

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y LA TECNOLOGÍA



MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE BLOQUES DE
TIERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADA (BTCE) ELABORADOS CON
SISTRATOS DE MEXICALI, COMO ALTERNATIVA PARA UNA
CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

PRESENTA

ANA ELVA MICHEL VALENZUELA

Correo electrónico: ana.michel@uabc.edu.mx

Identificador ORCID: 0009-0004-5701-6879

Director de tesis: Dr. Daniel Antonio Olvera García

Identificador ORCID: 0000-0002-9293-7604

Mexicali, B.C. agosto del 2025



MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADA (BTCE) ELABORADOS CON SUSTRATOS DE MEXICALI, COMO ALTERNATIVA PARA UNA CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE

TESIS PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

PRESENTA

ANA ELVA MICHEL VALENZUELA

Correo electrónico UABC: ana.michel@uabc.edu.mx
Identificador ORCID: 0009-0004-5701-6879

Director de tesis: Dr. Daniel Olvera García
Identificador ORCID: 0000-0002-9293-7604

Tutor: Dr. Rubén Salvador Roux Gutiérrez

Asesor de tesis: M.I. Ricardo Cota Ramírez

Revisor de tesis: Dra. Cristina Sotelo

Mexicali B.C, agosto del 2025

AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha 10 de junio de 2025

DR. ALEJANDRO JOSÉ PEIMBERT DUARTE

Director de la Facultad de Arquitectura y Diseño

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Presente.

Para dar cumplimiento al artículo 106 del ESTATUTO ESCOLAR DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, en su TÍTULO CUARTO DE LOS TÍTULOS PROFESIONALES, GRADOS ACADÉMICOS Y DIPLOMAS, CAPÍTULO ÚNICO, sobre los requisitos para la obtención del grado de Maestría en Arquitectura, Urbanismo y Diseño, como director de tesis en la Línea de Arquitectura y Medio Ambiente, de la Facultad de Arquitectura y Diseño; se emite la presente acta que avala que la estudiante:

ANA ELVA MICHEL VALENZUELA

Ha concluido su tesis de grado titulada:

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADA (BTCE) ELABORADOS CON SUSTRATOS DE MEXICALI, COMO ALTERNATIVA PARA UNA CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE

Lo anterior en virtud de que se realizaron las correcciones y recomendaciones del comité tutorial, por lo que ha sido aprobada para el proceso de presentación de examen de grado.

DR. DANIEL ANTONIO OLVERA GARCIA
DIRECTOR DE TESIS

FIRMA _____

copia de la carta dirigida al Coordinador de maestría o en su caso de Doctorado, por parte del tutor de la tesis, en la cual manifiesta su autorización para la impresión de la misma, dado que el sustentante ha cumplido con todos los trámites y exigencias de titulación.

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Asimismo, declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Mexicali, B.C., agosto de 2025

Ana Elva Michel Valenzuela

DEDICATORIA

Agradezco profundamente a Dios, por permitirme alcanzar esta meta y por guiar cada paso de este proceso sin contratiempos. Su presencia constante ha sido mi fortaleza y luz en este camino

A mis amados hijos, quienes son mi fuente diaria de inspiración y motivación para seguir aprendiendo y superándome. Este logro es para ustedes, como testimonio de que, con esfuerzo y dedicación, todo es posible.

A mi madre, por inculcarme la determinación y perseverancia necesarias para no rendirme ante las dificultades y por enseñarme a luchar por mis objetivos.

A toda mi familia, con quienes he compartido desafíos y aprendizajes, y que me han mostrado el valor de la resiliencia y la unión para superar obstáculos y alcanzar nuestras metas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a Dios, ya que sin Él no estaría aquí, cumpliendo un propósito más en mi camino. A mi director de tesis, el Dr. Daniel Antonio Olvera García, por su guía y respaldo constantes, que fueron clave para alcanzar los objetivos planteados a lo largo de este proceso. A mis tutores: el Dr. Rubén Salvador Roux Gutiérrez, catedrático del Instituto de Estudios Superiores de Tamaulipas, A.C., por compartir su amplia experiencia en el tema desarrollado; y al Mtro. Ing. Ricardo Cota Ramírez, por su valioso acompañamiento en la etapa experimental dentro del laboratorio; y por supuesto, a la Dra. Cristina Sotelo Salas, Cristina Sotelo Salas, por sus enriquecedoras aportaciones para el mejoramiento de este documento.

Extiendo mi agradecimiento al cuerpo académico de la Universidad Autónoma de Baja California, en especial a la Dra. Ramona Alicia Romero Moreno, por su tiempo, orientación y apoyo constante; al Dr. Aníbal Luna León, por los conocimientos y la disposición brindada, y a cada docente que, con dedicación, contribuyó al enriquecimiento de esta investigación.

Gracias también a los investigadores de CRATerre por permitirme realizar una estancia académica en su centro de investigación. Agradezco profundamente a Bakonirina Rakotomamonjy, Majid Hajmirbaba, David Gandreau y Thierry Joffroy, por acercarme a nuevas técnicas, conocimientos y experiencias que marcaron tanto mi desarrollo personal como académico.

Reconozco el apoyo de la institución universitaria, que hizo posible mi participación en dicha estancia y en la ponencia presentada durante el segundo semestre de la Maestría. Finalmente, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTY) por el respaldo económico que impulsó la realización de estos estudios, orientados al avance científico y al bienestar de nuestro país.

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADA (BTCE) ELABORADOS CON SUSTRATOS DE MEXICALI, COMO ALTERNATIVA PARA UNA CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE

RESUMEN

Ante el panorama donde la industria de la construcción genera aproximadamente el 39% de las emisiones globales de dióxido de carbono a la atmósfera; la adopción de prácticas sustentables en diseño arquitectónico y sistemas constructivos se vuelve fundamental. En este contexto, los materiales derivados de la tierra han resurgido como una alternativa viable, ya que se ha demostrado que las edificaciones con tierra pueden absorber CO₂ atmosférico. Este estudio analizó el sistema bloque de tierra comprimida estabilizada (BTCE), con sustratos locales de Mexicali. El objetivo fue evaluar sus propiedades mecánicas a partir de un modelo experimental. Se seleccionaron cuatro suelos: dos arcillas y dos arenas, que fueron sometidos a cuatro fases de análisis: la primera de caracterización física; la segunda de estabilización física mediante mezclas con diferentes proporciones, la tercera con estabilización química, y la cuarta de elaboración de piezas a escala real. Los ensayos se realizaron conforme a las normativas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y la *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Los resultados evidenciaron que la estabilización física mejoró significativamente la plasticidad y la resistencia a la compresión de las mezclas. En contraste, la estabilización química mostró un rendimiento desfavorable, ya que la pérdida de humedad redujo de manera notable la resistencia mecánica. Este estudio genera conocimiento inédito, sobre el comportamiento de los BTCE fabricados con suelos específicos de Mexicali, contribuyendo así al cuerpo de conocimiento científico en torno a la arquitectura sustentable y las tecnologías de bajo impacto ambiental.

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF STABILIZED COMPRESSED EARTH BLOCKS (SCEBS) PRODUCED WITH MEXICALI SOILS FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION APPLICATIONS

ABSTRACT

The construction industry is responsible for approximately 39% of global carbon dioxide emissions into the atmosphere, the adoption of sustainable practices in architectural design and construction systems has become essential. In this context, earth-based materials have re-emerged as a viable alternative, as it has been demonstrated that earthen buildings can absorb atmospheric CO₂. This study analyzed the Stabilized Compressed Earth Block (BTCE) system using local substrates from Mexicali. The objective was to evaluate its mechanical properties through an experimental model. Four types of soil were selected—two clays and two sands—which underwent four phases of analysis: the first involved physical characterization; the second, physical stabilization through mixtures with varying proportions; the third, chemical stabilization using different additive percentages; and the fourth, the fabrication of full-scale blocks using the most promising combinations. All testing was conducted in accordance with the standards of the Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) and the American Society for Testing and Materials (ASTM). The results showed that physical stabilization significantly improved the plasticity and compressive strength of the mixtures. In contrast, chemical stabilization yielded unfavorable performance, as the loss of moisture considerably reduced mechanical strength. This study contributes new, previously undocumented evidence on the behavior of BTCE made with specific soils from Mexicali, thereby enriching the scientific knowledge base on sustainable architecture and low-impact construction technologies.

INDICE

| | |
|---|-----|
| DEDICATORIA | i |
| AGRADECIMIENTOS..... | ii |
| RESUMEN | iii |
| ABSTRACT | iv |
| Índice de Tablas | iv |
| Índice de Figuras | ix |
| Índice de Fórmulas | xvi |
| Introducción..... | 1 |
| Capítulo I, | 7 |
| Planteamiento del Problema..... | 7 |
| Justificación..... | 9 |
| Hipótesis..... | 12 |
| Delimitación del Tema | 12 |
| Alcances y Limitaciones | 13 |
| Preguntas de Investigación..... | 13 |
| <i>Pregunta General:</i> | 13 |
| <i>Preguntas específicas:</i> | 14 |
| Objetivos de la Investigación | 14 |
| <i>Objetivo General</i> | 14 |
| <i>Objetivos específicos:</i> | 14 |
| Capítulo II | 15 |
| Marco Teórico..... | 15 |
| Antecedentes de la construcción con tierra cruda..... | 15 |

| | |
|---|-----|
| Bloque de tierra comprimida (BTC) y bloque de tierra comprimida estabilizada (BTCE), origen y evolución | 23 |
| Capitulo III | 29 |
| Estado del arte | 29 |
| El BTCE en la actualidad | 29 |
| Normativas en el Mundo y México sobre la Construcción con Tierra y BTCE..... | 35 |
| Caracterización..... | 41 |
| Estabilización | 45 |
| Metodologías de referencia | 49 |
| Capitulo IV | 58 |
| Mexicali y su entorno | 58 |
| Ubicación geográfica | 59 |
| Clima | 59 |
| Origen y formación | 60 |
| Fisiografía..... | 63 |
| Historia constructiva | 66 |
| Capítulo V..... | 70 |
| Metodología..... | 70 |
| Fase 1, | 74 |
| Selección y análisis de sustratos | 74 |
| Caracterización..... | 77 |
| Fase 2, Diseño de mezclas primera secuencia..... | 100 |
| Límites de consistencia con estabilizada física | 103 |
| Resistencia a la compresión en suelos cohesivos no confinados..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| Fase 3, Diseño de mezclas segunda secuencia | 113 |
| Prueba de compresión para suelos cohesivos no confinados | 116 |
| Fase 4, Producción y desempeño de BTCE | 116 |
| Ensayos a piezas de BTCE | 117 |
| Proceso de fabricación de la prensa | 117 |
| Proceso de fabricación de piezas de BTCE; | 119 |
| Mezclado y homogenización | 122 |
| Fabricación de Bloques Estabilizados con Cal | 124 |
| Fabricación de Bloques Estabilizados con Cemento | 126 |
| Fabricación Adicional de Bloques Estabilizados con Cemento y T01 + Cal | 127 |
| Bloques Estabilizados con Cemento | 128 |
| Curado de las piezas | 128 |
| Prueba de compresión | 132 |
| Prueba de absorción por capilaridad | 135 |
| Capítulo VI | 142 |
| Resultados y discusión | 142 |
| Resultados fase 1, análisis de sustratos | 142 |
| Contenido de humedad en arcillas y arenas | 142 |
| Granulometría arcillas y arenas | 143 |
| Densidad en arcillas y arenas | 145 |
| Límites de consistencia, arcillas y arenas | 146 |
| Prueba de compactación AASHTO estándar, en arcillas y arenas | 147 |
| Prueba de espectroscopia de Rayos X (EDX) | 150 |
| Resultados fase 2, caracterización con estabilización física | 154 |
| Límites de consistencia | 154 |
| Resistencia a la compresión en suelos cohesivos no confinados | 157 |
| Resultados Fase 3, | 160 |
| Resistencia a la compresión en suelos cohesivos no confinados | 160 |
| Resultados fase 4, | 162 |
| Prueba de compresión | 162 |

| | |
|---|-----|
| Resultados de absorción por capilaridad | 168 |
| Capítulo VII..... | 170 |
| Conclusiones..... | 170 |
| Anexo | 172 |
| Apéndice | 178 |
| Listado de Referencias | 180 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. | 38 |
| Resumen de normativas y reglamentos internacionales para materiales de tierra cruda | 38 |
| Tabla 2. | 40 |
| Propiedades térmicas de BTCE y adobe, datos obtenidos de varios autores | 40 |
| Tabla 3. | 40 |
| Propiedades mecánicas de BTCE y adobes, datos obtenidos de varios autores | 40 |
| Tabla 4. | 44 |
| Ensayos de laboratorio más utilizados y su comparativo con ensayos de campo..... | 44 |
| Tabla 5. | 52 |
| Diseño de tabla del experimento Roux et al (2012) | 52 |
| Tabla 6. | 77 |
| Descripción de los suelos seleccionados y ubicación, elaboración propia | 77 |
| Tabla 7. | 79 |
| Ensayos aplicados a los sustratos para caracterizar, elaboración propia..... | 79 |
| Tabla 8. | 102 |
| Porcentajes de primera secuencia cuyos porcentajes son en masa. | 102 |
| Tabla 9. | 102 |
| Masas equivalentes a los porcentajes de primera secuencia..... | 102 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 10. | 111 |
| Masas de suelos sin el contenido de humedad inicial de estos | 111 |
| Tabla 11. | 114 |
| Diseño de mezclas segunda secuencia con estabilizantes químicos..... | 114 |
| Tabla 12. | 115 |
| Masas de los suelos y estabilizantes en las mezclas..... | 115 |
| Tabla 13 | 116 |
| Dosificaciones de especímenes para pruebas de compresión simple | 116 |
| Tabla 14. | 117 |
| Ensayos aplicados a las piezas de BTCE con los resultados sugeridos por la norma . | 117 |
| Tabla 15. | 119 |
| Dosificaciones de especímenes en masa | 119 |
| Tabla 16. | 122 |
| Dosificación de sustratos para BTCE-1 | 122 |
| Tabla 18. | 126 |
| Dosificación de los BTCE estabilizados con cemento..... | 126 |
| Tabla 19. | 127 |
| Dosificación de piezas adicionales de BTCE-5 y BTCE-6..... | 127 |
| Tabla 20. | 128 |
| Datos de dosificaciones de los BTCE fabricados..... | 128 |
| Tabla 21. | 131 |
| Resumen de condiciones y tiempos de curado..... | 131 |
| Tabla 22. | 136 |
| Masas de probetas para ensayo de absorción..... | 136 |
| Tabla 23. | 137 |
| Datos de superficies sumergidas de especímenes. | 137 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 24. | 141 |
| Datos de piezas sometidas a prueba de absorción..... | 141 |
| Tabla 25. | 143 |
| Resultados de contenido de humedad..... | 143 |
| Tabla 26. | 143 |
| Resultados granulométricos T01 | 143 |
| Tabla 27. | 144 |
| Resultados granulométricos T02 | 144 |
| Tabla 28. | 144 |
| Resultados granulométricos A01 | 144 |
| Tabla 29. | 145 |
| Resultados granulométricos A02 | 145 |
| Tabla 30. | 146 |
| Tabla que muestra datos de la densidad relativa en sólidos | 146 |
| Tabla 31. | 146 |
| Resultados de límites de consistencia de sustratos | 146 |
| Tabla 32. | 147 |
| Registro de valores de ensayo AASHTO estándar para T01 | 147 |
| Tabla 33. | 148 |
| Curva de compactación de T01 | 148 |
| Tabla 34. | 148 |
| Registro de valores de ensayo para AASHTO estándar de A01. | 148 |
| Tabla 35. | 149 |
| Curva de compactación A01 | 149 |
| Tabla 36. | 149 |
| Registro de valores de ensayo AASHTO estándar de A02 y porcentaje de humedad. | 149 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 37. | 150 |
| Curva de compactación A02..... | 150 |
| Tabla 38. | 150 |
| Elementos más representativos en T01..... | 150 |
| Tabla 39. | 151 |
| Óxidos más representativos de T01 | 151 |
| Tabla 40. | 151 |
| Tabla de los elementos más representativos en A01..... | 151 |
| Tabla 41. | 152 |
| Óxidos más representativos en A01 | 152 |
| Tabla 42. | 152 |
| Elementos más representativos en A02..... | 152 |
| Tabla 43. | 152 |
| Óxidos más representativos en A02 | 152 |
| Tabla 44. | 155 |
| Resultados límite líquido..... | 155 |
| Tabla 45. | 156 |
| Resultados límite plástico | 156 |
| Tabla 46. | 156 |
| Resultados de índice de plasticidad..... | 156 |
| Tabla 47. | 157 |
| Resultados de contracción lineal | 157 |
| Tabla 48. | 158 |
| Pesos volumétricos húmedos y secos con estabilización física | 158 |
| Tabla 49. | 158 |
| Deformación unitaria en especímenes con estabilización física..... | 158 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 50. | 159 |
| Gráfica de esfuerzo desviador en especímenes con estabilización física | 159 |
| Tabla 51. | 160 |
| Masa volumétrica seca y húmeda de segunda secuencia de mezclas. | 160 |
| Tabla 52. | 161 |
| Gráfico de deformación unitaria, de segunda secuencia de mezclas. | 161 |
| Tabla 53. | 161 |
| Gráfico de capacidad de carga en segunda secuencia de mezcla..... | 161 |
| Tabla 54. | 163 |
| Valores promediados de los BTCE, fabricados para ensayos de compresión..... | 163 |
| Tabla 55. | 164 |
| Valores de las tres probetas de BTCE-1..... | 164 |
| Tabla 56. | 164 |
| Valores de las tres probetas de BTCE-2..... | 164 |
| Valores de las tres probetas de BTCE-3..... | 165 |
| Tabla 58. | 165 |
| Valores de las tres probetas de BTCE-5..... | 165 |
| Tabla 59. | 166 |
| Valores de las tres probetas de BTCE-5* | 166 |
| Tabla 60. | 166 |
| Valores de las tres probetas de BTCE-6..... | 166 |
| Tabla 61. | 167 |
| Comparativo de las siete mezclas ensayadas | 167 |
| Tabla 62. | 168 |
| Masas de probetas para ensayo de absorción..... | 168 |
| Tabla 63. | 168 |

| | |
|---|-----|
| Fórmulas y coeficientes de absorción por capilaridad..... | 168 |
| Tabla 64. | 169 |
| Fórmula y resultados de absorción total. | 169 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. | 16 |
| Detalles de las ruinas de Loropéni (Burkina Faso)..... | 16 |
| Figura 2. | 16 |
| Ruinas de Loropéni (Burkina Faso) | 16 |
| Figura 3. | 17 |
| Hohenrode, Saxony-Anhalt, Alemania siglo XII-XIV A.C. | 17 |
| Figura 4. | 18 |
| Ciudad de Chan Chan, Perú..... | 18 |
| Figura 5. | 19 |
| Paquimé, Casas Grandes..... | 19 |
| Figura 6. | 20 |
| Ruinas de Uruk, Irak del 4to y 3er milenio a.C. | 20 |
| Figura 7. | 21 |
| Ilustración de libro de "Ecole d'architecture rurale'..... | 21 |
| Figura 9. | 24 |
| Crécise de Francois Couteroux, 1806..... | 24 |
| Figura 10. | 26 |
| Autoproducción de bloques de "suelo-cemento" y máquina cinva-ram | 26 |
| Figura 11. | 27 |
| Construcción de CINVA de viviendas de "suelo-cemento"..... | 27 |
| Figura 12. | 28 |

| | |
|---|----|
| Escuela en Mayotte de BTCE, 1982 | 28 |
| Figura 13 | 30 |
| Construcción de Escuela primaria en Gando, Burkina Faso | 30 |
| Figura 14. | 30 |
| SKF-RTL Children Learning Centre, Kenia, Francis Kéré | 30 |
| Figura 15. | 31 |
| Eco-villa H2OS | 31 |
| Figura 16. | 32 |
| Centro etno-educacional Walirumana | 32 |
| Figura 17. | 33 |
| Proceso de construcción de vivienda en Zimatlán, Oaxaca | 33 |
| Figura 18. | 34 |
| Brasilia Jalisco Imagen exterior e interior, Van Artensen | 34 |
| Figura 19. | 35 |
| Villas de la bahía de Loreto, Jim Hallock | 35 |
| Figura 20. | 43 |
| Evolución de la concepción de suelos | 43 |
| Figura 21. | 47 |
| Imagen de arcilla con estabilizante químico a base de cal..... | 47 |
| Figura 22. | 56 |
| Imagen de la tabla de dosificación en peso de las series | 56 |
| Figura 23. | 57 |
| Análisis estadísticos de las series de BTCE. | 57 |
| Figura 24. | 62 |
| Carta geológica de Mexicali..... | 62 |
| Figura 25. | 64 |

| | |
|---|----|
| Carta Edafológica de Mexicali | 64 |
| Figura 26. | 65 |
| Carta fisiográfica de Mexicali | 65 |
| Figura 27. | 66 |
| Prototipos de vivienda indígena Cucapah..... | 66 |
| Figura 28. | 68 |
| Inundación de Mexicali 1907, se muestran viviendas previas a demolición. | 68 |
| Figura 29. | 68 |
| Vivienda en adobe de 1920, sobre Ave. Reforma..... | 68 |
| Figura 30. | 69 |
| Escuela primaria Mariano Abasolo, construida con muros de adobe | 69 |
| Figura 31. | 70 |
| Esquema de variables independientes y dependientes | 70 |
| Figura 32. | 73 |
| Esquema metodológico | 73 |
| Figura 33. | 74 |
| Mapa de ubicación de extracción de arenas..... | 74 |
| Figura 34. | 75 |
| Mapa de ubicación de extracción de arcilla T01y T02..... | 75 |
| Figura 35. | 76 |
| Punto de extracción arcilla T01 (izquierda0 y punto de extracción de arcilla T02 (derecha) | 76 |
| Figura 36. | 78 |
| Fase uno esquema de experimento..... | 78 |
| Figura 37. | 79 |
| Siguiendo un orden en sentido de las manecillas del reloj, identificados como T01 y T02. | 79 |

| | |
|--|----|
| Figura 38. | 81 |
| Arenas (izquierda) y arcillas (derecha) dentro de horno..... | 81 |
| Figura 39. | 82 |
| Proceso de lavado de T01 | 82 |
| Figura 40. | 82 |
| Suelo T01 y T02 después del hornear más de 24 h..... | 82 |
| Figura 41. | 83 |
| Tamizado del suelo T02, después de sacarlo del horno | 83 |
| Figura 42. | 84 |
| Vaso de licuadora, vaso de aluminio, cucharón y báscula | 84 |
| Figura 43. | 85 |
| Homogenizado y licuado de arcilla | 85 |
| Figura 44. | 86 |
| Succión de aire con bomba de vacío | 86 |
| Figura 45. | 87 |
| Arcilla T02, después de sacar de horno..... | 87 |
| Figura 46. | 87 |
| T01 en báscula después de extracción de aire | 87 |
| Figura 47. | 89 |
| Muestra el estado de humedad óptimo de A01 y A02..... | 89 |
| Figura 48. | 90 |
| Matraz A y B con el suelo y agua hasta la línea de aforo..... | 90 |
| Figura 49. | 90 |
| Traslado de arena a vaso de precipitado y A01 y A02 antes de ingresar a horno..... | 90 |
| Figura 50. | 92 |
| Equipo utilizado para límites de consistencia..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| Figura 51. | 92 |
| Mezclas homogenizadas con saturación de humedad..... | 92 |
| Figura 52. | 93 |
| Muestras de suelo en la copa Casagrande..... | 93 |
| Figura 53. | 94 |
| Prueba de límite plástico de T01 y T02..... | 94 |
| Figura 54. | 95 |
| Muestras de suelo dentro de contendedores para determinar la contracción lineal | 95 |
| Figura 55. | 97 |
| Material y herramientas iniciales para realizar la prueba Aashto estándar, el suelo pasó por malla # 4 | 97 |
| Figura 56. | 97 |
| Proceso de homogenización de arcilla | 97 |
| Figura 57. | 98 |
| Muestras antes de ingresar al horno..... | 98 |
| Figura 58. | 100 |
| EDX utilizado para identificar los elementos en las muestras | 100 |
| Figura 59. | 101 |
| Mapa conceptual de combinaciones de mezclas físicas y químicas | 101 |
| Figura 60. | 104 |
| Mezclas para límites de consistencia de AB y AC, antes de agregarles humedad..... | 104 |
| Figura 61. | 104 |
| Muestras después de secarse con dimensiones de contracción lineal | 104 |
| Figura 62. | 106 |
| Equipo utilizado para la prueba ASTM D2166 | 106 |
| Figura 63. | 106 |
| Mezclas homogenizadas dentro de las bolsas de plástico | 106 |

