunstancias me han seguido brindando su amistad.

A: M. I. T. Ernesto Alberto Núñez Guzmán, Dr. Elia Mercedes Alonso Guzmán, M. I. T., Cindy Lara Gómez, Ing. J. Jesús Zauno Zamudio por abrirme las puertas del Laboratorio y permitir mi desarrollo profesional y la colaboración con ustedes y todos los que están ahí. El laboratorio se ha convertido en mi segundo hogar y sin duda lo considero como la mejor parte de mi etapa universitaria, porque he conocido a personas excepcionales de manera profesional y personal.

Al Ing. Félix Abel Tobón Cornejo por los permisos necesarios y conseguir las muestras patrimoniales estudiadas en esta investigación.



UMSNH
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
“CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE ADOBES DE LA HUACANA Y TURICATO,
REGIÓN TIERRA CALIENTE, MICHOACÁN, MÉXICO”



A: Ing. Isaías Trujillo Calderón, M. I. T. Noel Díaz González y Dr. Mauricio Arreola Sánchez, por el trabajo de campo de búsqueda de las Haciendas, y por la extracción de núcleos, y de piezas, así como su consiguiente traslado al Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil.

Al Ing. Marco Miguel Granados Ceras., M. Adria Sánchez Calvillo, M. Sandra del Carmen Arguello Hernández, Dr. Cipriano Bernabé Reyes que me apoyaron durante el proceso de esta investigación, desde la experimentación hasta la revisión de tesis. Gracias infinitas por ese apoyo.

A mis compañeros de trabajo de todas las áreas en el laboratorio por su apoyo y conocimientos que me han compartido para poder desarrollar esta tesis.

¡GRACIAS A TODOS POR SER PARTE DE ESTE CAMINO!



RESUMEN

El adobe es una técnica constructiva ancestral que cuenta con grandes cualidades, físicas, económicas y ecológicas, y culturalmente, esas construcciones representan nuestras raíces, lo que fuimos y lo que somos. Sin embargo, esta técnica constructiva fue desplazada y remplazada por los materiales industrializados como el concreto. Pero hoy en día la situación ambiental a la que nos enfrentamos nos obliga a buscar materiales sustentables, haciéndonos retomar el uso de la tierra como material para la construcción.

En el presente trabajo se realizó el estudio de caracterización de las propiedades físico-mecánicas de dos muestras de adobe procedentes de haciendas de La Huacana y Turicato, municipios pertenecientes al estado de Michoacán en México. La experimentación fue realizada en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” en Morelia, Michoacán. Se realizaron pruebas destructivas (D) y no destructivas (ND) en especímenes cilíndricos y cúbicos en las muestras de adobe. Los ensayos practicados en dichas muestras fueron los siguientes: humedad relativa, colorimetría, frecuencia fundamental longitudinal, velocidad de pulso ultrasónico, módulo de elasticidad estático, esfuerzo de ruptura a la compresión, esfuerzo de ruptura a la flexión, distribución granulométrica, límites de Atterberg, esfuerzo por método de carga puntual, potencial de hidrogeno, triaxial no drenada-no confinada, humedad actual, Fagerlünd o sortividad, y resistividad eléctrica.

Uno de los factores que más influyo en los resultados de esta investigación fue la composición de los adobes, específicamente el tipo y cantidad de la fibra orgánica. Esta influyo significativamente en las deformaciones, el esfuerzo de ruptura compresión simple, módulo ruptura y hasta en la capilaridad.

Los resultados de esta investigación permiten un acercamiento al desarrollo de normativas para construcciones con adobe más seguras y durables, y que cumplan con el confort, estética y exigencias de la sociedad actual.



ABSTRACT

Adobe is an ancestral construction technique that has great physical, economic and ecological qualities, and culturally, these constructions represent our roots. However, this construction technique was replaced by industrialized materials such as concrete. The current environmental situation we face forces us to look for sustainable materials, making us return to the use of earth as a material for construction.

This assignment presents the characterization study of the physical-mechanical properties of two samples of adobe from haciendas of La Huacana and Turicato, municipalities belonging to the state of Michoacán in Mexico. The experimentation was carried out in the Laboratory of Materials “Ing. Luis Silva Ruelas” in Morelia, Michoacán. Destructive (D) and nondestructive (ND) tests were performed on cylindrical and cubic specimens in the adobe samples. The tests carried out on these samples were the following: relative humidity, colorimetry, fundamental longitudinal frequency, ultrasonic pulse velocity, static modulus of elasticity, compressive strength, flexural strength, particle size distribution, Atterberg limits, stress by point load method, hydrogen potential, undrained-unconfined triaxial, current humidity, Fagerlünd or sortivity, and electrical resistivity.

One of the factors that most influenced the results of this research was the composition of the adobes, specifically the type and amount of organic fiber. This significantly influenced the deformations, the simple compression rupture effort, rupture modulus and even capillarity.

The results of this research allow an approach to the development of regulations for safer and more durable adobe constructions, and that satisfy the comfort, aesthetics and demands of today's society.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
INTRODUCCIÓN	XVIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Construcción y Arquitectura en Tierra.....	1
1.1.1. La Tierra Como Material De Construcción	1
1.1.2. Antecedentes De La Construcción Y Arquitectura En Tierra.....	2
1.1.3. Propiedades De La Tierra Como Material De Construcción	8
1.1.4. Técnicas De Construcción En Tierra	9
1.1.4.1. Tapia pisada.....	9
1.1.4.2. Bajareque	10
1.1.4.3. Cob.....	11
1.1.4.4. Superadobe.....	11
1.1.4.5. BTC – Bloque de Tierra Comprimida	12
1.1.4.6. Adobe.....	12
1.2. Procedencia De Las Muestras	16
1.2.1. La Huacana.....	16
1.2.2. Turicato	17



2. METODOLOGÍA	19
2.1. Muestreo	20
2.2. Labrado.....	20
2.3. Humedad Relativa (ND).....	23
2.4. Colorimetría (ND)	24
2.5. Frecuencia Fundamental Longitudinal (ND).....	25
2.6. Velocidad de Pulso Ultrasónico (ND).....	26
2.7. Módulo de Elasticidad Estático (D)	27
Cabeceado	28
Ensaye	29
2.8. Esfuerzo de Ruptura a Compresión Simple (D).....	31
2.9. Esfuerzo de Ruptura a la Flexión (D).....	32
2.10. Distribución Granulométrica (D).....	33
2.11. Límites de Atterberg (D).....	36
2.12. Esfuerzo por Método de Carga Puntual (D)	41
2.13. Potencial de Hidrogeno - pH (D).....	43
2.14. Triaxial Undrained Unconfined, UU (D).....	44
2.15. Humedad Actual (ND).....	46
2.16. Fagerlünd o Sortividad o Absorción Capilar (ND).....	47
2.17. Resistividad Eléctrica, Re (ND).....	50
3. RESULTADOS.....	52
3.1. Humedad Relativa (ND).....	52
3.2. Colorimetría (ND)	53



3.3.	Frecuencia Fundamental Longitudinal (ND).....	55
3.4.	Velocidad de Pulso Ultrasónico (ND).....	57
3.5.	Módulo de Elasticidad Estático (D)	58
3.6.	Esfuerzo de Ruptura a Compresión Simple (D)	63
3.7.	Esfuerzo de Ruptura a la Flexión (D).....	66
3.8.	Distribución Granulométrica (D)	68
3.9.	Límites de Atterberg (D)	72
3.10.	Esfuerzo por Método de Carga Puntual (D)	74
3.11.	Potencial de Hidrogeno, pH (D)	76
3.12.	Triaxial Undrained Unconfined, UU (D).....	77
3.13.	Humedad Actual (ND).....	82
3.14.	Fagerlünd o Sortividad o Absorción Capilar (ND).....	83
3.15.	Resistividad Eléctrica, Re (ND).....	83
4.	CONCLUSIÓN.....	85
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	88



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Arquitectura de tierra en el mundo. Fuente: Gatti, 2012	1
Ilustración 2. Representación del Templo Göbekli Tepe. Fuente: National Geographic	3
Ilustración 3. Ruinas de Göbekli Tepe. Fuente: National Geographic	3
Ilustración 4. Ruinas de Çatal Hüyük. Fuente: National Geographic.	4
Ilustración 5. Bóvedas del templo de Ramsés II, en Gourná, Egipto. Fuente: José Lull.	4
Ilustración 6. Ciudad de Arge Bam, Irán. Fuente: Iran Negin Travel.....	4
Ilustración 7. La Gran Muralla China. Fuente: National Geographic.	5
Ilustración 8. La Pirámide del Sol en Teotihuacán, México. Fuente: Patu Soto.....	6
Ilustración 9. Paquimé en Casas Grandes, Chihuahua. Fuente: Eduardo Pio Gamboa Carrera.....	6
Ilustración 10. La Alhambra de Granada, España. Fuente: desconocida.....	6
Ilustración 11. Ciudad de Shibam, Yemen. Fuente: Jean Paul Peters.....	6
Ilustración 12. Chan-Chan, Perú.	7
Ilustración 13. Mezquita, Kashan, Irán. Fuente: desconocida.	7
Ilustración 14. La Gran Mezquita, Mopti, Malí. Fuente: desconocida.	7
Ilustración 15. Técnica de tapia pisada.	10
Ilustración 16. Técnica de bajareque. Fuente: desconocida.....	10
Ilustración 17. Técnica de cob. Fuente: Gaurav Sood.	11
Ilustración 18. Técnica de superadobe. Fuente: Megan Frye.....	12
Ilustración 19. Técnica de BTC. Fuente: Emily Vasquez.....	12



Ilustración 20. Técnica de adobes.	Fuente: Ignacio Gómez Pulido. 13
Ilustración 21. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Fuente. MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS I..... 15	
Ilustración 22. Hacienda en Santa Cruz de Morelos, Turicato. Fuente: Adrián Solís Morelos 16	
Ilustración 23. Macro y micro localización de La Huacana, Michoacán, México. Fuente: Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México. 17	
Ilustración 24. Macro y micro localización de Turicato, Michoacán, México. Fuente: Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México. 18	
Ilustración 25. Labrado de las muestras en la cortadora. Fuente: M. Ruiz-Mendoza. 21	
Ilustración 26. Cilindros de 10cm de diámetro labrados en cortadora. Fuente: M. Ruiz- Mendoza..... 21	
Ilustración 27. Cubos y vigas labrados en cortadora. Fuente: M. Ruiz-Mendoza. 21	
Ilustración 28. Labrado del cilindro (paso No.2). Fuente: M. Ruiz-Mendoza..... 22	
Ilustración 29. Labrado del cilindro (paso No.3). Fuente: M. Ruiz-Mendoza..... 22	
Ilustración 30. Labrado de cilindro (paso No. 4). Fuente M. Ruiz-Mendoza. 22	
Ilustración 31. Cilindro de 3.5cm de diámetro. Fuente M. Ruiz-Mendoza. 22	
Ilustración 32. Determinación de la humedad relativa con el equipo Contractor’s Moisture Meter, BD-2100, Delmhorst. Fuente: M. Ruiz-Mendoza..... 24	
Ilustración 33. Diagrama de los espacios de colores L^* , a^* , and b^* . El eje L^* o eje de luminosidad va de 0 (negro) a 100 (blanco), mientras que el los ejes a^* y b^* van de - 128 a 127. En los casos en los que $a^* = b^* = 0$ son acromáticos. Por lo tanto, L^* representa la escala acromática de grises, Martínez Molina et al., 2018 25	
Ilustración 34. Espécimen colocado en el equipo E-METER de James Instruments para la obtención de la frecuencia longitudinal. Fuente: M. Ruiz-Mendoza. 26	
Ilustración 35. Ajuste del equipo en el centro de la cara del espécimen. Fuente: M. Ruiz-Mendoza. 26	



Ilustración 36. VPU (medición directa) con el equipo V METER MK IV. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	27
Ilustración 37. Colocación de cinta masking alrededor de la cara que se va a cabecear. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	29
Ilustración 38. Vertido de Azufre dejando una capa que cubra todas las irregularidades. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	29
Ilustración 39. Lijado del azufre para eliminar todas protuberancias u oquedades. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	29
Ilustración 40. Espécimen cabeceado en una de sus caras. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	29
Ilustración 41. Instalación del deformímetro con el espécimen al centro. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	30
Ilustración 42. Ensaye del módulo de elasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	30
Ilustración 43. Espécimen cubico (T-C2) siendo ensayado a compresión simple. El espécimen se encontraba en muy buen estado, no se observó ninguna falla previa al ensayo y su ausencia de material es básicamente nula. Fuente: M. Ruiz-Mendoza. ...	32
Ilustración 44. Viga marcada y colocada en la prensa para el ensayo de flexión. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	33
Ilustración 45. Muestra en reposo durante 12h. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	34
Ilustración 46. Lavado de la muestra para eliminar los finos y dejar únicamente las arenas. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	35
Ilustración 47. Vertido de la muestra en el juego de mallas. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	35
Ilustración 48. Cribado manual. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	36
Ilustración 49. Muestra cribada de la Huacana Liso. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	36
Ilustración 50. Copa de Casagrande con una muestra de suelo de La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	38
Ilustración 51. Lectura de todas las masas secas de las determinaciones de LL y LP. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	38



Ilustración 52. CV y CL completamente en estado seco. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	39
Ilustración 53. Colocación de cilindros sobre 2 dedos y presionando ligeramente para comprobar si se rompe. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	40
Ilustración 54. Determinaciones del LL, LP, CV y CL. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	41
Ilustración 55. Forma requerida de los especímenes. Fuente: ASTM D5731-95	42
Ilustración 56. Se marco el centro de la muestra sobre el cual aplicara la carga. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	42
Ilustración 57. Colocación del espécimen en la prensa de carga puntual. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	42
Ilustración 58. Ensaye invalido debido al tipo de falla. Fuente: ASTM D5731-95.	43
Ilustración 59. Comparación de la tira reactiva con la tabla colorimétrica de la caja. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	44
Ilustración 60. Espécimen colocado sobre la base inferior de la cámara triaxial con la membrana y bandas de hule. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	46
Ilustración 61. Cámara triaxial colocada en la prensa, llena de agua y conectada al tanque regulador. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	46
Ilustración 62. Cubriendo las caras laterales del espécimen con parafina y brea. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	48
Ilustración 63. Cubriendo la cara superior del espécimen con una bolsa de hule y una banda elástica. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	48
Ilustración 64. Especímenes dentro del contenedor previamente preparado. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	49
Ilustración 65. Preparación del espécimen y equipo según se explica en los pasos 3 y 4. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	51
Ilustración 66. Comparación colorimétrica los adobes de La Huacana y Turicato acorde a las coordenadas del CIELAB. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	54



Ilustración 67. Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de los especímenes de La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	59
Ilustración 68. Espécimen H-CI1 posterior al ensaye de módulo de elasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	60
Ilustración 69. Espécimen H-CI2 posterior al ensaye de módulo de elasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	60
Ilustración 70. Espécimen H-CI3 posterior al ensaye de módulo de elasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	60
Ilustración 71. Espécimen H-CI4 posterior al ensaye de módulo de elasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	60
Ilustración 72. Grafica esfuerzo-deformación de los especímenes de Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	61
Ilustración 73. Espécimen T-CI1 antes de ser ensayado. Presentaba 2 fracturas horizontales, las cuales no atravesaban en su totalidad la sección transversal del espécimen. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	61
Ilustración 74. Espécimen H-C4 antes y después del ensaye de compresión simple. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	64
Ilustración 75. Espécimen H-C9 antes y después del ensaye de compresión simple. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	64
Ilustración 76. Espécimen H-C2 antes y después del ensaye de compresión simple. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	65
Ilustración 77. Espécimen T-C8 antes y después del ensaye de compresión simple. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	65
Ilustración 78. Grafica de correlación de UCS entre cilindros y cubos. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	65
Ilustración 79. Fibra orgánica de la muestra "Huacana Paja". Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	68
Ilustración 80. Fibra orgánica de la muestra "Huacana Liso". Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	68
Ilustración 81. Líticos de la muestra "Huacana Paja". Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	69



Ilustración 82. Líticos de la muestra "Huacana Liso". Fuente: M. Ruiz-Mendoza. ...	69
Ilustración 83. Muestra de Turicato en saturación para realizar posteriormente el lavado. No se observan fibras orgánicas como en el caso de las muestras de La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	69
Ilustración 84. Granulometría obtenida de Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	70
Ilustración 85. Granulometría obtenida de Huacana Paja. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	70
Ilustración 86. Granulometría obtenida de Huacana Liso. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	70
Ilustración 87. Grafica de distribución granulométrica de las muestras de Turicato y La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	71
Ilustración 88. Clasificación de finos de La Huacana y Turicato en la carta de plasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	73
Ilustración 89. CV y CL de la muestra No.2 de La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	74
Ilustración 90. CV y CL de la muestra No.1 de Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	74
Ilustración 91. Grafica de correlación entre $I_{s(50)}$ y UCS obtenida de la compresión simple en cubos. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	75
Ilustración 92. Grafica esfuerzo-deformación de los especímenes Huacana Paja sometidos a los diferentes esfuerzos de confinamiento. Fuente: M. Ruiz-Mendoza. .	78
Ilustración 93. Cohesión y ángulo de fricción del adobe denominado Huacana Paja. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	79
Ilustración 94. Grafica esfuerzo-deformación de los especímenes Huacana Liso sometidos a los diferentes esfuerzos de confinamiento. Fuente: M. Ruiz-Mendoza. .	79
Ilustración 95. Cohesión y ángulo de fricción del adobe denominado Huacana Liso. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	80
Ilustración 96. Grafica esfuerzo-deformación de los especímenes Turicato sometidos a los diferentes esfuerzos de confinamiento. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	80



Ilustración 97. Cohesión y ángulo de fricción del adobe de Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza..... 81



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Plan de trabajo de la experimentación. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	19
Tabla 2. Tiempos y tolerancias para la lectura de la masa m_t . Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	49
Tabla 3. Humedad relativa obtenida en diferentes especímenes. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	52
Tabla 4. Coordenadas "a", "b" y "L*" del sistema CIELAB de cada muestra. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	53
Tabla 5. Comparación colorimétrica de la fotografía de la muestra real y el color generado por Nix Colo Sensor de los adobes de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	55
Tabla 6. Datos y resultados del ensaye de frecuencia fundamental longitudinal realizado en la cara 1. Los resultados resaltados en blanco fueron descartados. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	56
Tabla 7. Datos y resultados del ensaye de frecuencia fundamental longitudinal realizado en la cara 2. Los resultados resaltados en blanco fueron descartados. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	56
Tabla 8. Promedios de frecuencia y módulo de elasticidad de los resultados seleccionados. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	57
Tabla 9. VPU y Ed de los adobes de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	57
Tabla 10. Módulos de elasticidad estático y esfuerzos máximos de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	62
Tabla 11. Resultados de los especímenes ensayados a compresión simple. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	63
Tabla 12. Comparación de densidad y esfuerzos de cilindros y cubos. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	64
Tabla 13. Datos y resultados del ensaye de flexión. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	67



Tabla 14. Porcentaje correspondiente de grava, arena, finos y fibra orgánica de cada muestra. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	71
Tabla 15. Porcentaje promedio de la distribución granulométrica, clasificación de finos y clasificación SUCS de Turicato y La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	72
Tabla 16. Límites de Atterberg en las muestras de adobe de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	73
Tabla 17. Promedio de los límites de Atterberg de los adobes de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	73
Tabla 18. $I_{s(50)}$ y esfuerzo por el método de carga puntual de los adobes de Turicato y La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	76
Tabla 19. PH obtenido con las tiras reactivas. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	77
Tabla 20. Resumen de resultados del ensaye triaxial realizado en los especímenes de La Huacana (liso y paja) y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	78
Tabla 21. Valores de cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ). Fuente: M. Ruiz-Mendoza.	81
Tabla 22. Humedad actual obtenida de los residuos de la prueba triaxial. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	82
Tabla 23. Tasa de absorción inicial y su correlación ($R_{inicial}$), tasa de absorción secundaria y su correlación ($R_{secundaria}$), índice de absorción (I), tiempo donde finaliza la absorción inicial (t_n), permeabilidad (K), resistencia a la penetración del agua (m), porosidad efectiva (ϵ_e) y sortividad (S). Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	83
Tabla 24. Resistividad de los adobes de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.....	84



INTRODUCCIÓN

En el momento que el hombre dejó de ser nómada y se convirtió en sedentario comenzó a desarrollar diferentes técnicas de supervivencia entre ellas la construcción para refugiarse de las inclemencias del clima y animales. Con el paso del tiempo las técnicas y materiales de construcción han ido evolucionando, pero sin duda siempre se ha utilizado aquel material que se tiene al alcance. La construcción con tierra es el método de construcción más antiguo empleado por el hombre y podemos encontrar vestigios alrededor del mundo.

A pesar de que la construcción en tierra ha estado presente desde hace miles de años, la normativa al respecto es muy deficiente, debido a que las investigaciones existentes son insuficientes (Cid et al., 2011). Uno de los principales motivos de esto es debido a la dificultad de estandarizar este material, el cual, se encuentra alrededor del mundo y sus características varían de lugar a lugar. Otro de los motivos es que, gracias a la industrialización de materiales, la construcción en tierra sufrió un abandono durante algunas décadas, deteniendo súbitamente su uso, comercialización e investigación, y tristemente la arquitectura en tierra ya existente se ha descuidado y/o destruido sin ser saber el gran valor histórico y cultural que representan. Sin embargo, en las últimas dos décadas debido a los cambios climáticos que sufrimos en la actualidad se ha optado por la búsqueda de materiales sustentables, resurgiendo nuevamente la construcción en tierra como una alternativa y con ello las dificultades de estandarización y normativa de esta.

En la actualidad son poco los países que cuentan con normativas para la construcción en tierra. En los últimos años entre los trabajos de normalización destacan Colombia y España, con la publicación de nuevas normas; Chile, Ecuador, México y Nicaragua, desarrollando futuras normas; o Perú mejorando documentos ya existentes (Cid et al., 2011).

Algunas investigaciones precedentes sobre este tema son:

Investigación de tesis de licenciatura titulada “Caracterización y propiedades índice en adobes de Jojutla de Juárez, Morelos, México”, en la cual se presenta el estudio de caracterización de 11 muestras de adobe pertenecientes a diferentes viviendas de adobe dañadas por el sismo de las 2017 y 2 muestras de arcilla de bancos de material de la región (Preciado Villcaña, 2020). De la mano de esta investigación podemos encontrar el artículo titulado “Characterization of Adobe Blocks Point-Load Assessment as a Complementary Study of Damaged Buildings and Samples” que es parte de la misma investigación (Sanchez-Calvillo et al., 2021).



Artículo titulado “Vernacular Caramel’s Adobe Masonry Dwellings – Material Characterization”, en el cual se presenta el estudio de caracterización de 3 muestras de diferentes viviendas construidas en la primera mitad del siglo XX (Silva et al., 2022).

Artículo titulado “Adobe Blocks in the Center of Portugal: Main Characteristics” en el cual se presente el estudio de caracterización de 41 muestras de la costa central de Portugal (Costa et al., 2021).

Artículo titulado “Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions” en el cual se presenta la caracterización de propiedades mecánicas de especímenes cilíndricos del distrito Aveiro, Portugal (Silveira et al., 2012).