| | |
|---|-----|
| Figura 64. | 107 |
| Proceso de fabricación de probetas..... | 107 |
| Figura 65. | 108 |
| Evidencia de probetas B y C, al desmontarse..... | 108 |
| Figura 66. | 109 |
| Colocación de suelo en molde cilíndrico y desmontaje de extensión de molde..... | 109 |
| Figura 67. | 109 |
| Figura 68. | 109 |
| Medición de probetas | 109 |
| Figura 69. | 110 |
| Probeta dentro de prensa triaxial..... | 110 |
| Figura 70. | 111 |
| Probetas de suelos estabilizados envueltos en plástico..... | 111 |
| Figura 71. | 113 |
| Proceso consecutivo de aplicación de norma ASTM D-2166..... | 113 |
| Figura 72. | 115 |
| Mezclas de la segunda secuencia con estabilización química | 115 |
| Figura 73. | 118 |
| Isométrico de Cinva-Ram, fabricado en Mexicali, B.C. | 118 |
| Figura 74. | 118 |
| Maquina Cinva-Ram elaborada por Breton Industrias..... | 118 |
| Figura 75. | 120 |
| Isométrico y planta de pieza de block | 120 |
| Figura 76. | 121 |
| Tamizado de arcilla..... | 121 |
| Figura 77. | 122 |

| | |
|---|-----|
| Pesaje de los materiales para garantizar la precisión en las proporciones. | 122 |
| Figura 78. | 123 |
| Homogenización de los sustratos para formar AB1 | 123 |
| Figura 79. | 123 |
| Desintegración de grumos y mezclado manual en carreta..... | 123 |
| Figura 80. | 124 |
| Pesado y almacenado de BTCE..... | 124 |
| Tabla 17. | 125 |
| Dosificación de BTCE más cal..... | 125 |
| Figura 81. | 125 |
| BTCE's elaborados con cal..... | 125 |
| BTCE cubierto con hojas de palma para curado..... | 129 |
| Figura 83. | 130 |
| Proceso de curado de BTCE-6..... | 130 |
| Figura 84. | 132 |
| Prensa universal..... | 132 |
| Figura 85. | 133 |
| Pieza montada en prensa..... | 133 |
| Figura 86. | 133 |
| Isométrico de bloque de BTCE | 133 |
| BTCE-3, en la maquina de compresión | 134 |
| Figura 88. | 136 |
| Probetas pesadas previo a ser horneadas, y probetas en el horno..... | 136 |
| Figura 89. | 137 |
| Diagrama de obtención de datos de superficie | 137 |
| Figura 90. | 138 |

| | |
|--|-----|
| Equipo para baño María | 138 |
| Figura 91. | 138 |
| Probetas sumergidas en charola, probeta después de obtener su masa | 138 |
| Figura 92. | 139 |
| Probetas sumergidas en pileta durante 24 horas | 139 |
| Figura 93. | 140 |
| Probetas después de sumersión..... | 140 |
| Figura 94. | 154 |
| Zona recomendada de límite líquido e índice plástico por la norma UNE 41410..... | 154 |

Índice de Fórmulas

| | |
|---|----|
| Fórmula 1. | 80 |
| Ecuación para obtener contenido de humedad..... | 80 |
| Fórmula 2. | 83 |
| Para obtener los porcentajes de material que pasa por la malla #200 | 83 |
| Fórmula 3. | 88 |
| Fórmula para materiales solidos o arcillosos que pasan la malla #40 | 88 |
| Fórmula 4. | 91 |
| Fórmula para obtener densidad en arenas | 91 |
| Fórmula 5. | 94 |
| Límite líquido | 94 |
| Fórmula 6. | 95 |
| Límite plástico..... | 95 |
| Fórmula 7. | 95 |
| Índice plástico..... | 95 |
| Fórmula 8. | 96 |

Contracción lineal96

Fórmula 9. 120

Dosificación de mezcla para elaboración de BTCE..... 120

Fórmula 11.141

Cálculo para la absorción de agua.....141

Introducción

Las tendencias en la construcción apuestan por el desarrollo sustentable, que implica generar menores impactos negativos ambientales en los ecosistemas, es por ello que las políticas públicas a nivel internacional y local promueven la implementación de nuevas técnicas que ayuden a mitigar los daños que han prevalecido. Lo anterior da como resultado la búsqueda de sistemas constructivos que requieren menor inversión energética, disminución en el uso de recursos naturales, más económicos a los bolsillos, de fácil acceso a la materia prima y una ejecución constructiva viable; que permiten mejorar el bienestar material de los usuarios, favorecen las condiciones climáticas, y evitan emitir menos dióxido de carbono a la atmósfera (CO₂).

Por ello, algunos países como Kenya, Burkina Faso, Brasil, Nueva Zelanda, Colombia, Chile, España, México, entre otros, han apostado por sistemas constructivos derivados de la tierra; donde gracias a investigaciones y estudios de las propiedades de la misma surgieron propuestas como el “Bloque de Tierra Comprimida” (BTC) y “Bloque de Tierra Comprimida Estabilizado (BTCE), que de acuerdo a investigaciones realizadas por otros investigadores como Aranda (2023), Angulo (2017), la Cátedra UNESCO, sobre la construcción con tierra; alcanza las metas planteadas por las nuevas políticas de desarrollo sustentable, enfatiza que el BTC presenta pocas o casi nulas emisiones de CO₂ durante su proceso de fabricación y la vida útil del edificio; así mismo, presenta condiciones favorables en cuanto a coeficientes térmicos se refiere y logra con ello, menor uso de recursos energéticos para el acondicionamiento de las construcciones.

A través de esta búsqueda, se presenta un análisis del estado del arte a nivel internacional, nacional y local, junto con las normativas que lo avalan en el mundo y su posicionamiento en México. Tal revisión, permite identificar un vacío de conocimiento relevante en el uso y aplicación del BTCE, particularmente en el contexto nacional y, de forma más específica, en la ciudad de Mexicali, Baja California.

Dado lo anterior, se plantea como objetivo principal la caracterización del BTCE con suelos locales de Mexicali, con el fin de evaluar su viabilidad como sistema constructivo sustentable en esta región. Esta caracterización se considera fundamental para validar su posible incorporación en contextos urbanos donde las condiciones climáticas extremas exigen soluciones pasivas y eficientes.

Con tales afirmaciones, se pretenden encontrar las dosificaciones adecuadas para la elaboración del BTCE, con la intención de ser una alternativa constructiva en Mexicali, que mejore las condiciones de los espacios habitados, basándose en los parámetros de la construcción sustentable.

Capítulo I,

Planteamiento del Problema

La construcción es uno de los rubros que más emisiones de CO₂ genera en la atmósfera junto con la industria manufacturera y de extracción, según el World Resources Institute (2024), quienes monitorean año con año a todos los países para determinar la huella de carbono que emiten al ambiente, indicó a la edificación como responsable del 39% de las emisiones globales de dióxido de carbono. Por ello, adoptar prácticas sustentables en el rubro de la construcción que requieran menos recursos y disminuyan impactos negativos en los ecosistemas es fundamental. Agregando que el aumento de costos de producción y ejecución en la construcción, el usuario final busca hacer esta, más accesible tanto en recursos naturales como económicos; por lo cual, una de las alternativas que aún se toma en cuenta para los preceptos anteriores es la construcción a base de materiales derivados de la tierra, ya que es un recurso accesible para un gran número de habitantes, sin la necesidad de invertir en infraestructura costosa para su transformación.

La tierra como material constructivo ha dado origen a una amplia diversidad de sistemas, tanto tradicionales como contemporáneos. Entre los métodos ancestrales se encuentran el tapial, el bajareque, el cob y el adobe, cada uno con variantes formales adaptadas a su contexto geográfico y cultural (Chazelles, 2003). En paralelo, la evolución tecnológica ha derivado en sistemas modernos como los bloques de tierra comprimida (BTC), BTCE, e incluso tecnologías emergentes como la impresión 3D con arcilla, que integran precisión digital y sostenibilidad material (Mario Cucinella Architects, 2024).

Cabe destacar que las construcciones basadas en tierra presentan una capacidad significativa para la mitigación del cambio climático, ya que durante su producción y vida útil pueden actuar como sumideros de carbono, absorbiendo CO₂ atmosférico. Asimismo, al concluir su ciclo de vida, estos sistemas permiten una reinserción casi total en el entorno

natural, se minimiza residuos y cierra su ciclo de vida de manera sustentable (Bestraten et al., 2011a).

En Mexicali, cuyo sistema constructivo predominante es a base de bloque de concreto (INFONAVIT, s. f.), cuya sustentabilidad se pone en duda, ya que para su producción requiere cemento, el cual emite 2.9 Ton por m³ de CO₂ a la atmósfera (Angulo & Carreño, 2017), se suma que durante la vida útil de las construcciones generan CO₂ que libera a la atmósfera (Alavedra et al., 1997); a lo anterior se agrega que el incremento de costos anuales tanto de producción como de fabricación lo vuelve inaccesible para la mayoría de los habitantes, según los valores que se publican cada año en el Diario Oficial de la Federación y la Federación de Colegios de Arquitectos de la República Mexicana (FCARM, 2022).

En contraste, es un sistema que presenta ventajas estructurales a sismos y rapidez constructiva que facilita el trabajo de la mano de obra, por un lado, y de cálculo estructural por el otro.

Sustentar un sistema constructivo que pueda unir las ventajas de ambas técnicas es esencial para considerarlo una alternativa para la ciudad, donde se aproveche un recurso extenso que actualmente se considera merma en los procesos constructivos, reduzca las emisiones de CO₂ a la atmósfera, resuelva criterios estructurales establecidos por las normas mexicanas para la ciudad y, este al alcance económico de más personas.

En la búsqueda de un sistema alternativo basado en las premisas de los objetivos del desarrollo sustentable (ODS) establecidos en la cumbre de las Naciones Unidas en el 2015, (Acuerdo de París Naciones Unidas 2015, 2015), se selecciona el BTCE como alternativa viable; cuyos ingredientes son arcilla, limos y arenas. Este ha sido objeto de investigaciones a nivel internacional y nacional que han resultado favorables en aplicaciones en zonas sísmicas, con climas cálidos y de bajos recursos hídricos y económicos.

A través del estudio del estado del arte, se afirma que a nivel nacional hay limitadas investigaciones en cuanto a fabricación, técnicas constructivas, y ventajas del BTCE (Albarrán,

2019). Gracias a esfuerzos privados, se obtuvo la primera norma mexicana de este la NMX-C-508-2015; no obstante, existe un desconocimiento de sus características, ventajas y propiedades. Hay falta de difusión del sistema, preexisten paradigmas en lo que a la construcción con tierra se refiere, limita esto su uso para autoproducción asistida y niveles económicos bajos (Albarrán, 2019).

A nivel regional, en particular la ciudad de Mexicali, es nula la investigación, a pesar que el sistema constructivo tradicional en la ciudad de Mexicali era el adobe (Olvera, 2019b), actualmente no existe ningún estudio previo de la caracterización del BTCE, su dimensionamiento o criterios estructurales para las características geográficas de la zona (Lira-Herrera, 2005).

Justificación

De acuerdo a los arqueólogos, las construcciones más antiguas encontradas realizadas por el hombre fueron hechas a base de tierra, ya que, al no existir medios de transporte de materiales, debieron resolver sus necesidades con la materia que tenían a su disposición. Es por lo anterior, que la historia humana y la tierra tienen un fuerte lazo.

La construcción junto con la extracción de materias primas son los rubros donde más emisiones de CO₂ se emiten a la atmósfera, el alto consumo de recursos naturales provoca un elevado costo ecológico en los ecosistemas, y se agregan las demandas energéticas requeridas para la transformación de las materias primas en productos para la construcción como agua, gas y electricidad, que dejan una huella ecológica elevada (Alavedra et al., 1997 p.42).

Por ello, hace más de 30 años los Organismos Internacionales como la Organización de las Naciones Unidas (ONU), Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Grupo Integrado Ambiental (EIG), entre otros; empezaron a señalar los cambios climáticos y efectos adversos que las actividades humanas y desarrollos industrializados provocan en el planeta, cuyas consecuencias se manifiestan en el aumento de la temperatura de la superficie y

atmósfera terrestre, y generan cambios graves en los ecosistemas (Naciones Unidas, 1992). Esto provoca una disminución de recursos hídricos en todos los niveles (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021). Así mismo, los objetivos del desarrollo sustentable (ODS) planteados por la ONU desde el 2013 con la educación del desarrollo sustentable (EDS) propone en la agenda mundial para el 2030, implementarlos en varios rubros (*Educación para los Objetivos de Desarrollo Sostenible: objetivos de aprendizaje - UNESCO Biblioteca Digital*, s. f.).

Por lo anterior, distintos organismos nacionales en México, como Sociedad Hipotecaria Federal (SHF), Secretaría de Desarrollo Social y Construcción, Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU), entre otros; procuran implementar criterios de evaluación de las nuevas edificaciones o la rehabilitación de las ya existentes, con eco-tecnologías o productos que favorezcan la sustentabilidad, disminuyan los materiales industrializados y eviten el consumo innecesarios de recursos económicos o naturales (Desarrollo Territorial, 2019)

Según la CONAVI,

“la construcción sustentable se define como un espacio habitable que, desde su diseño arquitectónico, contempla las necesidades fundamentales del ser humano y su contexto urbano, comunitario y natural, proporciona bienestar general a sus habitantes, propicia el ahorro económico familiar y mitiga las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), Así mismo, se busca dar apoyos a las edificaciones para la implementación de eco-tecnias y eco-tecnologías” (Gobierno del México, 2019 p.45)

La crisis hídrica es una problemática global que afecta a numerosos países, incluido México, donde se evidencia mediante la reducción de precipitaciones y la disminución de los

niveles en los mantos acuíferos (Román Guillermo Meyer Falcón et al., s. f.) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021). Desde la perspectiva de la sustentabilidad ambiental, la implementación de este material representa una estrategia pasiva alineada con los principios del desarrollo sostenible, que ha sido una prioridad en las políticas públicas del país durante las últimas tres décadas, en consonancia con los objetivos de la ONU y las directrices sobre cambio climático (ONU, 1998).

Este material contribuye a la reducción de emisiones de CO₂ durante su proceso de fabricación y a lo largo de la vida útil de las edificaciones en las que se emplea. Además, minimiza el consumo de agua y energía en las fases de producción y secado (Bradley et al., 2018); la materia prima requerida es abundante y de fácil acceso, lo que permite su uso sin necesidad de procesos de industrialización complejos.

El BTCE ha sido implementado como alternativa constructiva de bajo costo en países en vía de desarrollo y poca inversión económica. (Augarde et al., 2016). Se agrega que las características térmicas del BTCE, son eficientes para lugares con clima cálido-seco-extremoso (García, 1964), y en investigaciones recientes se ha propuesto mejorar la técnica constructiva para que sea una alternativa a lugares sísmicos (Blondet et al., 2011).

El presente objeto de estudio es relevante, ya que proporciona una base para generar conocimiento sobre este material en la región geográfica de Mexicali. Esta investigación pretende desarrollar un sistema constructivo basado en tierra que sea adaptable a zonas sísmicas, siguiendo experiencias previas que han demostrado su viabilidad en contextos similares (Blondet et al., 2011). El propósito final es contribuir al desarrollo de cambios en las normativas técnicas nacionales, promoviendo la adopción de este material mediante la generación de especificaciones que regulen su correcta implementación. Actualmente, la falta de información técnica sobre los BTCE ha limitado la creación de normativas que incentiven su uso en diferentes tipologías arquitectónicas y en proyectos de distintos niveles socioeconómicos.

Este material presenta ventajas significativas en respuesta a los desafíos energéticos y climáticos actuales, ya que se compone de elementos con baja energía incorporada y requiere un mínimo de agua para su producción (Bradley et al., 2018). En comparación con los ladrillos de arcilla cocida y las mezclas de arena-cemento, su utilización permite reducir significativamente el consumo energético asociado tanto a los procesos constructivos como al transporte (Cabrera, González, et al., 2020).

Hipótesis

Los sustratos de Mexicali, una vez estabilizados con técnicas adecuadas, alcanzan parámetros técnicos y mecánicos que los hacen aptos para la fabricación de BTCE con aplicación estructural en muros de carga, en conformidad con las normas técnicas nacionales e internacionales vigentes.

Delimitación del Tema

Durante la investigación del estado de arte, se encontró que el BTCE presenta características favorables térmicas, físicas y sustentables, (Angulo & Carreño, 2017), que pueden ser óptimas para Mexicali, ciudad donde se construye predominantemente con bloque de concreto, sistema no apto para las condiciones de clima cálido seco extremoso de Mexicali (INFONAVIT, 2022).

En el proceso de investigación se identificó que, a nivel nacional, existen iniciativas sobre el BTCE; sin embargo, estas son menos numerosas en comparación con estudios realizados en otros países de América Latina, Europa y África, donde ya se han establecido reglamentos y normativas para especificar las características, dimensiones y métodos de construcción con este material (Cid et al., 2011). La identificación de carencia de conocimientos sobre el BTCE en México, y particularmente en el estado de Baja California, justificó la selección del tema. Como primera etapa, la investigación se enfoca en la búsqueda de arcillas y arenas adecuadas para la fabricación del BTCE en Mexicali, con el objetivo de obtener un material que cumpla con los requisitos de las pruebas de compresión, resistencia al corte y

absorción, considerando las condiciones sísmicas y climáticas específicas del sitio (Olvera, 2019b). Con base en las propiedades mecánicas que se obtengan del material producido, el BTCE podría constituir una alternativa viable para la construcción en Mexicali.

Alcances y Limitaciones

Se busco caracterizar los sustratos seleccionados y determinar la dosificación óptima para obtener propiedades mecánicas adecuadas de acuerdo a la norma M-MMP-1-05/18 que permitieran utilizar los bloques como muros de carga. Este estudio también servirá como base para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de un sistema constructivo adaptado a las condiciones sísmicas y edafológicas de Mexicali.

Las principales limitaciones del estudio incluyen el tiempo disponible para analizar un mayor número de sustratos y realizar mezclas adicionales, así como el acceso restringido a equipos especializados para ensayos químicos, de resistencia al cortante y térmicos; ya que en las instalaciones del laboratorio utilizado en Mexicali no disponen de estos equipos, y los laboratorios externos que los ofrecen requieren un costo por muestra que no puede ser fácilmente financiado. Por esta razón, el estudio se centrará en el análisis de cuatro sustratos con ubicaciones específicas. Asimismo, la duración del proyecto limita el alcance de las evaluaciones experimentales.

Preguntas de Investigación

Pregunta General:

¿Pueden los sustratos estabilizados de Mexicali cumplir con los parámetros técnicos necesarios para la fabricación de BTCE estructuralmente resistentes?

Preguntas específicas:

1. ¿Qué propiedades se recomienda tengan las arcillas y arenas de Mexicali para fabricar el BTCE?
2. ¿Cómo se debe estabilizar la arcilla de Mexicali, para aumentar sus capacidades de resistencia mecánica y fabricar BTCE resistentes a la compresión?
3. ¿Cuál es el estabilizante recomendado de acuerdo a la caracterización obtenida para aumentar resistencias mecánicas del BTCE?
4. ¿Cuál es la dosificación idónea para fabricar BTCE en Mexicali, según los sustratos disponibles?

Objetivos de la Investigación**Objetivo General**

Determinar si las arcillas de Mexicali estabilizadas física y químicamente son aptas para fabricar BTCE, con características mecánicas adecuadas para muros de carga.

Objetivos específicos:

1. Identificar las propiedades físicas de los sustratos seleccionados y compararlas con estudios previos utilizados en la fabricación de (BTCE), con el uso de los ensayos nacionales e internacionales.
2. Seleccionar la dosificación y estabilizante adecuado para estabilizar la arcilla e incrementar sus propiedades mecánicas según los ensayos aplicados.
3. Realizar piezas a escala 1:1, con la prensa manual, con las dosificaciones seleccionadas
4. Evaluar resultados con base a las normas mexicanas e internacionales aplicables, sobre los valores de resistencia mecánica requeridos para muros estructurales, según lo establecido en la Norma *NMX-C-404-ONNCCE-2012*.

Capítulo II

Marco Teórico

Con el propósito de contextualizar históricamente las construcciones a base de tierra y su evolución a lo largo del tiempo, este apartado presenta una revisión teórica que unifica conceptos, técnicas y saberes desarrollados por diversas culturas para la creación de espacios habitables de técnicas constructivas con tierra, pasados y actuales.

Se analizan los avances constructivos desde una perspectiva cronológica y técnica, se destaca la continuidad y transformación de los métodos tradicionales hasta su adaptación contemporánea; se abordan conceptos que permiten comprender su valor estructural, ambiental y cultural. Su finalidad es proporcionar al lector una base teórica sólida mediante ejemplos históricos y antecedentes relevantes, con el fin de obtener una mejor comprensión de los procesos, alcances y potencial de estas prácticas dentro del marco de la arquitectura sustentable.

Antecedentes de la construcción con tierra cruda

Las construcciones con tierra cruda fueron las más antiguas realizadas por el hombre, desde que este descubre la agricultura; a través de la observación el hombre notó las características particulares de la misma, y comenzó a experimentar con esta. Se considera un tiempo aproximado de 10,000 años antes de Cristo, desde que el hombre utilizó este material para habitar (Angulo & Carreño, 2017).

Hasta mediados del siglo XX era el sistema habitual junto con la piedra y la madera (A. Fabbri et al., 2022). Según investigaciones arqueológicas, cronológicamente las primeras técnicas de construcción con tierra fueron el cob y bajareque, debido a que su ejecución fue intuitiva y no requería transferencia de técnicas complejas para su ejecución. Según Sébastien Moriset (2024), arquitecto investigador de patrimonio arqueológico de tierra en CRA-terre, mencionó durante un taller de entrenamiento para la conservación y administración del patrimonio arqueológico de tierra, estos sistemas asemejan un juego infantil jugando con lodo.

Durante los últimos 30 años, los hallazgos arqueológicos mencionan que durante los siglos IX y VII antes de Cristo, en la región que comprende el Levante se empleó la construcción con ladrillos moldeados a mano poniendo de manifiesto que hasta en el Alto Imperio, los sistemas constructivos mayormente utilizados fueron los ladrillos moldeados a mano y el Cob (de Chazelles et al., 2008).

Figura 1.

Detalles de las ruinas de Loropéni (Burkina Faso)



Fuente Gandreau, (2010)

Figura 2.

Ruinas de Loropéni (Burkina Faso)



Los ladrillos plano-convexos o en forma de cigarro con las marcas de los dedos se han encontrado tanto en lo que fue Jericó, como en el valle medio del Éufrates, al igual que en Ganj Dareh (Irán); estos ladrillos fueron los primeros antecesores del adobe que conocemos hoy. (de Chazelles et al., 2008).

Otra de las primeras técnicas de la construcción con tierra es el tapial, que consiste en levantar muros portantes mediante la colocación de capas sucesivas de tierra en estado semihúmedo. Inicialmente, se colocaban las capas directamente una sobre otra; posteriormente, se introdujo el uso de encofrados de madera, conocidos como tapiales, donde se vertía una mezcla de tierra, agua, rocas y diversos estabilizantes. Esta mezcla se compactaba mediante apisonado dentro del encofrado para formar muros sólidos, de los cuales

Figura 3.

Hohenrode, Saxony-Anhalt, Alemania siglo XII-XIV A.C.



(Grimm 1939)

algunos todavía han llegado hasta nuestros días como los vestigios de Hohenrode, en Alemania que datan del siglo XII A.C. (Knoll et al., 2019).

En América la ciudad más grande conocida de construcción con tierra que se ha encontrado hasta la fecha está ubicada en lo que fue el reino de Chimú, cuya capital fue Chan Chan, esta ciudad data del siglo XV (Figura 4), y se desarrolló en el valle del río Moche o Santa Catalina.

Figura 4.

Ciudad de Chan Chan, Perú



Fuente: Bullard (2012)

En México, los vestigios más antiguos de construcción con tierra se encuentran en el centro arqueológico de Paquimé, en Casas Grandes, Chihuahua (Figura 5), cuyos orígenes se remontan a los siglos XIV y XV. El material de construcción predominante es el adobe, y se

estima que las viviendas originales contaban con varios niveles. Hasta la fecha, solo se ha excavado aproximadamente el 20% del sitio; el resto permanece aún sin explorar (Centre, s. f.).

Figura 5.

Paquimé, Casas Grandes



Fuente: INAH (2015)

Las técnicas de construcción con tierra cruda han sido empleadas desde tiempos prehistóricos (Figura 6), y su denominación varía según la región, el idioma y las tradiciones constructivas locales. Para unificar y clarificar estos términos, la investigadora Franziska Knoll, junto con otros expertos, desarrolló un glosario multilingüe que explica las distintas terminologías de las técnicas de construcción con tierra cruda, acompañadas de imágenes representativas. Este recurso tiene como objetivo esclarecer los conceptos y facilitar la comprensión de las diversas prácticas constructivas en diferentes contextos culturales. (Knoll et al., 2019)

Figura 6.

Ruinas de Uruk, Irak del 4to y 3er milenio a.C.



Fuente: Qahtan Al-Abeed (2015)

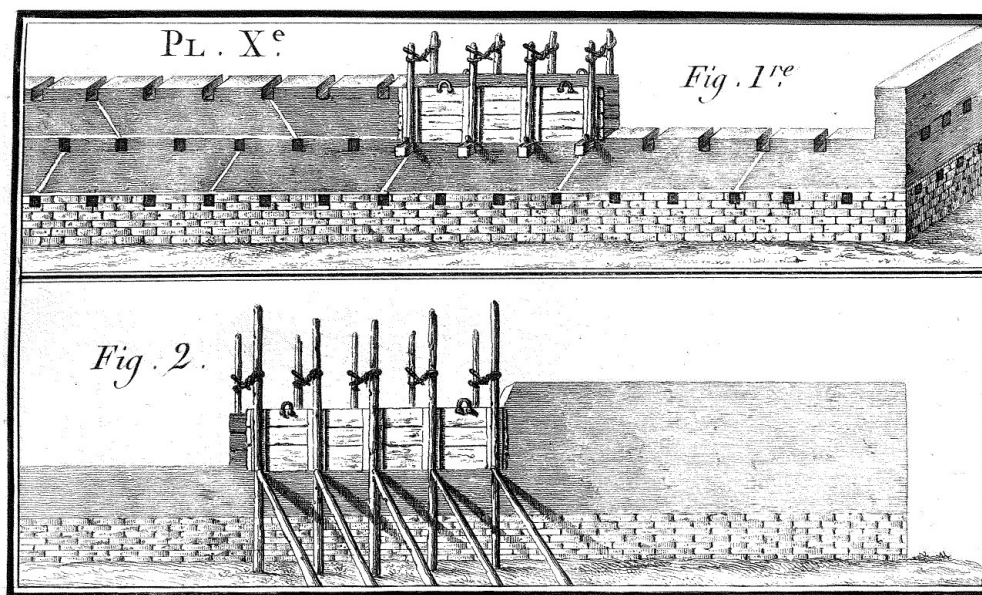
Gracias al interés de arquitectos como François Cointeraux (1740–1830) quien fue pionero en la promoción de la construcción con tierra, específicamente del tapial en Europa (ver Figura 7). Donde a través de sus libros, como la “École d'architecture rurale” (Escuela de Arquitectura Rural) y "Traité sur la construction des manufactures et maisons de campagne" (Tratado sobre la construcción de fábricas y casas de campo) publicados en París en 1790-91 difundió activamente esta técnica, que en ese momento se utilizaba principalmente en el sureste de Francia. Estas obras captaron la atención de arquitectos internacionales, como Henry Holland en Inglaterra, Thomas Jefferson en Estados Unidos, David Gilly en Alemania y Nicolaï L'vov en Rusia (Cointeraux & texte, 1790)(CRATerre, 2024). Su enfoque en la arquitectura rural y la construcción con tierra ha dejado una huella significativa en la historia de la arquitectura sostenible.

La construcción con tierra apoya los criterios de sostenibilidad, esta ofrece una gran oportunidad de reducir el impacto ambiental de la edificación, y por tanto es importante

reconocer sus cualidades para potenciar su valor, como: aprovechar la tierra de las propias excavaciones de una obra evitando gastos de transporte y residuos; absorción de CO₂ de la atmosfera durante la vida útil del edificio, reintegración de los restos del material al ecosistema después de la vida útil de la construcción, por mencionar algunos (Bestraten et al., 2011a).

Figura 7.

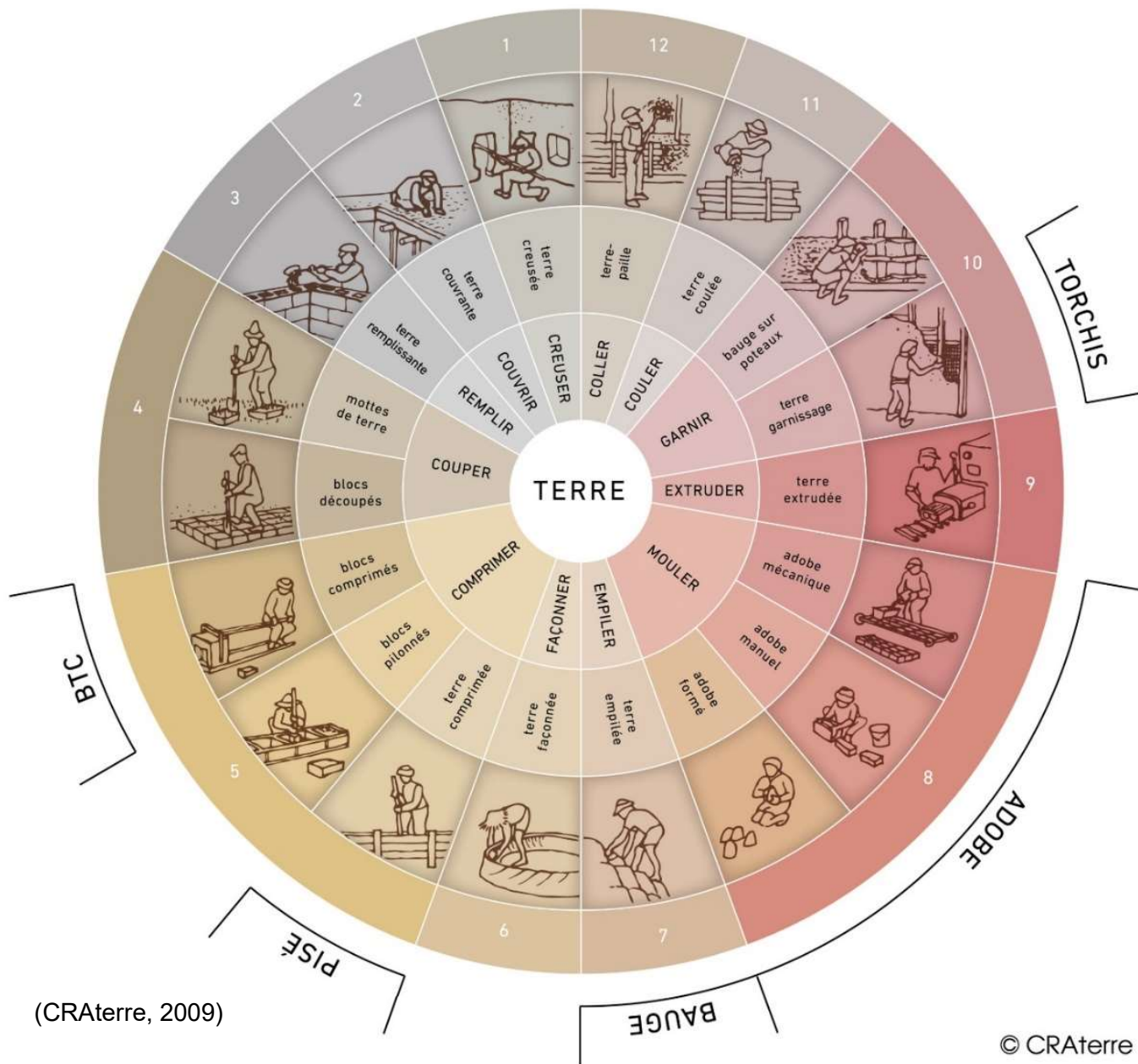
Ilustración de libro de "Ecole d'architecture rurale"



(Cointeraux, 1790)

En 1984, el centro de investigaciones CRATerre desarrolló una rueda de técnicas de construcción con tierra con el objetivo de difundir, explicar y comprender las diversas metodologías empleadas en la edificación con tierra. Este esquema clasificatorio resume las técnicas en cuatro subdivisiones, que a su vez se desglosan en 12 métodos distintos, tal como se ilustra en la Figura 7. Entre estas técnicas se incluyeron técnicas más contemporáneas como el Bloque de Tierra Comprimida (BTC), cuyo origen data del siglo XX (CRATerre, 2009).

Figura 8. Rueda de técnicas de tierra



Bloque de tierra comprimida (BTC) y bloque de tierra comprimida estabilizada (BTCE), origen y evolución

El BTC es una técnica constructiva basada en tierra, elaborada a partir de una mezcla de tierra arcillosa, arena y agregados que se compactan individualmente en forma de bloques mediante el uso de una máquina de compresión (Angulo & Carreño, 2017). Estas máquinas pueden ser mecánicas, semi-mecánicas o hidráulicas (Roux Gutiérrez & Espuna Mujica, 2012).

Al igual que muchas técnicas de construcción, el BTC recibe diferentes denominaciones dependiendo de la región o sus componentes; cuando a los agregados se les añade un estabilizante para mejorar sus propiedades físicas, mecánicas y/o químicas, se denomina BTCE (bloque de tierra comprimida estabilizada). En el ámbito anglosajón, es conocido como compressed earth block (CEB) o stabilized earth block (SEB), mientras que en otras regiones puede denominarse suelo-cemento o bloque estabilizado, entre otros (Galindo et al., 2023).

El origen de la estabilización del BTCE parte de un procedimiento que se empleó en la antigua Roma, donde los suelos eran estabilizados con diversas técnicas, para mejorar las propiedades mecánicas del suelo y garantizar la durabilidad de sus construcciones y calzadas.

En la obra de Marco Porcio Catón, conocido como Catón el Viejo "De Agri Cultura", escrita alrededor del siglo II a.C., ofrece una guía sobre técnicas agrícolas y de construcción rural. En esta, Catón describe métodos de construcción que implican el uso de cal y otros materiales, lo que sugiere un conocimiento temprano de técnicas similares al hormigón romano. Por ejemplo, en el capítulo 14, al referirse a la construcción de una villa rústica, menciona:

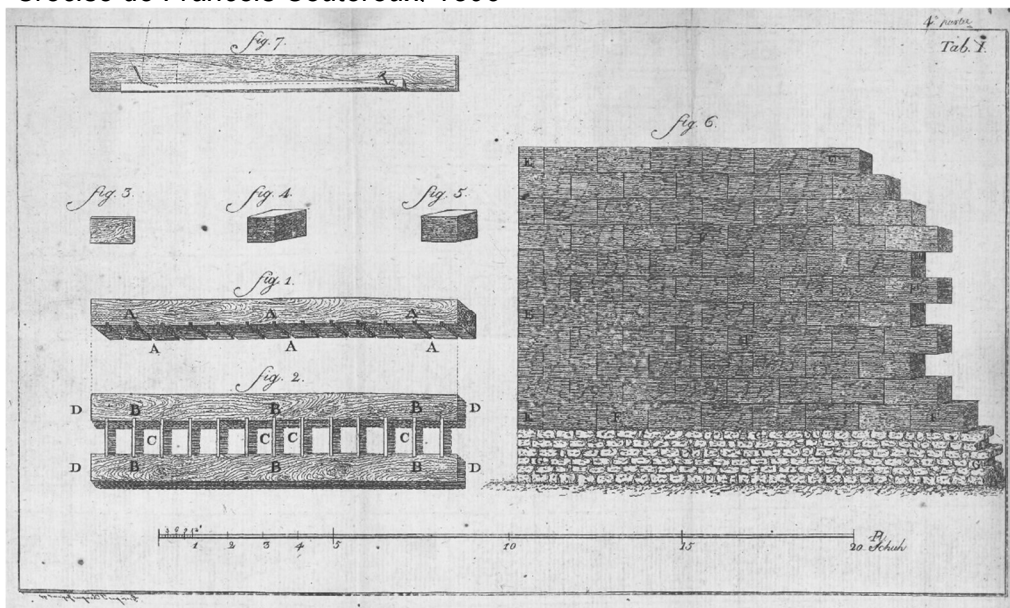
"Hae rei materiem, et quae opus sunt dominus praebebit, et ad opus dabit, (succidet, dolabit lineabit secabitque materiam dumtaxat conductor) lapidem, calcem, arenam, aquam, paleas, terram, unde lutum fiat."

Esta cita indica que el propietario debe proporcionar los materiales necesarios para la construcción, incluyendo cal y tierra para hacer un mortero. Aunque el término "Opus caementicium" se popularizó posteriormente, las prácticas descritas por Catón reflejan el uso de una mezcla que se asemeja al hormigón, con la cal como aglutinante (*Caton l'Ancien : De re rustica : traduction française*, s. f.)

Se puede decir que el origen del BTC se remonta al siglo XVIII, donde François Cointeraux inventó la primera prensa para fabricar bloques de tierra, llamada "Crécise" (ver Figura 9), que consistía en un molde de madera, al cual se le agregaba la tierra y esta era apisonada en el interior (Morel et al., 2000).

Figura 9.

Crécise de Francois Couteroux. 1806



Cointeraux (1806)

A finales del siglo XIX, el ingeniero H. E. Brook-Bradley, aplicó la técnica de estabilización de suelos arcillosos con cemento para construir carreteras en Inglaterra, expandiendo la técnica internacionalmente (Galindo et al., 2023).

Durante la Gran Depresión de 1929 en Estados Unidos, se construyeron viviendas rurales con BTC debido a su economía y facilidad de producción. En India, a finales de la década de 1940, se levantaron miles de casas con BTC para familias de bajos ingresos, con esto se comprobó su utilidad en proyectos de vivienda social. Simultáneamente, en Brasil y África, se experimentó con variaciones del BTC, como el "swishcrete", una mezcla de suelo, cemento y agua diseñada para ser producida localmente con costos mínimos (Galindo et al., 2023).

En Latinoamérica, el BTC ganó relevancia durante la posguerra gracias al trabajo del Centro Interamericano de Vivienda (CINVA), creado en 1951 en Bogotá bajo los auspicios de la Organización de Estados Americanos (OEA). El CINVA se enfocó en soluciones para la vivienda social en contextos rurales, donde la escasez de recursos y la necesidad de materiales sostenibles eran prioritarias (Galindo et al., 2023).

Fue aquí, con la intención de fabricar baldosas para viviendas rurales económicas, se encontraron el problema de que las máquinas existentes en el mercado para fabricar BTCE eran costosas, en comparación a su eficiencia y difíciles de transportar o trabajar en lugares remotos; de manera que el resto de la investigación se derivó al diseño y fabricación de una prensa que fuese económica, sencilla y eficiente, cuya tarea quedó en las manos de McNeal, Davison y Raúl Ramírez (Galindo Díaz, 2023 b) Figura 10.

Figura 10.

Autoproducción de bloques de “suelo-cemento” y máquina cinva-ram



CINVA (1957)

Entre 1953 y 1957, el CINVA lideró un programa de investigación que culminó en el desarrollo de la máquina Cinva-Ram, una prensa mecánica que permitió la fabricación eficiente de bloques en el sitio de construcción. Diseñada para ser portátil, económica y fácil de operar, la Cinva-Ram fue clave para promover la autoconstrucción en comunidades rurales, Figura 11. Este avance no solo redujo los costos asociados al transporte de materiales, sino que también empoderó a las comunidades al permitirles participar activamente en el proceso constructivo (Galindo et al., 2023).

Figura 11.

Construcción de CINVA de viviendas de "suelo-cemento"



CINVA (1957)

El BTC se utilizó en diversos proyectos experimentales liderados por el CINVA, como viviendas en San Jerónimo y Chambimbal (Colombia). Estas iniciativas no solo validaron la calidad del material y la eficiencia de la Cinva-Ram, sino que también demostraron cómo el BTC podía integrarse en tipologías arquitectónicas adaptadas a las necesidades locales. Además, los prototipos incluyeron innovaciones como la producción de baldosas de suelo-cemento y la exploración de recubrimientos para mejorar la durabilidad frente a condiciones climáticas adversas (Galindo et al., 2023).

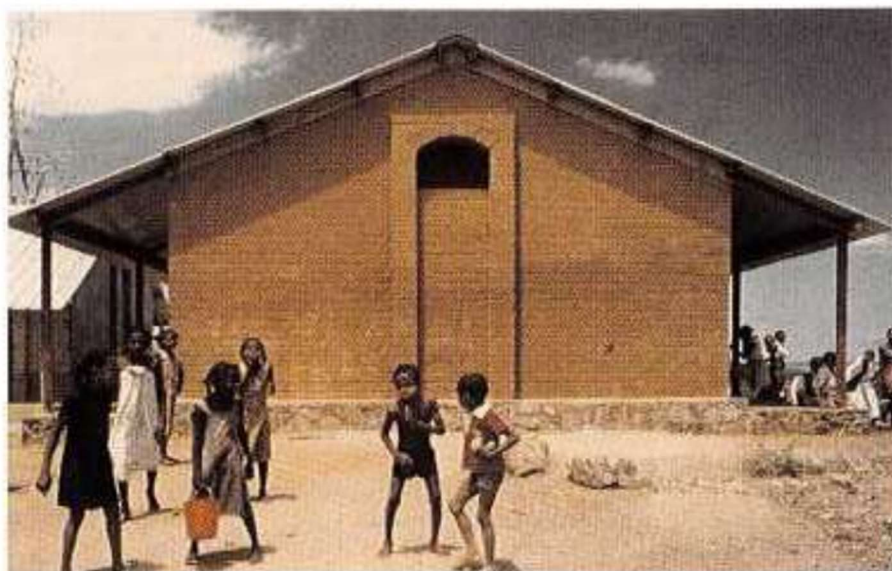
La difusión del BTC trascendió América Latina, donde llegó a Centroamérica, África y Asia. En Corea del Sur, por ejemplo, se utilizaron máquinas Landcrete similares a la Cinva-Ram para reconstruir viviendas tras la guerra. En África, la técnica se combinó con tecnologías locales para construir miles de viviendas en zonas rurales (Woudstra, 2020).

Un caso ejemplar en la implementación de estrategias sostenibles en la construcción es Mayotte, una isla perteneciente al Archipiélago de las Comoras, ubicada entre Madagascar y la costa africana. En este contexto, se desarrolló un proyecto innovador liderado por CRATerre y la Société Immobilière de Mayotte (SIM), cuyo objetivo principal fue mejorar la calidad de vida de la población mediante la creación de infraestructura sostenible. Este enfoque priorizó la autoconstrucción y la utilización de recursos naturales locales, con un respeto por las tradiciones culturales mahoríes (Taxil & Misse, 1999).

Como parte de esta iniciativa, se introdujo la producción de bloques de tierra comprimida (BTC), estabilizados con cemento, como una alternativa eficiente y ecológica frente a los materiales convencionales. Entre las acciones clave del programa se incluyeron la instalación de 19 fábricas de ladrillos distribuidas estratégicamente por la isla y la capacitación de artesanos locales en la fabricación y aplicación del BTC en diversos proyectos de construcción, Figura 12. Este enfoque no solo fomentó la autosuficiencia local, sino que también sentó las bases para una economía circular, promoviendo la sostenibilidad y el desarrollo comunitario (Taxil & Misse, 1999).

Figura 12.

Escuela en Mayotte de BTCE, 1982



SIM, 1999

Por todo lo anterior, podemos decir que en la búsqueda de alternativas constructivas que sean económicas y cuya materia prima esté al alcance de las comunidades el ser humano ha utilizado la tierra como alternativa; la evolución tecnológica a través de la investigación ha permitido la innovación de herramientas y equipo que puedan mejorar características físicas, mecánicas, de permeabilidad, entre otros, que se puedan obtener desde el mismo componente: la tierra; por lo cual el BTCE es estudiado y utilizado en varios países debido a su economía (Angulo & Carreño, 2017 p.72).

Capítulo III

Estado del arte

El BTCE en la actualidad

En las últimas décadas debido a la crisis energética, la crítica a la industrialización y la cumbre ambiental de Río de Janeiro en 1992, surge una conciencia enfocada en la arquitectura sustentable, que busco retomar aspectos de lo vernáculo, que busco la eficiencia energética y conservación de los recursos naturales por sobre el uso de equipos artificiales para producir el confort (Angulo & Carreño, 2017).

Es por ello que el BTCE es un sistema que desde entonces ha sido utilizado como alternativa constructiva de bajo costo, sobre todo en lugares donde el acceso a la materia prima industrializada por precio o accesibilidad es limitado, pero los suelos son vastos.

A nivel internacional puede apreciarse la aplicación de este sistema constructivo, en el continente africano, trabajos como el de Francis Keré (ver Figura 13) han mostrado la versatilidad del material con la ejecución de diversos proyectos como la Escuela Primaria de Gando, Burkina Faso en el 2004, y el Centro de Aprendizaje para Niños en Kenia (ver Figura 14), terminado en el 2020 y con el cual ganó el premio Aga Khan de Arquitectura en 2004.

Figura 13

Construcción de Escuela primaria en Gando, Burkina Faso



Herraiz, 2004

Figura 14.

SKF-RTL Children Learning Centre. Kenia. Francis Kéré



Herraiz, 2020

Otro proyecto destacado también desarrollado en África es H2OS (Figura 15), una eco-villa en Keur Bakar, Senegal, situado a 200 km de Dakar y desarrollado por TAMassociati. El proyecto fue ideado por la asociación de migrantes senegaleses Sunugal, en colaboración con los arquitectos de TAMassociati, y construido por una cooperativa juvenil local, bajo la supervisión de USE, una ONG senegalesa («The Right to Water», 2017).