Y algunas otras relacionadas con la estabilización de arcillas con fines patrimoniales (Amado Flores Rentería, 2010; Amirais Flores Ponce, 2018; Martínez Molina et al., 2018; Omar Salvador Miranda Leal, 2017).

Estas son algunas de las investigaciones que se pueden encontrar alrededor del mundo sobre la tierra y sus diferentes técnicas constructivas, pero como ya se mencionó son insuficientes para lograr crear una normativa más completa y actualizada que cumpla con las necesidades y exigencias del ser humano hoy en día. Es por ello que este tipo de investigación tiene una gran importancia no solo para rescatar nuestra historia y cultura, sino también para retomar e impulsar el uso de este material que cuenta con una gran cantidad cualidades físicas, económicas y ecológicas.

Esta tesis tiene como objetivo proporcionar herramientas experimentales, teóricas y prácticas a los usuarios de la construcción con tierra, a los medioambientalistas, a los conservadores de energía, a los protectores de la vivienda vernácula, a los economistas que fomentan la economía circular, a los interesados en los materiales sostenibles y reusables.

En base a todo lo descrito anteriormente se presenta este documento de investigación. En el marco teórico se muestran los antecedentes de la construcción y arquitectura en tierra a través de los años; se describen las ventajas de la tierra como material de construcción como lo es la inercia térmica, aislamiento acústico, etc., y las desventajas como lo es su reacción al agua. Se describen las técnicas constructivas del tapial, bajareque, cob, superadobe, BTC y adobe, y sus ventajas y desventajas sobre otras técnicas. También encontrarán la descripción de localización, población, clima, flora y fauna de La Huacana y Turicato.

Para la metodología se diseñó un plan de trabajo de tal manera que se desperdiciara la menor cantidad material posible. El primer paso fue labrar y acondicionar los especímenes requeridos (cubos, vigas y cilindros); posteriormente se realizaron los



ensayos correspondientes a cada espécimen. Los ensayos están divididos en dos grupos: destructivos (D) y no destructivos (ND). Se realizaron primero los ND y luego los D. Los ensayos realizados fueron: humedad relativa, colorimetría, frecuencia fundamental longitudinal, velocidad de pulso ultrasónico, módulo de elasticidad, esfuerzo de ruptura a la compresión simple, esfuerzo de ruptura a la flexión, distribución granulométrica, límites de Atterberg, esfuerzo por método de carga puntual, potencial de hidrogeno, triaxial UU, humedad actual, absorción capilar y resistividad eléctrica. En cada uno de los ensayos se describen los especímenes y equipo utilizados, así como, el procedimiento y la norma que lo rige.

A continuación, se muestran los resultados, interpretación y discusión de ellos comparándolos con datos de otras investigaciones. Al final se presenta una discusión general de la información obtenida más sobresaliente de esta investigación y unas conclusiones generales de la investigación incluyendo los aspectos que podrían desarrollarse en extenso más adelante.



1. MARCO TEÓRICO

1.1. Construcción y Arquitectura en Tierra

1.1.1. La Tierra Como Material De Construcción

Construir en tierra es revalorizar, adaptar y transformar más de 11.000 años de conocimiento y “saber hacer”, know how, o tecnología constructiva, y asociar un material milenario con arquitectura innovadora.

Construir en tierra es reconocer el valor cultural de los edificios vernáculos, oponerse a la destrucción y fomentar la rehabilitación de un edificio respetando el material y expresión arquitectónica.

Construir en tierra es continuar el desarrollo del arte de construir y su compleja conformación en un todo que une arquitectura, estática, economía, confort térmico, reuso y reciclado, y por supuesto decoración.

Construir en tierra significa desarrollar la innovación para optimizar el material, simplificar implementaciones y producir nuevas arquitecturas. (CRAtierra & Cátedra UNESCO de "Arquitectura de tierra y desarrollo sostenible", n.d.).

La construcción con tierra es el método de construcción más antiguo empleado por el hombre (Gatti, 2012) y en la actualidad un tercio de la población mundial vive en construcciones con tierra (Ilustración 1) (CRAtierra & Cátedra UNESCO de "Arquitectura de tierra y desarrollo sostenible", n.d.).



Ilustración 1. Arquitectura de tierra en el mundo. Fuente: Gatti, 2012



La tierra es un material natural muy bondadoso que cuenta con una gran cantidad de cualidades físicas, económicas y ecológicas, y se encuentra de manera abundante alrededor del mundo y por lo tanto se ha empleado en la edificación desde el inicio de las civilizaciones (Ruiz Mendoza et al., 2020). Sin embargo, en las últimas décadas este tipo de construcción ha sufrido un abandono y desplazamiento debido a materiales y técnicas constructivas contemporáneas (Sánchez Calvillo et al., 2021) que se han generado para poder satisfacer las necesidades de la actualidad. Asimismo, la sociedad ha relacionado las construcciones con tierra como un signo de estatus social inferior lo cual ha ayudado a relegar dichas construcciones (Preciado Villicaña, 2020).

El sector de construcción usa alrededor del 40% de la energía mundial (Sameh, 2014). Y actualmente, la demanda de materiales industrializados ha aumentado, por lo tanto, se ha generado una sobre explotación y escasez de recursos naturales. Surgiendo así la necesidad de la recuperación e innovación de la construcción en tierra.

“En los países industrializados se apuesta por el comportamiento bioclimático de los edificios y la recuperación histórica en obras de restauración del patrimonio, en los países en vías de desarrollo el motivo es más una necesidad, tanto de vivienda como de autoconstrucción, economía y rapidez” (Yuste, n.d.).

1.1.2. Antecedentes De La Construcción Y Arquitectura En Tierra

El hombre comenzó a construir con tierra en el momento que dejó de ser nómada y se convirtió en sedentario (Preciado Villicaña, 2020). No siempre se disponía de madera, o de piedra de fácil trabajar para la construcción (Gatti, 2012), es aquí donde surge la necesidad de hacer uso de los recursos locales y siendo la tierra el recurso más abundante en todo el mundo y el que demanda menos energía. Existen restos de arquitecturas de tierra en todos los continentes y en la mayoría de los países del mundo, desde las regiones cálidas y desérticas, hasta los lugares más lluviosos (Yuste, n.d.).

La tierra se utilizó para todo tipo de construcciones como viviendas, fortalezas, obras religiosas, monumentos, edificios agrícolas, etc. (Gatti, 2012). Los primeros vestigios de construcción en tierra datan del periodo Neolítico con 6,000-10,000 años de antigüedad en Mesopotamia, ubicada entre los ríos Tigris y el Éufrates (Gatti, 2012) donde se encontró Göbekli Tepe (Ilustración 2, Ilustración 3) considerado el primer templo de la historia según el arqueólogo alemán Klaus Schmidt (National Geographic, 2012). Otras de las construcciones en tierra más antiguas de las que se encontró registro son construcciones de adobe en Turquestán, Asia Central, que datan de 8,000 al 6,000 a.C. (Minke, 2005); poblado Çatal Hüyük (Ilustración 4) sur de la actual Turquía, que data entre 7,100 y 5,950 a.C. (Mayans, 2019); en Asiria han sido encontrados cimientos de



tierra que datan del 5,000 a.C. de los cuales destacan las bóvedas del templo de Ramsés II (Ilustración 5), en Gourná, Egipto, hecho con adobe hace más de 3,000 años; en Arge Bam (Ilustración 6), Irán, se pueden encontrar edificaciones con 2,500 años de antigüedad (Minke, 2005).

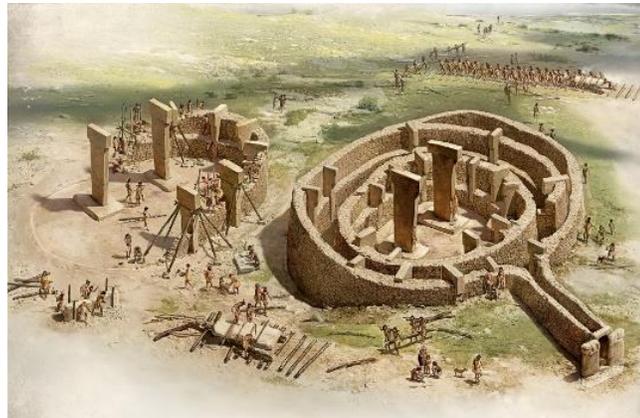


Ilustración 2. Representación del Templo Göbekli Tepe. Fuente: National Geographic



Ilustración 3. Ruinas de Göbekli Tepe. Fuente: National Geographic



Ilustración 4. Ruinas de Çatal Hüyük. Fuente: National Geographic.



Ilustración 5. Bóvedas del templo de Ramsés II, en Gurna, Egipto. Fuente: José Lull.



Ilustración 6. Ciudad de Arge Bam, Irán. Fuente: Iran Negin Travel.



Uno de los prejuicios de la sociedad actual sobre las construcciones en tierra es que son muy débiles e impiden o limitan las grandes construcciones, sobre todo construcciones de varios niveles o muros de gran altitud. Cabe resaltar que mucha de la arquitectura en tierra que hoy en día se conserva se encuentra ubicada en zonas sísmicas lo cual nos demuestra que tienen una gran resistencia mecánica.

A continuación, se mencionan algunas de las construcciones monumentales alrededor del mundo. La Gran Muralla China (Ilustración 7) considerada una de las siete maravillas del mundo se construyó hace 4,000 años según lo menciona Gernot Minke con más de 20,000km de longitud, 400 muros de entre los 7 y 8m de altura (National Geographic, 2015); construida inicialmente en tierra apisonada y posteriormente fue revestida con piedras naturales y ladrillos, dándole la apariencia de una muralla de piedra (Minke, 2005).



Ilustración 7. La Gran Muralla China. Fuente: National Geographic.

La Pirámide del sol es la construcción más grande de Teotihuacán, México (Ilustración 8): mide 225 m por lado y alcanza unos 65 m de altura (Arqueología Mexicana, n.d.). Fue construida entre los años 300-900, donde el núcleo está constituido por 2 millones de toneladas de tierra apisonada (Minke, 2005). Otra construcción en tierra que sobresale en México es la zona de Paquimé en Casas Grandes, Chihuahua (1,200-1,450 EC) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) era muy importante en relaciones comerciales entre la civilización Pueblo, originaria del sur de Estados Unidos y norte de México, y las civilizaciones más destacadas de lo que fue Mesoamérica (Preciado Villicaña, 2020). La ciudad llegó a tener una extensión de 750,000m², sus enormes bloques de habitaciones todavía se elevan a unos 10 - 12 metros de altura, y algunas estructuras tienen varios pisos de altura (Blake Wiener, 2020).



Ilustración 8. La Pirámide del Sol en Teotihuacan, México. Fuente: Patu Soto.



Ilustración 9. Paquimé en Casas Grandes, Chihuahua. Fuente: Eduardo Pio Gamboa Carrera.

El palacio La Alhambra en Granada, España (Ilustración 10) fue construido entre los siglos XII-XIV sobre una colina por la cultura musulmana (di Turi et al., 2017). La ciudad de Shibam, Yemen (Ilustración 11) también conocida como “la Manhattan del desierto”. Es el hogar de los primeros rascacielos del mundo: se trata de un grupo denso de 500 casas-torre de 9/10 pisos de altura, construidas en su totalidad con adobes (Gatti, 2012).



Ilustración 10. La Alhambra de Granada, España. Fuente: desconocida.

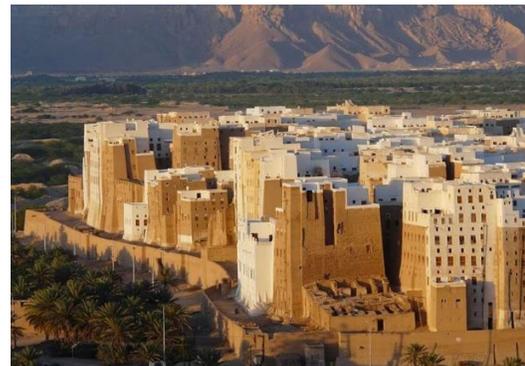


Ilustración 11. Ciudad de Shibam, Yemen. Fuente: Jean Paul Peters.

La ciudad de Chan-Chan, Perú (Ilustración 12) fundada por la cultura chimú en el año 850 EC. Fue levantada en adobe, ocupando una extensión de veinte kilómetros cuadrados y muros de barro de hasta doce metros de alto y seiscientos de largo; convirtiéndose en el mayor centro urbano de América del Sur (Mayans, 2018).



Ilustración 12. Chan-Chan, Perú.

Fuente: <https://historiacivil.wordpress.com/2021/02/02/chan-chan-ciudad-de-adobe/>

En África la mayoría de las mezquitas fueron construidas en tierra dos grandes ejemplos de dichas construcciones son la mezquita, Kashan, Irán (Ilustración 13) y la gran mezquita, Mopti, Malí (Ilustración 14) la cual fue construida en 1935 (Minke, 2005).



Ilustración 13. Mezquita, Kashan, Irán.

Fuente: desconocida.



Ilustración 14. La Gran Mezquita, Mopti, Malí.

Fuente: desconocida.

Estos son algunas de las innumerables construcciones con tierra que podemos encontrar a través de los años en todo el mundo.



1.1.3. Propiedades De La Tierra Como Material De Construcción

La arquitectura de tierra, puede proporcionar un nivel de confort idéntico o superior al habitual en la arquitectura convencional, pero sin utilizar aparatos eléctricos (aire acondicionado, calefacción, etc.) y valiéndose de la regulación y utilización de las propias características del material (Gatti, 2012). Sin embargo, muchas barreras sociales, políticas y económicas aún obstaculizan su uso. Además, otros materiales convencionales dominan el mercado, apoyados por supuestas mejores tecnologías, monopolios industriales y otros factores políticos. Sin embargo, quizás la situación económica actual y la conciencia ampliada sobre la sostenibilidad podrían ayudar a promover su uso en el contexto moderno (Sameh, 2014). A continuación, se mencionan las ventajas de la arquitectura en tierra:

a. Inercia térmica.

En zonas climáticas donde las diferencias de temperatura son amplias o donde es necesario almacenar la ganancia térmica por vías térmicas, las construcciones en tierra son capaz de balancear el clima interior (Minke, 2005). Por ejemplo, un muro de tierra que ha estado todo el día expuesto a la radiación solar, por la noche empieza a desprender el calor que ha ganado durante el día, este proceso dura 10 horas y garantiza agradables temperaturas en el interior de la vivienda (Gatti, 2012).

b. Higroscopicidad.

Se considera que la humedad relativa óptima para un ambiente interior está entre el 40 y 70%. En la universidad de Kassel, Alemania, demostraron que, si la humedad relativa de un ambiente interior aumentara súbitamente de 50% a 80%, un bloque de tierra es capaz de absorber 30 veces más la humedad que un ladrillo cocido en un lapso de 48h. En otro estudio se demostró también que una construcción con tierra es capaz de mantener una humedad relativa de 50% con una variación de 5 y 10% (Minke, 2005).

c. Aislamiento acústico.

“Los muros de tierra transmiten mal las vibraciones sonoras, de modo que se convierten en una barrera eficaz contra el ruido indeseado. Las propiedades de aislamiento acústico son mucho mejores que las de muros convencionales” (Gatti, 2012).

d. Ahorra energía y disminuye la contaminación ambiental.

Las construcciones en tierra se realizan generalmente con material local así que el gasto por transporte de este es nulo o casi nulo, la fabricación no requiere de un proceso industrializado y además es biodegradable, por lo tanto, su contaminación ambiental en relación a otros materiales de la construcción como el concreto y el ladrillo es minúsculo. Para preparar, trabajar y elaborar barro en el sitio se necesita solo 1% de la energía que requerirían otro tipo de materiales (Minke, 2005).



e. Recurso infinito.

Se considera como un recurso infinito gracias a que es un material reutilizable cuantas veces se desee y, además, el 74% de la corteza terrestre está conformado por suelo arcillosos (Sameh, 2014).

Pese a las virtudes de la arquitectura en tierra, presenta algunas desventajas frente a otros sistemas constructivos:

a) No es un material estandarizado.

Su composición varía de lugar a lugar y contiene diferentes cantidades y tipos de arcilla, limo, arena y agregados por lo cual dificulta lograr estandarizar este material.

b) Se agrieta cuando se seca.

Debido a que la arcilla es un material, cristalográficamente hablando en forma de casa de naipes, y que sus distancias interplanares son de 1.4 Angströms, aunado a su capacidad higroscópica mencionada antes, que le permite la absorción de agua, las arcillas son expansivas y contráctiles, volumétricamente hablando, y los cambios volumétricos deben entonces ser controlados en lo posible, con estabilizantes volumétricos, o refuerzos con morfología de shards. La durabilidad de las construcciones en tierra se puede ver afectada en zonas húmedas ya que la tierra es soluble en agua. Siendo necesario la protección de este material con revestimientos, voladizos de techo, estabilizantes, rodapiés, adiciones, etc. (Sameh, 2014).

c) Limitaciones estructurales.

Debido al gran espesor de muros en la construcción en tierra se tiene una considerable reducción de área útil en las edificaciones. Así mismo, otra limitante son las construcciones de grandes alturas (Yuste, n.d.).

1.1.4. Técnicas De Construcción En Tierra

1.1.4.1. Tapia pisada

Tapia, tapial o tierra apisonada es una de las técnicas más antiguas de construcción. La técnica consiste en rellenar un encofrado o cimbra con capas de tierra de 10 a 15 cm compactadas con ayuda de un pisón. El encofrado se compone por dos tablonces paralelos separados, unidos por un travesaño como se observa en la Ilustración 15 (Minke, 2005). El espesor de los muros puede variar entre los 40cm y 2m (Yuste, n.d.). En comparación con técnicas las que se utiliza el barro en un estado más húmedo, el tapial brinda retracciones mucho más bajas y mayor resistencia. En comparación con



el adobe, la construcción de tapial se realiza de forma monolítica y gracias a eso tiene una mayor durabilidad (Minke, 2005).



Ilustración 15. Técnica de tapia pisada.

Fuente: <http://construyediferente.com/tapial-tecnica-antigua-nueva/>

1.1.4.2. Bajareque

El bajareque, bahareque, bareque o quincha es una técnica probablemente más antigua que el tapial y es utilizado en climas tropicales, subtropicales y templados. La estructura consiste en elementos verticales y horizontales que forman una malla. Generalmente se utiliza madera en elementos verticales y ramas delgadas en elementos horizontales. Se realiza una mezcla de barro y paja picada, se lanza o se compacta sobre la malla de tal manera que todos los elementos sean cubiertos al menos por 2cm de dicha mezcla (Ilustración 16) (Minke, 2005).



Ilustración 16. Técnica de bajareque.

Fuente: desconocida.



1.1.4.3. Cob

La técnica del Cob o muro amasado consiste en el apilado sobre el muro de “pelladas” de barro y fibras vegetales. Las pelladas son colocadas sobre el muro con horcones y pisadas para compactarlas. Pasados dos días, una vez que ha adquirido cierta consistencia, el material sobrante se corta con una pala y se enrasa el paramento; este sistema se han construido muros de 40 y 200 cm de espesor y permite fácilmente realizar secciones ataludadas (Gatti, 2012). Si bien la técnica logra un muro de carga monolítica, se diferencia del tapial, ya que se construye sin un encofrado y con una mezcla más húmeda. Debido a la ausencia de encofrados, la experiencia práctica y la observación muestran que las paredes se construyen mejor sin aristas agudas (Ilustración 17) en la esquinas o aberturas (Watson & McCabe, 2011).



Ilustración 17. Técnica de cob.
Fuente: Gaurav Sood.

1.1.4.4. Superadobe

Las técnicas de superadobe consisten en introducir tierra en sacos que se apilan para formar estructuras de adobe (Ilustración 18). Una vez llenas las bolsas, se comprimen ligeramente para eliminar el aire del interior de la bolsa y regularizar la superficie de contacto. La adherencia y fricción entre hileras se mejora colocando alambre de púas encima de cada hilera. El superadobe representa una alternativa sostenible, rápida y de bajo costo para la construcción de viviendas sociales, albergues de emergencia y eco aldeas con los recursos disponibles en cada lugar. A pesar de su potencial, varios aspectos aún comprometen el uso eficiente y seguro de estas técnicas. Por ejemplo, actualmente el diseño de las estructuras se basa en lineamientos empíricos o semiempíricos ya que no existe un método general al respecto (Canadell et al., 2016).



Ilustración 18. Técnica de superadobe.
Fuente: Megan Frye.

1.1.4.5. BTC – Bloque de Tierra Comprimida

Los Bloques de Tierra Comprimida son ladrillos de tierra cruda con bajo contenido de agua obtenidos tras el prensado de manera manual o automáticamente. Es el método de construcción en tierra creado más recientemente. El material suele estar estabilizado con diferentes materiales. Los estabilizadores más comunes son el cemento y la cal hidráulica. Generalmente, del 3% al 9% de estabilizante se utiliza en el BTC para aumentar la resistencia física de erosión superficial y capacidad de carga (Yuste, n.d.). Es posible fabricar BTC de diferentes formas y tamaños; macizos o huecos, con y sin machihembrado mecánico (Ilustración 19), son solo unas de las posibles posibilidades (Gatti, 2012). La principal ventaja de los BTC es su uniformidad, la cual minimiza el uso de mortero y disminuye tanto el costo de mano de obra como el de transporte (Sameh, 2014).



Ilustración 19. Técnica de BTC.
Fuente: Emily Vasquez.

1.1.4.6. Adobe

La técnica de adobes es otra de las técnicas más antiguas de construcción en tierra, ya que se pueden encontrar construcciones en adobe que datan del 8,000 al 6,000 a.C.



El adobe o bloque de tierra cruda se realiza rellorando moldes con un barro de consistencia pastosa o lanzando un barro menos pastoso en el molde Ilustración 20. La superficie se enrasa con ayuda de la mano, una madera, una paleta o un alambre. En la técnica de lanzado mientras más fuerte se lance el barro en el molde mejor será la compactación y la resistencia. Se pueden utilizar moldes metálicos o de madera, estos últimos son los más comunes y deben de ser previamente engrasados o humedecidos. Una vez desmoldados se dejan secar al aire libre alrededor de un mes y posteriormente estarán listos para su almacenamiento o colocación (Minke, 2005).



Ilustración 20. Técnica de adobes.
Fuente: Ignacio Gómez Pulido.

La principal diferencia entre el adobe y BTC, es que estos últimos son prensados, dando así la posibilidad de utilizar una menor cantidad de agua. Esto permite el almacenamiento inmediato. La desventaja es la necesidad de estabilización para obtener una buena resistencia, puesto que la capacidad de aglomerante de la arcilla no puede activarse con tan bajo contenido de humedad. De igual manera, debido a la ausencia de amasado y batido no se activan las fuerzas aglutinantes de los minerales de la arcilla (Minke, 2005).

El adobe y las diferentes técnicas de construcción en tierra se realizan con barro. La composición general del barro es tierra, agua, fibras (materia orgánica) y en algunas ocasiones adiciones estabilizantes. Pero las cantidades varían dependiendo de las características de los mismos y la técnica constructiva a utilizar. El barro utilizado para ladrillos requiere un alto contenido de arcilla para lograr alcanzar la suficiente resistencia luego de ser quemado. La distribución granulométrica para ladrillos según Minke es 24% arcilla, 50% limo, 23% arena y 3% de grava, no necesariamente es grava, puede tratarse de arena gruesa retenida en malla No. 4 ASTM. Cuando se utiliza un barro con esta distribución granulométrica en adobe se producen problemas de expansión y retracción al mojarse y secarse respectivamente. Una curva de distribución granulométrica óptima para adobes oscila alrededor de los siguientes porcentajes: 14% arcilla, 22% limo, 62% arena y 2% grava. Este contenido de arena les permite obtener



una alta porosidad (y por ende una alta resistencia a las heladas) y una alta resistencia a la compresión con un mínimo de retracción. Pero a la vez tiene la cantidad de arcilla suficiente que permite una buena cohesión para la manipulación del adobe (Minke, 2005). Asimismo, el tamaño y contenido de fibra añadida y su longitud afectan directamente a las propiedades mecánicas (Rodríguez-Mariscal & Solís, 2020). El contenido de fibra oscila alrededor del 1% (Yuste, n.d.).

Para la elaboración de muros con adobe, estos se unen con un mortero de barro, cal hidráulica o altamente e hidráulica. Se puede añadir pequeñas cantidades de cemento portland al mortero, pero mezclas únicamente de cemento no son recordables ya que son muy rígidas y provocan fisuras. El mortero debe de contener suficiente arena para evitar fisuras por retracción y un contenido de arcillas entre 4% y 10 % (Minke, 2005).

A continuación, se explicará la clasificación SUCS, es muy importante conocerla, ya que los adobes están conformados por arcilla, limo, arena y grava.

Clasificación SUCS

La mecánica de suelos define como suelo al material térreo cuyas partículas sean menor a 7.5cm (*MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS I*, n.d.). El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Ilustración 21), originalmente llamado Sistema de Clasificación de Aeropuertos es actualmente el sistema más usado a nivel mundial, ya que este contempla la graduación y los propiedades mecánicas e hidráulicas que interesan al ingeniero civil (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1973).

“El sistema divide a los suelos en 2 grandes fracciones: la gruesa, formada por partículas mayores que la malla No. 200 (0.074mm) y menores a la maya 3” (7.62cm) y la fina, formada por las partículas que pasan la malla No. 200”(Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1973).

La fracción gruesa está conformada por arenas y gravas y se clasifican mediante la granulometría. La fracción fina se subdivide en 2 grupos, limos y arcillas; los cuales se determinan con ayuda de los límites de Atterberg. Para esta investigación se siguieron los procedimientos establecidos por las normas NMX-C-496-ONNCCE-2014 y MX-C-493-ONNCCE-2018.



UMSNH
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
“CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE ADOBES DE LA HUACANA Y TURICATO,
REGIÓN TIERRA CALIENTE, MICHOACÁN, MÉXICO”



DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 Φ Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE $\frac{1}{2}$ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD C_u : mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA C_c : entre 1 y 3. $C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$		
		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.	
		GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de	* d u	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA “LÍNEA A” O I.P. MENOR QUE 4. Arriba de la “línea A” y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
				GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla	
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE $\frac{1}{2}$ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	ARENA LIMPIA Poco o nada de partículas finas	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	$C_u = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3.
				SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	
	ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas		* d u	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA “LÍNEA A” O I.P. MENOR QUE 4. Arriba de la “línea A” y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
				SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.	
	SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 Φ Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla N° 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)
				CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
		OL		Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		
		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomeos, más elásticos.		
CH			Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas			
OH			Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.			
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.				

** CLASIFICACIÓN DE FRONTERA.- LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS, POR EJEMPLO GW-GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.
 Φ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.
 * LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS ÚNICAMENTE, LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SÍMBOLO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SÍMBOLO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.

Ilustración 21. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
 Fuente. MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS I.



1.2.Procedencia De Las Muestras

Las muestras fueron obtenidas de dos haciendas, una ubicada en La Huacana y otra en Santa Cruz de Morelos, localidad perteneciente a Turicato (Ilustración 22).



Ilustración 22. Hacienda en Santa Cruz de Morelos, Turicato.
Fuente: Adrián Solís Morelos

1.2.1. La Huacana

La Huacana se localiza al sur del Estado de Michoacán, en las coordenadas 18°58' de latitud norte y 101°48' de longitud oeste, a 480 metros sobre el nivel del mar. Colinda al norte con Gabriel Zamora, Nuevo Urecho y Ario de Rosales, al este con Turicato, al sur con Churumuco y Arteaga, al oeste con Múgica y Apatzingán como se puede observar en Ilustración 23. Su distancia a Morelia la capital del Estado es de 161 km (C. Presidentes Municipales del Estado de Michoacán & Personal del Centro Estatal de Estudios Municipales, 2022).



Ilustración 23. Macro y micro localización de La Huacana, Michoacán, México. Fuente: Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México.

La población en 2020 fue de 30,627 habitantes (49.5% hombres y 50.5% mujeres). En comparación a 2010, la población en La Huacana decreció un -6.5% (Secretaría de Economía, 2022).

Su clima es tropical con lluvias en verano y en algunas partes seco estepario. Tiene una precipitación pluvial anual de 800.0 milímetros y temperaturas que oscilan de 10.0 a 54° centígrados (C. Presidentes Municipales del Estado de Michoacán & Personal del Centro Estatal de Estudios Municipales, 2022).

En el municipio dominan los bosques: tropical deciduo, con zapote, plátano, parota y tepeguaje; bosque tropical espinoso, con amole, cardón, huizache y tepemezquite. Su fauna la conforman el coyote, conejo, zorrillo, ocelote, mapache, codorniz, liebre, boa, gavilancillo, güilota, pato, bagre y carpa (C. Presidentes Municipales del Estado de Michoacán & Personal del Centro Estatal de Estudios Municipales, 2022).

1.2.2. Turicato

Se localiza al sureste del Estado, en las coordenadas 19°03' de latitud norte y 101°25' de longitud oeste, a 720 metros sobre el nivel del mar. Colinda al norte con Tacámbaro, al este con Nocupétaro y Carácuaro, al sur con Huetamo y Churumuco, y al oeste con La Huacana y Ario de Rosales como se puede observar en Ilustración 24. Su distancia a Morelia la capital del Estado es de 158 km (C. Presidentes Municipales del Estado de Michoacán & Personal del Centro Estatal de Estudios Municipales, 2022).



Ilustración 24. Macro y micro localización de Turicato, Michoacán, México.
Fuente: Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México.

La población en Turicato fue de 29, 056 habitantes (48.7% y 51.3% mujeres). En comparación a 2010, la población de Turicato decreció un -8.85% (Secretaría de Economía, 2022).

Su clima es tropical con lluvias en verano. Tiene una precipitación pluvial anual de 849 milímetros y temperaturas que oscilan de 14.7 a 33.3° centígrados (C. Presidentes Municipales del Estado de Michoacán & Personal del Centro Estatal de Estudios Municipales, 2022).

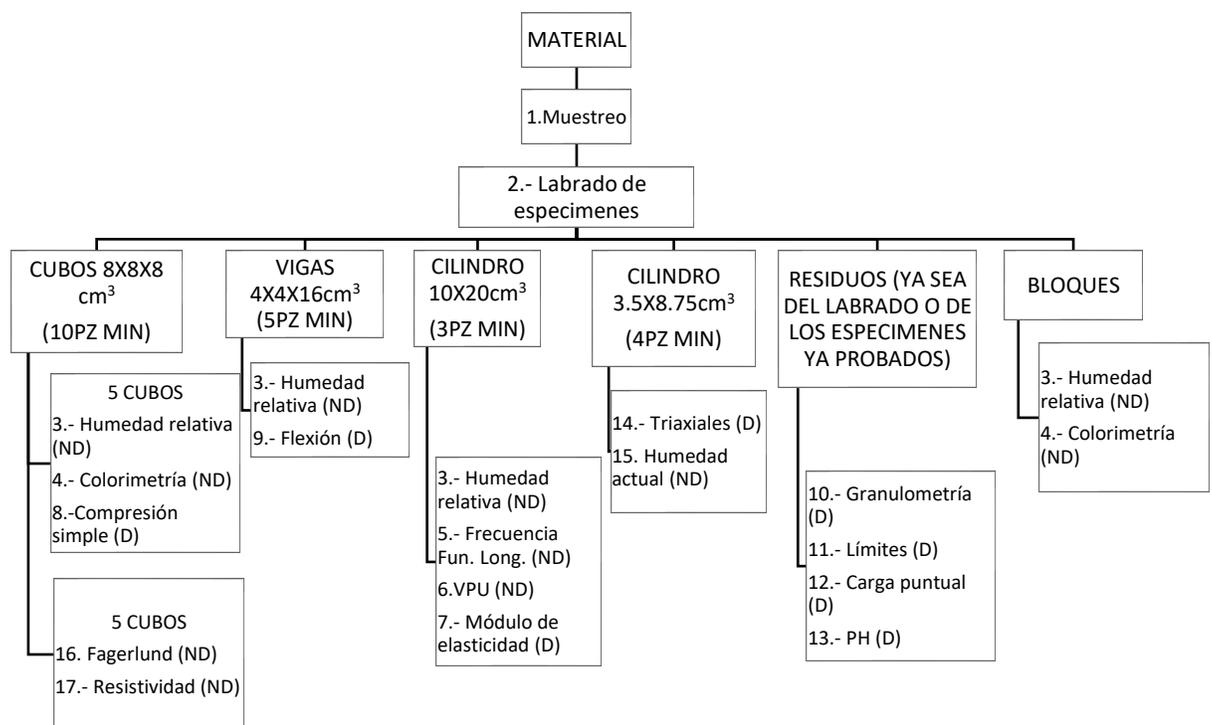
En el municipio domina el bosque tropical deciduo con parota, cuéramo, ceiba, huizache, tepemezquite, zapote y mango, y el bosque tropical espinoso con huizache, teteche, cardón, amolé y viejito. La fauna del municipio está representada por coyote, conejo, águila, gavilán, urraca, zopilote y paloma (C. Presidentes Municipales del Estado de Michoacán & Personal del Centro Estatal de Estudios Municipales, 2022).



2. METODOLOGÍA

La experimentación se dividió en 2 tipos de pruebas *destructivas (D)* y *no destructivas (ND)*, esto con la intención de no desperdiciar y reutilizar la mayor cantidad de material posible. Diseñándose así el siguiente plan de trabajo:

Tabla 1. Plan de trabajo de la experimentación. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Las pruebas se realizaron respetando el orden descendente de cada tipo de espécimen y fueron enumeradas según el orden en el que se fueron realizando. A continuación, se describe el proceso de desarrollo de cada una de las pruebas¹ de ensaye.

¹ Las pruebas de humedad relativa y colorimetría que se repiten en varios de los recuadros son porque todos esos especímenes fueron utilizados para realizar esas pruebas.



2.1. Muestreo

El material en estudio fue obtenido de haciendas ubicadas en La Huacana y Turicato, recogiendo un aproximado de 120kg y 100kg de material respectivamente. Las muestras de material obtenidas estaban conformadas por extracciones de cilindros con diámetros de 10cm y diferentes longitudes, bloques de adobes en su mayoría incompletos y deteriorados por el intemperismo, aunque algunos todavía conservaban parte del enjarre y pintura. Es importante mencionar que dichos muestreos fueron realizados en el año 2012, por lo tanto, las muestras estuvieron resguardadas aproximadamente 10 años.

2.2. Labrado

En primer lugar, fue necesario hacer el labrado de los especímenes correspondientes para cada una de las pruebas. Los especímenes labrados fueron cubos de $8 \times 8 \times 8 \text{ cm}^3$, vigas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (Ilustración 27), cilindros de 10cm de diámetro con una relación 1:2 de diámetro:altura (Ilustración 27) y cilindro de 3.5cm de diámetro con una relación 1:2.5 aproximadamente (Ilustración 31).

El equipo necesario para el labrado de las muestras es:

- Cortadora (se utilizó un disco para corte de concreto).
- Flexómetro
- Marcador
- Cúter

Procedimiento para el labrado de cubos de $8 \times 8 \times 8 \text{ cm}^3$, vigas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (Ilustración 27) y cilindros de 10cm de diámetro (Ilustración 26):

1. Buscar los adobes o fragmentos de adobes adecuados para el espécimen correspondiente. Se consideraron como adecuados aquellos en los que se desperdiciaría la menor cantidad de material posible al momento de labrar.
2. Colocar la muestra en la cortadora y hacer un primer corte en unas de las caras para eliminar las protuberancias o excedentes de material y conseguir una superficie plana (Ilustración 25).
3. Con ayuda del flexómetro y el marcador hacer la marca o marcas necesarias.
4. Una vez marcada nuestra muestra, colocar en la cortadora nuevamente y hacer el corte correspondiente.



5. Realizar los pasos 3 y 4 cuantas veces sea necesaria hasta terminar de labrar nuestra muestra sin enfriador de agua en cuchilla.

Para el caso de los cilindros de 10cm de diámetro, estos ya habían sido extraídos directamente de la finca cuando se hizo el muestreo, sólo fue necesario hacer los cortes en las caras inferior y superior para obtener una relación 1:2. Los diámetros de los cilindros no fueron exactamente de 10cm, los cilindros de La Huacana tenían un diámetro aproximado de 9cm y los de Turicato de 9.5cm, por los tanto las longitudes fueron de 18cm y 19cm respectivamente.



Ilustración 25. Labrado de las muestras en la cortadora. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 26. Cilindros de 10cm de diámetro labrados en cortadora. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 27. Cubos y vigas labrados en cortadora. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Procedimiento para cilindros de 3.5cm de diámetro (Ilustración 31):

1. Buscar los adobes o fragmentos de adobes adecuados para el espécimen correspondiente.
2. En el caso de fragmentos muy grandes, se puede realizar los primeros cortes con ayuda de la cortadora para quitar el material excedente. Se puedan hacer cortes para formar una viga con medidas aproximadas de 4x4x10cm (Ilustración 28).
3. Posteriormente, con ayuda del cúter se le dará la forma cilíndrica a nuestra muestra de manera cautelosa hasta obtener un diámetro de 3.5cm (Ilustración 29).



Ilustración 28. Labrado del cilindro (paso No.2).
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 29. Labrado del cilindro (paso No.3).
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 30. Labrado de cilindro (paso No. 4).
Fuente M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 31. Cilindro de 3.5cm de diámetro.
Fuente M. Ruiz-Mendoza.



4. Para hacer el corte de las caras inferior y superior se utiliza la base que se muestra en la Ilustración 30, aunque se puede omitir el uso de esta. Primero se hace el corte en una de las caras y posteriormente se marca la longitud de 8.75cm o aproximada y se procede a realizar el otro corte.

Una vez labrados los especímenes se etiquetan para llevar un control de ellos durante la experimentación. Para esta investigación se utilizó la siguiente nomenclatura:

- Para la procedencia: T (Turicato) y H (La Huacana). Durante la experimentación surgió una subdivisión de La Huacana, la cual es H (Huacana Liso) y H' (Huacana Paja)
- Para el tipo de espécimen: C (cubo), CI (cilindro de 10cm de diámetro) y V (viga). Para los cilindros de 3.5cm de diámetro no se propuso nada.
- Y finalmente se asignó un número a cada espécimen.

Por ejemplo, el primer cubo de $8 \times 8 \times 8 \text{cm}^3$ de Turicato se etiquetó como T-C1.

2.3.Humedad Relativa (ND)

La humedad relativa se define como el cociente entre la fracción molar de vapor de agua en un espacio dado y la fracción molar del vapor de agua en su condición de saturación (Martines L., n.d.).

La determinación de la humedad relativa se obtuvo con ayuda del equipo Contractor's Moisture Meter, BD-2100, Delmhorst. Se seleccionan diferentes tipos de especímenes (cubos, cilindros, vigas y bloques de adobe sin labrar), posteriormente se coloca el extremo con puntas del equipo sobre alguna de las caras del espécimen deseado y se procede a obtener el valor correspondiente (Ilustración 32). Se toman lecturas en diferentes caras de dicho espécimen para poder obtener un promedio. Se repite el mismo procedimiento para todos los especímenes en estudio.



Ilustración 32. Determinación de la humedad relativa con el equipo Contractor's Moisture Meter, BD-2100, Delmhorst. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

2.4. Colorimetría (ND)

El color es algo subjetivo al ojo humano, debido a eso, a lo largo de los años se han creado diferentes sistemas para medir el color (Martinez Molina et al., 2018). La Comisión Nacional De Iluminación (CIE por sus siglas en francés) desarrollo en el año de 1294, dos de los sistemas más utilizados en la actualidad. El primero de ellos se creó en 1931 a partir de los valores de los tres estímulos (X, Y, Z), y el segundo se creó en 1976 haciendo referencia a los espacios de color (L^* , a^* , b^*) y es mejor conocido como CIELAB (Martínez Molina et al., 2018). CIELAB está basado en la luminosidad L^* (claro u oscuro), y la oposición de colores a^* ($+a^*$ rojo, y $-a^*$ verde) y b^* ($+b^*$ amarillo, y $-b^*$ azul) (Ilustración 33).

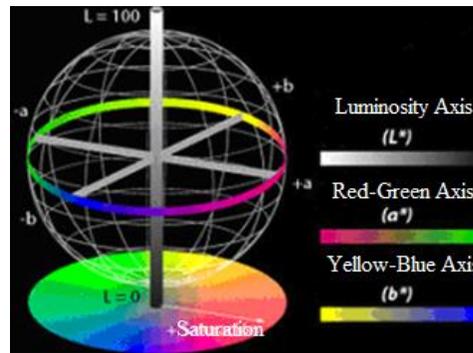


Ilustración 33. Diagrama de los espacios de colores L^* , a^* , and b^* . El eje L^* o eje de luminosidad va de 0 (negro) a 100 (blanco), mientras que el los ejes a^* y b^* van de -128 a 127. En los casos en los que $a^* = b^* = 0$ son acromáticos. Por lo tanto, L^* representa la escala acromática de grises, Martínez Molina et al., 2018

El equipo utilizado en esta prueba fue High-Quality Colorimeter, Blue-NH300. El procedimiento consiste en seleccionar varios especímenes los cuales cuenten con superficies planas. Se coloca el lente del colorímetro en alguna de las caras, se ejerce un poco de presión para sellar y evitar el paso de la luz exterior entre en lente y se procede a tomar la lectura de los valores L^* , a^* y b^* arrojados por el colorímetro. Se toman varias lecturas de los especímenes para promediar dichos valores.

2.5.Frecuencia Fundamental Longitudinal (ND)

Con ayuda de la frecuencia fundamental longitudinal podemos obtener el módulo de elasticidad dinámico. La prueba se realizó con el equipo E-METER, modelo C-4959, serie 40003-300040 de James Instruments y los especímenes cilíndricos de 10cm Ø.

El procedimiento seguido está regido por la norma mexicana NMX-C-089-ONNCCE-1997, 1998.

1. Determinar el peso y las dimensiones de cada uno de los especímenes. La relación diámetro: longitud debe de ser al menos de 2.
2. Marcar el centro del espécimen por ambas caras.
3. Colocar el espécimen en el equipo de manera horizontal y céntrica con respecto a su longitud (Ilustración 34), y ajustar el equipo en los centros marcados anteriormente (Ilustración 35).

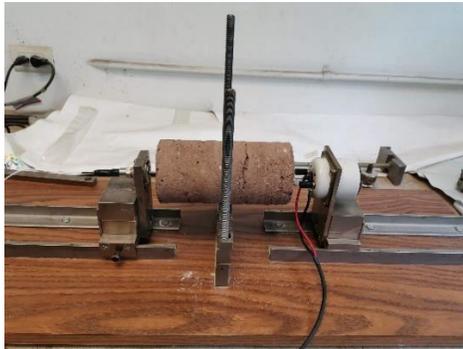


Ilustración 34. Espécimen colocado en el equipo E-METER de James Instruments para la obtención de la frecuencia longitudinal. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 35. Ajuste del equipo en el centro de la cara del espécimen. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

4. Se procede a encender el equipo para forzar el espécimen a vibrar a frecuencias variables. Se registra la frecuencia de vibración máxima que tenga un pico bien definido sobre el indicador.
5. Se retira y se coloca nuevamente el espécimen de manera inversa y se repiten los pasos 3 y 4.

Se deben repetir los pasos anteriores para cada uno de los especímenes.

2.6. Velocidad de Pulso Ultrasónico (ND)

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) es una prueba no destructiva aplicada comúnmente en concreto, acero y madera, y puede utilizarse para conocer las propiedades físicas del material, verificar su uniformidad y calidad relativa del mismo, así como, indicar la presencia de vacíos y grietas (Raavi & Tripura, 2021)(NMX-C-275-ONNCCE-2004, 2004). También se pueden obtener el módulo de elasticidad y resistencia, sin embargo, no se puede establecerse sin un mínimo de 30 muestras para el caso de los concretos. Desafortunadamente, para el caso de la tierra hay muy poca información y no existen parámetros con los cuales se puedan comparar y clasificar de una manera rápida nuestro material como lo es en el caso del concreto.

La prueba se realizó mediante el método de medición directa ya que con este se obtienen los mejores resultados (NMX-C-275-ONNCCE-2004, 2004); usando el equipo V METER MK IV, Ultrasonic System for Identifying Basic Characteristics



Coarse Grained Materials de NDT James Instruments (Ilustración 36) y los especímenes cilíndricos de 10cm de \varnothing con su humedad actual.

Previo al procedimiento se determinan las dimensiones (diámetro y longitud) mediante un promedio de dos lecturas, y masa de los especímenes. Procedimiento establecido por la NMX-C-275-ONNCCE-2004, 2004:

1. Calibrar el equipo.
2. Colocar los transductores en los extremos inferior y superior del cilindro (Ilustración 36) asegurando que haya un buen contacto entre el transductor y la superficie de la muestra. Es necesario colocar un agente apropiado de acoplamiento (gel) en la superficie de contacto del espécimen y el transductor para evitar aire atrapado entre ellos.
3. Medir el tiempo de tránsito. Para disminuir el error dividido a la falla de contacto repetir la medición hasta que las diferencias de las dos últimas sea menor al 2%.

Se debe repetir los pasos anteriores para todos los especímenes.



Ilustración 36. VPU (medición directa) con el equipo V METER MK IV.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

2.7. Módulo de Elasticidad Estático (D)

El Módulo de Elasticidad Estático (Módulo de Young) es la relación entre esfuerzo y deformación del material en un ensayo de carga axial en compresión (NMX-C-128-ONNCCE-2013, 2014).



Se utilizó la norma NMX-C-128-ONNCCE-2013 (la cual está diseñada para concretos, no para adobes) como guía para realizar esta prueba por lo tanto no se cumplió escrupulosamente debido a las circunstancias. El procedimiento se divide en 2 partes, el cabeceado y el ensayo para el módulo de elasticidad.