Esta eco-villa adaptó técnicas bioclimáticas tradicionales a las tecnologías de sostenibilidad más avanzadas, la propuesta es de código abierto, lo que permite su replicación y adaptación en otras localidades. Fue culminado en el 2017(*H2os Project – 2016*, s. f.).

Figura 15.

Eco-villa H2OS



TAMassociati, 2014

En América, también existen ejemplos destacados de la aplicación de sistemas constructivos a base de tierra cruda. Uno de los países que fomenta técnicas constructivas con este material es Colombia. Un ejemplo notable es el Centro Etno-educativo Walirumana que se puede observar en la Figura 16, ubicado en la ranchería Walirumana, a 20 kilómetros al norte

de Uribia, en el departamento de La Guajira. Este proyecto desarrollado por Salba arquitectos, empleo bloques de tierra comprimida (BTC) en sus muros, integró elementos de la memoria colectiva de la comunidad wayuu y adoptó técnicas tradicionales a soluciones contemporáneas (*Walirumana Ethno Educational Center / Salba, 2023*)

Figura 16.

Centro etno-educacional Walirumana



Salamanca, 2020

Con el mismo enfoque, nos encontramos el trabajo de EchaleMX, que desde 1985, realiza proyectos de vivienda con BTCE, como producción asistida para grupos afectados por desastres naturales en distintos estados de la República Mexicana como Chiapas, Puebla, Veracruz, Oaxaca, Tabasco, Morelos, Ciudad de México, entre otras localidades, (Albarrán, 2019). De acuerdo a las publicaciones de EchaleMX, el bloque con el que ellos construyen y al cual denominan eco-block, está fabricado con el proceso del BTCE.

Utilizan tierra del sitio, donde un 90% es arcilla y 10% una mezcla de cemento, cal, arena y agua; cuyo proceso está certificado por INFONAVIT, UNAM y CENAPRE. Sus construcciones van destinadas al apoyo de comunidades con pobreza extrema (ver Figura 17), recibiendo apoyo de fundaciones, ellos mencionan que construyeron treinta viviendas para familias de escasos recursos a través de un programa de inclusión social en La Soledad, Zimatlán, Oaxaca (Echale, 2021)

Figura 17.

Proceso de construcción de vivienda en Zimatlán, Oaxaca



EchaleMX, 2021

En Zapopan Jalisco, el arquitecto Van Aartensen, construyó en el 2015, un conjunto de viviendas en una zona urbanizada, con el objetivo de ser un desarrollo sustentable, llamado Brasilia Sustentable, sin embargo, tuvo complicaciones burocráticas por los que el BTCE de este desarrollo se utilizaron solo como muros tapón, y no como muro estructural (ver Figura 18) (Albarrán, 2019).

Figura 18.

Brasilia Jalisco Imagen exterior e interior, Van Artensen



Fuente: Castillo, 2016

En la península de Baja California, en el municipio de Loreto, se encuentra una comunidad basada en el desarrollo sustentable llamada *Village of Loreto Bay*, creada en el 2003, con la intención del propietario Jim Hallock, por implementar un sistema de construcción ecológico, generar electricidad en el sitio, aprovechar los recursos naturales, y reciclar los desperdicios, la Figura 19 muestra una imagen de parte de dicho desarrollo el cual se extiende por la costa del Golfo de California (Buntin, s. f.)(*Hacer bloques de tierra comprimida*, 2018).

Figura 19.

Villas de la bahía de Loreto, Jim Hallock



Fuente: desconocida

En diversos países, el uso del BTCE ha surgido como una alternativa constructiva sostenible, alineada con los principios del desarrollo sustentable. México, hace un esfuerzo en incentivar el desarrollo de proyectos sustentables, con iniciativas que fomentan proyectos de construcción sustentable. Estas acciones están enmarcadas dentro de los compromisos internacionales asumidos por el país, como los Acuerdos de París y la COP21, que buscan mitigar los efectos del cambio climático (Aram, 2023).

Los programas nacionales de vivienda y desarrollo, refuerzan la intención al incorporar estrategias dirigidas hacia la sostenibilidad. Estas políticas no solo promueven el uso de materiales alternativos como el BTCE, sino que también incentivan prácticas constructivas responsables que minimizan el impacto ambiental, contribuyendo a una transición hacia un modelo de desarrollo más equilibrado y respetuoso con el medio ambiente (Aram, 2023).

Normativas en el Mundo y México sobre la Construcción con Tierra y BTCE

La tierra ha resurgido como un material de construcción altamente valorado por su sostenibilidad y su capacidad para enfrentar los desafíos contemporáneos en la edificación. No obstante, la ausencia de un marco legal uniforme ha llevado a numerosos países a desarrollar normativas que regulen su uso y promuevan técnicas de construcción con tierra cruda (Cid, 2012).

En los últimos años, países como Francia, Brasil, Colombia, España, Burkina Faso, Sri Lanka y Estados Unidos han implementado nuevas normativas, mientras que otros, como México, continúan el trabajo en su desarrollo. El análisis del estado actual de la normalización en la construcción con tierra resulta fundamental para consolidar el conocimiento técnico y establecer directrices claras que impulsen su aceptación global.

En este contexto, la investigación de Cid (2012) ha sido fundamental para proporcionar una comprensión integral del marco legal vigente en diversos países, así como de las oportunidades para consolidar este enfoque constructivo como una alternativa económica y sustentable. Es por ello que, investigadores alrededor del mundo han trabajado en determinar la caracterización adecuada de los materiales para su fabricación y uso.

Algunos de estos estudios han derivado en la creación de normativas, metodologías de fabricación, dosificaciones optimizadas de materiales, variantes en el uso de agregados, estabilizantes, criterios estructurales, caracterización detallada de los componentes, entre otras variables. Estos avances no solo han permitido una mayor estandarización en la construcción con tierra, sino que también han ampliado su potencial como solución viable y sostenible frente a los desafíos actuales de la edificación.

En Nueva Zelanda, a través de la influencia de Yvonne Rust surge Northland Craft Trust, hoy Earth Building Association of New Zealand (EBANZ); creándose las tres normas neozelandesas en 1998, normativa considerada la más amplia y completa que existe en cuanto a la construcción con tierra se refiere, incluido capítulos específicos del BTCE, específicamente

caracterización, cimentaciones en sismos, condiciones térmicas particulares, e incluso consideraciones para ciclones (EBANZ, 2021) (Cid et al., 2011).

En Francia, desde hace casi 40 años la escuela Escuela Nacional Superior de Arquitectura de Grenoble (ENSAG), capacita a profesionales en el laboratorio CRATerre, cuyo trabajo es reunir a investigadores y profesionales en el ámbito de la construcción y conservación del patrimonio de tierra, para crear herramientas como, la maleta Pedagógica, cátedras UNESCO, investigación arqueología, métodos de preservación, laboratorios de materiales, talleres experimentales, entre otros. (Gandreau et al., 2012).

Brasil ha sido otro referente en la normalización y promoción del uso de BTCE, desde 1986 ha emitido trece normas relacionadas con la construcción con tierra de las cuales más de ocho normativas abordan distintas caracterizaciones y criterios estructurales desarrolladas por la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT). Además, el país ha sido clave en la creación de la Organización Iberoamericana PROTERRA, que impulsa la arquitectura y construcción con tierra en la región (Neves et al., 2011).

Estas normativas regulan tanto la fabricación como las aplicaciones constructivas del BTCE, abarcan su uso en bloques de suelo-cemento y en paredes monolíticas, y consolidan su posición como líder en el desarrollo técnico y normativo en este ámbito (Cid et al., 2011).

El interés por las construcciones con tierra ha ganado relevancia a nivel global, impulsando la creación de reglamentos, normativas e incluso manuales constructivos para el uso del BTCE en países como Francia, España, Argentina, África e India, entre otros. Este auge se debe principalmente a la accesibilidad y bajo costo de la materia prima utilizada, así como a las ventajas técnicas que ofrece (Angulo & Carreño, 2017).

En Estados Unidos, a través de la *American Society of Testing Materials* (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales: ASTM, por sus siglas en inglés) crearon una norma para la construcción de muros con tierra que es la ASTM E2392M (ASTM, 2010), aunque esta toma de referencia las normas neozelandesas está destinada a la mayoría de los sistemas como el

tapial y adobe. En Nuevo México tiene un código para la construcción con tierra desde el 2001 que ha ido actualizándose periódicamente (NMAC, 2015).

En México hasta el 2015, surge la primer Norma Mexicana para “Bloques de Tierra Comprimida Estabilizados con Cal - Especificaciones y Métodos de Ensayo”, la NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ONNCCE, 2015) debido a la investigación entre CALINDRA y el Universidad Autónoma de Tamaulipas, un grupo de investigadores participaron en los análisis de la cal como estabilizante para fabricar el BTCE, (Roux, 29 marzo 2023). En la normatividad se mencionan los requisitos para producción de BTCE, empero, se referencia a las normas para mampostería de ladrillo cocido y bloque de cemento, de modo que, algunos criterios son contradictorios. La NMX-C-508 exige que, para los bloques de tierra se debe de usar solamente cal como estabilizante o algún otro material natural en un máximo de 15%, sin embargo, los estudios confirman que la cal como estabilizante no cumple con los requerimientos técnicos, de compresión y absorción de agua que otros estabilizantes logran. (Albarrán, 2019)

En la Tabla 1, se muestran algunas normas constructivas para el BTCE, que se obtuvieron a partir de la investigación de Cid (2012).

Tabla 1.

Resumen de normativas y reglamentos internacionales para materiales de tierra cruda

| Nombre | Código | Descripción | País | Año |
|--|---------------------------------|--|----------------------------|------|
| STANDARDS NEW ZELAND | NZS 429 NZS 4298 NZS 4299 | | Nueva Zelanda | 1998 |
| NMAC CÓDIGO DE CONSTRUCCIÓN COMERCIAL DE NUEVO MÉXICO | NMAC-2412 NMAC-2405 | New México Building Code. Construction Industries Division (CID) of the Regulation and Licensing Department. | Santa Fe, Nuevo Mexico, US | 1982 |
| ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS | NBR-10832 | Fabricación de ladrillo macizo de suelo-cemento con el uso de prensa manual. Procedimiento. | Brasil | 1989 |

| | | | | |
|--|-----------------------------------|--|----------|------|
| ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS | NBR- 10834 | Bloque hueco de suelo-cemento sin función estructural. Especificación. Bloque hueco de suelo-cemento sin función estructural – Determinación de la resistencia a la compresión y absorción de agua. Método de ensayo. | Brasil | 1994 |
| INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS ICONTEC | NTC -5324 | Bloques de Suelo Cemento para Muros y Divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de Ensayo. Condiciones de Entrega, que es una declarada traducción de la norma francesa AFNOR XP P 13-901:2001 *establecen requisitos para la resistencia a la abrasión | Colombia | 2005 |
| NORMAS MEXICANAS | NMX-C- 508- ONNCCE- 2015 | Industria de la Construcción - Bloques de Tierra Comprimida Estabilizados con Cal - Especificaciones y Métodos de Ensayo | México | 2015 |

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación de Cid (2011).

Entre las normativas previamente mencionadas, varias abordan de manera general la construcción con tierra, mientras que otras se centran específicamente en los bloques de tierra comprimida estabilizada (BTCE). Las disposiciones más relevantes incluyen información detallada sobre la tipología de suelos aptos para su fabricación, el uso de estabilizantes, la cuantificación y proporción de los materiales, el dimensionamiento de las piezas y ciertos criterios estructurales. Asimismo, se describen los ensayos experimentales a los que fueron sometidas las muestras, permitiendo evaluar su desempeño mecánico, durabilidad y comportamiento en distintas condiciones ambientales (Cid et al., 2011).

Al igual que las pruebas establecidas en las normativas de otros países, diversos estudios han demostrado que las características del sustrato pueden variar significativamente dentro de un mismo predio, debido a la ausencia de una homogeneización en sus propiedades. Por esta razón, las características mecánicas y térmicas de los sistemas construidos con

elementos naturales deben ser analizadas y definidas en función del sitio de extracción de la materia prima.

Las Tablas 2 y 3 se presentan variaciones en las características físicas y mecánicas de los BTCE y adobes, según datos obtenidos de diversos autores. Estos resultados evidencian la complejidad de la homogenización de dichos materiales, lo que da lugar a diferencias significativas que afectan su desempeño estructural como térmico, en el Anexo A y B, se muestran más resultados obtenidos de otras investigaciones.

Tabla 2.

Propiedades térmicas de BTCE y adobe, datos obtenidos de varios autores

| Material | Conductividad Térmica (W/m°C) | Densidad (kg/m ³) | País | Autor |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|
| BTCE | 0.79-0.93 | 1625-2200 | varios | (Cutíño et al., 2020) |
| BTCE | 0.93 | 1750 | Australia | (Heathcote, 2011) |
| BTCE | 0.81-0.93 | 1700 | India | (Bestraten et al., 2011b) |
| Barro macizo | 0.4-1.2 | 1000-1900 | Alemania | (Gernot Minke, 2005) |

Fuente: Elaboración propia a partir de investigaciones de varios autores, (ver Anexo A, para más datos).

Tabla 3.

Propiedades mecánicas de BTCE y adobes, datos obtenidos de varios autores

| Material | Resistencia Compresión Simple (kg/cm ²) | Densidad (kg/m ³) | País | Autor |
|--------------|---|-------------------------------|--------|---|
| BTCE | 40 -76 | 1625-2200 | varios | (Cutíño et al., 2020) |
| BTCE | 40.92 | 1500-200 | México | (GOPA INFRA, 1979) |
| BTCE | 50.98 | 1700 | India | (Bestraten et al., 2011b) |
| Barro macizo | 40.78 | - | México | (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012a) |
| BTCE | 20.39 | - | México | (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012b) |

Fuente: Elaboración propia a partir de investigaciones de varios autores, (ver Anexo B, para más datos)

Por lo anterior, es fundamental destacar la importancia de la caracterización y estabilización de los materiales para optimizar el desempeño de las piezas. En el siguiente apartado, se describen en detalle los métodos empleados para ambos conceptos, así como la mención de las nuevas pruebas de laboratorio a las cuales pueden ser sometidos los suelos, con el objetivo de comprender mejor sus propiedades y su comportamiento en sistemas constructivos basados en tierra.

Caracterización

En el pasado, la fórmula para la fabricación de materiales en la construcción con tierra se realizó de forma empírica, basándose en las culturas constructivas locales, que eran transmitidas oralmente de generación en generación por los constructores, quienes a su vez también eran agricultores que explotaban la tierra para la agricultura. Estos constructores aprendieron a adaptarse a las limitaciones de los materiales locales y, en particular, a las propiedades de los suelos locales (A. Fabbri et al., 2022).

Antiguamente, los humanos se adaptaban a las propiedades del suelo de su región, lo que orientó sus decisiones sobre la técnica empleada. Por ejemplo, la tierra del Valle del Ródano, Francia; contiene cantidades significativas de granos gruesos y, si el constructor de esa época hubiera querido fabricar adobe con esta tierra, habría tenido que tamizarla, lo cual era complicado. Por lo cual, la mejor técnica de acuerdo a esta granularidad fue la tierra apisonada. Un análisis similar se puede hacer con el tapial en Normandía (A. Fabbri et al., 2022), pero en este caso, una de las razones para la elección de esta técnica fueron las condiciones meteorológicas. Aunque la tierra de Normandía tiene una granularidad adecuada para fabricar adobe, la humedad presente y las dificultades para el secado orientaron a los constructores hacia el "adobe colocado directamente sin secado", es decir, la técnica del tapial. Así mismo, cuando la tierra utilizada era demasiado arcillosa, el alto contenido de agua del tapial causaba agrietamientos significativos de los materiales durante el secado, por lo que los

constructores encontraron una solución añadiendo fibras vegetales a la mezcla de tierra, lo que no solo ayudaba a limitar el agrietamiento durante el secado, sino también a estructurar mejor las piezas frescas de tapial. Así, el patrimonio vernáculo demuestra que los constructores, por experiencia, aprendieron a adaptarse a los materiales locales. Lo mismo ocurre con la fórmula de los materiales, ellos no utilizaban pesaje, ni distribución granulométrica, mucho menos química o mineralógica. Las combinaciones empleadas eran el resultado de la experiencia adquirida en el lugar de construcción a través de los años (A. Fabbri et al., 2022).

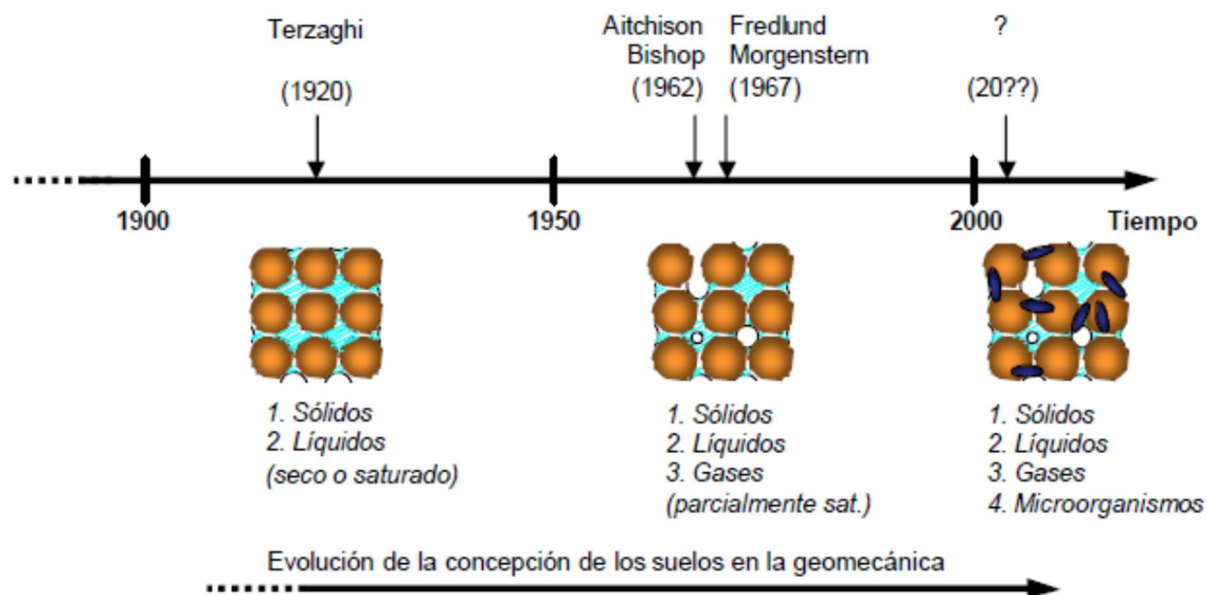
Es común que, al analizar los suelos, las investigaciones se centren en los componentes granulares —partículas de arcillas, limos, arenas finas, arenas gruesas y gravas— cuya proporción determina la clasificación del suelo; el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM, 2000b). No obstante, además de los elementos sólidos, el suelo incorpora otros componentes para su caracterización: los líquidos y gases presentes en el como se muestra en la Figura 22. Estos elementos desempeñan un rol fundamental en la comprensión de la tierra como material potencial para la construcción (Rodríguez-Mariscal & Solís, 2020).

Para ello, resulta fundamental caracterizar adecuadamente la materia y comprender la composición de los sustratos, ya que estos presentan características individuales complejas, al estar compuestos por elementos sólidos como minerales, materia orgánica y organismos vivos, más los vacíos que comprenden el agua y el aire (Sáinz Guerra & Sandoval, 2010).

Existen distintos métodos de caracterización que pueden aplicarse, que permiten obtener datos físicos, químicos o biológicos de acuerdo con los resultados específicos que se desean en el estudio del suelo. En la última década, las investigaciones sobre la construcción con tierra han experimentado un incremento significativo, por lo que se han implementado nuevas herramientas para lógralo. No obstante, existen metodologías consolidadas que continúan siendo fundamentales y accesibles para la mayoría de los investigadores, tanto en laboratorio como en campo.

Figura 20.

Evolución de la concepción de suelos



Fuente (Narsilio & Santamarina, 2008)

En 2017, Fabbri Antonine y su equipo llevaron a cabo un metaanálisis de publicaciones científicas en Science Direct, en el cual identificaron que características era más relevantes en el estudio de suelos para aplicaciones constructivas, de acuerdo a sus datos mencionan el siguiente orden: primer lugar, destaca el análisis granulométrico, debido a su impacto en la distribución de partículas y su influencia en la estabilidad y compactación del material. Posteriormente, la caracterización física y geotécnica, ya que permite evaluar propiedades como la densidad, la cohesión y la resistencia mecánica del suelo. Subsecuentemente, la caracterización química, ya que determina la composición de los elementos y la interacción del material con su entorno. Finalmente, la caracterización mineralógica, ya que esta proporciona información sobre la estructura cristalina y la reactividad de los minerales presentes (A. Fabbri et al., 2022).

Existen otros parámetros químicos, como la cantidad de materia orgánica, las sales solubles o el pH, que nos permiten saber cómo reaccionarían los suelos con estabilizaciones química.

La Tabla 4 presenta un resumen sobre una selección de ensayos aplicables en ambas condiciones (campo y laboratorio) esta proporciona un marco comparativo para su implementación en estudios de suelos; una relación más extensa se encuentra en el Apéndice A.

Tabla 4.

Ensayos de laboratorio más utilizados y su comparativo con ensayos de campo.

| Propiedad | Análisis de laboratorio | Prueba de campo |
|---------------------------------------|---|---|
| Propiedades físicas | | |
| Granulometría | Ensayo granulométrico SCT M-MMP-1-06/03 | Tacto sintiendo las partículas |
| | Ensayo sedimento métrico (Ley de Stokes) | Prueba de la botella |
| Plasticidad | Límites de Atterberg | Pegajosidad y Cohesión (Prueba del Dedo) |
| | | Prueba de rollo o la cinta |
| Propiedad | Análisis de laboratorio | Prueba de campo |
| | | Prueba de bola y secado o de pastilla y secado |
| Contenido de humedad | Contenido de humedad | estufa portátil, cilindro metálico, y balanza |
| Densidad relativa, aparente y real | ASTM C-128 | estufa portátil, cilindro metálico, y balanza |
| | M-MMP-1-05/18 | |
| Compresibilidad - compactación | Ensayo Proctor | Prueba de la bola |
| | Contracción | Prueba de la pastilla |
| Propiedades químicas | | |
| Sales, óxidos, sulfatos, etc. | Ensayos químicos | Observación visual y olfativa (color, olor, sabor, tacto) |
| | Azul metileno | |

Fuente: Elaboración propia de datos obtenidos de CRATerre (2024) y RILEM (2022)

De acuerdo con Bowles (1982) en *Propiedades Geofísicas de los Suelos*, el comportamiento de los estratos está directamente influenciado por la composición física y química, así como por la estructura del suelo. Conocer estas características permite evaluar la necesidad de estabilización para mejorar sus propiedades y adecuarlas a aplicaciones específicas.

Estabilización

La estabilización de suelos es un proceso que busca mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo en su estado natural mediante la incorporación de materiales estabilizantes, con el fin de adecuarlo para aplicaciones específicas, ya sea de agricultura, ingeniería, arquitectura. Para determinar si se requiere la estabilización se deben caracterizar previamente el sustrato y con ello determinar que aspectos se desea modificar.

Según Barbeta (2020), un estabilizante es una sustancia que, al añadirse al suelo, mejora sus características físicas, como la resistencia a la compresión y la tracción, y reduce la contracción, aspectos fundamentales en el ámbito de la construcción.

El origen de la estabilización se menciona en el capítulo II de esta investigación cuyos datos arqueológicos datan desde siglo II a.C. aunque se sabe que la civilización Mesopotámica y egipcia ya utilizaban métodos para mejorar los caminos y rutas; los romanos posiblemente fueron los que más impulsaron estas obras cada vez más eficientes y complejas. Tanto en el viejo continente como en Mesoamérica la estabilización con distintos aditivos se ha descubierto en los vestigios arqueológicos analizados.