Cabeceado

Material y equipo:

- Azufre
- Parrilla
- Cinta masking adhesiva base papel (coloquialmente llamada masking tape) 2”
- Hoja de lija de carburo de silicio No.80 o 60
- Nivel horizontal de albañilería

Procedimiento:

1. Determinar las dimensiones reales del espécimen con un promedio de 2 lecturas.
2. Colocar masking tape alrededor de la cara que se desee cabecear. Procurar no dejar ningún tipo de abertura por el cual se pueda derramar el azufre (Ilustración 37).
3. Calentar el azufre hasta su estado líquido.
4. Colocar el espécimen ya con cinta en una superficie nivelada y verter el azufre en él dejando una capa que cubra todas las irregularidades (Ilustración 38).
5. Una vez solidificado el azufre se procede a retirar la cinta. Y con ayuda de la lija y el nivel se eliminan las protuberancias u oquedades que se pudieron haber generado. Lijar hasta que quede una superficie plana y nivelada (Ilustración 39 e Ilustración 40).
6. Repetir los mismos pasos para cabecear la cara contraria del espécimen.

Este procedimiento se utilizó tanto para los especímenes cilíndricos de 10cm de diámetro y los cubos de $8 \times 8 \times 8 \text{cm}^3$. A pesar de que existe un molde para cabecear dichos cilindros se optó por este método, ya que, al momento de intentar separar el espécimen del molde se genera una fuerza de tracción y el espécimen se fractura.



Ilustración 37. Colocación de cinta masking alrededor de la cara que se va a cabecear.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 38. Vertido de Azufre dejando una capa que cubra todas las irregularidades.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 39. Lijado del azufre para eliminar todas protuberancias u oquedades. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 40. Espécimen cabeceado en una de sus caras. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Ensaye

Material y equipo:

- Prensa hidráulica de la marca ELVEC, modelo E659-2, serie 100813, capacidad 120,000kg con aproximación a la centésima de kilogramo.
- Deformímetro de dos anillos y dos extensómetros.
- Micrómetro digital para deformímetro
- Nivel de regla.



En el procedimiento la norma NMX-C-128-ONNCCE-2013, 2014 pide 4 especímenes para realizar la prueba, 2 se ensayan a compresión para conocer el esfuerzo máximo y 2 para determinar el módulo de elasticidad. Debido a que solo se contaba con 3 cilindros de Turicato y 4 de La Huacana y desafortunadamente no se conoce la velocidad a la que debe ser realizada la prueba para el caso de los adobes, se optó por realizar el ensayo a compresión en especímenes cúbicos con el fin de evitar destruir algún espécimen y desperdiciarlo.

Procedimiento:

1. Ensayar un espécimen cúbico a compresión y obtener el esfuerzo máximo. Y determinar el 15%, 40% y 60% de dicho esfuerzo.
2. Colocar el espécimen cilíndrico en una superficie plana y nivelada. Instalar el deformímetro con el espécimen al centro (Ilustración 41) y fijar mediante los tornillos. Verificar el nivel de los anillos. Una vez listo retirar las barras que separan los anillos y colocar el micrómetro.
3. Colocar en la prensa (Ilustración 42) y aplicar una precarga hasta 15% del esfuerzo máximo. Aplicar una segunda precarga hasta la misma carga y corroborar que la deformación regrese a cero una vez retirada dicha carga.
4. Aplicar la carga de ensayo hasta llegar al 60% del esfuerzo máximo. Tomando lectura de las cargas a cada 0.1mm de la deformación.
5. Retirar el deformímetro al espécimen y aplicarle carga hasta su falla.



Ilustración 41. Instalación del deformímetro con el espécimen al centro.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 42. Ensayo del módulo de elasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



2.8. Esfuerzo de Ruptura a Compresión Simple (D)

La compresión simple o compresión axial es la prueba más practicada en la construcción en el día a día, ya que de ella se obtiene el esfuerzo máximo a la compresión que es uno de los parámetros principales para el diseño estructural. Para el caso de los especímenes de concreto, esta prueba se rige por la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2015, sin embargo, para los adobes no existe ninguna. Por lo tanto, el desarrollo de esta prueba se realizó instintivamente y siguiendo la lógica de la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2015.

Para el ensaye se utilizaron 5 especímenes cúbicos de $8 \times 8 \times 8 \text{ cm}^3$ procedentes de cada lugar y en la Máquina Universal de Pruebas FORNEY, capacidad 120,000kg con aproximación a la centésima de kilogramo.

Para la selección de los especímenes es necesario aplicar los siguientes criterios:

1. No presentar fallas o fallas muy representativas previo al ensaye, para aquellos que contengan algún tipo de falla es necesario hacer la anotación correspondiente para el momento del cálculo.
2. Presentar la menor ausencia de material, la cual se pudo haber generado al momento de ser labrado.

Una vez seleccionados los especímenes se determinan sus dimensiones reales y se cabecean siguiendo el procedimiento mencionado en módulo de elasticidad. Ya preparados los especímenes se colocan en la máquina universal Forney y se procede a realizar la prueba (Ilustración 43). Aplicar la carga a una velocidad constante de 0.20 ton/min ± 0.05 hasta su falla y tomar nota de la carga máxima obtenida y su tipo de falla.



Ilustración 43. Espécimen cubico (T-C2) siendo ensayado a compresión simple. El espécimen se encontraba en muy buen estado, no se observó ninguna falla previa al ensayo y su ausencia de material es básicamente nula. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

2.9.Esfuerzo de Ruptura a la Flexión (D)

Para esta prueba, el procedimiento se rigió en la norma turca “Natural stone test methods - Determination of flexural strength under concentrated load”, TS EN 12372, 2007; la cual equivale a la norma europea nombrada igual. Se utilizaron los especímenes prismáticos (vigas) de $4 \times 4 \times 16 \text{cm}^3$.

Material:

- Vernier
- Marcador
- Prensa
- 3 rodillos de acero de 10mm de diámetro

Procedimiento:

1. Determinar las dimensiones de la viga con ayuda del vernier.
2. Marcar la viga a 2.5cm de cada extremo y en la parte central de manera que quede equidistante de las marcas de los extremos.



3. Colocar el espécimen ya marcado en la prensa. Se colocarán 2 rodillos de apoyo en la parte inferior de las marcas de los extremos; y 1 en la parte superior de la marca central como se observa en la Ilustración 44.
4. Aplicar la carga a una velocidad constante de 0.20 ton/min \pm 0.05 hasta su falla y tomar nota de la carga máxima obtenida y su tipo y lugar de falla.



Ilustración 44. Viga marcada y colocada en la prensa para el ensaye de flexión. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

2.10. Distribución Granulométrica (D)

Los adobes están compuestos por suelo (tierra) en su mayoría. Es por eso importante hacer la clasificación de este, ya que el comportamiento del adobe depende en gran parte del tipo de suelo que se tenga. La clasificación se realizó con ayuda del SUCS en la cual intervienen dos procedimientos la granulometría y los límites de Atterberg, a continuación, se describirán ambos procedimientos.

La prueba se realizó según lo establecido en la norma NMX-C-496-ONNCCE-2014, 2015.

Material y equipo:

- Juego de mallas (No. 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200 y ensamblar en este mismo orden)
- Agitador de mallas
- Charolas
- Vaso metálico
- Cepillo de cerdas



- Balanza con aproximación 0.1gr
- Horno

Procedimiento:

Para el procedimiento se omitieron algunos pasos, ya que la presencia de grava en el adobe es nula prácticamente.

1. Pesar 200g de esquirlas o fragmentos de adobe seco en un vaso metálico. Colocar al sol durante unas horas en caso de estar húmedo.
2. Agregar agua cubriendo el material totalmente como se observa en la Ilustración 45 y dejarlo reposar al menos 12h.



Ilustración 45. Muestra en reposo durante 12h. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

3. Agitar con la mano o ayuda de una varilla para completar la separación de todas las partículas.
4. Decantar todo el contenido sobre la malla No.200 y colocar bajo el chorro del agua para facilitar el paso de las partículas a través de la malla (Ilustración 46). Retirar una vez que el agua de lavado se observe limpia.



Ilustración 46. Lavado de la muestra para eliminar los finos y dejar únicamente las arenas. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

5. Regresar el material al vaso metálico y colocar en el horno hasta que su masa sea constante.
6. Una vez ensambladas las mallas, verter el material en la parte superior (Ilustración 47) y colocar la tapa.



Ilustración 47. Vertido de la muestra en el juego de mallas. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

7. Efectuar el cribado mediante medio mecánico o manual.
8. Retirar la primera malla y agitar sobre una charola hasta que la cantidad que pase la malla durante 1min no sea mayor a 1g (Ilustración 48). El material retenido en la charola se vierte en la siguiente malla. Repetir este paso para todas las mallas.



Ilustración 48. Cribado manual. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

9. Obtener la masa del material retenido de cada una de las mallas y colocar en una charola como se observa en la Ilustración 49.



Ilustración 49. Muestra cribada de la Huacana Liso. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

2.11. Límites de Atterberg (D)

La prueba se realizó según lo establecido en la norma NMX-C-493-ONNCCE-2018, 2019.

Material y Equipo:

- Cápsula de porcelana



- Balanza con aproximación 0.01g
- Copa de Casagrande
- Horno
- Espátula
- Cuentagotas
- Espátula flexible de 7.5cm de longitud y 2cm de ancho con punta redonda.
- Malla ASTM No.40
- Placa de vidrio
- Ranurador plano y curvo
- Recipientes para las muestras
- Molde para contracción volumétrica de volumen conocido y contracción lineal.
- Franela
- Secador eléctrico (secadora de pelo)
- Mortero con brazo

Procedimiento:

Primero es necesario preparar la muestra. Triturar el material con ayuda del mortero, evitando disgregar los líticos. Posteriormente cribar a través de la malla No.40 hasta obtener una cantidad de 400 o 500g y colocar en la cápsula de porcelana. Agregar agua destilada hasta que se cubra y dejar en reposo durante al menos 16h

Límite líquido (LL)

1. Se homogeniza la muestra y se procede a colocar en la copa de Casagrande con ayuda de la espátula. Dejar una capa de 10mm de espesor en el punto más profundo de la copa.
2. Ranurar por la parte central. Si se puede hacer la ranura en una pasada se utiliza el ranurador plano y si el material se rompe utilizar el ranurador curvo en un máximo de 6 pasadas.
3. Accionar la copa de Casagrande hasta que las dos mitades de la porción del suelo entren en contacto en la parte inferior de la ranura a lo largo de la distancia de 13mm (Ilustración 50). Registrar el número de golpes.



Ilustración 50. Copa de Casagrande con una muestra de suelo de La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

4. Tomar una muestra representativa de aproximadamente 10g de material de la copa de Casagrande. Tomar lectura de la masa del recipiente y la masa húmeda de nuestra muestra.
5. Realizar los pasos 1, 2, 3 y 4 hasta obtener 4 determinaciones de golpes comprendido en el rango de 10 a 35 golpes. Se puede hacer uso del cuentagotas y secador eléctrico si es necesario aumentar o reducir el contenido de agua del material.
6. Una vez obtenidas las masas de las cuatro determinaciones, colocar las muestras en el horno a una temperatura de 50°C durante 24h y posteriormente tomar lectura la masa seca (Ilustración 51).



Ilustración 51. Lectura de todas las masas secas de las determinaciones de LL y LP. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Contracción Lineal (CL)

Esta prueba se realiza con el material sobrante de la determinación del límite líquido que es a los 25 golpes.

1. Engrasar el molde y comenzar a colocar el material con ayuda de la espátula. El llenado se realiza en 3 capas y se debe golpear el molde contra una superficie dura en cada capa para expulsar el aire atrapado, hacerlo hasta que no se observen burbujas en la superficie.
2. Una vez lleno el molde se engrasa.
3. Dejar oreando hasta que el material cambie de color y posteriormente secar en el horno durante 18h, a una temperatura de 50°C (Ilustración 52).
4. Desamoldar y determinar la longitud interior del molde y la longitud de la barra de material seco.

Contracción Volumétrica (CV)

Esta prueba también se realiza con el material sobrante de la determinación del límite líquido.

1. Repetir los pasos 1 y 2 de explicados en la CL.
2. Registrar la masa del molde (este se puede obtener antes del llenado una vez finalizada la prueba) y la masa del molde con el suelo húmedo.
3. Realizar el secado de la muestra como se explica en el paso 3 de CL.
4. Desamoldar y determinar la masa del molde con el suelo seco.
5. Lo siguiente es determinar el volumen de la pastilla de suelo seco mediante el uso de mercurio. Para ese se llena un recipiente con mercurio y se engrasa. Se sumerge la pastilla en el mercurio y nuevamente se engrasa. Registrar el peso del mercurio desalojado.



Ilustración 52. CV y CL completamente en estado seco. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Límite Plástico (LP)

1. Se utiliza un poco (20g aprox.) del material sobrante del LL. Se debe de reducir el contenido de agua de la muestra hasta que tenga una consistencia adecuada, es decir que no pegue en las manos al momento de manipularla.
2. Tomar una pequeña porción de material y comenzar a formar cilindros sobre la placa de vidrio. Rolar el cilindro hasta que este alcance un diámetro de 3mm y que éste se rompa en varias secciones. Para esto se puede colocar el cilindro sobre 2 dedos y se hace presión con otro para comprobar que este se rompa (Ilustración 53). No se debe flexionar, si es el caso significa que aún le falta pérdida de agua y se debe de repetir este paso.



Ilustración 53. Colocación de cilindros sobre 2 dedos y presionando ligeramente para comprobar si se rompe. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

1. Colocar los fragmentos obtenidos en un recipiente y registrar su masa húmeda y seca para obtener su contenido de agua.
2. Para un mejor resultado se deben obtener al menos 3 determinaciones (Ilustración 54).



Ilustración 54. Determinaciones del LL, LP, CV y CL.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

2.12. Esfuerzo por Método de Carga Puntual (D)

EL ensaye de carga puntal se rige por la norma ASTM D5731–95, 2017, la cual cabe mencionar está diseñada para rocas. Para la prueba se utilizó la prensa de carga puntal, modelo 45-d0550/E, de Controls y los especímenes fueron labrados de las esquirlas no dañadas o contaminadas que se rescataron de los residuos de otras pruebas.

Procedimiento:

1. Con las esquirlas seleccionadas se intentará labrar prismas con dimensiones aproximadas a las que se muestran en la Ilustración 55. Las dimensiones no serán menores a 30mm, ni superiores a 85mm.

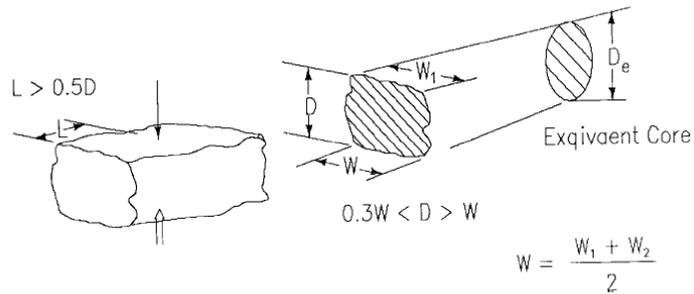


Ilustración 55. Forma requerida de los especímenes.
Fuente: ASTM D5731-95

2. Con ayuda de un marcador, dibujar dos ejes de manera perpendicular sobre la cara superior ($L \times W$) (Ilustración 56) para identificar el centro del espécimen sobre el cual se aplicará la carga.
3. Colocar el espécimen en el equipo. Se colocará la muestra entre los dos puntos de contacto, alineando el centro de la muestra con estos como se observa en la Ilustración 57.



Ilustración 56. Se marco el centro de la muestra sobre el cual aplicara la carga.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 57. Colocación del espécimen en la prensa de carga puntual. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

4. Aplicar la carga y aumentarla gradualmente de manera que ocurra una falla dentro de 10 a 60s. Registrar la carga que se obtenga. La prueba debe ser rechazada si se obtiene una falla similar a la que se observa en la Ilustración 58.

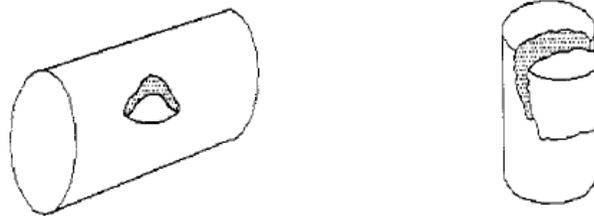


Ilustración 58. Ensaye invalido debido al tipo de falla.
Fuente: ASTM D5731-95.

2.13. Potencial de Hidrogeno - pH (D)

Para obtener el PH del adobe se utilizaron tiras reactivas de pH y estas reaccionan al entrar en contacto con un líquido. Siendo este el caso, la muestra de adobe debe de estar en estado líquido, para ello se realizó una solución de 50g de adobe y 50g de agua. La muestra de adobe para la solución no debe de estar contaminada y conservar su composición original, optando por seleccionar esquirlas que conserven su arcilla, limo, arena y fibras orgánicas. Y el agua se tomó del grifo y se verificó que esta tuviera un pH neutro.

Para la elaboración de la solución se deben dejar reposar el agua y el adobe en un recipiente durante 5min y posteriormente se mezcla hasta que no existan grumos. Una vez lista la solución, se procede a introducir una de las tiras en el líquido durante 5 segundos, luego esperar unos 10 segundos y retirar de manera cuidadosa el excedente de la mezcla para lograr observar los colores de la tira. Comparar la tira con la tabla colorimétrica incluida en la caja como se observa en la Ilustración 59 y determinar cuál es el pH según la coloración.



Ilustración 59. Comparación de la tira reactiva con la tabla colorimétrica de la caja. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

2.14. Triaxial Undrained Unconfined, UU (D)

La resistencia cortante de una masa de suelo es la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el desplazamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él (Braja M. Das, n.d.). La prueba triaxial es un ensaye mediante el cual se pueden obtener dicha resistencia y la capacidad de carga.

Existen 3 tipos estándar de prueba triaxial:

- ✚ Prueba consolidada-drenada o prueba drenada (prueba CD)
- ✚ Prueba consolidada-no drenada (prueba CU)
- ✚ Prueba no consolidada-no drenada o prueba no drenada (prueba UU)

En este caso se utilizó la prueba UU, a la cual también se le conoce como prueba rápida ya que no se permite el drenaje y esto agiliza el desarrollo de la prueba.

Esta prueba se realizó bajo lo establecido por la norma NMX-C-432-ONNCCE-2002, 2003 y se utilizaron los especímenes cilíndricos de 3.5cm de diámetro.

Material y Equipo:

- Vernier



- Cámara triaxial
- Equipo con manómetro y válvulas para presión de confinamiento
- Membrana de hule
- Papel filtro
- Bandas de hule
- Prensa
- Báscula con aproximación 0.01g

Procedimiento:

1. Con ayuda del vernier determinar las dimensiones de altura (h) y diámetro (d) en parte superior, media e inferior del espécimen.
2. Determinar su masa húmeda.
3. Colocar el espécimen en la base inferior de la cámara triaxial de manera vertical. Colocar sobre el vástago la membrana de hule y posteriormente colocar sobre el espécimen para deslizar la membrana de hule sobre este. Colocar una banda de hule en la parte superior (vástago) e inferior (base de la cámara triaxial) para lograr sellar y evitar que el agua entre en contacto con el espécimen (Ilustración 60).
4. Cerrar herméticamente la cámara con ayuda de las tuercas, procurando que el espécimen se encuentre centrado con el vástago de la cámara.
5. Colocar la cámara en la prensa.
6. Realizar el llenado de la cámara evitando se generen burbujas de aire atrapado. Una vez llena se cierran las válvulas.
7. Conectar la manguera del tanque regulador con el que se aplicará la presión de confinamiento. Ajustar a la presión requerida (Ilustración 61).
8. Ajustar los micrómetros de carga y deformación en cero para comenzar la prueba a una velocidad de 1 mm/min. Tomar lectura de la carga a cada 0.05 mm hasta su falla.
9. Una vez finalizada la prueba el espécimen se coloca en un recipiente metálico para lograr obtener su masa humedad según se describe en el procedimiento de humedad actual.



Ilustración 60. Espécimen colocado sobre la base inferior de la cámara triaxial con la membrana y bandas de hule. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 61. Cámara triaxial colocada en la prensa, llena de agua y conectada al tanque regulador. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Este procedimiento se repite para los esfuerzos de confinamiento 0.3, 0.6 y 0.9 kg/cm² a los que deben de ser sometidos los especímenes. Para la compresión simple se omite la colocación de la membrana de hule, bandas de hule y el llenado de agua, y tampoco será sometido a la presión de confinamiento.

2.15. Humedad Actual (ND)

La humedad actual se obtuvo con los restos de los especímenes usados en el ensaye de triaxiales. Primero para darle un segundo uso a este material, y segundo, para comprobar si los especímenes contenían el mismo porcentaje de humedad al momento de ser probados.

El equipo necesario es una balanza con aproximación de 0.01g, un recipiente de las dimensiones adecuadas para contener la porción de la muestra y resistente a altas temperaturas, y un horno. El procedimiento consiste en tomar una muestra de al menos 100g de material y se coloca en la balanza para obtener la masa húmeda (M_h). Se coloca en el horno durante un lapso de 24hrs o hasta obtener un más constante. Se pesa nuevamente para obtener la masa seca (M_s) y se aplica la siguiente fórmula para obtener el porcentaje de humedad (H%):

$$H\% = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$



Debido a que el adobe contiene materia orgánica, el horno no debe exceder los 60°C (NMX-C-475-ONNCCE-2013, 2014). Teniendo esto en cuenta se optó por tener el horno una temperatura de 50°C.

2.16. Fagerlünd o Sortividad o Absorción Capilar (ND)

La humedad es una patología importante y peligrosa en zonas sísmicas para las construcciones en tierra; la cual conlleva algunos otros daños como: revoques sin adherencia al sustrato, desmenuzamientos, eflorescencias, pintura descascarada, etc. (Cirvini & Gómez Voltan, 2014). Y esta humedad es provocada generalmente por la absorción capilar que se genera desde la subestructura.

Para esta prueba se utilizaron los especímenes cúbicos de 8x8x8cm y el procedimiento está basado en la norma NMX-C-504-ONNCCE-2015, 2015, sin embargo, hay algunos aspectos que no se cumplieron. Por ejemplo, la norma pide especímenes cilíndricos de 10cm de diámetro por 5cm de espesor; debido a lo complicado de obtener dichos especímenes se optó por los especímenes cúbicos.

Material:

- Vernier
- Parafina y brea
- Brocha
- Bolsas de plástico
- Bandas elásticas
- Recipiente de plástico con tapa
- Esponja de 5cm de espesor
- Báscula con aproximación 0.01g
- Franela
- Cronómetro

Procedimiento:

Acondicionamiento del recipiente:

1. Colocar la esponja en toda la base interior del recipiente plástico y colocar agua del grifo a una altura de 3 ± 1 mm superior a la superficie de apoyo (esponja). Mantener este nivel de agua durante toda la prueba.



Acondicionamiento del espécimen:

2. En primer lugar, es necesario meter las muestras al horno a una temperatura de 50°C para secarlas completamente. En este caso las muestras permanecieron durante 8 días dentro del horno hasta alcanzar peso seco constante.
3. Una vez secas, determinar las dimensiones de todos sus lados (LxLxL) mediante un promedio de 4 lecturas para cada dimensión. Así mismo tomar lectura de la masa seca correspondiente.
4. Calentar la parafina y la brea, y con ayuda de una brocha sellar las caras laterales de cada muestra, dejando libres los lados inferior y superior (Ilustración 62). Con una bolsa de plástico y con una banda elástica sellaremos la cara superior de cada muestra cómo se observa en la Ilustración 63.



Ilustración 62. Cubriendo las caras laterales del espécimen con parafina y brea.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 63. Cubriendo la cara superior del espécimen con una bolsa de hule y una banda elástica. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Desarrollo de prueba:

5. Medir la masa del espécimen ya sellado y registrarla como masa inicial (m_0).
6. Posteriormente colocar el espécimen dentro del recipiente (Ilustración 64) e iniciar la medición del tiempo. Anotar fecha y hora del contacto inicial. Tomar como precaución el tiempo necesario entre cada muestra para que les permita tomar las lecturas necesarias y evitar que se estas se superpongan.



Ilustración 64. Especímenes dentro del contenedor previamente preparado. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

7. Registrar la masa en los intervalos que se muestran en la Tabla 2.
8. Para la determinación de la masa, retirar el espécimen del contenedor, detener el tiempo del cronómetro, secar superficialmente con ayuda de la franela y colocar en la balanza de manera inversa. Registrar la masa como m_t , reinstalar el espécimen en el contenedor y continuar con la medición del tiempo.
9. Repetir el paso 8 hasta llegar al tiempo indicado en la Tabla 2 o hasta que el peso de la muestra sea constante.

Tabla 2. Tiempos y tolerancias para la lectura de la masa m_t . Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Tiempo	30 seg	60 seg	2 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	60 min	1 medición cada hora desde la hora 2 hasta la hora 6	1 medición por día, del día 1 hasta el día 7	1 medición final al menos 24 horas después del día 7 y antes del día 9
										2h 3h 4h 5h 6h	24h 48h 72h 96h 120h 144h 168h	192h
Tolerancia	2 seg	2 seg	10 seg	10 seg	2 min	5 min	2h	2h				



2.17. Resistividad Eléctrica, R_e (ND)

La resistividad eléctrica se considera una propiedad volumétrica de los materiales que indica su resistencia u oposición al paso de las cargas eléctricas (Antonio et al., 2019). En el caso del concreto, o de los sólidos en general, cuanto mayor es la resistividad eléctrica, menor es la porosidad del concreto; por lo tanto, mayor será su impermeabilidad y resistencia mecánica (Antonio et al., 2019). Para suelos no existe un valor aceptado universalmente de la R_e .

El procedimiento se realizó según la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016, 2016; cabe mencionar que esta norma también está diseñada para concretos y no para adobes o suelos. Se utilizó el equipo Soil Resistance Meter, Modelo 400 de Nilsson Electrical Laboratory Inc. y los especímenes cúbicos de $8 \times 8 \times 8 \text{ cm}^3$ utilizados en la prueba de Fagerlünd ya que la prueba requiere que los especímenes se encuentren saturados.

Procedimiento:

1. Determinar las dimensiones de los especímenes (estas debieron de ser tomadas al realizar la prueba de Fagerlünd).
2. Colocar el espécimen sobre una superficie no conductora de electricidad, plana y horizontal.
3. Colocar en las caras inferior y superior las esponjas o capuchones húmedos presionadas con placas de cobre (o acero inoxidable según lo indica la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016). Colocar peso sobre la cara superior para fijar y garantizar el contacto eléctrico (Ilustración 65).
4. Realizar la conexión del equipo con las placas de cobre.
5. Operar el resistómetro de acuerdo al manual del proveedor y seguir las instrucciones para la aplicación de corriente (I). Tomar lectura de los datos o registro del voltaje (E); realizar esta operación por lo menos en tres ocasiones para corroborar los resultados.

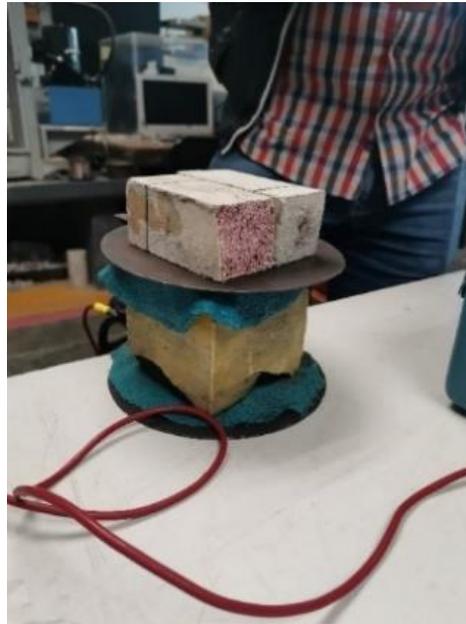


Ilustración 65. Preparación del espécimen y equipo según se explica en los pasos 3 y 4. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



3. RESULTADOS

3.1. Humedad Relativa (ND)

Es importante mencionar que los adobes estuvieron en las instalaciones del laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” en Morelia por algunos años y la prueba se realizó el 31 de agosto del 2020. En Morelia la humedad relativa en los meses de agosto y septiembre es alrededor del 83% (Weather Atlas, n.d.) (Weather Spark, n.d.).

Tabla 3. Humedad relativa obtenida en diferentes especímenes. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

MUESTRA	%HUMEDAD RELATIVA CARAS						% HUMEDAD RELATIVA
							PROM
TURICATO							
T-C1	87.10	83.30	84.40	82.50	87.80	89.70	85.80
T-C2	90.00	84.80	93.00	92.20	87.10	85.00	88.68
T-C3	79.20	85.20	88.30	85.20			84.48
T-C4	85.20	88.90	86.90	86.20			86.80
T-C5	80.00	86.60	91.90	93.00			87.88
T-C6	83.80	80.40	89.20	83.60			84.25
T-C7	73.10	78.30	79.00	87.80			79.55
T-C8	80.50	81.20	84.40	82.80			82.23
T-C9	83.80	81.50	89.50	84.40			84.80
T-C10	86.20	86.20	77.50	88.00			84.48
T-C11	90.00	91.10	78.70	88.00			86.95
HUACANA							
H-C1	80.90	76.50	84.80	79.20			80.35
H-C2	83.20	78.70	82.30	80.50			81.18
H-C3	81.30	82.30	77.00	80.00			80.15
H-C4	84.80	77.90	82.80	86.80			83.08
H-C5	60.80	71.20	67.60	70.20			67.45

En la Tabla 3 se puede observar que independientemente de la procedencia o composición del adobe estos muestran una humedad superficial similar a la humedad relativa del ambiente, en este caso de Morelia.



3.2. Colorimetría (ND)

A continuación, en la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos del ensaye de colorimetría:

Tabla 4. Coordenadas "a", "b" y "L*" del sistema CIELAB de cada muestra. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Procedencia	Muestra	L*	a	b
Huacana (liso)	H-C6	50.56	11.52	23.46
	H-C2	50.59	11.56	23.29
	H-C3	51.69	12.08	23.92
	Promedio	50.95	11.72	23.56
Huacana (paja)	H-C4	50.28	10.97	21.66
	H-C11	50.41	10.99	21.85
	H-C9	51.08	11.33	22.07
	Promedio	50.59	11.10	21.86
Turicato	T-C2	43.69	7.18	11.48
	T-C7	41.70	6.73	10.76
	T-C5	43.72	7.13	11.07
	Promedio	43.04	7.01	11.10

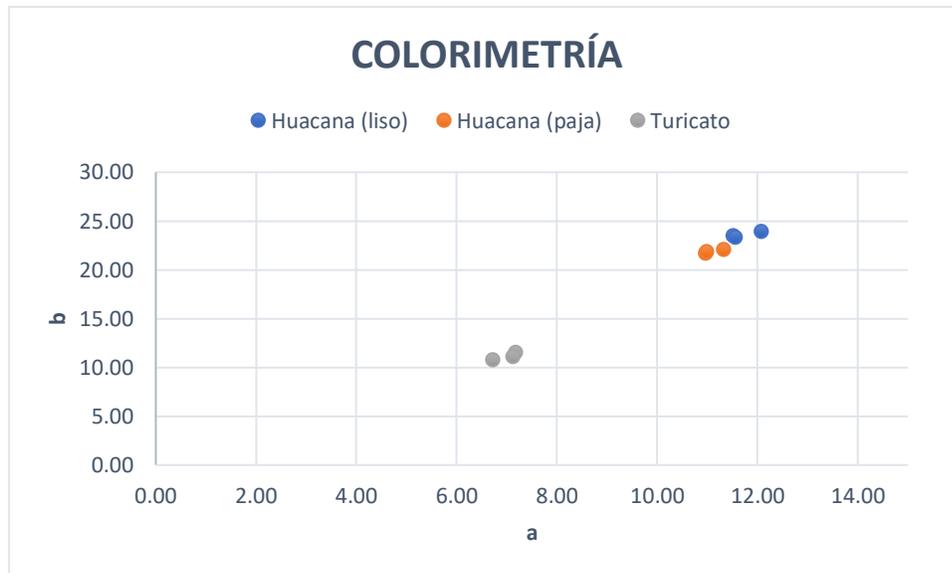


Ilustración 66. Comparación colorimétrica los adobes de La Huacana y Turicato acorde a las coordenadas del CIELAB. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

En la Ilustración 66 se puede observar que se generaron dos grupos principales, lo cual se debe a los dos lugares de procedencia Turicato y La Huacana, de los cuales su color es visiblemente diferente. El primero es un café oscuro y el segundo café claro ligeramente amarillento. Y también podemos observar que en La Huacana hay dos subgrupos, lo cual se debe al tipo de fibra² que contiene cada uno de estos grupos. En la Tabla 5 se muestra la comparación del color real las muestras y el obtenido con ayuda del generador Nix Color Sensor (<https://www.nixsensor.com/free-color-converter/>) y el promedio de las coordenadas de cada grupo.

² En el apartado “3.9 Granulometría” se muestran las fibras encontradas en los adobes.



Tabla 5. Comparación colorimétrica de la fotografía de la muestra real y el color generado por Nix Colo Sensor de los adobes de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Muestra	Generador	Fotografía
Huacana (liso)		
Huacana (paja)		
Turicato		

Es importante la prueba de colorimetría ya que estos inmuebles tienen una importancia histórica y cultural en la región. Por lo tanto, si serán intervenidos o restaurados, los reglamentos del INAH exigen que el color no sufra grandes variaciones.

3.3.Frecuencia Fundamental Longitudinal (ND)

En la Tabla 7 y Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos del ensaye de frecuencia fundamental longitudinal realizado en la cara 1 y cara 2 respectivamente de cada muestra. Para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico se utilizó la formula dada por la Red Durar.

$$E = [4n^2(L * 1000)^2\rho(10)^{-12}][10.193679]$$

Donde:

- E: módulo de elasticidad dinámico (kg/cm²)
- n: frecuencia fundamental longitudinal (Hz)
- L: longitud del espécimen (m)
- ρ : densidad (kg/m³)



Tabla 6. Datos y resultados del ensaye de frecuencia fundamental longitudinal realizado en la cara 1. Los resultados resaltados en blanco fueron descartados. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

CARA 1									
Nº Esp.	Tipo Esp.	Peso (grs)	Diam. (m)	Long. (m)	Frec. Long. (Hz)	Área (m ²)	Vol.(m ³)	Den.(kg/m ³)	E (kg/cm ²)
T-CI1	CILINDRO 15X30	2129.02	0.095	0.19	213	0.0071	0.00135	1580.84	105.57
T-CI2	CILINDRO 15X30	2209.21	0.095	0.19	2387	0.0071	0.00135	1640.39	13757.81
T-CI3	CILINDRO 15X30	2120.02	0.094	0.19	1084	0.0069	0.00132	1607.83	2780.98
H-CI1	CILINDRO 15X30	2083.87	0.091	0.18	1211	0.0065	0.00117	1780.02	3448.65
H-CI2	CILINDRO 15X30	1938.99	0.091	0.18	1600	0.0065	0.00117	1656.27	5601.53
H-CI3	CILINDRO 15X30	2008.82	0.090	0.18	745	0.0064	0.00115	1754.26	1286.30
H-CI4	CILINDRO 15X30	1997.30	0.091	0.18	1115	0.0065	0.00117	1706.08	2802.10

Tabla 7. Datos y resultados del ensaye de frecuencia fundamental longitudinal realizado en la cara 2. Los resultados resaltados en blanco fueron descartados. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

CARA 2									
Nº Esp.	Tipo Esp.	Peso (grs)	Diam. (m)	Long. (m)	Frec. trans. (Hz)	Area (m ²)	Vol.(m ³)	Den.(kg/m ³)	E (kg/cm ²)
T-CI1	CILINDRO 15X30	2129.02	0.095	0.19	1290	0.0071	0.00135	1580.84	16025.90
T-CI2	CILINDRO 15X30	2209.21	0.095	0.19	2330	0.0071	0.00135	1640.39	54251.55
T-CI3	CILINDRO 15X30	2120.02	0.094	0.19	895	0.0069	0.00132	1607.83	7681.56
H-CI1	CILINDRO 15X30	2083.87	0.091	0.18	601	0.0065	0.00117	1780.02	3404.73
H-CI2	CILINDRO 15X30	1938.99	0.091	0.18	1754	0.0065	0.00117	1656.27	26983.49
H-CI3	CILINDRO 15X30	2008.82	0.090	0.18	980	0.0064	0.00115	1754.26	8726.83
H-CI4	CILINDRO 15X30	1997.30	0.091	0.18	505	0.0065	0.00117	1706.08	2304.04



Tabla 8. Promedios de frecuencia y módulo de elasticidad de los resultados seleccionados.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Muestra	Fre. Long. Prom (Hz)	E (kg/cm ²)
T	1979	10462.54
H	6757	27574.18

Existe una gran variación entre los resultados, y esta puede ser causada por discontinuidades, inhomogeneidades, refuerzos, mellado, descantillado en aristas, relaciones morfológicas, etc.

Ya que los valores son muy variados entre ellos, se seleccionaron aquellos con la frecuencia o módulo de elasticidad similares o lo más cercanos posibles. Siendo seleccionadas las muestras resaltadas de color amarillo en la Tabla 7 y Tabla 5, y obteniendo como promedios los valores mostrados en la Tabla 8.

Los valores obtenidos con la prueba de frecuencia fundamental no permiten para hacer un buen análisis ya que estos presentaron altas variaciones, por la tanto para poder obtener un buen resultado sería necesario realizar dicho ensaye en un mayor número de muestras, lo cual desde luego es imposible con muestras patrimoniales como el caso que nos ocupa.

3.4. Velocidad de Pulso Ultrasónico (ND)

En este ensaye se utilizaron los mismos especímenes del ensaye de frecuencia fundamental longitudinal y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9. VPU y Ed de los adobes de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Nº Esp.	Vel (km/s)	Den (kg/m ³)	Poisson	Ed (kg/cm ²)	Vel _{prom} (km/s)	Ed _{prom} (kg/cm ²)
T-CI1	0.97	1580.84	0.46	3279.54	1.095	4300
T-CI2	1.214	1640.39	0.46	5330.45		
T-CI3	1.1	1607.83	0.46	4289.50		
H-CI1	1.05	1780.02	0.46	4326.97	1.075	4488
H-CI2	0.876	1656.27	0.46	2802.33		
H-CI3	1.27	1754.26	0.46	6238.51		
H-CI4	1.104	1706.08	0.46	4584.76		



Con la velocidad obtenida se calculó el módulo de elasticidad dinámico de los adobes con ayuda de la siguiente ecuación (Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, 2016):

$$E_d = \left[\frac{V^2 \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \right] 10.19368$$

Donde:

- E_d : Módulo de elasticidad dinámico (kg/cm²)
- V: Velocidad de pulso ultrasónico (km/s)
- ρ : Densidad (kg/m³)
- μ : Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson en adobes o suelo en su efecto va desde 0.15 hasta 0.50 según diversas investigaciones (Aguilar et al., 2015)(García, 2014). Dado que el valor es muy variado y en esta investigación no se realizó el ensaye para la obtención de dicho coeficiente, se optó por un escoger un valor que nos diera como resultado un módulo de elasticidad similar al módulo de elasticidad estático obtenido. Siendo este el caso, el coeficiente Poisson que dio resultados similares a los buscados fue $\mu=0.46$.

Los valores de VPU en adobes de México, Portugal y Perú obtenidos de diversas investigaciones varían entre los 600 y 950 m/s (Preciado Villicaña, 2020) (Silva et al., 2022) (Aguilar et al., 2015). La VPU de Turicato y La Huacana fue de 1095 y 1075 m/s respectivamente, por lo se le pueden considerar como adobes con una VPU alta.

3.5. Módulo de Elasticidad Estático (D)

En las ilustraciones (Ilustración 72 - Ilustración 72) se muestran las gráficas esfuerzo-deformación unitaria de los especímenes ensayados y las imágenes de los cilindros después de realizar la prueba. Dichos especímenes fueron los mismos utilizados para el ensaye de frecuencia fundamental longitudinal y VPU. Cabe resaltar que los especímenes utilizados de La Huacana pertenecen al subgrupo de “Huacana Paja”

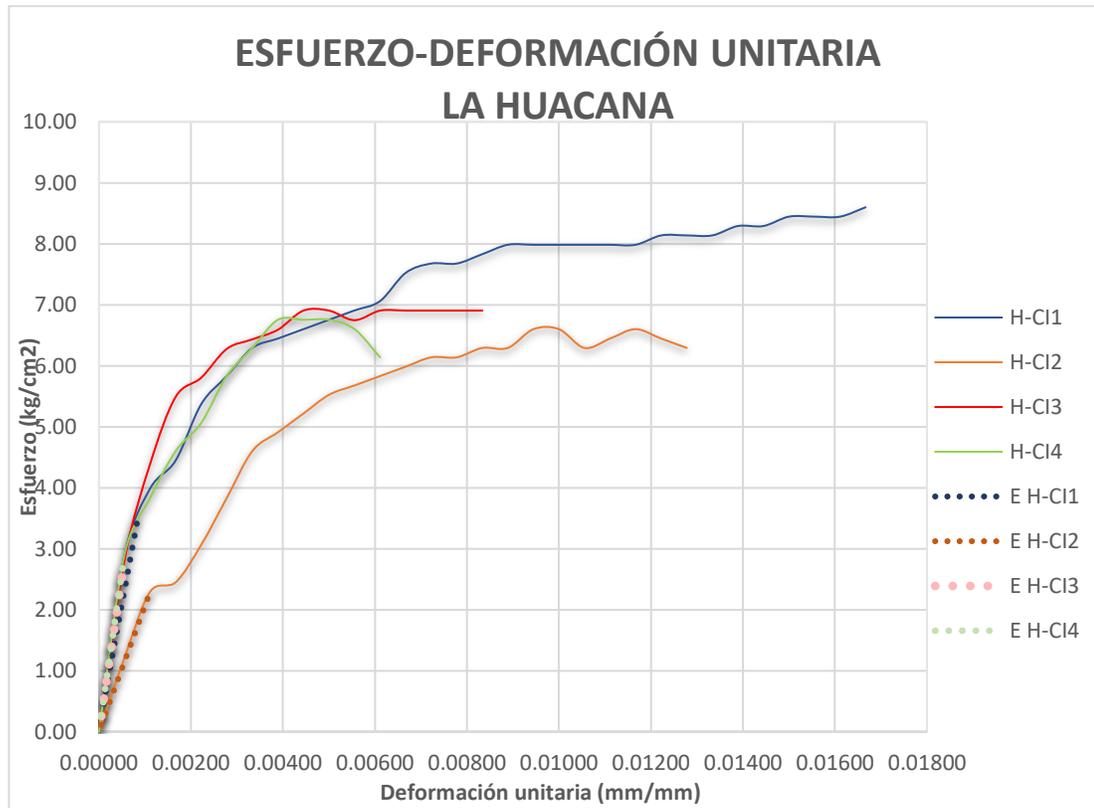


Ilustración 67. Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de los especímenes de La Huacana.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

En los especímenes de La Huacana se puede observar que los módulos de elasticidad son muy similares en todos los casos a excepción del espécimen H-CI2 (Ilustración 69). Sin embargo, las deformaciones en la zona plástica divergen bastante en todas las muestras; por ejemplo, el H-CI1 mostró una gran fluencia y aun así no tuvo grandes daños físicos (Ilustración 68), mientras que el H-CI4 tuvo una caída abrupta una vez que pasó a la zona plástica y el daño físico fue mayor (Ilustración 71) que el H-CI1. El H-CI3 es el que obtuvo el mayor esfuerzo (6.90kg/cm²) pero también mostro el mayor daño físico (Ilustración 70).



Ilustración 68. Espécimen H-CI1 posterior al ensaye de módulo de elasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 69. Espécimen H-CI2 posterior al ensaye de módulo de elasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 70. Espécimen H-CI3 posterior al ensaye de módulo de elasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 71. Espécimen H-CI4 posterior al ensaye de módulo de elasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

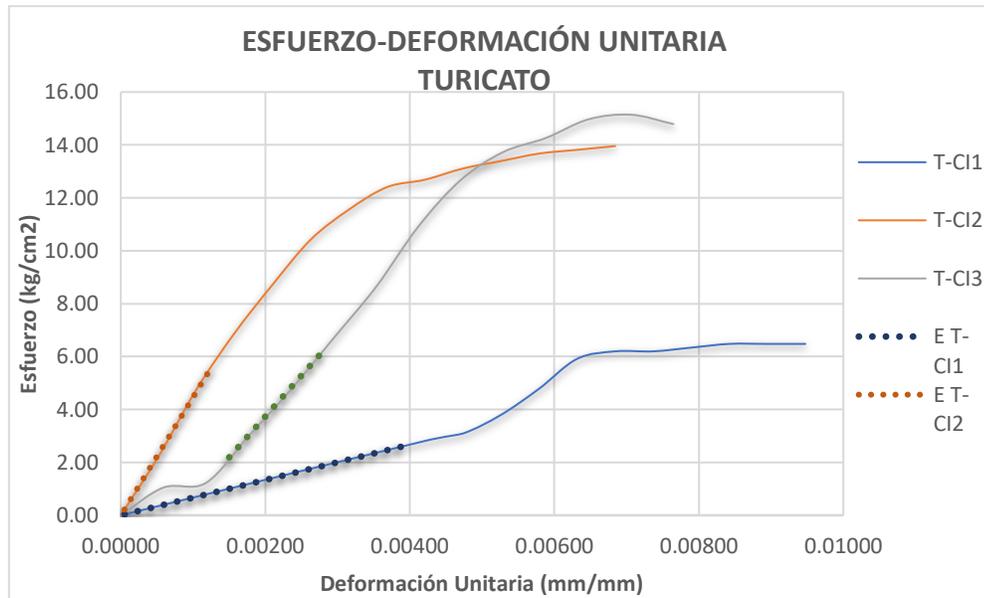


Ilustración 72. Grafica esfuerzo-deformación de los especímenes de Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Para el material de Turicato se puede observar que el espécimen T-CI1 tuvo una deformación rápida y un menor esfuerzo a comparación de los otros. Este espécimen presentaba 2 fracturas horizontales (Ilustración 73) antes de su ensaye, las cuales no atravesaban en su totalidad la sección transversal del espécimen, pudiendo ser esta la causa de dicha falla.