Existen diversos tipos de estabilizantes que se pueden emplear, clasificados en físicos, orgánicos y químicos. La elección del estabilizante adecuado dependerá de la caracterización del suelo y de los fines específicos para los que se destina.

La estabilización física consiste en el mezclado de dos o más suelos cuyo resultado permitirá tener un producto térreo con mejores características que las originales. Este tipo de

estabilización ayuda a tener una mejor proporción en la granulometría que aumenta el valor relativo de soporte del suelo, así como la modificación de la plasticidad (Roux, 2010).

La estabilización orgánica ocurre cuando se agrega al suelo materia de origen orgánico, ya sea animal o vegetal. Entre los estabilizantes de origen animal se encuentran el estiércol, la urea, el acetato de amoníaco, el pelo humano o animal, entre otros; mientras que de origen vegetal se incluyen la paja, el pasto, los residuos de cosechas, las fibras vegetales, las savias, entre otros (Jiménez et al., 2016). La adición de materia orgánica favorece la estructura y la resistencia del suelo, ya que incrementa su capacidad de resistencia a la tensión. (Minke, 2005).

La estabilización química implica la incorporación de agentes que reaccionan con el suelo, los cuales alteran sus propiedades moleculares de forma permanente. A diferencia de la estabilización orgánica o física, donde las modificaciones pueden ser temporales y el suelo podría retornar a su estado original bajo ciertas condiciones, la estabilización química induce cambios irreversibles en la estructura y comportamiento del suelo.

Algunos de los agregados utilizados para este propósito incluyen la cal, el cemento, las resinas, los asfaltos, los lignosulfitos, entre otros, que tienen la capacidad de modificar químicamente la estructura molecular del suelo. La selección de estos agentes dependerá de los objetivos específicos que se deseen lograr en el suelo, así como de la disponibilidad y accesibilidad de los mismos.

La estabilización con cal es habitual realizarla en suelos con alto contenido de arcilla, debido a que esta reacción produce hidratos de silicato de calcio estables e hidratos de aluminato de calcio a medida que el calcio de la cal reacciona con los aluminatos y silicatos solubilizados de la arcilla. La reacción puzolánica completa puede continuar durante un período de tiempo muy largo, incluso décadas, siempre que haya suficiente cal presente y el pH por encima de 10 o 12. (*Soil Stabilization*, s. f.) (Roux, 2010).

La cal puede modificar casi todos los suelos de grano fino, pero mejora notable a los suelos arcillosos de plasticidad moderada a alta. La modificación ocurre porque los cationes de calcio proporcionados por la cal hidratada reemplazan a los cationes normalmente presentes en la superficie del mineral de arcilla (ver Figura 23); se altera la mineralogía de la superficie de la arcilla, produciendo los siguientes beneficios: reducción de plasticidad, disminución de la capacidad de retención de humedad, reducción de expansión, y mejora de estabilidad (*Soil Stabilization*, s. f.).

Figura 21.

Imagen de arcilla con estabilizante químico a base de cal



Fuente: Michel (2024), En la imagen se observa que, tras la adición de un 3% de cal y agua a la muestra, la arcilla ha experimentado una transformación notable, adquiriendo características similares a las de la arena.

Cabe mencionarse que existen diferentes tipos de cal, según su origen. La cal viva es el producto de un proceso de calcinado, rehidratación y secado de rocas de origen calizo, se recomienda utilizar este material en roca (Roux, 2010). También existe la cal parcialmente hidratada, conocida como Calhidra, que es un óxido de calcio que fue triturado después de su cocción y humedecido por aspersión en un proceso industrial, lo que favorece a que la hidratación se limite a la de algunas partículas, de modo que se desarrolle una mezcla seca de polvo de óxido de calcio e hidróxido de calcio (Roux, 2010).

También existe la cal hidráulica, cuya utilización se documentó en los vestigios de la cultura romana y cuya presencia en Mesoamérica apenas está siendo estudiada gracias a las investigaciones de Villaseñor y Graham (2010). Este material, conocido como cal puzolánica, se obtiene al mezclar puzolanas con cal apagada, lo que da lugar a la formación de diversos compuestos hidráulicos, entre ellos silicatos de calcio y aluminatos hidratados (Villaseñor & Graham, 2010). Históricamente, este tipo de cal se empleó en la conservación de estructuras para el almacenamiento de agua y en la construcción de acueductos.

La estabilización con cemento tiene dos objetivos principales: mejorar la durabilidad y la resistencia de los mampuestos. Estas mejoras no solo optimizan el desempeño del material, sino que también tienen un impacto positivo en el aspecto económico. El porcentaje de estabilizante a utilizar dependerá de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio realizadas en diferentes probetas, permitiendo determinar la proporción óptima para garantizar el mejor rendimiento del material (Roux, 2010).

Según Minke, en su *Manual de Construcción con Tierra* (2005), la adición de cal o cemento se emplea para incrementar la resistencia del suelo; sin embargo, si la cantidad añadida es inferior al 5 %, esta puede disminuir. Esto se debe a que la cal y el cemento pueden interferir con la cohesión de los minerales de arcilla. Además, a mayor contenido de arcilla en el suelo, mayor deberá ser la proporción de estabilizante para lograr una estabilización efectiva. Minke también señala que el tipo de arcilla influye en la resistencia final del material. En su

recomendación, si la arcilla predominante es caolinita, el cemento será un estabilizante adecuado, mientras que, si es montmorillonita, la cal será una mejor opción.

Por otro lado, Roux menciona en su libro “Los bloques de tierra comprimida (BTC) en zonas húmedas”, que, el cemento actúa en la floculación de las arcillas y neutraliza las cargas de negativas, esto impacta en la contracción por secado, dilatación y absorción de agua.

El proceso de estabilización de estos materiales se realiza en seco, es decir, mediante la mezcla de los componentes sin la adición inicial de agua. Para ello, los suelos se tamizan a través de una malla con perforaciones no mayores a 5 milímetros, permitiendo el paso del 100 % de las partículas de arcilla, limos y arenas, mientras se eliminan pequeñas gravas.

Posteriormente, se incorporan diferentes porcentajes de estabilizantes.

Metodologías de referencia

Para definir una metodología adecuada, se revisaron diversos estudios sobre la fabricación de BTCE, se analizó cómo otros investigadores abordaron sus experimentos para obtener resultados óptimos y qué propiedades priorizaron en sus análisis. Entre los procedimientos constantes se encuentra la caracterización de los sustratos en su estado natural y estabilizado, previa a la fabricación de probetas. Con las probetas realizadas, las propiedades predominantes son resistencia mecánica, térmica, la impermeabilidad y la durabilidad.

En el estado del arte, se emplea el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (UCS), según la norma IRAM 10509, actualizado en el año 2000 para incluir sólidos, líquidos, gases y microorganismos como elementos esenciales del suelo. Este sistema se utiliza para registrar las características obtenidas en los ensayos y clasificar el suelo dentro de su categoría correspondiente. (Narsilio & Santamarina, 2008).

Para guiar el diseño metodológico de la presente investigación, se seleccionaron cinco estudios de referencia, la primera es trabajo de Allen (2012), quien hace un análisis de diversas

metodologías para la fabricación de BTCE, centrándose en el contenido de humedad, la resistencia al corte y las condiciones de curado (tiempo y ambiente). Allen evaluó paredes a escala real con diferentes alturas, y aplicó diversas cargas axiales para medir su resistencia al corte.

Por otro lado, Krosnowski (2011) inició la clasificación de suelos conforme a la norma ASTM D2487, seguida de la granulometría y la prueba de hidrómetro según la ASTM D422, y posteriormente los límites de Atterberg conforme a la ASTM D4318. Luego, elaboró bloques de 2.5" de ancho, 3.5" de largo y 1" de alto con distintas dosificaciones, uso un tamiz #8 para los cubos pequeños y un tamiz #4 en campo. Krosnowski destacó la importancia de conocer el contenido de humedad inicial de los sustratos antes de mezclarlos.

Una vez fabricados los cubos, realizó ensayos de compresión sin confinamiento siguiendo el Código de Materiales de Construcción con Tierra de Nuevo México, y comparó sus resistencias. Tras determinar la mejor dosificación, aplicó la prueba de resistencia a la compresión sin confinamiento UCS, para definir la resistencia final de cada mezcla. Posteriormente, llevó a cabo la prueba de módulo de ruptura o flexión a tres puntos (MOR), lo que le permitió seleccionar el diseño óptimo de mezcla para la fabricación del BTCE (Allen, 2012).

En las investigaciones realizadas por Oliveira, Lourenço y Barros (2002), se llevaron a cabo pruebas de cortante basadas en la norma EN 1052-4. Para ello, analizaron tres series de piezas con tres niveles, manteniendo estos niveles constantes durante las pruebas. Los desplazamientos fueron registrados mediante ocho transductores de desplazamiento de voltaje lineal (LVDT), distribuidos en pares de cuatro a cada lado del panel (Allen, 2012).

Asimismo, en otros estudios se observa una tendencia similar en la cantidad de piezas utilizadas para las pruebas de compresión y flexión, lo que sugiere un enfoque estandarizado en la evaluación de estos materiales (Allen, 2012)

Otro estudio relevante es el de Roux (2015), quien integró fibras de coco al BTCE en un experimento dividido en dos fases. En la primera, realizada en laboratorio, caracterizó los sus tratos con pruebas de granulometría, plasticidad, masa volumétrica seca máximo y humedad óptima mediante el ensayo Proctor; el objetivo fue estabilizar el material con cemento. Posteriormente, comparó sus resultados con diversas normativas, incluyendo las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), las Normas Técnicas de Edificación de Mortero de Lodo del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Tapial, BTCE y BTCE de Suelo-Cemento (BSC), así como con las Normas ARS-1996.

Para evaluar las fibras de coco, utilizó la norma ASTM C1116-89, analizó su compatibilidad con la mezcla y su impacto en la estabilidad y resistencia del material (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012^a).

Tras obtener los resultados preliminares, se fabricaron dos grupos de prueba: un grupo control, compuesto por piezas 1:1 estabilizadas con un 6% de cemento sin fibra, y un grupo experimental. Este último incluyó cuatro series de 10 especímenes cada una, con proporciones de fibra de coco del 0.5%, 1%, 1.5% y 2% en peso. Estas proporciones se establecieron en consideración de que el procedimiento tradicional emplea un 1% de fibra, por lo que se realizaron pruebas con valores superiores e inferiores a este porcentaje. (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012b)

Posteriormente, los especímenes fueron sometidos a pruebas de resistencia: a la compresión simple conforme a la norma NOM-C-36-1974, de absorción según la norma NOM-C-38-1974, y de resistencia a la flexión de acuerdo con la norma NOM-C-303-1986. También se realizaron pruebas de permeabilidad, tracción e impacto, aunque en este último caso no se especifica la norma correspondiente para su evaluación (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012b).

En la etapa de campo, se construyeron seis modelos experimentales, conformados por 16 muros con dimensiones predefinidas y orientados en los ocho puntos cardinales. En estos modelos se analizaron las siguientes variables independientes: orientación, material, características constructivas y juntas, lo que generó un total de 192 condiciones experimentales diferentes.

Las variables dependientes se enfocaron en evaluar las propiedades físicas y químicas de los muros, incluyendo abrasión, absorción de humedad, características mecánicas, estabilidad, durabilidad, afloración de hongos y ataque de insectos. A continuación, se presenta la Tabla 5, basada en los datos recabados del experimento, en esta se muestra algunas de las caras, la imagen de la misma se puede observar en el Anexo C, con el registro de algunas de las variables consideradas (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012b).

Tabla 5.

Diseño de tabla del experimento Roux et al (2012)

| | | Orientación | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--------|-----------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| | | Norte | | Sur | | Este | | Oeste | | Noreste | | Noroeste | | Sureste | | Suroeste | |
| | | Fibra de coco | Sin fibra | Fibra de coco | Sin fibra | Fibra de coco | Sin fibra | Fibra de coco | Sin fibra | Fibra de coco | Sin fibra | Fibra de coco | Sin fibra | Fibra de coco | Sin fibra | Fibra de coco | Sin fibra |
| Con zócalo | Juntas | Mortero cemento lodo | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Mortero Cemento arena | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Machimbre | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si zócalo | Juntas | Mortero cemento lodo | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Mortero Cemento arena | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Machimbre | | | | | | | | | | | | | | | |

Elaboración propias a partir del experimento de Roux

Nota: El extenso del diseño de la tabla se muestra en el Anexo D (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012b , p.41)

En la investigación realizada por Cuitiño et al. (2020) sobre las características térmicas y mecánicas de la construcción con tierra, se recopilaron datos de diversos autores,

complementándolos con información de las normativas argentinas y los resultados experimentales obtenidos por los propios investigadores.

En cuanto a las resistencias mecánicas para los sistemas constructivos con tierra se analizaron la resistencia al corte, la flexión y la compresión simple. Para las propiedades térmicas, se evaluaron la densidad, la transmitancia térmica y la conductividad térmica. Los resultados obtenidos fueron comparados con la Norma Argentina IRAM 11.605 para espesores mínimos. Además, para la transmitancia térmica, se tomaron como referencia los valores establecidos en las normas IRAM 11.603 (2012) e IRAM 11.605 (1996) (Cuitiño-Rosales et al., 2020).

En relación a las capacidades mecánicas, mencionan los autores la preponderancia de la preparación de la mezcla, ya que aquí se determina que los resultados sean óptimos. Se hace un comparativo de distintas capacidades de cargas y ensayos que se aplicaron a piezas en diversos países, donde en uno de los casos se realizó una prueba a la compresión con las piezas húmedas.(Cuitiño-Rosales et al., 2020).

En una publicación de Lahbabi et al. (2024), se realizaron estudios mineralógicos, fisicoquímicos y geotécnicos en cuatro tipos de suelos utilizados como materiales de construcción en zonas rurales de Al Haouz, Marruecos. El objetivo fue identificar las fallas en las construcciones de tierra que llevan a los habitantes de esta región a reemplazar sus técnicas tradicionales por el uso de cemento. Los resultados evidenciaron que los principales factores que afectan la durabilidad de los materiales de construcción con tierra son la distribución granulométrica, la composición mineralógica, el contenido de humedad y el proceso constructivo (Lahbabi et al., 2024).

Primero, se determinó el contenido de humedad de las muestras mediante secado en horno a 60°C durante 24 horas. Posteriormente, 50 gramos de muestra fueron molidos en un mortero de ágata y tamizados con una malla #100 μm .

El polvo obtenido se caracterizó mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) se usó un espectrómetro Epsilon 4 de Malvern Panalytical. La identificación de fases cristalinas se realizó con el software HighScore, mientras que la difracción de rayos X (XRD) se llevó a cabo en un Panalytical X-Pert Pro con un anticátodo de cobre (Lahbabi et al., 2024).

Para el análisis de propiedades químicas y estructurales, se empleó espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con un espectrómetro Bruker Vertex 70. La morfología y composición elemental de las muestras se estudiaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplada a espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDX) con un equipo SEM VEGA 3-Tescan.

El comportamiento térmico se analizó mediante análisis térmico diferencial (DTA) y análisis termogravimétrico (TGA) con un Labsys Evo bajo atmósfera de aire, con 50 mg de muestra. La pérdida por ignición (LOI) se determinó al calentar la muestra en polvo a 1000°C durante dos horas, con una velocidad de calentamiento de 5°C/min.

Finalmente, el contenido de materia orgánica (MO) se evaluó mediante calcinación del suelo a 550°C durante cuatro horas, mientras que el contenido de carbonatos (CC) se determinó mediante calcinometría, siguiendo la norma NM13.1.029 (Lahbabi et al., 2024).

Se elaboraron pellets con mezclas de 1 mg de la muestra triturada con 99 mg de bromuro de potasio (KBr). El análisis espectral cubrió un rango de 400 a 4000 cm^{-1} , se empleó un total de 32 piezas con una resolución de 4 cm^{-1} .

Para la caracterización geotécnica, los estudios se basaron en la normatividad marroquí. Se determinó el contenido de agua según la norma NM 13.1.152, mientras que la granulometría se analizó de acuerdo con la NM ISO 17892-4. Se evaluó el valor de azul de metileno (MBV) en los sustratos bajo la norma NM 13.1.178, con el objetivo de cuantificar la presencia de partículas finas en la tierra. Además, se realizaron ensayos Proctor para determinar el contenido óptimo de humedad (OMC) y la máxima densidad seca, siguiendo la norma NM 13.1.023. Asimismo, se llevaron a cabo pruebas de límites de Atterberg, se

consideró la plasticidad (NM 13.1.007) y el límite líquido (NM 13.1.012). La densidad de los sólidos se obtuvo mediante el método del picnómetro con agua destilada, conforme a la norma NM 00.8.098.(Lahbabi et al., 2024).

También realizaron piezas para compactación de 20 mm por 40 mm de longitud, las cuales se tamizaron con la malla de 4mm. El contenido de agua óptimo obtenido por las pruebas se agregó gradualmente hasta conformar una pasta, dicha pasta fue colocada inmediatamente en un molde cilíndrico y compactado con una prensa hidráulica uniaxial con una presión de 2 MPa. Estas muestras se almacenaron en un contenedor de plástico dejándose reposar a temperatura ambiente por 28 días. Después de esta fecha los cilindros se calentaron a 70°C hasta alcanzar una masa consistente según norma XP P 13-901. Posteriormente se realizó la resistencia a la compresión de acuerdo a la EN1015-11, se usó una maquina INSTRION 3369, a una velocidad de 0.5 mm/min pruebas mecánicas. Los parámetros se determinaron a partir del diagrama de tensión-deformación. La densidad relativa de las muestras se calculó a partir de la masa y volumen $P_{app} = m/V$. Cada experimento lo realizaron tres veces, y especificaron una fórmula utilizada para determinar las posibles variables de error (Lahbabi et al., 2024).

La última investigación mostrada en esta sección, fue realizada por Cabrera (2020), donde se realizó un comparativo de los resultados obtenidos en piezas de BTCE, con dos tipos de estabilizantes: cal y cemento, en distintas dosificaciones como se muestra en la Figura 26.

Después de la selección del suelo, se continuó con la caracterización del mismo en estado natural, obteniendo: Límites líquidos, límite plástico, contracción lineal y granulometría. A las probetas de BTCE les realizaron pruebas de resistencia a la compresión, para esto fabricaron en laboratorio 12 series de 5 BTCE con cada una de las variables como se muestra en la Figura 22, manteniendo fija la relación tierra – arena (Cabrera, et al., 2020)

Figura 22.

Imagen de la tabla de dosificación en peso de las series

| Serie | | Tierra (%) | Arena (%) | Cal (%) | Cemento (%) |
|---------|-----------|------------|-----------|---------|-------------|
| Cemento | Cto. 0% | 50,0 | 50,0 | - | 0,0 |
| | Cto. 2,5% | 48,75 | 48,75 | - | 2,5 |
| | Cto. 5% | 47,5 | 47,5 | - | 5,0 |
| | Cto. 10% | 45,0 | 45,0 | - | 10,0 |
| | Cto. 15% | 42,5 | 42,5 | - | 15,0 |
| | Cto. 20% | 40,0 | 40,0 | - | 20,0 |
| Cal | Cal 0% | 70,0 | 30,0 | 0,0 | - |
| | Cal 2,5% | 68,25 | 29,25 | 2,5 | - |
| | Cal 5% | 66,5 | 28,5 | 5,0 | - |
| | Cal 10% | 63,0 | 27,0 | 10,0 | - |
| | Cal 15% | 59,5 | 25,5 | 15,0 | - |
| | Cal 20% | 56,0 | 24,0 | 20,0 | - |

Fuente: (S. Cabrera et al., 2020)

Las probetas utilizadas en el estudio presentaban dimensiones iniciales de $0.25 \times 0.125 \times 0.0625$ m, e incluían dos perforaciones verticales de 6.0 cm de diámetro. Para su fabricación, se empleó una prensa hidráulica Eco Brava, desarrollada por la empresa brasileña Eco Máquinas. Todas las series fueron preparadas con un contenido de humedad del 12.5%, determinado en función del peso seco de los materiales (Cabrera, Jiménez, et al., 2020).

Tras su conformado, las piezas fueron seccionadas transversalmente en mitades, con esto se obtuvieron dos probetas de $12.5 \times 12.5 \times 6.5$ cm por unidad original. A continuación, se realizó una selección aleatoria de seis probetas por serie, las cuales fueron sometidas a ensayos de resistencia a compresión de acuerdo con la norma NMX-C-508, los resultados se pueden observar en la Figura 23 (ONNCCE, 2013)(ONNCCE, 2015).

Figura 23.

Análisis estadísticos de las series de BTCE.

| Series | N | μ (MPa) | σ (MPa) P | ANOVA | | |
|---------|----------|----------------|------------------------|-------|---------|---|
| | | | | Grupo | | |
| Cemento | Cto 0% | 6 | 0.76 | 0.26 | < 0.001 | A |
| | Cto 2.5% | 6 | 0.81 | 0.14 | | A |
| | Cto 5% | 6 | 1.39 | 0.16 | | A |
| | Cto 10% | 6 | 5.09 | 0.52 | | B |
| | Cto 15% | 6 | 6.08 | 0.77 | | B |
| | Cto 20% | 6 | 7.426 | 1.34 | | C |
| Cal | Cal 0% | 6 | 0.57 | 0.13 | 0.372 | D |
| | Cal 2.5% | 6 | 0.57 | 0.08 | | D |
| | Cal 5% | 6 | 0.57 | 0.03 | | D |
| | Cal 10% | 6 | 0.66 | 0.12 | | D |
| | Cal 15% | 6 | 0.60 | 0.10 | | D |
| | Cal 20% | 6 | 0.54 | 0.05 | | D |

Fuente: (Cabrera et al., 2020)

El ensayo se llevó a cabo sin encabezado, con una velocidad de carga variable y una duración de entre 1 y 2 minutos. Todas las probetas fueron evaluadas en estado seco, con 28 días de edad, tras haber sido curadas por 7 días. Posteriormente, permanecieron 21 días en ambiente de laboratorio, con una humedad relativa del 55% y una temperatura de 24°C.

Para el análisis de los resultados y la comparación de las resistencias medias entre las distintas series, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación de medias de Tukey, se usó el software estadístico Minitab (Cabrera, Jiménez, et al., 2020)

Cabe señalar que en la investigación de Cabrera et al. realizaron un estudio del impacto ambiental de cada uno de los estabilizadores, donde se aplicó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a la norma IRAM-ISO 14040 (IRAM, 2017). Esta metodología permite caracterizar y cuantificar los impactos ambientales potenciales a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de un producto o sistema, para este estudio se empleó el software SimaPro 9 (Cabrera et al., 2020)

En síntesis, las pruebas de caracterización son constantes en la evaluación de materiales vírgenes e incluyen ensayos de granulometría, límites de Atterberg, prueba Proctor, densidad y contenido de humedad en el caso de suelos. Para las mezclas estabilizadas, se analizan principalmente la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. Dependiendo del objetivo del estudio y los materiales empleados, pueden incorporarse pruebas adicionales para la caracterización de fibras, así como variaciones en el uso de tecnología y equipamiento.

Capítulo IV

Mexicali y su entorno

En la búsqueda de optimizar los recursos naturales y mitigar los efectos del cambio climático, uno de los objetivos del marco del desarrollo sustentable es la creación de ciudades y construcciones resilientes y sostenibles (Acuerdo de París Naciones Unidas 2015). En este contexto, la ciudad de Mexicali cuenta con extensas reservas de suelos de fácil extracción, los

cuales, históricamente, han sido utilizados en la construcción, por los primeros pobladores, ya sea como revoco en viviendas de grupos indígenas o fabricación de adobes durante los primeros asentamientos urbanos. Para evaluar el potencial de estos sustratos en el desarrollo de un sistema constructivo eficiente y sostenible, es fundamental caracterizar sus propiedades a través del estudio de su edafología, fisiología, condiciones climáticas e historia constructiva.