Ilustración 73. Especimen T-CI1 antes de ser ensayado. Presentaba 2 fracturas horizontales, las cuales no atravesaban en su totalidad la sección transversal del espécimen. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



En la Tabla 10 se muestran los módulos de elasticidad estático, esfuerzos máximos esfuerzos de ruptura obtenidos de cada espécimen, así como el promedio de estos.

Tabla 10. Módulos de elasticidad estático y esfuerzos máximos de La Huacana y Turicato.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Espécimen	Densidad (kg/m ³)	Densidad prom (kg/m ³)	E (kg/cm ²)	E _{prom} (kg/cm ²)	σ _{max} (kg/cm ²)	σ _{prom} (kg/cm ²)	σ _{ruptura} (kg/cm ²)	σ _{prom} (kg/cm ²)
H-CI1	1780.02	1724.16	4079.56	4796.50	8.60	6.75	8.61	7.77
H-CI2	1656.27		2059.41		6.60		6.61	
H-CI3	1754.26		5072.02		6.90		8.17	
H-CI4	1706.08		5237.92		6.75		7.69	
T-CI1	1580.84	1610.62	667.65	3781.46	6.48	14.55	6.49	14.56
T-CI2	1640.39		4471.72		13.96		13.97	
T-CI3'	-		3091.19		15.14		15.16	

En la norma NMX-C-128-ONNCCE-2013 para concretos especifica que los valores no deben de variar más del 5% entre ellos (NMX-C-128-ONNCCE-2013, 2014). Dado que esta norma está diseñada para concretos y los especímenes ensayados son muy pocos, se decidió tomar en consideración para esta investigación solo aquellos cuyos resultados sean similares.

En los resultados del módulo de elasticidad de La Huacana, las muestras H-CI1, H-CI2 y H-CI4 varían 19%, 72% y 3% respectivamente en relación a la muestra H-CI3, las. Por la tanto se omitió el uso del resultado de la muestra H-CI2 para el promedio. En el caso de los esfuerzos máximos, los resultados de las muestras H-CI1, H-CI2 y H-CI3 varían respecto a la muestra H-CI4 un 27%, 2% y 2% respectivamente. Por lo tanto, no se utilizó el resultado de la muestra H-CI1 para el promedio.

Para los valores del módulo de elasticidad de Turicato, el resultado de la muestra T-CI1 varia un 78% respecto a la muestra T-CI3', es por eso que el valor de T-CI1 no se consideró para el promedio. El resultado de T-CI2 varia 44% respecto a T-CI3', pero como no existen más valores que se puedan utilizar, este valor no se descartó. En los esfuerzos máximos, el resultado de la muestra T-CI1 varía un 53% respecto a la muestra T-CI2.El resultado de T-CI3' varia 8.5% respecto a T-CI2, por lo tanto, no se utilizó T-CI1 para el promedio.

Al cotejar los resultados de ambos lugares, se puede observar que el módulo de elasticidad es mayor el de La Huacana que el de Turicato. Así mismo, la fluencia muestra un mejor comportamiento en los adobes de La Huacana que en los de Turicato.



Sin embargo, el esfuerzo máximo obtenido es mayor el de Turicato que el de La Huacana con una diferencia de más del doble.

El esfuerzo de ruptura a compresión de un adobe generalmente va de 0.50 a 4.00 Mpa y su módulo de elasticidad va de 150 a 300 Mpa (Preciado Villicaña, 2020) (Illampas et al., 2014) (Costa et al., 2021) (Ige & Danso, 2021) (Vega et al., 2011). El esfuerzo más bajo que se obtuvo fue de 0.64 Mpa (T-CI1) y el más alto de 1.49 Mpa (T-CI3'). Por lo tanto, los adobes de La Huacana y Turicato tienen una resistencia a la compresión baja. Sin embargo, los módulos de elasticidad obtenidos fueron muy buenos, el más bajo fue de 202 Mpa (H-CI2) y el más alto de 513 Mpa (H-CI4), colocando los adobes en estudio por encima del promedio general.

3.6. Esfuerzo de Ruptura a Compresión Simple (D)

En la Tabla 11 se muestran los resultados de los especímenes ensayados a compresión simple. Y en la Tabla 12 se muestra la comparación de los resultados de especímenes cilíndricos y cúbicos. En concreto para obtener el esfuerzo de ruptura es multiplicar el esfuerzo obtenido por un factor de corrección por esbeltez (NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2015), dado que la norma está diseñada para concreto no se omitió el uso de dicho factor.

Tabla 11. Resultados de los especímenes ensayados a compresión simple. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

MUESTRA	OBSERVACIONES	DENSIDAD (kg/m ³)	DENSIDAD PROM (kg/m ³)	$\sigma_{ruptura}$ (kg/cm ²)	σ_{prom} (kg/cm ²)
T-C2	Fractura horizontal	1168.7876	1250.29	11.27	10.29
T-C5		1636.6446		10.67	
T-C6		-		10.77	
T-C8		1079.2186		7.38	
T-C9		1116.4934		8.45	
H-C2	Tuvo falla interna	895.0602	911.53	13.57	12.68
H-C3		909.2436		14.06	
H-C5	Tuvo falla interna	930.2844		10.41	
H-C4	MAS PAJA	890.8617	890.33	6.46	7.18
H-C9	MAS PAJA	889.7942		7.89	

Tabla 12. Comparación de densidad y esfuerzos de cilindros y cubos. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

	HUACANA (PAJA)		TURICATO	
	CUBOS	CILINDRO	CUBOS	CILINDROS
Densidad (kg/m^3)	890.33	1724.16	1250.29	1610.62
σ_{ruptura} (kg/cm^2)	7.18	7.77	10.29	14.56

De La Huacana se tuvieron especímenes de ambos subgrupos: Huacana Liso (H-C2, H-C3 y H-C5) y Huacana Paja (H-C4 y H-C9). La densidad entre ambos subgrupos es básicamente igual, pero si se compara con la densidad obtenida en los cilindros, esta última es mayor y divergen entre ellas por casi el doble. Por otro lado, el esfuerzo de ruptura es muy similar entre cilindros y cubos para el caso de los denominados especímenes Huacana Paja, pero comparando los cubos Huacana Liso versus Huacana Paja e incluso Turicato, los primero obtuvieron un esfuerzo de ruptura mayor. En la Ilustración 74 e Ilustración 75 se puede observar que los especímenes Huacana Paja mostraron una mayor deformación, mientras que los especímenes Huacana Liso no mostraron deformación e incluso tuvieron fallas internas el H-C2 (Ilustración 76) y H-C5 y esto se ve directamente relacionado con el contenido de fibras orgánicas.



Ilustración 74. Especimen H-C4 antes y después del ensayo de compresión simple.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 75. Especimen H-C9 antes y después del ensayo de compresión simple.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

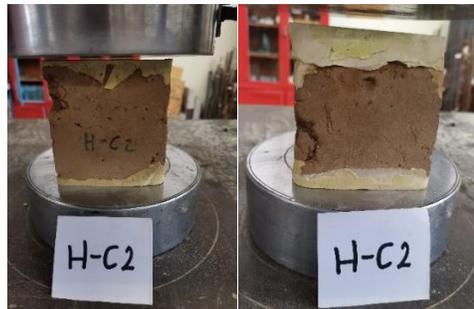


Ilustración 76. Espécimen H-C2 antes y después del ensayo de compresión simple.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 77. Espécimen T-C8 antes y después del ensayo de compresión simple.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Para el caso de Turicato, tanto las densidades como los esfuerzos de ruptura son diferentes en cilindros y en cubos, siendo mayores los resultados de los cilindros.

Se observa que tanto en Turicato como en La Huacana la densidad y los esfuerzos son menores en cubos. Es interesante ya que en concretos los cubos obtienen esfuerzos mayores a los cilindros. La correlación entre los esfuerzos de ruptura (UCS) de los cilindros y los cubos es de 0.8676 (Ilustración 78).

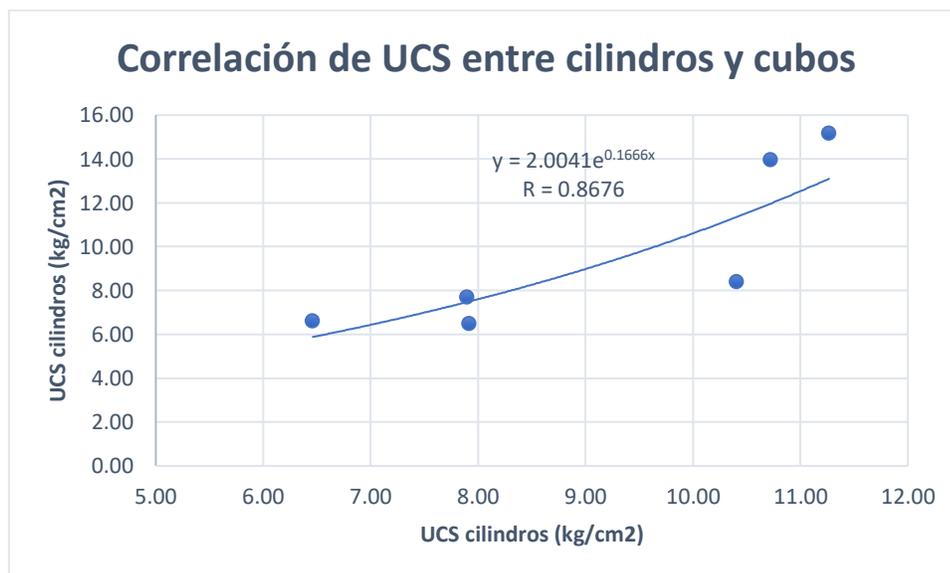


Ilustración 78. Grafica de correlación de UCS entre cilindros y cubos. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



3.7. Esfuerzo de Ruptura a la Flexión (D)

El ensaye de flexión fue realizado acorde a la norma TS EN 12372, pero los cálculos fueron realizados acorde a esta norma y también la norma mexicana NMX-C-191-ONNCCE-2015. Ninguna de las dos está diseñada para adobes. A continuación, se muestran las fórmulas utilizadas para el cálculo del módulo de ruptura:

- **TS EN 12372**

$$R = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

- **NMX-C-191-ONNCCE-2015**

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro el módulo de ruptura se calcula con la siguiente formula:

$$R = \frac{Fl}{bh^2}$$

Si la fractura se presenta fuera del tercio medio del claro el módulo de ruptura se calcula con la siguiente formula:

$$R = \frac{3Fa}{bh^2}$$

Donde:

R: módulo de ruptura (kg/cm²)

F: carga máxima aplicada (kg)

l: distancia entre apoyos (cm)

b: ancho del espécimen (cm)

h: peralte del espécimen (cm)

a: distancia promedio entre la fractura y el apoyo más cercano (cm)

En la Tabla 13 se muestran los datos y módulos de ruptura obtenidos del ensaye de flexión. Nuevamente en los especímenes de La Huacana tenemos especímenes de los dos subgrupos, siendo el HV-2 el único que pertenece a la “Huacana Liso” y todos los demás a la “Huacana Paja”



Tabla 13. Datos y resultados del ensaye de flexión. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

MUESTRA	OBSERVACIONES	LONGITUD (cm)	PERALTE (cm)	ANCHO (cm)	CARGA (kg _f)	LUGAR DE LA FALLA	a (cm)	R _{MEX} (kg _f /cm ²)	R _{prom} (kg _f /cm ²)	R _{ESP} (kg _f /cm ²)	R _{prom} (kg _f /cm ²)
TV-1	Sin fallas o fisuras presentes en la muestra antes de aplicar carga.	12.50	4.42	4.42	15.50	Fuera del tercio medio	3.00	1.61	7.53	3.36	3.85
TV-2	Sin fallas o fisuras presentes en la muestra antes de aplicar carga.	12.00	4.47	4.45	12.80	Dentro del tercio medio	-	7.73		2.59	
TV-3	Se observo una ligera fisura vertical, y fue donde se produjo la falla.	12.30	4.50	4.68	32.60	Dentro del tercio medio	-	19.04		6.34	
TV-4	Ligera falta de material donde se generó la falla.	12.50	4.48	4.39	14.60	Fuera del tercio medio	3.50	1.74		3.10	
HV-2	Adobes con una menor cantidad de materia orgánica. Falla horizontal bastante significativa antes de realizar la prueba y justo ahí se generó la falla final.	12.50	4.41	4.52	8.50	Fuera del tercio medio	3.50	1.02	1.02	1.82	5.36
HV-3	Ligera falta de material donde se generó la falla.	12.00	4.44	4.41	14.30	Dentro del tercio medio	-	8.77	15.80	2.97	
HV-4	Sin fallas o fisuras presentes en la muestra antes de aplicar carga. Falta de material en uno de los extremos pero no afecto en nada.	11.60	4.43	4.24	38.60	Dentro del tercio medio	-	23.84		8.07	
HV-5	2 fisuras unidas en forma de "V". Una estaba justo a la mitad de la viga con una inclinación de unos 45° y en la cual se genero la falla final.	11.50	4.39	4.45	21.70	Dentro del tercio medio	-	12.78		4.36	
HV-6	Sin fallas o fisuras presentes en la muestra antes de aplicar carga.	12.40	4.43	4.03	25.60	Dentro del tercio medio	-	17.80		6.03	

Comparando los módulos de ruptura de los tres grupos o subgrupos, ya sea mediante el cálculo de la norma mexicana o europea, se puede observar que el módulo de ruptura más alto es el de los especímenes de Huacana Paja superando al de Turicato por el doble aproximadamente, y el más bajo es el de Huacana Liso. La diferencia tan grande entre los dos subgrupos de La Huacana probablemente se deba al refuerzo de fibra orgánica que estos contienen, ya que esta es diferente en ambos y la cantidad es mayor en los especímenes Huacana Paja. Por otro lugar cabe mencionar que la fibra orgánica del adobe de Turicato ya estaba en un estado deteriorado ó sensible (no se logró rescatar y separar en el procedimiento de granulometrías) y no estaba distribuida de manera homogénea en todos los adobes, ya que había algunos que contenían más fibra que otros.

En adobes de la provincia de León, España se realizó el ensaye de flexión de acuerdo a la norma TS EN 12372 y los valores mínimo y máximo obtenidos fueron 0.49 N/mm² (4.99 kg/cm²) y 0.82 N/mm² (8.36 kg/cm²) (Vega et al., 2011). Los datos obtenidos de Huacana Paja, Turicato y Huacana Liso fueron de 5.36, 3.85 y 1.82 kg/cm² respectivamente. Esto coloca el módulo de ruptura de los adobes en estudio por debajo del de los adobes de España, con una diferencia de 3 kg/cm² respecto a la carga más cercana.



3.8. Distribución Granulométrica (D)

Inicialmente eran 2 muestras de cada lugar, pero cuando las muestras se pusieron a saturar, fue que se observó que existían dos muestras diferentes dentro de los adobes de La Huacana, la fibra orgánica que contenían era diferente (Ilustración 79 e Ilustración 80) y la cantidad también era visiblemente mayor en una de ellas. Por este motivo fue que se le nombre “Huacana Paja” (muestras Huacana 2 y Huacana 4) a la muestra que contenía mayor cantidad de fibra orgánica y a la otra se le nombró “Huacana Liso” (muestras Huacana 1 y Huacana 3) porque su textura era visiblemente más lisa que la otra. Una vez que se finalizó la prueba de ambas muestras de La Huacana también se observó que los líticos eran diferentes; mientras que los de la Huacana Paja eran en su mayoría de color negro u oscuro y con aristas marcadas (Ilustración 81), los de la Huacana Liso eran más claros y con aristas redondeadas similares a los líticos de un río (Ilustración 82).



Ilustración 79. Fibra orgánica de la muestra "Huacana Paja". Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 80. Fibra orgánica de la muestra "Huacana Liso". Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 81. Líticos de la muestra "Huacana Paja". Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 82. Líticos de la muestra "Huacana Liso". Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

En la muestra de Turicato al momento de saturar se observó básicamente una presencia nula de fibras orgánicas (Ilustración 83) y fue imposible poder rescatar las fibras existentes durante el proceso, ya que estaban muy sensibles y se disgregaron.



Ilustración 83. Muestra de Turicato en saturación para realizar posteriormente el lavado. No se observan fibras orgánicas como en el caso de las muestras de La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



En la Ilustración 84, Ilustración 85 e Ilustración 86 se muestran las granulometrías obtenidas de Turicato, Huacana Paja y Huacana Liso. El adobe de Turicato muestra un mayor contenido de arena que los de La Huacana.



Ilustración 84. Granulometría obtenida de Turicato.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 85. Granulometría obtenida de Huacana Paja.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 86. Granulometría obtenida de Huacana Liso.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Como se mencionó anteriormente la distribución granulométrica para adobes recomendada es la siguiente: 14% arcilla, 22% limo, 62% arena y 2% grava. En la Ilustración 87 Ilustración 86, Tabla 15 y Tabla 15 se puede observar que el adobe de Turicato es el único que se asemeja a la distribución granulométrica recomendada, presentando la siguiente distribución: finos (arcilla y limos) 44.67%, 54.10% arena y 1.23% grava. Por otro lado, los dos subgrupos de La Huacana presentan un porcentaje de finos cercano al 90%, por lo cual esta distribución sería más adecuada para ladrillos que para adobes.

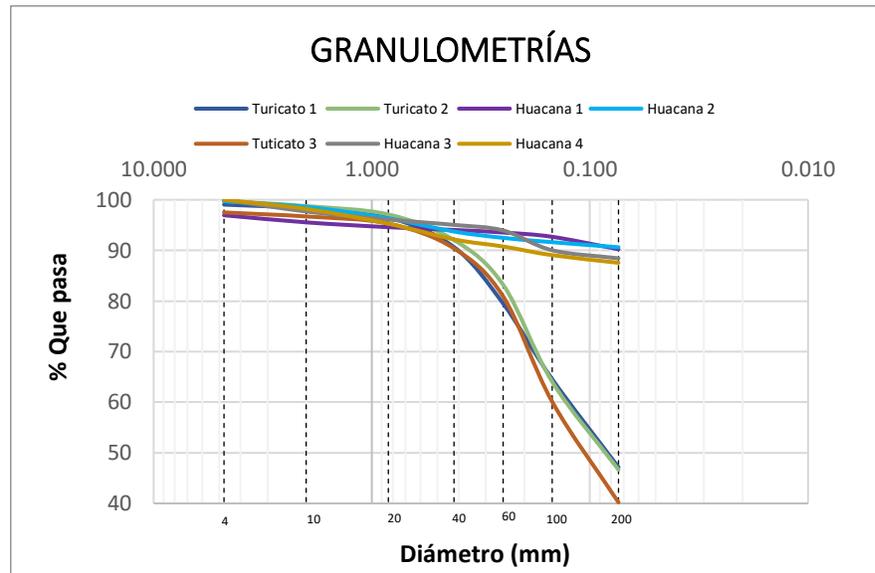


Ilustración 87. Grafica de distribución granulométrica de las muestras de Turicato y La Huacana.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Tabla 14. Porcentaje correspondiente de grava, arena, finos y fibra orgánica de cada muestra.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

TIPO SUELO	Turicato 1	Turicato 2	Turicato 3	Huacana 1	Huacana 2	Huacana 3	Huacana 4
Grava	0.95	0.25	2.50	3.06	0.30	0.00	0.00
Arena	51.90	53.10	57.30	6.72	9.08	11.58	12.45
Finos < ASTM 200	47.15	46.65	40.20	90.23	90.62	88.42	87.55
Fib. Orgánica	-	-	-	0.26	0.37	0.25	0.40
Clasificación SUCS	SC	SC	SC	CL	CL	CL	CL

Se realizó acorde a SUCS (capítulo 1.1.4.6) la clasificación del suelo que conformaban los adobes. Obteniendo para Turicato una clasificación de arena arcillosa (SC) y para ambos subgrupos de La Huacana una clasificación de arcilla de baja plasticidad (CL).



Tabla 15. Porcentaje promedio de la distribución granulométrica, clasificación de finos y clasificación SUCS de Turicato y La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

TIPO SUELO	Turicato (%)	Huacana Paja (%)	Huacana Liso (%)
Grava	1.23	0.15	1.53
Arena	54.10	10.77	9.15
Finos	44.67	89.08	89.32
Fib. Orgánica	-	0.38	0.25
Clas. Finos	CL	CL	CL
SUCS	SC	CL	CL

Según diversas investigaciones la distribución granulométrica del adobe varió alrededor de los porcentajes antes mencionados, pero hay sus excepciones. Existen adobes que presentan un alto contenido de finos y pueden llegar hasta el 90% como es en el caso de La Huacana; o viceversa que presentan un porcentaje de finos muy bajo de alrededor del 15% o hasta 5% como los adobes de Jojutla y Portugal respectivamente. (Preciado Villicaña, 2020) (Costa et al., 2021) (Ige & Danso, 2021) (Raavi & Tripura, 2021) (Illampas et al., 2014) .

Por otro lado, el contenido de fibra orgánica más alta obtenido de los adobes en estudio fue de 0.38%. En Jojutla los adobes presentan un porcentaje 0.5-1.0% y en Portugal alrededor del 1% (Preciado Villicaña, 2020) (Costa et al., 2021).

3.9.Límites de Atterberg (D)

A continuación, en la Tabla 16 se presentan los límites de consistencia obtenidos mediante los diferentes contenidos de agua y en la Tabla 17 se presenta el promedio correspondiente de cada uno de ellos para La Huacana Turicato.



Tabla 16. Límites de Atterberg en las muestras de adobe de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

MUESTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	CV (%)	SUCS
H1	48.76	35.64	13.12	6.48	33.08	CL
H2	48.44	32.80	15.64	6.04	31.24	CL
H3	49.42	33.52	15.90	6.36	30.71	CL
T1	26.61	19.13	7.48	4.92	19.77	CL
T2	25.33	23.28	2.06	4.38	20.50	CL
T3	25.24	18.44	6.80	3.56	18.04	CL

Tabla 17. Promedio de los límites de Atterberg de los adobes de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

MUESTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	CV (%)	SUCS
LA HUACANA	49.58	34.10	15.48	6.38	31.97	CL
TURICATO	25.73	20.28	5.45	4.29	19.43	CL

En base a los datos obtenidos (Tabla 16) y con ayuda de la carta de plasticidad (Ilustración 88), se graficaron y clasificaron las muestras.

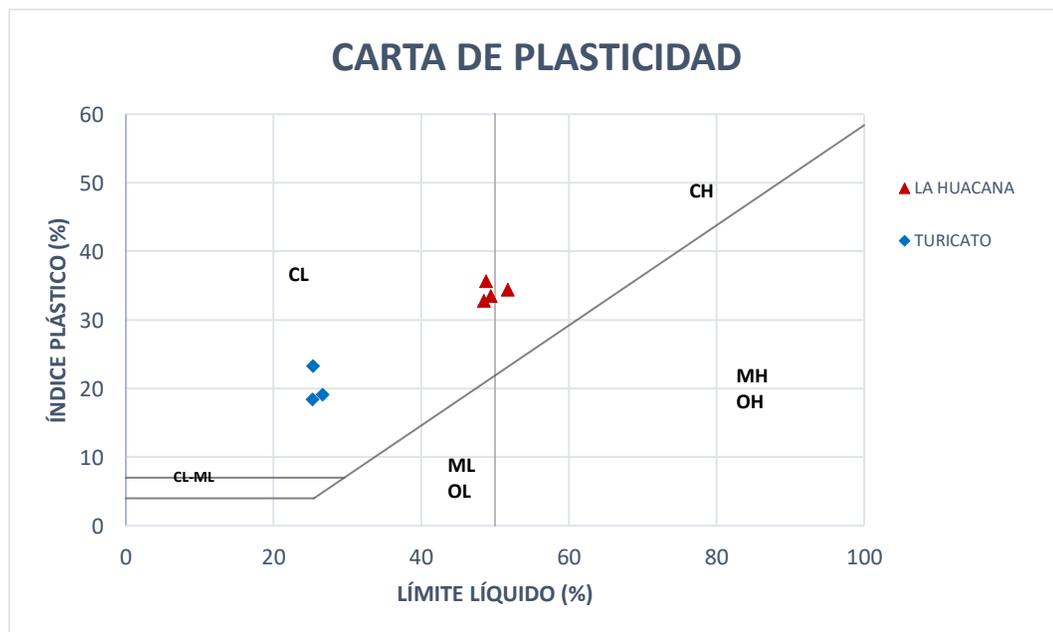


Ilustración 88. Clasificación de finos de La Huacana y Turicato en la carta de plasticidad. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Para ambos lugares la clasificación de finos obtenida fue “arcillas de baja compresibilidad” (CL), por lo tanto, tendrán un bajo grado de expansión. Sin embargo, los finos de La Huacana están en el límite entre alta y baja compresibilidad por lo tanto estos pueden causar más problemas que los finos de Turicato.



Ilustración 89. CV y CL de la muestra No.2 de La Huacana. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Ilustración 90. CV y CL de la muestra No.1 de Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Los especímenes de Turicato tuvieron una contracción volumétrica (CV) de 19.43% y una contracción lineal (CL) de 4.29%. Y la muestra de la Huacana tuvo una CV de 31.97% y una CL de 6.38%. Visualmente las contracciones no divergen mucho entre ellas (Ilustración 89 e Ilustración 90), mientras que numéricamente las diferencias son CV=12.54% y CL=2.09%.

3.10. Esfuerzo por Método de Carga Puntual (D)

Las fórmulas que se utilizaron para el cálculo del esfuerzo por el método de carga puntual son las siguientes:

$$D_e^2 = 4\pi/A \quad A = WD \quad I_s = P/D_e^2$$

$$F = \left(D_e/50\right)^{0.45} \quad I_{s(50)} = F * I_s$$

$$\sigma = C I_{s(50)}$$



Donde:

- De: Diámetro equivalente (mm).
- A: Área de la sección transversal (mm²).
- W: Ancho de la sección transversal (mm).
- D: Peralte de la sección transversal (mm).
- I_s: Índice de resistencia de carga puntual (Mpa).
- P: Carga de falla (kN)
- F: Factor de corrección.
- I_{s(50)}: Índice de resistencia de carga puntual corregido (Mpa).
- σ: Esfuerzo por el método de carga puntual (Mpa).
- C: Factor que depende de la correlación específica del sitio.

Los esfuerzos de los adobes de Turicato (20.50 kg/cm²), Huacana Paja (17.00 kg/cm²) y Huacana Liso (33.29 kg/cm²) obtenidos mediante el método de carga puntual conservan el mismo orden ascendente que los esfuerzos de compresión axial obtenidos en los cubos (10.29, 12.68 y 7.18 kg/cm² respectivamente) (Tabla 18). La diferencia entre los esfuerzos correspondientes de carga puntual y compresión simple es más del doble, pero es importante recordar que el esfuerzo de carga puntual tiene un factor que depende de la correlación específica del sitio (C) y en esta investigación se consideró con un valor igual 24, el cual fue determinado por la norma ASTM D5731 diseñada para rocas. Es por eso que se realizó una correlación entre I_{s(50)} y UCS de los cubos (Ilustración 91) y se obtuvo un valor de valor de R=0.8523.

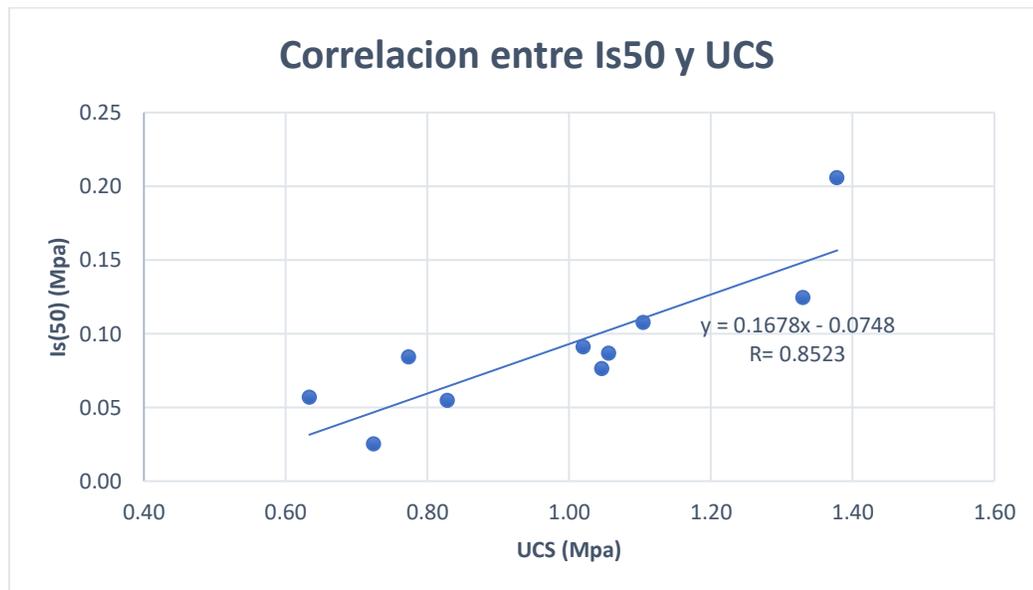


Ilustración 91. Grafica de correlación entre I_{s(50)} y UCS obtenida de la compresión simple en cubos. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



Tabla 18. $I_{s(50)}$ y esfuerzo por el método de carga puntual de los adobes de Turicato y La Huacana.
Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

MUESTRA	$I_{s(50)}$ (Mpa)	σ (kg/cm ²)	σ_{PROM} (kg/cm ²)
T1	0.11	26.85	20.50
T2	0.02	6.09	
T3	0.06	13.70	
T4	0.05	12.22	
T5	0.17	41.47	
T6	0.09	21.47	
T7	0.08	19.52	
T8	0.08	19.77	
T9	0.08	18.72	
T10	0.10	25.21	
H1-1	0.06	13.58	17.00
H1-2	0.09	22.24	
H1-3	0.07	17.20	
H1-4	0.09	20.98	
H1-5	0.06	15.06	
H1-6	0.05	12.94	
H2-1	0.14	34.11	33.28
H2-2	0.20	49.16	
H2-3	0.09	22.17	
H2-4	0.09	21.82	
H2-5	0.12	28.56	
H2-6	0.18	43.85	

3.11. Potencial de Hidrogeno, pH (D)

Los suelos arcillosos usualmente tienen un PH entre 7 y 8.5. Un pH de más de 7 generalmente previene el crecimiento de fauna y flora indeseables. El valor de pH favorable para el crecimiento de hongos varía entre 4.5 y 6.5 (Minke, 2005).



Tabla 19. PH obtenido con las tiras reactivas. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Muestra	PH
H1	6
H2	6
H3	6
H'1	5
H'2	5
H'3	5
T1	6
T2	6
T3	6

En la Tabla 19 se muestra los pH obtenido de cada muestra, se realizó la prueba por triplicado para cada grupo, obteniendo un PH promedio de 6, 5 y 6 para la Huacana Liso, Huacana Paja y Turicato respectivamente. De acuerdo a lo antes mencionado, los adobes de ambas procedencias muestran un pH apto para el crecimiento de hongos, si la muestra de suelo no contuviera estabilizantes. Sin embargo, durante toda la investigación no se observaron indicios de existencia de hongos en ninguna muestra. Esto probablemente se debe a que no están expuestos en un ambiente con una humedad relativa alta o que contienen cal, que es un inhibidor de biota.

3.12. Triaxial Undrained Unconfined, UU (D)

En la Tabla 20 se muestran los esfuerzos obtenidos mediante la prueba triaxial, con estos datos se generaron las gráficas de esfuerzo deformación (Ilustración 92, Ilustración 94 e Ilustración 96) y los círculos de Mohr (Ilustración 93, Ilustración 95 e Ilustración 97) y de los cuales se obtuvieron los datos de cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ) correspondientes de cada material.



Tabla 20. Resumen de resultados del ensaye triaxial realizado en los especímenes de La Huacana (liso y paja) y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

MUESTRA	σ_3 (kg/cm ²)	σ_{max} (kg/cm ²)	γ_m (g/cm ³)	W (%)
LA HUACANA (PAJA)	0.30	7.8841	1.29	5.29
	0.60	3.9791	1.17	8.00
	0.90	8.6680	1.14	5.37
	Com. Simple	5.2133	1.26	5.25
LA HUACANA (LISO)	0.30	12.0432	1.24	6.81
	0.60	12.1889	1.19	6.51
	0.90	17.4240	1.29	7.06
	Com. Simple	10.0249	1.30	6.70
TURICATO	0.30	9.9640	1.77	2.26
	0.60	8.5971	1.54	2.50
	0.90	17.5829	1.64	2.63
	Com. Simple	7.4544	1.53	3.36

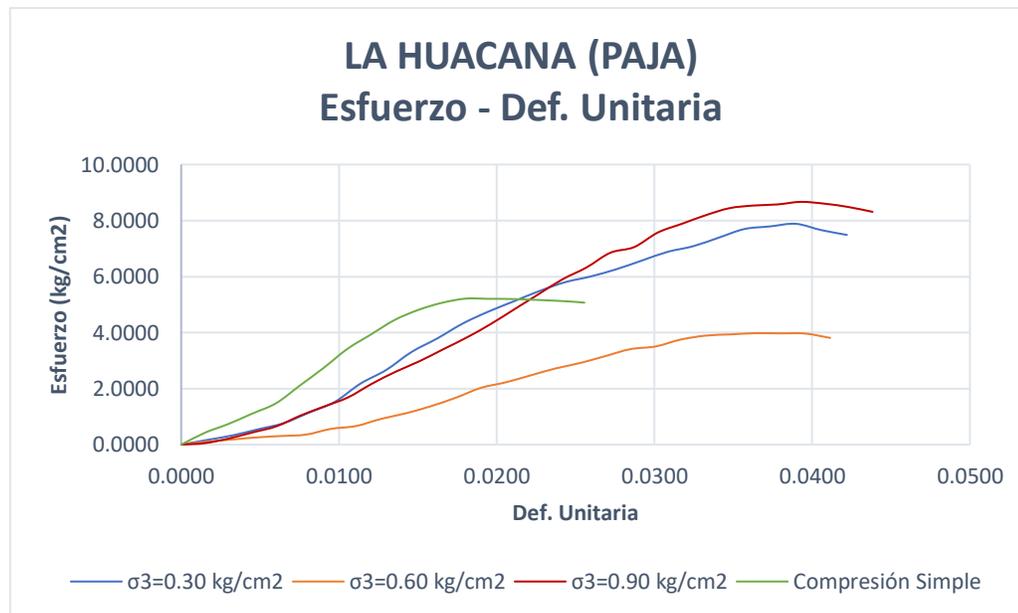


Ilustración 92. Grafica esfuerzo-deformación de los especímenes Huacana Paja sometidos a los diferentes esfuerzos de confinamiento. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN LA HUACANA (PAJA)

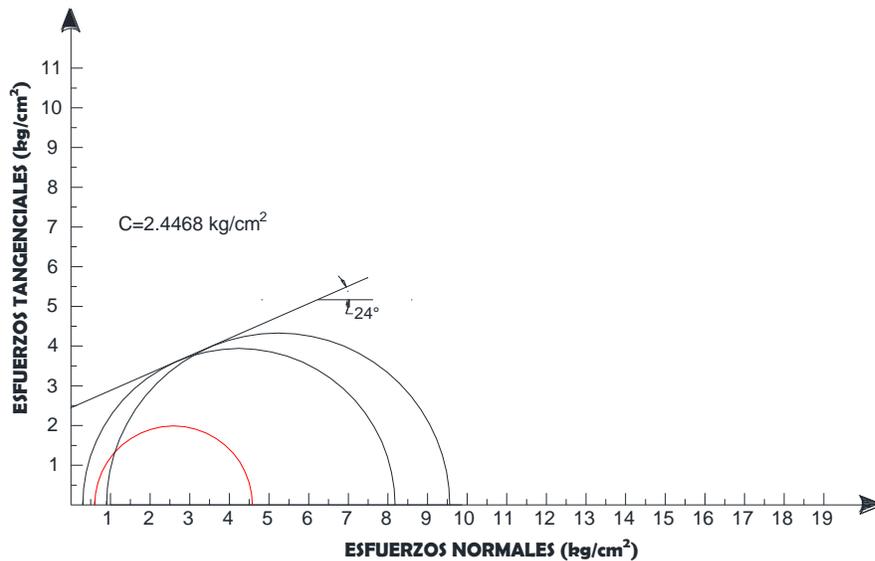


Ilustración 93. Cohesión y ángulo de fricción del adobe denominado Huacana Paja. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

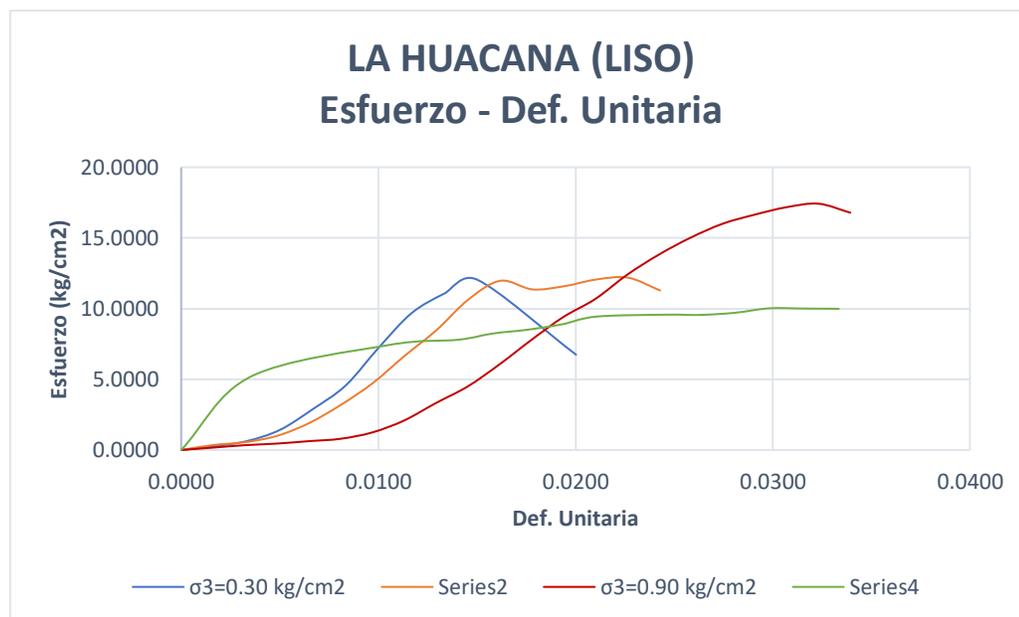


Ilustración 94. Grafica esfuerzo-deformación de los especímenes Huacana Liso sometidos a los diferentes esfuerzos de confinamiento. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN
LA HUACANA (LISO)

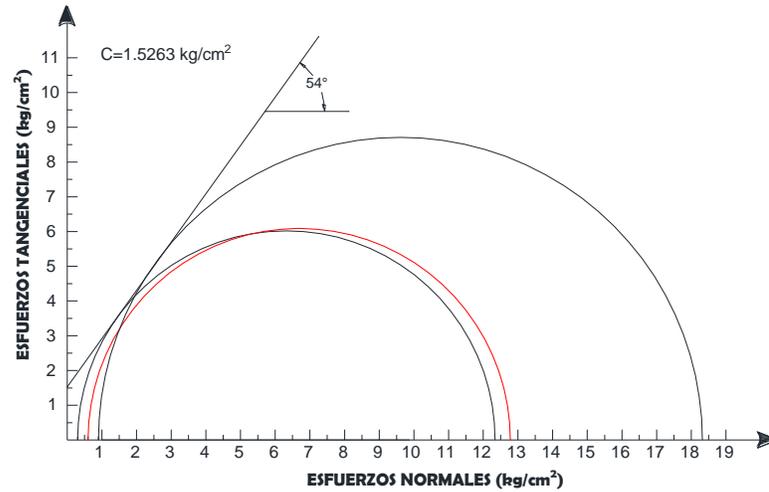


Ilustración 95. Cohesión y ángulo de fricción del adobe denominado Huacana Liso. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

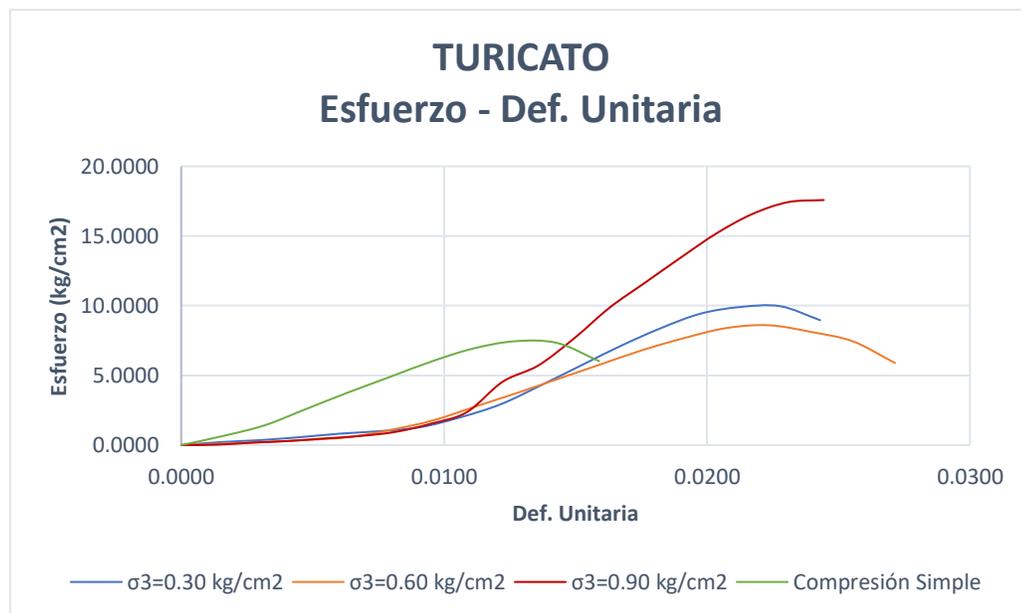


Ilustración 96. Grafica esfuerzo-deformación de los especímenes Turicato sometidos a los diferentes esfuerzos de confinamiento. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.



COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN TURICATO

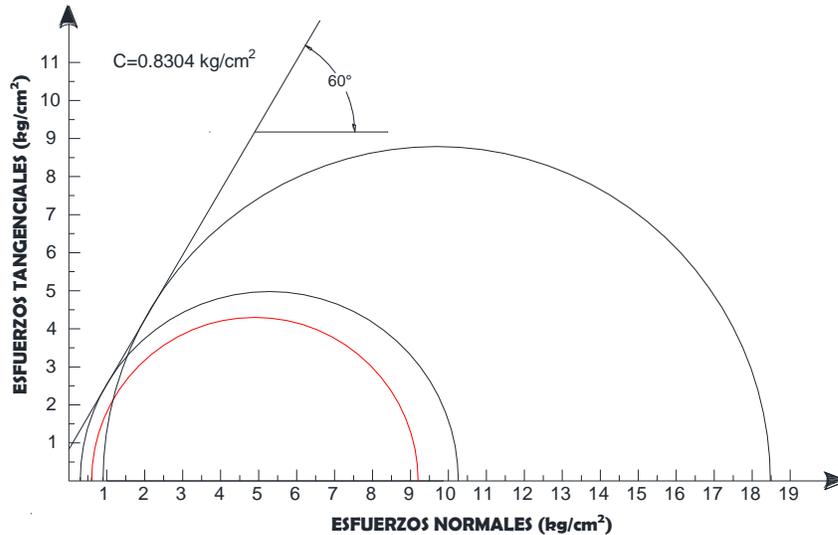


Ilustración 97. Cohesión y ángulo de fricción del adobe de Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Los esfuerzos obtenidos en esta prueba siguen siendo similares a los que se obtuvieron mediante el ensaye de módulo de elasticidad y compresión simple. Por otro lado, se obtuvieron valores altos de la cohesión y el ángulo de fricción (Tabla 21) debido a que son arcillas en estado seco. El ángulo de fricción más alto es el de la muestra Turicato gracias a su alto contenido de arenas las cuales son un material friccionante y sin cohesión. En las muestras de La Huacana es interesante que el ángulo de fricción difiera por más de doble, teniendo en cuenta que el material fino (menor a malla 200 ASTM) es el mismo y los porcentajes de distribución granulométrica son básicamente iguales, pero los líticos y fibra orgánica son diferentes (capítulo 3.8). Estos mismos criterios afectan a la cohesión, pero en sentido inverso, ya que la cohesión más alta fue la de la muestra denominada Huacana Paja y esto se le puede atribuir a su alto contenido de arcillas y fibra orgánica.

Tabla 21. Valores de cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ). Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Muestra	C (kg/cm ²)	ϕ (°)
Huacana Paja	2.4468	24
Huacana Liso	1.5263	54
Turicato	0.8304	60



3.13. Humedad Actual (ND)

En la Tabla 22 se muestra la humedad actual obtenida de los diferentes especímenes del ensaye triaxial. Debido a que la humedad no fue tomada cuando las muestras se llevaron al laboratorio no se puede considerar como la humedad actual representativa del adobe del lugar de procedencia. Sin embargo, considerando que las muestras estuvieron en el mismo lugar y condiciones durante un tiempo prolongado (10 años aproximadamente) se puede observar que el adobe de Turicato tuvo una absorción inferior de la humedad del ambiente con una diferencia del 3% aproximadamente de las muestras de La Huacana. Y las muestras de La Huacana también muestran una ligera diferencia del 0.79% entre ellas siendo menor la que tiene mayor contenido de fibra orgánica. Recordando que los adobes de La Huacana tienen un alto contenido de finos y su clasificación es arcillas de baja compresibilidad, pero están en el límite para arcillas de alta compresibilidad es lógico que estos hayan presentado una humedad actual mayor a los de Turicato.