Ubicación geográfica

El municipio de Mexicali, localizado en el estado de Baja California, México, se sitúa en la región más septentrional de América Latina. Geográficamente, se extiende entre los paralelos 30°51' y 32°43' de latitud norte, y los meridianos 114°43' y 115°51' de longitud oeste. La altitud en este territorio varía desde -3 metros hasta 1,900 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2010).

Mexicali, capital del estado de Baja California, se encuentra en el noroeste de la República Mexicana. Limita al norte con los estados estadounidenses de California y Arizona; al este con Sonora; al sur con el Golfo de California y el municipio de Ensenada; y al oeste con el municipio de Tecate.

La ciudad está ubicada en la llanura sonorense, a una latitud de 32°, dentro de una franja reconocida por albergar algunas de las regiones más cálidas del mundo. (*Clima Mexicali: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Mexicali*, 2025).

Clima

El municipio de Mexicali, situado en el estado de Baja California, México, presenta un clima clasificado como muy seco y muy cálido, con lluvias esporádicas en verano, según la clasificación de García (1964). Durante los meses estivales, de junio a septiembre, las temperaturas pueden superar los 42 °C a la sombra, mientras que en invierno las temperaturas mínimas registradas pueden descender por debajo de los -5 °C.

La precipitación pluvial en la región es baja. Durante los solsticios de invierno, se registran ráfagas de viento provenientes del noroeste, norte y este, con velocidades superiores

a 5.55 m/s, conocidas popularmente como vientos de Santa Ana. Estos vientos son extremadamente secos y cálidos, originados en una zona de alta presión ubicada en la Gran Cuenca y el desierto de Mojave en California, y suelen presentarse durante el otoño y principios del invierno en el sur de California y el norte de Baja California (INEGI, 2010).

Así Asimismo, el clima de la región se clasifica como cálido seco extremo, según la tipología climática de García (1964). Este tipo de clima se caracteriza por una baja precipitación pluvial anual, con lluvias escasas e irregulares, y veranos que registran temperaturas superiores a los 45 °C.

Estas condiciones climáticas representan un desafío considerable para la habitabilidad y el diseño arquitectónico.

Origen y formación

Cada sustrato presenta características particulares que no pueden ser comparadas con ninguna otra, Vitrubio menciona en su libro segundo de Arquitectura (, las características físicas que debían contener los sustratos para saber cuál será su uso dentro de una construcción, según su origen y características.

En aquellos tiempos no se contaba con herramientas y equipo de análisis, que existen hoy en día; hoy se sabe, que los materiales derivados de la naturaleza no son estandarizados, por ello, cada sustrato será diferente dentro de un predio entre una distancia a otra, como lo explica Minke en su Manual de Construcción con Tierra. La composición de la misma dependerá de cada lugar, por lo cual, la dosificación de cada mezcla para elaboración de materiales derivados de esta no puede homologarse.

Los orígenes geológicos del área de Mexicali se remontan a la era Mesozoica, hace aproximadamente 135 millones de años, influenciados por la actividad sísmica de fallas como la de San Andrés, Elsinore y San Jacinto (Ley García et al., 2006). Estas fallas provocaron la deposición de grandes cantidades de gravas y arenas provenientes de San Bernardino, las

cuales rellenaron la Depresión de Saltón, consolidándose posteriormente en conglomerados y areniscas (Gastil et al., 1975; Singer, 1998).

Según Lira, esta cuenca se extiende desde el mar de Salton hasta el Golfo de California. Durante el Mioceno, hace aproximadamente cinco millones de años, la activación del sistema de fallas de San Andrés originó el Protogolfo de California y el desplazamiento de la masa terrestre que hoy constituye la península de Baja California (Gastil et al., 1975). Actualmente, se estima que esta separación aumenta anualmente en 4.9 cm (Sarychikhina, 2003; Cruz-Castillo, 2002).

La depresión de las formaciones rocosas en la zona de Mexicali permitió que el río Colorado transportara sedimentos aluviales y deltaicos. Las elevaciones de Cucapá y Cerro Prieto, junto con la falla Imperial, formaron una cuenca tectónica con una profundidad aproximada de 5,200 metros, rellena de sedimentos que datan del Terciario y abarcan una extensión aproximada de 25 km, dando lugar al Delta del Colorado (Ley García et al., 2006).

Después del periodo glacial, el río fue el traslado de sustratos que provocaron las formaciones de bancos de arenas, gravas y arcillas a lo largo del mismo, y modificaron los recorridos de los cauces, así surgieron nuevos cuerpos de agua, que eventualmente se secaban por medio de la evaporación (Ley García et al., 2006).

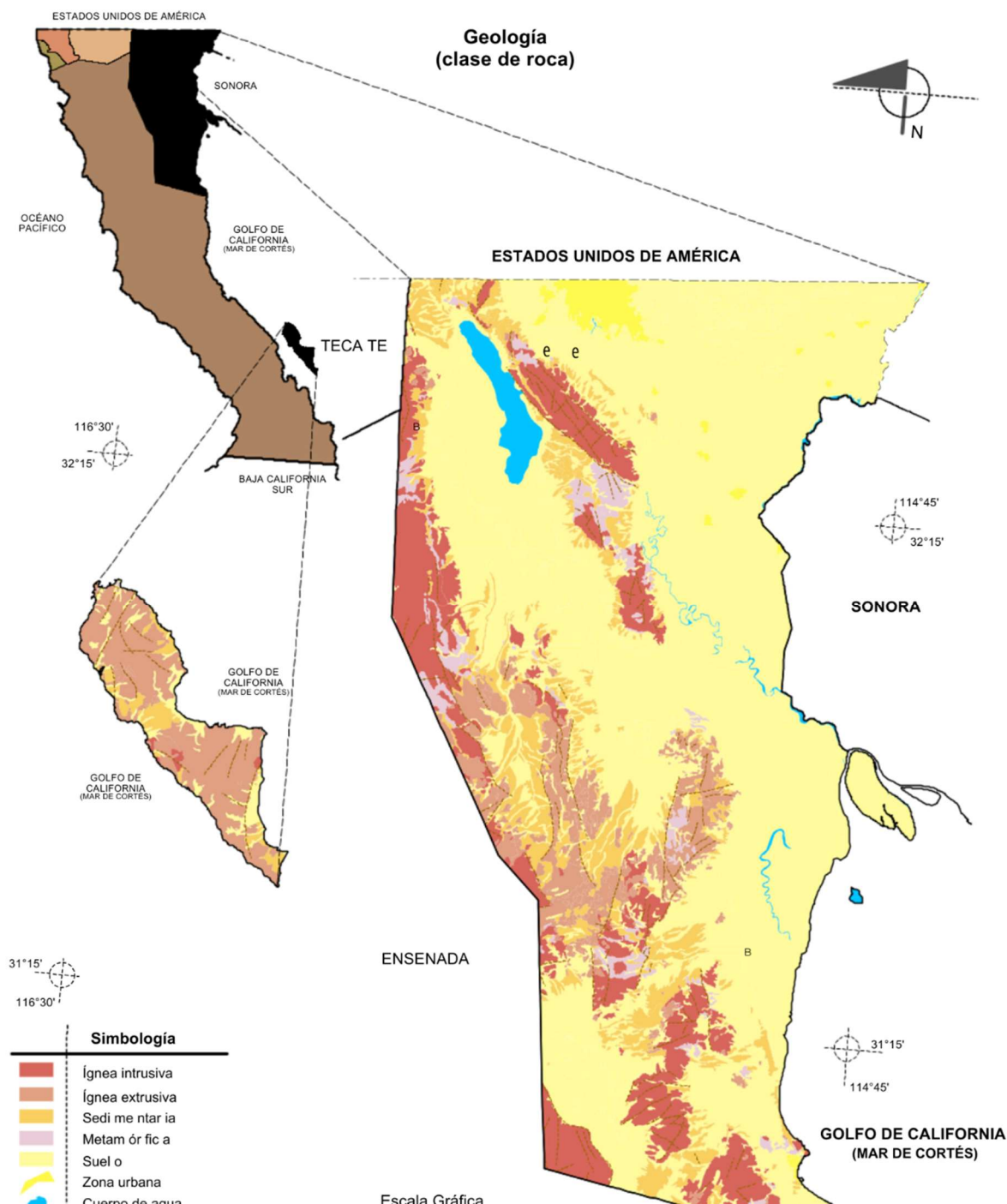
En síntesis, de acuerdo a la publicación del ATLAS DE RIESGOS NATURALES menciona que:

“La ciudad de Mexicali se encuentra enclavada en un amplio valle de origen tectónico formado por sedimentos producto del material depositado por el Río Colorado y los abanicos aluviales de la Sierra Cucapah, compuestos por gravas, arenas y arcillas que alcanzan una profundidad de hasta 2500 metros. Estos sedimentos descansan sobre un paquete arcilloso representado por lutitas grises con intercalaciones de areniscas, lutitas cafés del Terciario y lodolitas, con un espesor promedio de 2700 m, que subyacen sobre el basamento, el cual está compuesto por granitos del Cretácico. En la Figura 24 se puede observar la distribución

geológica en la región, donde la mayor parte de la superficie es plana con suelos sedimentados (Lira-Herrera, 2005).”

Figura 24.

Carta geológica de Mexicali



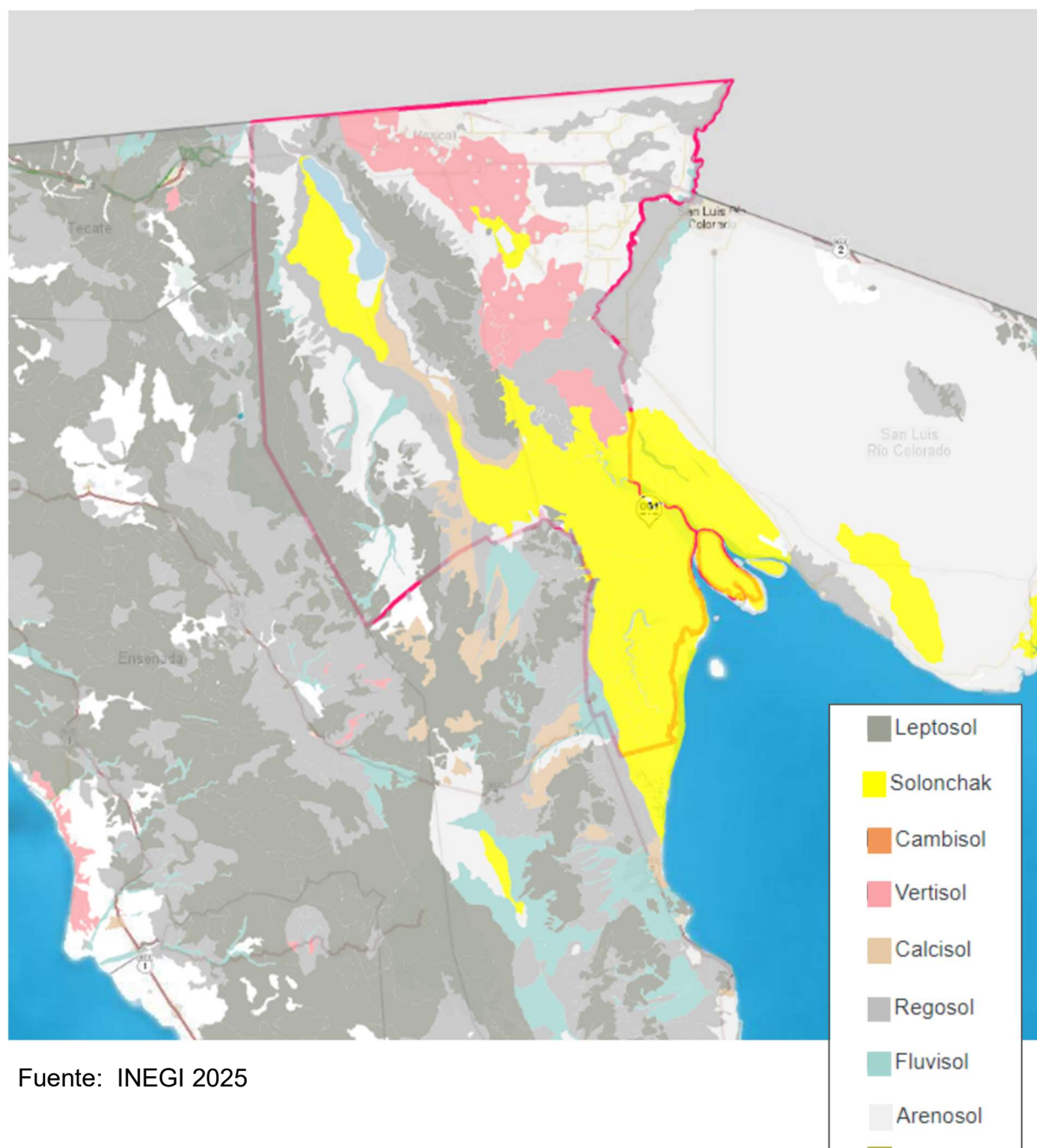
Fisiografía

Los datos que se mencionan a continuación fueron tomados del Atlas de Riesgos Naturales y Químicos de Mexicali del 2006, donde menciona que la ciudad y su valle forman parte del Bajo Delta del Colorado, y este a su vez de la Gran Provincia Fisiográfica del Desierto Sonorense (Ley García et al., 2006) (Shreve y Wiggins, 1964). La zona se caracteriza por presentar una superficie casi plana, manifestándose en área de inundación, con altitudes de poco más de 40 metros en la desembocadura del río Colorado hacia el valle, y después disminuyendo progresivamente hasta alcanzar el abanico aluvial de la sierra Cucapah, ubicada al sureste con altitud de 1080 msnm. Al norte de la sierra Cucapah se localiza el cerro El Centinela con 760 msnm. En el noreste se localizan las dunas llamadas Mesa de Andrade, que en su mayoría pertenecen a los Estados Unidos. Estas dunas son de origen eólico, con altitudes máximas de alrededor de 100 msnm. Hacia el noroeste, la ciudad va disminuyendo sus niveles hasta llegar a cero msnm, sobre todo en el extremo norte que colinda con el límite internacional de los Estados Unidos; En la formación de Salton Sea, el desnivel llega a los 87 metros bajo del nivel del mar. Al sur esta zona se conecta con el Golfo de California, que ormó litorales y en algunas ocasiones se generan oleaje que puede alcanzar entre tres y siete metros. En la porción oeste casi pegado a la sierra Cucapah, existe una estructura o aparato volcánico llamado Cerro Prieto que sobresale del paisaje casi plano, con una altitud de 220 msnm; es un volcán pleistocénico inactivo (Ley García et al., 2006)

En la zona de Mexicali los suelos predominantes Leptosol (26.78%), Regosol (22.20%), Solonchak (14.99%), Arenosol (12.35%), Vertisol (7.11%), Fluvisol (6.72%), Calcisol (4.36%), cambisol (2.09%), Luvisol (0.01%), cuya distribución se puede apreciar en la siguiente Figura 25. Dentro de las zonas urbanas los suelos predominantes originalmente eran los vertisoles, regosoles y fluvisoles (INEGI, 2010). En la Figura 26, se aprecia la fisiografía con los cuerpos de agua.

Figura 25.

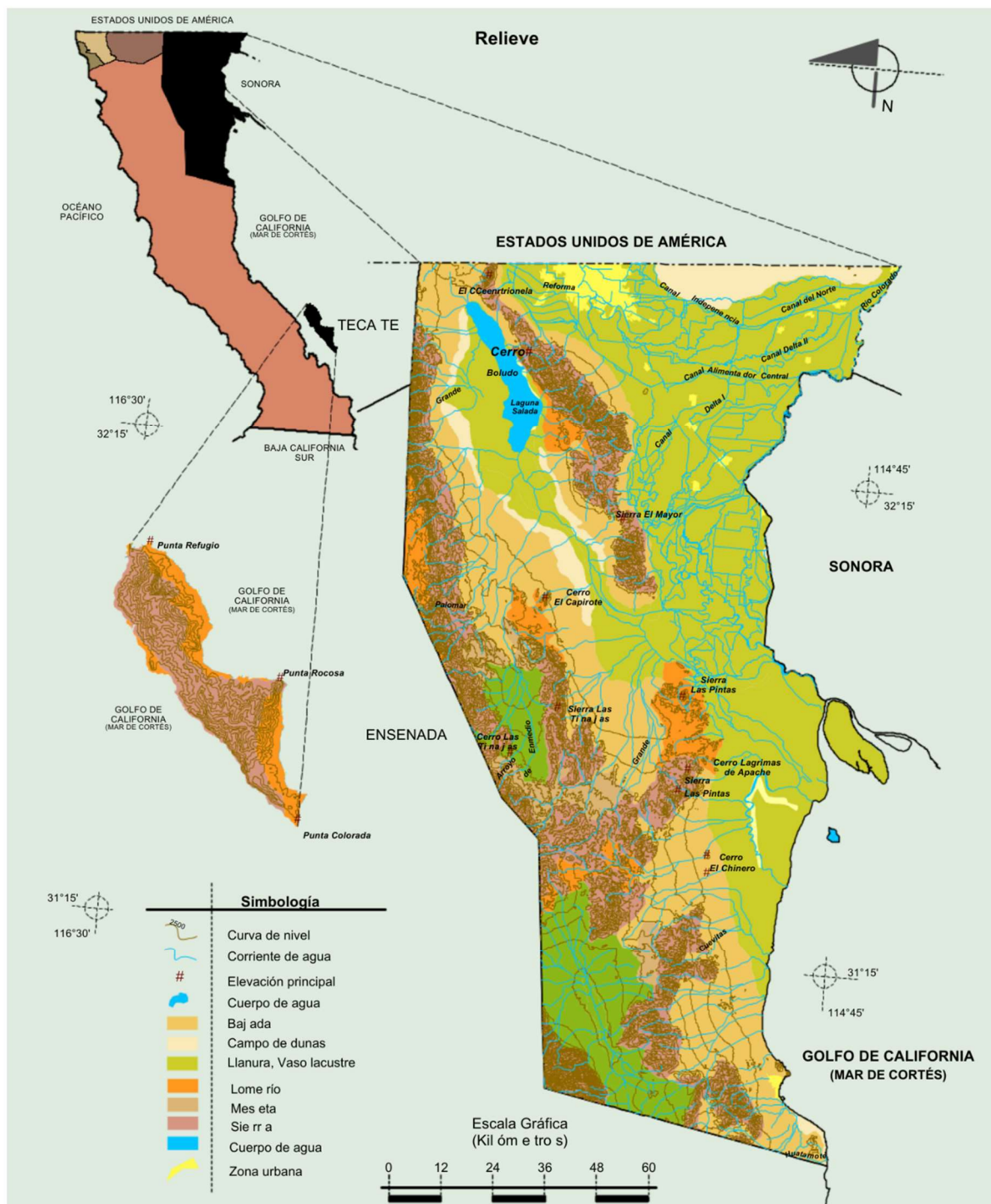
Carta Edafológica de Mexicali



Fuente: INEGI 2025

Figura 26.

Carta fisiográfica de Mexicali



Fuente: INEGI 2010

Historia constructiva

Los sistemas constructivos predominantes en Baja California, particularmente en la ciudad de Mexicali, se basan en muros de bloques de concreto, con cubiertas y entresijos de losa maciza de concreto armado o sistemas de vigueta y bovedilla, según datos del último censo de INEGI (2020). Si bien estas técnicas son ampliamente utilizadas por su disponibilidad y rapidez constructiva, no resultan óptimas frente a las condiciones climáticas extremas de la región, descritas previamente en el apartado de Clima de este capítulo.

Históricamente los grupos indígenas que habitaban en la región de Mexicali, como los Cucapá desarrollaron viviendas temporales adaptadas a las condiciones climáticas áridas y a la disponibilidad limitada de materiales; tales estructuras se construían a base de matorrales y lodo, como se muestra el ejemplo en la Figura 27. Donde los matorrales predominantemente utilizados eran la cachanilla, el mezquite, ocotillo, gobernadoras.

Figura 27.

Prototipos de vivienda indígena Cucapah



Fuente: Michel 2021

A principios del siglo XX, la región de Mexicali experimentó transformaciones antropológicas significativas debido a la migración motivada por la explotación agrícola. En 1904, Celso Vega, jefe político del Distrito Norte, realizó un censo en Mexicali por órdenes de la Secretaría de Gobernación. Durante este periodo, los pobladores habitaban en enramadas y carpas, como un reflejo de las condiciones precarias de vivienda en la zona. En contraste con Calexico, donde se registraron tres o cuatro viviendas de adobe (Olvera, 2019a).

En la investigación de Olvera (2019), se menciona que, en la historia constructiva de Mexicali, los sismos han influido en la desaparición de varias construcciones de adobe. Durante el sismo de 1927, se tiene registrado que se derrumbaron el 80% de las construcciones de adobe, sugiriendo que se debió a una "deficiencia en el uso del material".

Entre 1905 y 1907, Mexicali sufrió una inundación significativa debido a la desviación de las aguas del río Colorado hacia el valle de Mexicali. Este evento provocó una reconfiguración de la traza urbana, dividiendo la ciudad en sectores oriente y poniente, con el Río Nuevo como eje central (ver Figura 28). Las viviendas ubicadas en la zona afectada tuvieron que ser demolidas, ya que no podían ser reubicadas. Según el periódico Imperial Valley Press de 1906, menciona "casi todas las casas de Mexicali construidas con adobe o ladrillo no pudieron ser movidas y se derrumbaron y cayeron en la creciente, convirtiéndose en una pérdida total".

De acuerdo a Olvera (2019), menciona que en el censo de 1950, la construcción con adobe superaba al de la madera, donde se estimaba que en número de viviendas que utilizaban el adobe en muros o paredes era de 18,910, en comparación con 16,665 hechas de madera y 2,980 de tabique o ladrillo recocido. En la Figura 29, se muestra una vivienda de adobe que perduro hasta el 2017, la cual se encontraba en óptimas condiciones; fue demolida por decisión del dueño del predio. Lo mismo sucedió con la imagen de la Figura 30, la cual perteneció a la primera escuela primaria del Ejido Mariano Abasolo.

Figura 28.

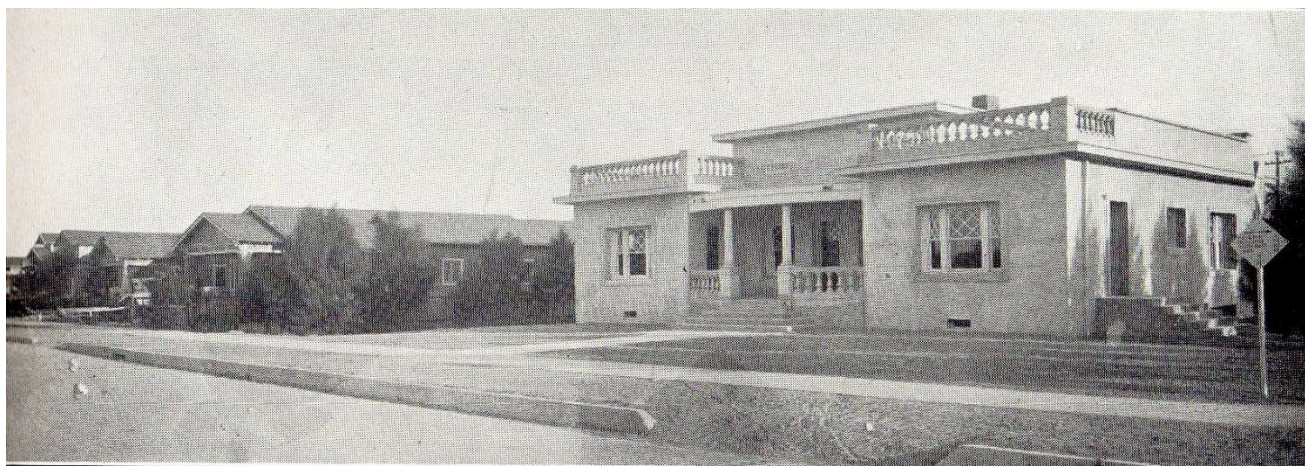
Inundación de Mexicali 1907, se muestran viviendas previas a demolición.



Fuente: Archivo histórico de Mexicali (s/f)

Figura 29.

Vivienda en adobe de 1920. sobre Ave. Reforma



Fuente: Archivo histórico de Mexicali (s/f)

Figura 30.

Escuela primaria Mariano Abasolo, construida con muros de adobe



Fuente: Chávez (2016)

El uso del adobe en Mexicali respondió a la necesidad de vivienda asequible y aprovechó la abundancia de tierra y agua en la región, que facilitó su elaboración. En Mexicali, la construcción de viviendas de adobe también representaba un avance económico para las familias. Conforme mejoraba su situación económica, podían permitirse construir casas de adobe, lo que reflejaba una mejora en su calidad de vida (Olvera, 2019a).

Sin embargo, con la llegada del concreto y el acceso a créditos y financiamientos, el uso de la tierra como material de construcción en Mexicali ha disminuido. Según datos de la SHF (2022), el uso de tierra en la construcción se considera un indicador de rezago habitacional. Además, el Registro Único de Vivienda (RUV) en el 2022, indicó que el 82.4% de las viviendas en Mexicali cuentan con muros de tabique, block o cemento, que desplazaron los sistemas constructivos tradicionales como el adobe, tapial o bahareque.

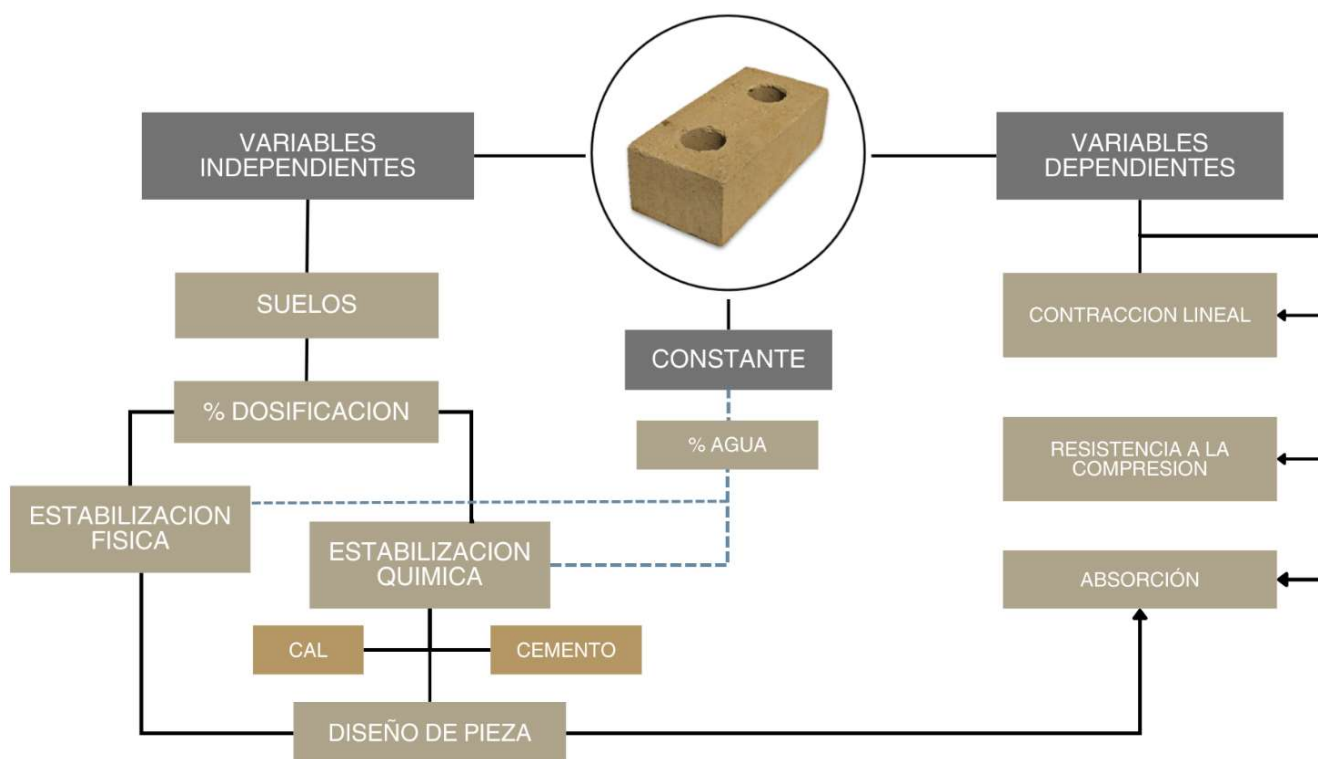
Capítulo V

Metodología

El proceso desarrollado para la obtención de los datos en esta investigación se representa mediante un esquema general que se muestra en la Figura 31, que identifica las variables independientes y dependientes relacionadas con el objeto de estudio. Aunque este esquema proporciona una visión global del diseño experimental, cada fase del proceso metodológico aplicado incluyó variables específicas que influenciaron la selección de los productos para las fases subsiguientes.

Figura 31.

Esquema de variables independientes y dependientes



Fuente: Michel (2024)

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Mexicali, con objeto de estudio, el análisis de arcillas y arenas locales, las cuales fueron transformadas para fabricar bloques de tierra comprimida estabilizados (BTCE). Este trabajo se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo y su temporalidad se considera transversal, siempre y cuando se controlen las condiciones de temperatura, un factor crítico en el contexto climático de Mexicali.

La investigación tuvo un carácter exploratorio, descriptivo y correlacional, desarrollándose a través de un modelo experimental que permitió evaluar la interacción de las variables y su impacto en las propiedades finales de los BTCE.

Las variables independientes fueron: suelos (arcillas y arenas), estabilizantes químicos: cal o cemento, y diseños de mezcla con porcentajes específicos. Las variables dependientes: resistencia a la compresión simple, límites de consistencia de las mezclas estabilizadas, densidad y absorción de la pieza terminada. Variable constante: el agua, cuyo porcentaje se obtiene a través de conocer la saturación máxima de la mezcla.

El objetivo principal fue alcanzar los valores de resistencia mecánica requeridos para muros estructurales, según lo establecido en la Norma *NMX-C-404-ONNCCE-2012*. Los resultados permitirán evaluar el desempeño de los materiales estudiados y su viabilidad como elementos de construcción en el contexto urbano de Mexicali.

El experimento se estructuró en cuatro fases, siguiendo un enfoque descriptivo y correlacional bajo un modelo experimental. Cada fase fue analizada conforme a normas mexicanas y estándares ASTM, específicamente relacionados con la caracterización de materiales y piezas de mampostería para uso estructural.

La mayoría de las actividades se llevaron a cabo en laboratorio, con excepción de la cuarta fase, que combinó trabajo de campo y laboratorio. Las fases del estudio fueron las siguientes:

Fase 1: Se inició con la selección de los sustratos, determinados por las características edafológicas específicas de Mexicali y la accesibilidad a estos. Los materiales fueron sometidos

a pruebas para identificar sus propiedades físicas, cuyos resultados sirvieron de base para avanzar a la siguiente etapa.

Fase 2: Primer diseño de mezclas con estabilización física, en esta etapa se diseñaron mezclas con estabilización física, es decir, con los sustratos entre sí, con porcentajes variables. Se aplicaron pruebas para evaluar la viabilidad de las mezclas, se seleccionaron aquellas que mejoraron las características de los sustratos y así proceder a la siguiente fase.

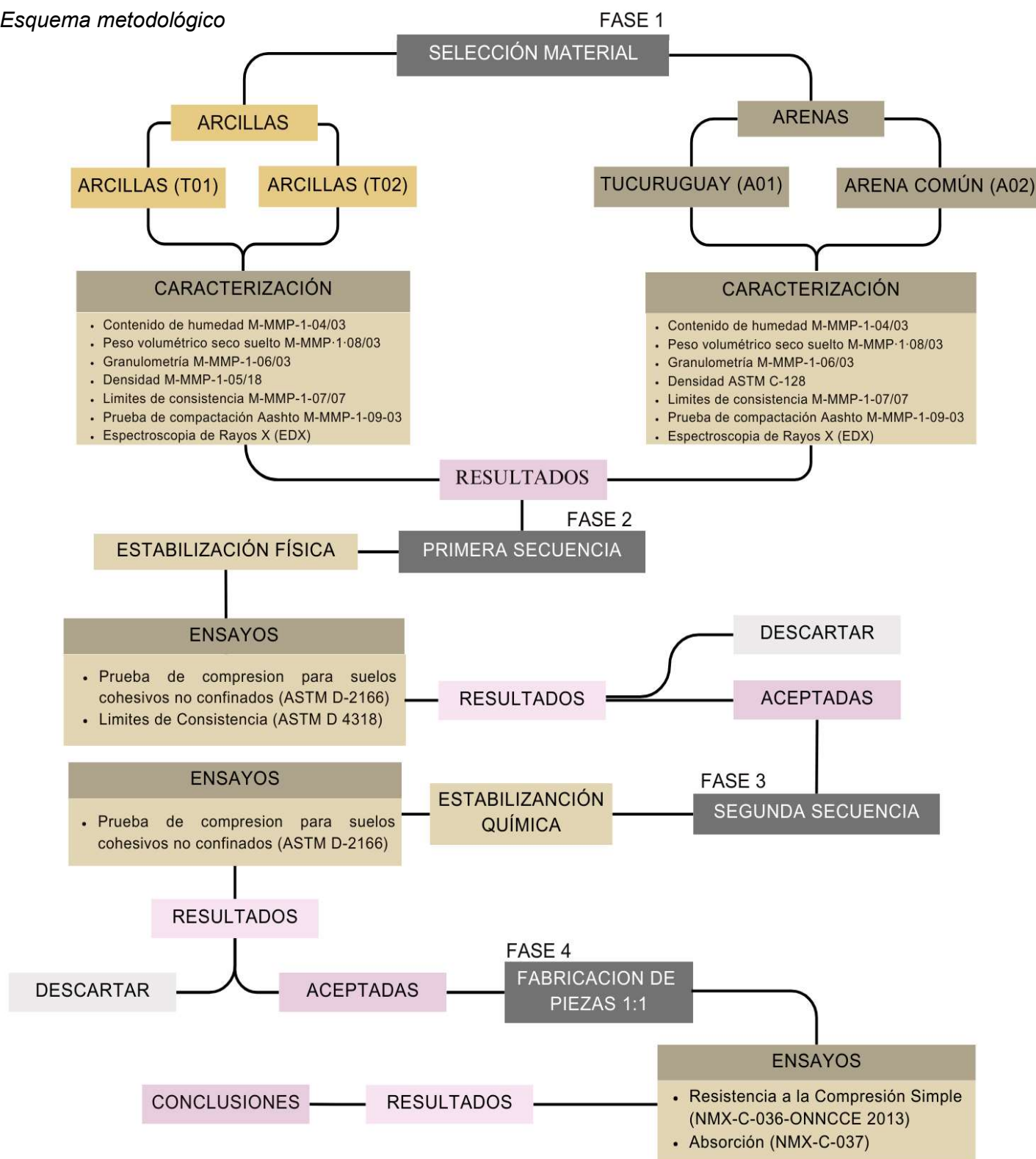
Fase 3: Diseño de mezclas con estabilización química, aquí se incorporaron estabilizantes químicos, como cal y cemento, con el objetivo de optimizar las propiedades mecánicas de las mezclas. Se realizaron las pruebas correspondientes y se seleccionaron las dosificaciones que arrojaron resultados óptimos para su aplicación en la fase siguiente.

Fase 4: Fabricación de piezas de mampostería a escala 1:1; finalmente se fabricaron bloques de BTCE se utilizaron tres diferentes mezclas: una con estabilización física y cuatro variables estabilizadas químicamente (unas con cal y otras con cemento). Las piezas se sometieron a pruebas de resistencia mecánica conforme a la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013 y a la prueba de absorción de agua según la NMX-C-037-ONNCCE-2013.

Cada fase incluyó ensayos específicos, detallados en el esquema metodológico de la Figura 32, que proporcionaron datos clave para el análisis y la validación de los resultados. Este enfoque permitió establecer correlaciones entre las propiedades iniciales de los materiales, los diseños de mezcla y las características finales de los BTCE.

Figura 32.

Esquema metodológico



Fuente: Elaboración propia (2023)

Fase 1,***Selección y análisis de sustratos***

El proceso comenzó con una exploración y análisis comparativo de normativas internacionales, nacionales, investigaciones previas, ensayos de materiales y experimentos aplicados. Esto permitió identificar y seleccionar las normativas adecuadas para evaluar las muestras, se consideró las características edafológicas de Mexicali, descritas en el apartado anterior.

La selección de sustratos se fundamentó en tales características, ya que los suelos locales difieren significativamente de aquellos utilizados para la fabricación de BTCE en otras regiones de México o el mundo. Para el estudio, se eligieron dos tipos de arcillas y dos tipos de arenas comunes en la construcción local, provenientes de diferentes zonas de Mexicali.

Figura 33.

Mapa de ubicación de extracción de arenas



Fuente: Elaboración propia a partir de mapa de Google earth

Las arenas fueron obtenidas de un banco de materiales comerciales ubicado en el Ejido Hipólito de Rentería, a lo largo de la carretera N.5, con coordenadas $115^{\circ} 22' 29.42''$ W, $32^{\circ} 25' 56.1''$ N y una altitud de 15 m s. n. m. Este banco se encuentra en las cercanías de la Sierra Cucapah, dentro de un suelo compuesto predominantemente por regosol y arenosol como se muestra en la Figura 33.

Las arcillas empleadas en el estudio fueron extraídas de un área cercana a una ramificación del Río Colorado, donde el suelo presenta características de vertisol, originado por arrastres del afluente. Esta región es conocida por el uso de arcilla en la fabricación de adobes, lo que subraya su importancia y viabilidad como material de construcción en la zona (ver Figura 34).

Figura 34.

Mapa de ubicación de extracción de arcilla T01y T02.



Fuente: Elaboración propia a partir de mapa de Google Earth (2023)

La recolección de muestras se realizó en dos predios específicos en la zona poniente de Mexicali, el primero en el desarrollo urbano Ex-Ejido Orizaba, ubicado sobre la calle Aguascalientes S/N en la zona conocida como Eligio Esquivel Mendoza, el predio está situado en $32^{\circ}39'36.0''\text{N}$, $115^{\circ}32'33.8''\text{W}$; y el segundo, localizado hacia el este de Mexicali, el predio se encuentra a pocos metros de la Calzada Manuel Gómez Morín Poniente. Al norte limita con la línea divisoria fronteriza (Zona Federal) y al sur con un canal afluyente del canal todo americano, en la colonia Misión de San Antonio. Las coordenadas del sitio son $32^{\circ}39'40.88''\text{N}$, $115^{\circ}32'10.84''\text{W}$.

Figura 35.

Punto de extracción arcilla T01 (izquierda) y punto de extracción de arcilla T02 (derecha)



Fuente: Gin (2022)

Ambos puntos de extracción comparten características edafológicas comunes debido a su proximidad geográfica, lo que permite evaluar la homogeneidad del material para su aplicación en la fabricación de BTCE. Estas ubicaciones fueron seleccionadas para garantizar representatividad en los materiales, se consideró su relevancia en las prácticas constructivas locales y la accesibilidad a la materia prima dentro de estos predios por parte de los propietarios. En la Figura 35 se muestran los puntos de extracción de los suelos arcillosos. La Tabla 6 muestra la ubicación y descripción específica de los puntos de extracción.

Tabla 6.

Descripción de los suelos seleccionados y ubicación, elaboración propia

| Suelos seleccionados | | |
|----------------------|-----------------|---|
| Muestra | Edafología | Ubicación |
| T01 | Vertisol pélico | Calle Aguascalientes s/n, Eligio Esquivel Mendoza latitud 32°39'36.0"N 115°32'33.8"W |
| T02 | Vertisol pélico | Calzada Manuel Gómez Morín Poniente, colonia Misión de San Antonio, latitud 32°39'40.88"N longitud 115°32'10.84"W |
| A01 | Regosol dístico | Ejido Hipólito de Rentería, por la carretera N.5 latitud de 115° 22' 29.42" W, 32° 25' 56.1" N -115.37 y altitud: 15 m s. n. m. |
| A02 | Arenosol | Ejido Hipólito de Rentería, por la carretera N.5 latitud de 115° 22' 29.42" W, 32° 25' 56.1" N -115.37 y altitud: 15 m s. n. m. |

Fuente: Elaboración propia

Caracterización

La fase experimental incluyó la caracterización de los suelos seleccionados para determinar su capacidad en las siguientes etapas del estudio. Este proceso se llevó a cabo en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), bajo la supervisión del M.I. Ricardo Cota Ramírez, especialista en la materia.

La caracterización se realizó conforme a la norma ASTM D 2487 – 00 y el SUCS. Los ensayos aplicados fueron seleccionados en base a los resultados del estado del arte y las metodologías descritas en este documento. Estos incluyeron normas mexicanas de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) y de la ASTM: contenido de humedad (M-MMP-1-04), densidad (M-MMP-1-05/18), granulometría (M-MMP-1-06/03), límites de consistencia (M-MMP-1-07/07), prueba de compactación AASHTO (M-MMP-1-09-03),

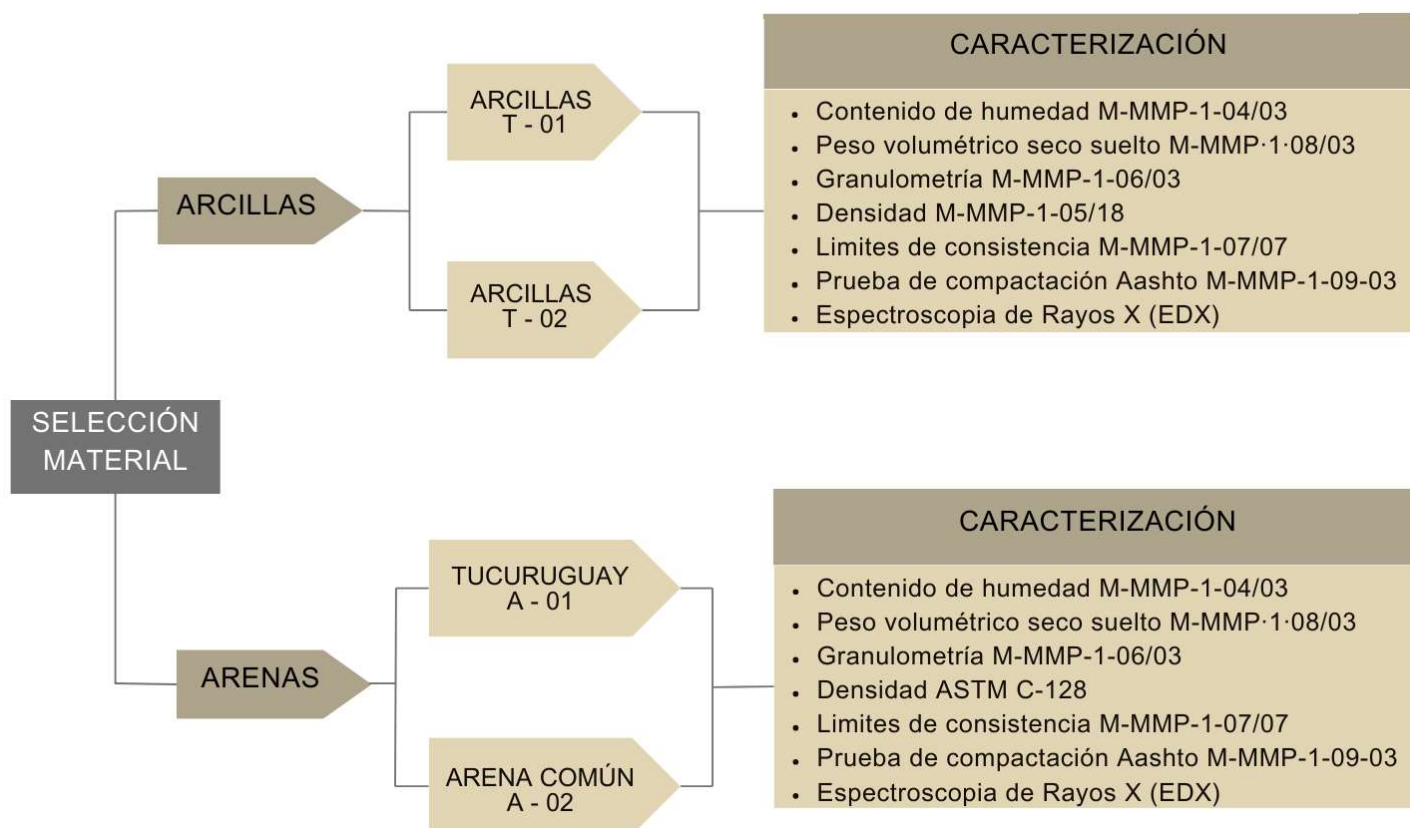
El compendio de ensayos aplicados a los suelos para su caracterización física se presenta en la Tabla 7, y la estructura metodológica se ilustra en el esquema correspondiente a la Figura 36.

Para ampliar la caracterización del material, se utilizó el equipo de espectroscopia de rayos X disponible en el Instituto de Ingeniería de la UABC. Esta técnica permitió analizar características químicas de las muestras, lo que enriqueció la descripción de los suelos. Aunque este análisis no está normado por la SCT o ASTM, se consideró una aportación significativa para comprender la composición química de los sustratos.

La elección de las normas SCT se basó en su aplicabilidad en el contexto nacional; en el caso donde las normas fueran inexistentes en México, se recurrió a las normas ASTM.

Figura 36.

Fase uno esquema de experimento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.

Ensayos aplicados a los sustratos para caracterizar, elaboración propia

| Sustrato | | ENSAYOS PARA CARACTERIZACION | | |
|----------|-------|--------------------------------------|----------------|---------|
| arcillas | arena | Descripción | Norma Mexicana | ASTM |
| √ | √ | Contenido de humedad | M-MMP-1-04/03 | |
| √ | √ | Densidad relativas de solidos | M-MMP-1-05/18 | C128-01 |
| √ | √ | Granulometría y prueba de hidrómetro | M-MMP-1-06/03 | C144 |
| √ | √ | Límites de consistencia | M-MMP-1-07/07 | D4318 |
| √ | √ | Prueba de compactación AASHTO | M-MMP-1-09-03 | D698 |
| √ | √ | Fluorescencia de rayos x | No se solicita | |

Fuente: Elaboración propia

Las muestras recolectadas fueron procesadas en el laboratorio mediante los procedimientos de disgregación y cuarteo, siguiendo las especificaciones de la norma M-MMP-1-03. Este proceso permitió preparar el material de manera uniforme y adecuada para la ejecución de las pruebas subsecuentes, se garantizó así, la homogeneidad de los suelos (ver Figura 37).

Figura 37.

Siguiendo un orden en sentido de las manecillas del reloj, identificados como T01 y T02.