Tabla 22. Humedad actual obtenida de los residuos de la prueba triaxial. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

MUESTRA	W (%)	W _{PROM} (%)
Huacana Paja $\sigma=0.3$	5.29	5.98
Huacana Paja $\sigma=0.6$	8.00	
Huacana Paja $\sigma=0.9$	5.37	
Huacana Paja CS	5.25	
Huacana Liso $\sigma=0.3$	6.81	6.77
Huacana Liso $\sigma=0.6$	6.51	
Huacana Liso $\sigma=0.9$	7.06	
Huacana Liso CS	6.70	
Turicato $\sigma=0.3$	2.26	2.69
Turicato $\sigma=0.6$	2.50	
Turicato $\sigma=0.9$	2.63	
Turicato CS	3.36	



3.14. Fagerlünd o Sortividad o Absorción Capilar (ND)

El agua se puede considerar como el principal enemigo de un adobe, ya que afecta directamente en las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y flexión que son la base principal de la construcción.

En las muestras de la Huacana Liso se observa (Tabla 23), según los valores, una mayor porosidad en un tiempo medio con respecto a las otras muestras. Y se observa una tasa de absorción inicial menor para Huacana paja (Tabla 23), implicando el mayor tiempo en la saturación.

Tabla 23. Tasa de absorción inicial y su correlación ($R_{inicial}$), tasa de absorción secundaria y su correlación ($R_{secundaria}$), índice de absorción (I), tiempo donde finaliza la absorción inicial (tn), permeabilidad (K), resistencia a la penetración del agua (m), porosidad efectiva (ϵ_e) y sortividad (S). Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

Denominación	Muestra	Tasa Abs. Inicial	$R_{inicial}$ (%)	Tasa Abs. Secundaria	$R_{secundaria}$ (%)	I (mm/s ^{1/2})	tn (s)	K [kg/(m ² s ^{1/2})]	m (s/m ²)	ϵ_e (%)	S (m/s ²)
Turicato	T-C3	1.39E-01	99.72%	2.96E-03	0.90125	0.13870	29948.64	1.24E-01	4.23E+06	25.54	4.86E-04
	T-C4	1.34E-01	99.78%	4.69E-03	0.95307	0.13440	30181.36	1.22E-01	4.27E+06	25.18	4.84E-04
	T-C7	1.24E-01	99.71%	6.41E-03	0.9843	0.12440	31971.56	1.10E-01	4.60E+06	23.65	4.66E-04
	T-C10	1.32E-01	99.89%	9.32E-03	0.99087	0.13240	30515.07	1.25E-01	4.29E+06	25.83	4.83E-04
Huacana Liso	H-C1	2.05E-01	99.73%	3.54E-03	0.96238	0.20540	34564.68	1.90E-01	4.67E+06	41.01	4.63E-04
	H-C6	2.26E-01	99.79%	4.37E-03	0.98537	0.22630	25480.88	2.02E-01	4.00E+06	40.43	5.00E-04
Huacana Paja	H-C10	1.15E-01	99.97%	9.54E-03	0.84366	0.11540	84682.10	1.17E-01	1.15E+07	39.59	2.95E-04
	H-C11	1.19E-01	99.90%	1.15E-02	0.83566	0.11950	73130.18	1.16E-01	1.04E+07	37.29	3.10E-04

3.15. Resistividad Eléctrica, Re (ND)

Para el cálculo de la resistividad se utilizó la siguiente formula:

$$\rho = R_e \frac{A}{L}$$

Donde:

ρ : Resistividad eléctrica (k Ω -cm o Ω -m)

R_e : Resistencia eléctrica (k Ω o Ω)

A: Área de la sección transversal del espécimen (cm² o m²)

L: Longitud del espécimen (cm o m)



Los adobes de Jojutla, Morelos obtuvieron una resistividad desde 623 hasta 2,510 Ω -m (Preciado Villicaña, 2020), pero esta resistividad fue obtenida en estado seco del adobe, debido a esto es más conveniente comparar los datos con los valores típicos de los suelos, en este caso arcilla o arena arcillosa. Los valores de resistividad típicos de un suelo arcilloso andan alrededor de 50 Ω -m y los de una arena arcillosa de 50 a 500 Ω -m (Sanz A. et al., 2010).

Recordemos que el adobe de La Huacana tiene un 89% CL (arcilla de baja compresibilidad) de su distribución granulométrica y Turicato tiene un 54% arenas y 44% CL, y presentaron una resistividad promedio de 22.94 y 24.42 Ω -m respectivamente (Tabla 24). Ambos presentan una resistividad similar a pesar de su diferencia en la distribución granulométrica y sus valores corresponden a los de un suelo arcilloso, esto quiere decir que ambos adobes presentan una porosidad interconectada similar.

Tabla 24. Resistividad de los adobes de La Huacana y Turicato. Fuente: M. Ruiz-Mendoza.

MUESTRA	a (cm)	b (cm)	A (cm ²)	L (cm)	k (cm)	Re (Ω)	ρ (k Ω -cm)	ρ (Ω -m)
T-C3	8.415	8.414	70.804	8.413	8.416	340.000	2.861	28.614
T-C4	8.330	8.315	69.264	8.405	8.241	260.000	2.143	21.426
T-C7	8.338	8.297	69.180	8.335	8.300	310.000	2.573	25.730
T-C10	8.182	8.358	68.385	8.429	8.113	270.000	2.191	21.905
H-C1 (liso)	8.515	8.274	70.453	8.604	8.188	275.000	2.252	22.518
H-C6 (liso)	8.522	8.535	72.735	7.986	9.108	265.000	2.414	24.136
H-C10 (paja)	8.541	8.583	73.307	8.573	8.551	250.000	2.138	21.377
H-C11 (paja)	8.482	8.521	72.275	8.383	8.622	275.000	2.371	23.709



4. CONCLUSIÓN

Como se ha mencionado anteriormente las construcciones en tierra, el adobe en específico para esta investigación, es una técnica constructiva que cuenta con una gran cantidad de cualidades físicas, económicas y ecológicas; y dadas las circunstancias ambientales de la actualidad es necesario retomar esta técnica de construcción sustentable. En esta investigación se logró la caracterización de las muestras de adobe de La Huacana y Turicato, logrando correlacionar las propiedades de cada caso de estudio.

En el ensaye de VPU entre mayor sea la velocidad se le considerara un material más durable según la Red Durar. Por lo tanto, se puede determinar que los adobes en estudio tienen una mayor durabilidad en comparación de los adobes de Jojutla, Morelos.

Como se mostró, los esfuerzos axiales obtenidos divergen entre los especímenes cilíndricos y cúbicos siendo mayores los esfuerzos en los cilindros. Cabe enfatizar que en los cubos siempre se obtienen esfuerzos mayores en el caso de concreto y es por eso que se utiliza un factor de corrección para los cubos, para el caso de los adobes no hay una norma que sugiera esto por lo mismo es que no se utilizó este factor, pero se encontró una investigación en la que se realizó el ensaye de compresión en especímenes de adobe prismáticos, cúbicos y cilíndricos en la que se demostró que con los cubos se obtienen esfuerzo mayores, pero los datos experimentales obtenidos de los cilindros se ajustaron mejor al modelo constitutivo desarrollado (Illampas et al., 2014).

La correlación de UCS entre cilindro y cubos es de 0.8676, siendo un valor bastante aceptable. Aunque la correlación es buena aún existe la incógnita del porque los valores de los esfuerzos son mayores en los cilindros. Existen varias posibilidades, recordemos que el adobe no es homogéneo ni en su composición, ni en su mano de obra, y este es un factor importarte. La otra es estos adobes también han estado al intemperismo por más de un siglo y es probable que algunos hayan recibido mayor daño. Al igual la consolidación de algunas muestras pudo haber sido mayor. Todos estos son fatores que afectan la homogeneidad del adobe y puede ser la causa más probable de los valores invertidos que se obtuvieron.

Con respecto a su composición granulométrica, en La Huacana existe un exceso de finos, sin embargo, no muestra problemas de contracción y expansión ya que es una arcilla de baja compresibilidad y probablemente esta se encuentre estabilizada. También es importante recordar que se encontraron dos tipos de adobe dentro de las muestras de La Huacana al momento de realizar este ensaye a los cuales se les denomino Huacana Paja y Huacana Liso. El primero contenía una mayor cantidad de



fibra orgánica y líticos angulosos; mientras que el segundo contenía una menor cantidad fibra orgánica y diferente al anterior, y con líticos redondeados. Generalmente, los líticos angulosos muestran mejores resultados en los esfuerzos de ruptura a la compresión con respecto a los líticos redondeados, pero en este caso, los mejores resultados se observaron en la muestra Huacana Liso que contenía los líticos redondeados y menor cantidad de fibra orgánica. Así que se puede observar que la fibra orgánica tiene una gran influencia en la composición del adobe. Por otro lado, los adobes de Turicato mostraron una distribución más acorde a la literatura y diversas investigaciones.

Los adobes que contienen menor cantidad de fibra orgánica (Turicato y la Huacana Liso) tuvieron mejores resultados en cuanto a resistencia a la compresión, pero con respecto a los esfuerzos a la tensión tuvieron mejores resultados y comportamiento el adobe que contiene mayor cantidad de fibra orgánica (Huacana Paja). Además de eso, la cohesión, que es un factor importante en los muros ya que son estructuras que no tienen confinamiento alguno y se obtuvieron mejores resultados en el adobe con mayor contenido de fibra orgánica. Con esto se demuestra que las fibras ayudan tanto en evitar la fisuración en el secado como a ayudar en los esfuerzos de tracción.

La porosidad también es un factor que se vio afectado positivamente por la presencia de fibras orgánicas. En las muestras de la Huacana Paja se obtuvo una mayor VPU y se obtuvieron muy buenos resultados en la prueba de Fagerlünd, como una tasa de absorción inicial, índice de absorción, permeabilidad, penetración del agua y sortividad menores a las muestras de los otros adobes.

El adobe de La Huacana mostro una mayor absorción de la humedad del ambiente debido al tipo de tipo y cantidad de finos que este presenta.

Con toda esta información recaudada, podemos llegar a la conclusión que la composición es un factor que determina las propiedades de los adobes no por su mayor contenido de arcillas significa que van a presentar problemas de expansión o contracción ya que con la correcta estabilización estos problemas pueden ser resueltos. Otro factor importante dentro de la composición es la cantidad y tipo de fibra orgánica, como ya se mencionó presenta varias ventajas la presencia de esta como lo es la resistencia a la flexión, mayor cohesión, permite mayores deformaciones y presenta una menor tasa de absorción inicial y sortividad. Pero afecta directamente a la resistencia a la compresión que para nosotros como ingenieros es uno de los factores con mayor importancia. Aunque hay investigaciones que demuestran que la disminución de la resistencia a la compresión es mínima, en esta investigación la reducción de los esfuerzos debido al contenido de la fibra orgánica se vio afectada en 44% aproximadamente, lo cual es bastante alto, pero esto también se puede deber tanto



a la diferencia líticas o la estabilización de arcillas ya que probablemente estos adobes (Huacana Paja y Huacana Liso) fueron realizados en diferentes tiempos.

Debe encontrarse un equilibrio de la cantidad adecuada de arenas, finos (< malla N.200 ASTM) y fibra orgánica que proporcione todos los beneficios o parte de ellos sin afectar en la medida de lo posible la resistencia a la compresión.

El estudio de los adobes tiene aún un gran campo de estudio por delante. La determinación del coeficiente de Poisson en adobes es una gran área de investigación para lograr una caracterización más completa de los adobes. Así como, seguir investigando la influencia que tiene la cantidad y tipo de fibra orgánica en los adobes y las diferentes distribuciones granulométricas.

Personalmente esta investigación me ayudo a ampliar mis conocimientos en la experimentación para la caracterización y análisis de resultados para entender el comportamiento de los materiales de construcción, específicamente en este caso el adobe. Como mencione anteriormente, el adobe es una técnica constructiva que cuenta con una gran cantidad de cualidades, y creo que es posible y necesario rescatarlo, ya que forma parte de nuestra historia y cultura y además cumple con las necesidades ambientales de hoy en día.

Este es un acercamiento a la experimentación de piezas de adobe patrimoniales, procedentes de dos municipios (Huacana y Turicato) y lo encontrado pueda dar directrices de cómo continuar caracterizándolos y generar en un futuro no muy lejano una normativa para adobes que permita cumplir con las necesidades y exigencias de la sociedad actual.



5. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, R., Saucedo, C., Montesinos, ; Mijail, Ramírez, ; Eduardo, Morales, R., & Santiago Uceda, ; (2015). *Caracterización mecánica de las unidades de adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna mediante ensayos de ultrasonido.*
- Amado Flores Rentería. (2010). *La norma ASTM d 6276 como instrumento de estabilización de suelos para fines patrimoniales.*
- Amirais Flores Ponce. (2018). *Morteros base arcilla, estabilizados con adiciones orgánicas y minerales para su uso patrimonial.*
- Antonio, A., Acosta, T., Moreno, A., Gabriel, V., Mendo, R., Guadalupe, M., González, L., & Madrid, M. M. (2019). *Efecto de la temperatura de prueba y la resistividad eléctrica húmeda en cilindros de concreto.*
- Arqueología Mexicana. (n.d.). *La Pirámide del Sol, Teotihuacan, Estado de México.* Arqueología Mexicana. Retrieved October 31, 2021, from <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/la-piramide-del-sol-teotihuacan-estado-de-mexico>
- ASTM D5731–95. (2017). *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock 1.*
- Blake Wiener, J. (2020). *Paquimé.* World History Encyclopedia. <https://www.worldhistory.org/trans/es/1-17309/paquime/>
- Braja M. Das. (n.d.). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.* Thomson Learning.
- C. Presidentes Municipales del Estado de Michoacán, & Personal del Centro Estatal de Estudios Municipales. (2022, February 17). *Enciclopedia de los Municipios de y Delegaciones de México, Estado de Michoacán de Ocampo.* <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/index.html>
- Canadell, S., Blanco, A., & Cavalaro, S. H. P. (2016). Comprehensive design method for earthbag and superadobe structures. *Materials & Design*, 96, 270–282. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.02.028>



- Cid, J., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de La Construcción*, 63(523), 159–169. <https://doi.org/10.3989/ic.10.011>
- Cirvini, S. A., & Gómez Voltan, J. A. (2014). Test and device to evaluate the capillary absorption in soil specimens of adobe and rammed earth. In *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia* (Vol. 37, Issue 1).
- Costa, C., Arduin, D., Rocha, F., & Velosa, A. (2021). Adobe Blocks in the Center of Portugal: Main Characteristics. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(3), 467–478. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1627442>
- CRAterre, & Cátedra UNESCO de "Arquitectura de tierra y desarrollo sostenible". (n.d.). *Habiter la Terre “Manifeste pour le Droit de Construire en Terre Crue.”* Retrieved October 30, 2021, from <http://craterre.org/>
- di Turi, S., García-Pulido, L. J., Ruggiero, F., & Stefanizzi, P. (2017). Recovery of ancient bioclimatic strategies for energy retrofit in historical buildings: the case of the Infants’ Tower in the Alhambra. *Energy Procedia*, 133, 300–311. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.09.391>
- García, A. H. (2014). *Elastoplasticidad de un suelo franco arenoso de Sabana*. 26, 153–167.
- Gatti, F. (2012). *Arquitectura y Construcción en Tierra “Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra.”*
- Ige, O., & Danso, H. (2021). Physico-mechanical and thermal gravimetric analysis of adobe masonry units reinforced with plantain pseudo-stem fibres for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121686>
- Illampas, R., Ioannou, I., & Charmpis, D. C. (2014). Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation. *Construction and Building Materials*, 53, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.103>
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1973). *Mecánica De Suelos; Fundamentos De La Mecánica De Suelos - Eulalio Juárez Badillo & Alfonso Rico Rodríguez (TOMO I)* (Segunda, Vol. 1).

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS I. (n.d.). UMSNH.



- Martines L., E. (n.d.). Definiciones de humedad y su equivalencia. *ENME*.
- Martínez Molina, W., Alonso Guzmán, E. M., Chávez García, H. L., Lara Gómez, C., Bedolla Arroyo, J. A., & Torres Acosta, A. A. (2018). Construcciones de tierra. Estabilización de arcillas montorilloníticas con mineral de yeso. . *Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico*, 2.
- Martinez Molina, W., Torres Acosta, A. A., Chavez Garcia, H. L., Alonso Guzman, E. M., Lara Gomez, C., Bedolla Arroyo, J. A., Lopez Calvo, H. Z., & Ruvalcaba Sil, J. L. (2018). Colorimetría de arcillas modificadas con adiciones minerales y orgánicas. *Revista ALCONPAT*, 8(2), 163–177. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.277>
- Mayans, C. (2018, May 23). *Chan Chan, la gran capital de barro del poderoso reino chimú*. National Geographic. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/chan-chan-gran-capital-barro-poderoso-reino-chimu_6850/4
- Mayans, C. (2019, June 19). *Hace 9.000 años las ciudades ya eran estresantes*. National Geographic. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/hace-9000-anos-ciudades-ya-eran-estresantes_14435
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción en tierra “La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual”* (E. Acevedo, Ed.; Segunda).
- National Geographic. (2012, September 18). *Göbekli Tepe, el primer templo de la historia*. National Geographic. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/gobekli-tepe-primer-templo-historia_6363
- National Geographic. (2015, November 2). *La Gran Muralla China se desvanece*. National Geographic. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/gran-muralla-china-se-desvanece_9687
- NMX-C-083-ONNCCE-2014. (2015). Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Edificación En La Construcción S.C.* .
- NMX-C-089-ONNCCE-1997. (1998). Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de las Frecuencias Fundamentales, Transversal, Longitudinal y



Torsional de Especímenes de Concreto - Método de Ensayo. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Edificación En La Construcción S.C.*

NMX-C-128-ONNCCE-2013. (2014). Industria de la Construcción-Concreto Sometido a Compresión-Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Edificación En La Construcción S.C.*

NMX-C-275-ONNCCE-2004. (2004). Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la Velocidad de Pulso a través del Concreto-Método de Ultrasonido. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Edificación En La Construcción S.C. .*

NMX-C-432-ONNCCE-2002. (2003). Industria de la Construcción - Geotecnia - Cimentaciones - Ensaye de Compresión Triaxial - Método de Prueba. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Edificación En La Construcción S.C.*

NMX-C-475-ONNCCE-2013. (2014). Industria de la Construcción-Geotecnia-Materiales-Método de Ensayo Terreos-Determinación del Contenido de Agua Mediante Horno. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Edificación En La Construcción S.C. .*

NMX-C-493-ONNCCE-2018. (2019). Industria de la Construcción - Geotecnia - Límites de Consistencia de Suelos - Método de Ensayo. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Edificación En La Construcción S.C. .*

NMX-C-496-ONNCCE-2014. (2015). Industria de la Construcción - Geotecnia - Materiales para Terracerías - Determinación de la Composición Granular. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Edificación En La Construcción S.C. .*

NMX-C-504-ONNCCE-2015. (2015). Industria de la Construcción - Determinación de la Absorción Capilar en Concreto Hidráulico - Método de Ensayo. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Edificación En La Construcción S.C.*

NMX-C-514-ONNCCE-2016. (2016). Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Edificación En La Construcción S.C.*



- Omar Salvador Miranda Leal. (2017). *Envolvente de falla en arcilla de Santiago Undameo, con diferentes estabilizadores; realizados en la maquina triaxial soiltest t-500.*
- Preciado Villicaña, D. (2020). *Caracterización y propiedades índice en adobes de Jojutla de Juárez, Morelos, México.*
- Raavi, S. S. D., & Tripura, D. D. (2021). Ultrasonic pulse velocity and statistical analysis for predicting and evaluating the properties of rammed earth with natural and brick aggregates. *Construction and Building Materials*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123840>
- Rodríguez-Mariscal, J. D., & Solís, M. (2020). Towards a methodology for experimental characterization of mechanical behavior of adobe masonry. *Informes de La Construcción*, 72(557). <https://doi.org/10.3989/IC.67456>
- Ruiz Mendoza, M., Sánchez Calvillo, A., Martínez Molina, W., Chávez García, H. L., Alonso Guzmán, E. M., Navarrete Seras, M. A., Preciado Villicaña, D., & Ramírez Carranza, V. A. (2020). Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico y cálculo del módulo de elasticidad en adobes de tierra caliente. *Instituto de Ciencias, Tecnología e Innovación* .
- Sameh, S. H. (2014). Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt. *Journal of Cleaner Production*, 65, 362–373. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.08.046>
- Sánchez Calvillo, A., Alonso Guzmán, E. M., & López Núñez, M. del C. (2021). Vista de Vulnerabilidad sísmica y la pérdida de la vivienda de adobe en Jojutla, Morelos, México, tras los sismos de 2017. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 5, 9–29. <http://www.revistavivienda.cuaad.udg.mx/index.php/rv/article/view/162/200>
- Sanchez-Calvillo, A., Alonso-Guzman, E. M., Martinez-Molina, W., Navarrete-Seras, M. A., Ruvalcaba-Sil, J. L., Navarro-Ezquerria, A., & Mitrani, A. (2021). Characterization of adobe blocks: Point-load assessment as a complementary study of damaged buildings and samples. *Heritage*, 4(2), 864–888. <https://doi.org/10.3390/HERITAGE4020047>
- Sanz A., J. H., Duque C., E., & Gómez Estrada, S. (2010). La resistividad en función de la frecuencia. *Scientia et Technica Año XVI*, 44.



- Secretaría de Economía. (2022, February 17). *DataMÉXICO BETA*.
<https://datamexico.org/>
- Silva, A., Oliveira, I., Silva, V., Mirão, J., & Faria, P. (2022). Vernacular Caramel's Adobe Masonry Dwellings–Material Characterization. *International Journal of Architectural Heritage*, 16(1), 67–84.
<https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1751343>
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H., & Almeida, J. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, 28(1), 36–44.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.08.046>
- TS EN 12372. (2007). *Natural stone test methods - Determination of flexural strength under concentrated load*.
- Vega, P., Juan, A., Ignacio Guerra, M., Morán, J. M., Aguado, P. J., & Llamas, B. (2011). Mechanical characterisation of traditional adobes from the north of Spain. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3020–3023.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.02.003>
- Vidaud Quintana, E. de J., & Vidaud Quintana, I. N. (2016). ULTRASONIDO: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico. *Construcción y Tecnología En Concreto*, 28–39.
- Watson, L., & McCabe, K. (2011). The cob building technique. Past, present and future. *Informes de La Construcción*, 63(523), 59–70.
<https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1253/1338>
- Weather Atlas. (n.d.). *Morelia, México - Información detallada del clima y previsión meteorológica mensual*. Retrieved March 23, 2022, from <https://www.weather-atlas.com/es/mexico/morelia-clima>
- Weather Spark. (n.d.). *El tiempo en Morelia en el verano, temperatura promedio (México)*. Retrieved March 23, 2022, from <https://es.weatherspark.com/s/4452/1/Tiempo-promedio-en-el-verano-en-Morelia-M%C3%A9xico#Figures-Humidity>
- Yuste, B. (n.d.). *Arquitectura de Tierra “Caracterización de los Tipos Edificatorios.”* Retrieved October 30, 2021, from <https://wwwaie.webs.upc.edu/maema/wp->



UMSNH
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
“CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE ADOBES DE LA HUACANA Y TURICATO,
REGIÓN TIERRA CALIENTE, MICHOACÁN, MÉXICO”



content/uploads/2016/07/26-Beatriz-Yuste-Miguel-Arquitectura-de-tierra_COMPLETO.pdf