Fuente: Michel (2024)

Contenido de humedad arcillas y arenas

Se inició el análisis con las arcillas T01 y T02, para determinar su contenido de humedad según la norma M-MMP-1-04/03. Este dato no fue determinante para saber la humedad en el terreno, ya que las muestras fueron extraídas del sitio en marzo de 2023 y procesadas en laboratorio en septiembre del mismo año, lo que se consideró relevante fue medir la capacidad de las arcillas para absorber humedad del entorno. Este comportamiento es inherente a sus propiedades, y la información obtenida se utilizó como referencia para comprender mejor su respuesta en etapas posteriores del experimento.

La fórmula para obtener el contenido de humedad es la que proponer la norma M-MMP-1-04/03 de la SCT, la cual es la siguiente:

Fórmula 1.

Ecuación para obtener contenido de humedad

Fórmula

$$\omega = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_t} (100)$$

Donde:

ω = Contenido de humedad en %

W_1 = Masa muestra húmeda + masa del recipiente

W_2 = Masa muestra seca + masa del recipiente

W_t = Masa del recipiente

Posteriormente, se analizaron las arenas, provenientes del banco de material, las cuales conservaban la humedad del sitio de extracción. Este factor permitió obtener mediciones de su estado natural. En la Figura 38, se muestran las arenas dentro del horno a una temperatura de ± 105 °C, para ser pesadas posteriormente y obtener el resultado del ensayo.

Figura 38.

Arenas (izquierda) y arcillas (derecha) dentro de horno



Fuente: Michel (2023)

Granulometría en arcilla y arenas

Las muestras de arcilla se prepararon para los ensayos de granulometría establecidos por la norma M-MMP-1-06/03 y densidad (M-MMP-1-05/18). Se seleccionaron 0.5 kg (500 g) de T01 y T02 como muestra, los cuales habían sido tamizadas previamente por la malla #40.

El procedimiento continuó con la humidificación de las muestras, saturándolas durante 24 horas. Posteriormente, se lavaron los materiales con la malla #200, conforme a la norma. Los residuos retenidos por la malla #200 fueron transferidos a vasos de aluminio de 500 ml, los cuales se colocaron en un horno a temperatura controlada durante 24 horas. Posteriormente a tales residuos se les obtuvo su masa, para completar el análisis.

La Figura 39, ilustra el proceso de lavado de las arcillas con malla #200, realizado antes de ingresar al horno. En la misma imagen, se observan los residuos retenidos por la malla, los cuales fueron transferidos a un vaso de aluminio para su posterior secado y análisis.

Figura 39.

Proceso de lavado de T01



Fuente: Michel (2023)

La Figura 40 presenta el material correspondiente a las muestras T01 y T02 después de haber sido sometido al proceso de secado en horno durante más de 24 horas. Posteriormente, el residuo seco se tamizó nuevamente con la malla #200. El material que no logró pasar por la malla fue pesado con una báscula de precisión, obteniendo así los datos necesarios para el análisis granulométrico del suelo (ver Figura 41).

Figura 40.

Suelo T01 y T02 después del hornear más de 24 h



Fuente: Michel (2023)

Figura 41.

Tamizado del suelo T02, después de sacarlo del horno



Fuente: Michel (2023)

Después de realizar los procedimientos que marca la norma, se prosigió a colocar los datos de las masas, para ello se aplicó la fórmula simplificada que se cita a continuación:

Fórmula 2.

Para obtener los porcentajes de material que pasa por la malla #200

Fórmula

$$W_d = W_{d1} + W_{d2}$$

Donde:

W_d = Masa del material seco de la muestra, (g), con aproximación a la unidad

W_{d1} = Masa del material seco de la fracción retenida en la malla N°4

W_{d2} = Masa del material seco de la fracción que pasó la malla N°4 después de estar en el horno por 24 hr, y tener masa constante.

La prueba de granulometría de ambas arenas fue proporcionada por el ingeniero laboratorista encargado de la Secretaría de Infraestructura, Desarrollo Urbano y Reordenación Territorial (SIDURT). Estas pruebas se realizaron conforme a la norma M-MMP-1-06/03 de la SCT.

El apoyo de SIDURT fue fundamental, ya que sus actividades incluyen obras continuas con sustratos provenientes del mismo banco de material donde fueron extraídas las arenas utilizadas en este proyecto. Además, cada uno de sus proyectos requiere contar con ensayos específicos, los cuales fueron considerados en esta investigación. Sin embargo, las pruebas no contempladas por SIDURT y que eran necesarias para esta investigación, se realizaron en los laboratorios de la UABC.

Debido a la naturaleza de este apoyo externo, no se dispone de fotografías del proceso. Los resultados de los ensayos granulométricos se presentan detalladamente en el apartado correspondiente de este documento.

Densidad, arcilla

La densidad se obtuvo de acuerdo norma de la M-MMP-1-05/18 de la SCT, para esto se toman 0.2 k (200 g) de T01 y T02 para humedecer durante 24h, se dejaron reposar en un vaso para licuar, donde se agregó agua hasta saturar; el ensayo se realizó al día siguiente. En la Figura 43, se muestran las herramientas utilizadas para preparar las muestras.

Figura 42.

Vaso de licuadora, vaso de aluminio, cucharón y báscula



Fuente: Michel (2023)

Al siguiente día se prosiguió a separar las partículas asentadas del material con una espátula, para homogenizar la mezcla, donde posteriormente inició el proceso de licuado durante 15 minutos, como se muestra en la Figura 43.

Figura 43.

Homogenizado y licuado de arcilla



Michel, 2023

El material ya licuado se colocó en el matraz para empezar el proceso de succión de acuerdo a la norma, este proceso dura 15 minutos. Posteriormente se llena de agua hasta la marca de aforo y se pesa el producto. Previo a este proceso, el matraz debe estar calibrado, como se indica en la norma M-MMP-1-05/18; en este caso se utilizó agua a una temperatura de $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$ en la Figura 44 se muestra a T01 dentro del matraz, durante el proceso de extracción de aire.

Figura 44.

Succión de aire con bomba de vacío



Michel, 2023

Después de succionar el aire y pesar el matraz con los sólidos y líquidos, se toma la temperatura del interior del matraz, la cual debe estar a $23^{\circ} \pm 2^{\circ}$. Si todo lo anterior cumple de acuerdo a la norma, se traslada el sustrato a un vaso de precipitado, donde se le agrega agua para limpiar al interior del matraz para que no quede ninguna partícula dentro de este. Se deja reposar el material con el agua en el vaso de precipitado de 15 a 20 minutos, para esperar el asentamiento de las partículas en el fondo y proseguir a la extracción del exceso de agua. Posteriormente se prosigue a ingresar el producto en el horno. Este proceso se llevó a cabo con T01 y T02. En la Figura 46 se observa el matraz con la arcilla sobre la báscula.

Tras varios días dentro del horno, las arcillas permanecieron en el vaso de precipitados, como se ilustra en la Figura 47, sin contenido de agua, para proseguir a pesarlos residuos y obtener su masa constante.

Figura 46.

T01 en báscula después de extracción de aire



Michel, 2023

Figura 45.

Arcilla T02. después de sacar de horno



Michel, 2023

De acuerdo a la norma M-MMP-1-05/18, la fórmula requerida para obtener la densidad de los suelos finos, es la siguiente:

Fórmula 3.

Fórmula para materiales solidos o arcillosos que pasan la malla #40

$$d_s = W_s / W_{fs} + W_s - W_{fsw}$$

Donde:

d_s = Densidad relativa de sólidos del material (adimensional)

W_s = Masa del material secado en el horno

W_{fs} = Masa del matraz lleno de agua a temperatura de prueba t_p , determinada gráficamente en la curva de calibración del matraz (g)

W_{fsw} = Masa del matraz conteniendo el suelo y el agua hasta la marca de aforo a la temperatura de prueba t_p

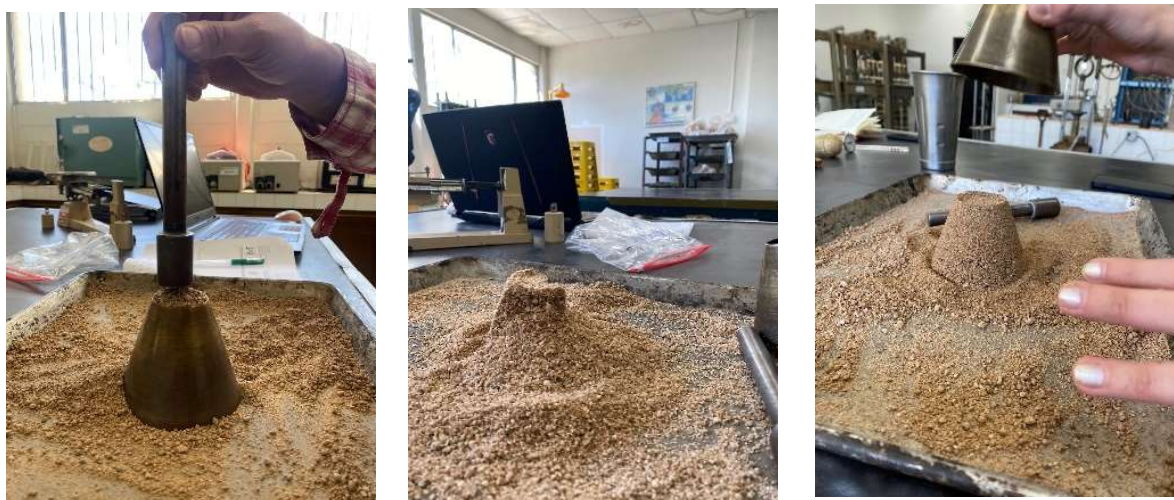
Densidad en arenas

Para la densidad en arenas se prosiguió con la norma ASTM C-128, ya que es la indicada en agregados finos como las arenas. Para ello se tomaron 0.7 k (700 g) de muestra de material que pasa por la malla #4, al cual se le agregó un 6% de humedad; se dejó reposar el material durante 24 h, en este caso duró 96 horas, para que el material este saturado parcialmente seco; para ello se hace la prueba con la copa cónica de metal y un pistón al cual se le agregará la arena para determinar si el grado de humedad es el óptimo de acuerdo a la norma; si la arena se desmorona en su totalidad, quiere decir que el material está muy seco, si el material no se desmorona indica que está muy saturado, por lo que en ambos casos se debe agregar agua o secar.

En la Figura 47, se muestra tanto A01 como A02, con el estado óptimo de saturación, y el equipo utilizado para la elaboración de dicho procedimiento.

Figura 47.

Muestra el estado de humedad óptimo de A01 y A02



Fuente: Michel (2024)

Cuando el material está en su estado óptimo, se prosiguió a calibrar el matraz donde se realizará la prueba, para ello es necesario pesar el matraz y agregarle agua hasta el punto de aforo, se recomienda usar agua destilada, en caso de no contar con ello se puede utilizar agua limpia a una temperatura constante de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$. A continuación, se prosigue a eliminar el agua del matraz, donde una parte se dejó en la base y se agregan 500 g de material el cual debe llegar por debajo del inicio del cuello del matraz, ulteriormente se agrega agua sin llegar al cuello del matraz, se prosigue a extraer el aire durante 15 minutos, por medio de golpes ligeramente el fondo. En cada uno de los pasos anteriores debe obtenerse la masa del matraz.

Subsecuentemente se añadió agua a cada matraz hasta la línea de aforo, se aseguró que el menisco, quedara alineado con la marca del nivel, como se muestra en la Figura 48; cabe mencionar que un menisco es una superficie cóncava o convexa de los líquidos al encontrarse en un tubo estrecho. Posteriormente se pesó cada matraz conteniendo la muestra de suelo y agua, a una temperatura constante de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$.

Figura 48.

Matraz A y B con el suelo y agua hasta la línea de aforo



Fuente: Michel (2024)

La mezcla de suelo y agua se transfirió cuidadosamente a un vaso de precipitados, donde se buscó la conservación de todas las partículas (ver Figura 49). Se dejó reposar durante 15 a 20 minutos para permitir la sedimentación, luego se eliminó el exceso de agua e ingresó al horno a una temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en lapso de 72 horas. Finalmente, se pesaron los residuos secos para obtener los datos y determinar la densidad de ambas muestras.

Figura 49.

Traslado de arena a vaso de precipitado y A01 y A02 antes de ingresar a horno



Fuente: Michel (2024)

De acuerdo a la norma ASTM C128-01, para obtener los datos de densidad en arenas, se utiliza la siguiente fórmula:

Fórmula 4.

Fórmula para obtener densidad en arenas

$$A/(B+A)-C$$

Donde:

A = masa de espécimen secado en el horno(g)

B = masa del matraz calibrado con agua hasta la marca de aforo (g)

C = masa del matraz conteniendo el suelo y el agua hasta la marca de aforo (g)

R1= lectura inicial del agua en el matraz de Chatelier (mL)

R2= lectura final del agua en el matraz de Chatelier (mL)

S = masa saturada del suelo-seco (utilizada en el procedimiento gravimétrico para densidad y densidad relativa específico para gravedad), o absorción con los dos procedimientos (g)

S1= masa de muestra saturada con superficie seca utilizada en el procedimiento volumétrico para densidad y densidad relativa (específico para gravedad) (g)

Límites de consistencia, arcilla y arenas

Este procedimiento consta de tres pruebas, las cuales permiten conocer las características de plasticidad de la porción de los materiales para terracerías que pasan la malla N°40, dichos resultados se utilizan para identificar y clasificar suelos. La norma utilizada para este fin es la M·MMP·1·07/07 (SCT, 2007). Las pruebas consisten en determinar el límite líquido, es decir, el contenido de agua para el cual un suelo plástico adquiere una resistencia al corte de 2,45 kPa (25 g/cm²); éste se considera como la frontera entre los estados semilíquido y plástico. El límite plástico o el contenido de agua para el cual un rollito se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm; éste se considera como la frontera entre los estados

plástico y semisólido. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico (SCT, 2007). Estos ensayos pertenecen a una serie de pruebas que se denomina Atterberg.

El equipo utilizado para su ejecución es la copa Casagrande, vidrios de reloj, vidrio plano, espátula, capsulas de aluminio, báscula, agua, paños y un horno (ver Figura 50). La preparación de las muestras pasó previamente por la malla #40 según la norma M·MMP·1·03. Se inició con las arcillas, para ello se debe homogenizar el suelo con agua hasta tener una consistencia plástica, donde se agrega agua para pasarla a una consistencia líquida; posteriormente se dejó en reposo durante 24 horas como se observa en la Figura 51.

Figura 50.

Equipo utilizado para límites de consistencia



Fuente: Michel (2024)

Figura 51.

Mezclas homogenizadas con saturación de humedad



Fuente: Michel (2024)

Al siguiente día se inició el proceso con T01, donde se revolvió la mezcla, la cual tenía exceso de agua, por lo que se secó con una secadora y mezcló el suelo. Cuando se llegó al estado óptimo se inició la prueba de límite líquido en la copa Casagrande. Para esto se optó por la versión corta de la prueba donde se hacen dos corridas con el material en su estado líquido las cuales deben unirse en el centro hasta los 25 golpes o entre 20 y 30. En caso de que la muestra se cerrara antes o después, se debió secar o humedecer según haya sido el caso.

Debido a que ambos materiales se encontraban muy húmedos se prosiguió a seguir secándolos hasta lograr que se cerrara cerca de los 25 golpes, es importante determinar que el cerrado del material debe visualizarse unido, como se muestra en la Figura 52.

Figura 52.

Muestras de suelo en la copa Casagrande



Fuente: Michel (2024)

Después que se lograron las dos corridas con unión entre los 20 y 30 golpes, se prosigue a tomar una parte de la muestra en el punto de unión, para pesarla. Posteriormente se ingresará al horno y obtendremos el porcentaje de humedad para tener el límite líquido del material.

Inmediatamente después se prosigue a realizar la prueba del límite plástico, este se obtiene al realizar un rollito de tres mm, que se rompa en tres partes; con esto se obtuvo la frontera entre los estados plástico y semisólido. Para ello se siguieron todos los pasos de la norma. En la Figura 53 se muestra el material T01 y T02 roto en tres partes; el cual se pesó inmediatamente y posteriormente se ingresó al horno durante 24 horas como se indica en la norma.

Figura 53.

Prueba de límite plástico de T01 y T02



Fuente: Michel (2024)

Tanto de la muestra T01 como T02, las corridas se realizaron tres veces para cada dato que se debe obtener, que son: límite líquido, límite plástico y contracción lineal. Las fórmulas que se requieren para obtener tales datos son las siguientes:

Fórmula 5.

Límite líquido

$$\omega_P = \sum \omega_i / 3$$

ω_P = Límite plástico de la muestra, (%), con aproximación a la unidad

ω_i = Contenido de agua para cada una de las tres determinaciones, (%)

Fórmula 6.*Límite plástico*

$$\omega_P = \sum \omega_i / 3$$

Donde:

 ω_P = Límite plástico de la muestra, (%), con aproximación a la unidad ω_i = Contenido de agua para cada una de las tres determinaciones, (%)**Fórmula 7.***Índice plástico*

$$I_p = \omega_L - \omega_P$$

Donde:

 I_p = Índice plástico del material, (%), con aproximación a la unidad ω_L = Límite líquido del material (%) ω_P = Límite plástico del material (%)

Para la contracción lineal se utilizan moldes rectangulares, los cuales fueron previamente engrasados para impedir la adherencia del material; la mezcla se tomó, del estado en el que se obtuvo el límite líquido, donde se incorporó el suelo al molde y se dejó secar a temperatura ambiente en un lapso mínimo de 24 horas (ver Figura 54). Al día siguiente se observaron los resultados de cada molde. El material utilizado fue: moldes, aceite, el material húmedo y vernier. La Fórmula 8, es la que se aplica para obtener la contracción lineal.

Figura 54.

Muestras de suelo dentro de contenedores para determinar la contracción lineal



Fuente: Michel (2024)

Fórmula 8.*Contracción lineal*

$$100 \cdot \text{Long. barra material seco} / \text{Long. De molde} \times 100$$

Límites de Consistencia, arenas

Esta prueba al igual que la de granulometría, también fue proporcionada por SIDURT con los ensayos que requieren para sus obras de infraestructura, por lo que no hay fotos de este proceso de las arenas. Dichos resultados se muestran en la sección de resultados de consistencia de arenas. Sin embargo, es importante aclarar que las arenas estudiadas no presentan un límite plástico, y la contracción lineal no se realizó porque no es determinante en las arenas. Cuando el material sea muy arenoso y no pueda determinarse el límite plástico, se reportan el límite plástico y el índice plástico como NP (no plástico).

Prueba AASHTO estándar, arcilla y arenas

Esta prueba determinó la curva de compactación, la masa volumétrica seca máxima y el contenido de agua óptimo de los sustratos. Para la prueba de compactación AASHTO estándar M-MMP-1-09-03, se tomaron muestras que pasaron la malla # 4, por lo que se aplicó la variante A de la prueba, donde se coloca el material en tres capas y a cada capa se le da una fuerza de compactación de 25 golpes por capa de acuerdo a lo estipulado en la norma. El material utilizado para esta prueba fue: molde cilíndrico variante A, junto con su collarín, base cúbica, pistón, charolas metálicas, regla, balanzas, horno, agua, probeta, capsulas, cucharón, aceite y sustratos. En la Figura 55 se muestra parte del equipo utilizado y la arena después de pasar por la malla # 4.

Se inició el ensayo con la arcilla, donde se tomaron 2.592 kg para iniciar la prueba. En la arcilla se usa el 100% del material, ya que todo pasa por la malla #4. Se agregó un

porcentaje de humedad inicial de 12% del volumen, el cual se adicionó para cada corrida en un 2% entre compactación y compactación. Al agregarse el agua se homogeniza la arcilla para que no quede ninguna partícula sin la humedad a través de proceso manual de mezclado. En la Figura 56, se muestra el inicio de humectación de la arcilla ya cernida.

Cuando se obtiene la primera compactación se sacó una muestra del centro se colocó en una capsula para tomar su peso y se registró (ver Figura 57). Esto se realiza con cada grado de humedad agregado y el proceso se repitió con cada sustrato.

Figura 55.

Material y herramientas iniciales para realizar la prueba Aashto estándar, el suelo pasó por malla # 4



Fuente: Michel (2024)

Figura 56.

Proceso de homogenización de arcilla



Fuente: Michel (2024)

Posteriormente, cada muestra obtenida de cada corrida de compactación con distinto porcentaje de humedad se ingresó al horno y se dejó reposar durante 24 h mínimo. La masa seca que obtuvimos se volvió a pesar.

Todos los datos obtenidos se registran en una hoja de cálculo que nos indicó la masa volumétrica seca máxima y el contenido de agua óptimo de los sustratos para obtener su mayor grado de compactación. En el Anexo D se muestra la tabla con los datos que deben registrarse para obtener los resultados de este ensayo.

Figura 57.

Muestras antes de ingresar al horno



Fuente: Michel (2024)

Este proceso se replicó de igual forma con la A01 y A02. Para aplicarse la prueba en la A02, pasó por la malla #40, se consideró inicialmente 2,502 kg de material, con un grado de humedad de 3.5 %; debido a lo anterior, el material no fue suficiente para completar este ensayo, por lo cual se agregó otros 0.502 kg.

Se realizaron siete corridas del ensayo, debido al bajo contenido de humedad inicial, para efectos de graficar la curva de compactación se descartaron tres corridas. La norma solo sugiere cinco corridas.

El material A01, se ingresó al horno, ya que contaba con un elevado porcentaje de humedad; para lograr esto se esparció en una charola y se dejó en el horno durante 24 horas. Posteriormente se inició la prueba con 3,112 kg de material, y se agregó 1.5 % de agua. Así mismo se descartó el material que no pasó por la malla #40.

Así como sucedió con la arena, al no llegar al porcentaje de humedad óptimo, se realizaron ocho corridas; y para efectos de graficarlo se descartaron las primeras tres. Todos los datos obtenidos se registraron en fichas independientes homologadas a la norma donde al ingresar los datos se obtuvo la curva de compactación, dándonos como resultado el grado óptimo de humedad y la compactación máxima alcanzada.

Espectroscopia de Rayos X Dispersivo (EDX)

Para llevar a cabo el análisis mediante espectroscopía de rayos X dispersiva en energía (EDX, EDS, EDXS o XEDS), se estableció contacto con el Dr. Benjamin Valdez Salas, investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, quien facilitó el uso del equipo Shimadzu EDX-7000 para este estudio (ver Figura 58). Este análisis se llevó a cabo a tres de los sustratos T01, A01 y A02 y fue seleccionado debido a su uso en investigaciones recientes (Tironi et al., 2014 p.469) (Laatar et al., 2023 p.74), donde se ha empleado para examinar tanto la composición química como la mineralógica y la estructura molecular de arcillas. El programa utilizado para analizar los resultados obtenidos se llama PCEDX Navi.

La espectroscopia de rayos X dispersiva en energía es una técnica analítica utilizada para el análisis elemental y químico. Su principio se basa en la interacción de los rayos X con una muestra menor a 100 g., ya que la estructura atómica de cada elemento es única, permite una distribución única de peaks en las emisiones de su espectro electromagnético. Esta singularidad genera una distribución característica de picos en el espectro electromagnético, lo

que permite identificar y cuantificar los elementos presentes en la muestra (*Espectroscopia de Rayos X Dispersivo en Energía EDX – Cromtek, 2019*).

Figura 58.

EDX utilizado para identificar los elementos en las muestras



Fuente: Michel (2024)

Fase 2, Diseño de mezclas primera secuencia

Una vez obtenidos los resultados de caracterización del material, se procedió a realizar una primera secuencia de diseño de mezclas con estabilización física. Para este proceso, los volúmenes de cuantificación fueron considerados en términos de masa dentro del laboratorio.

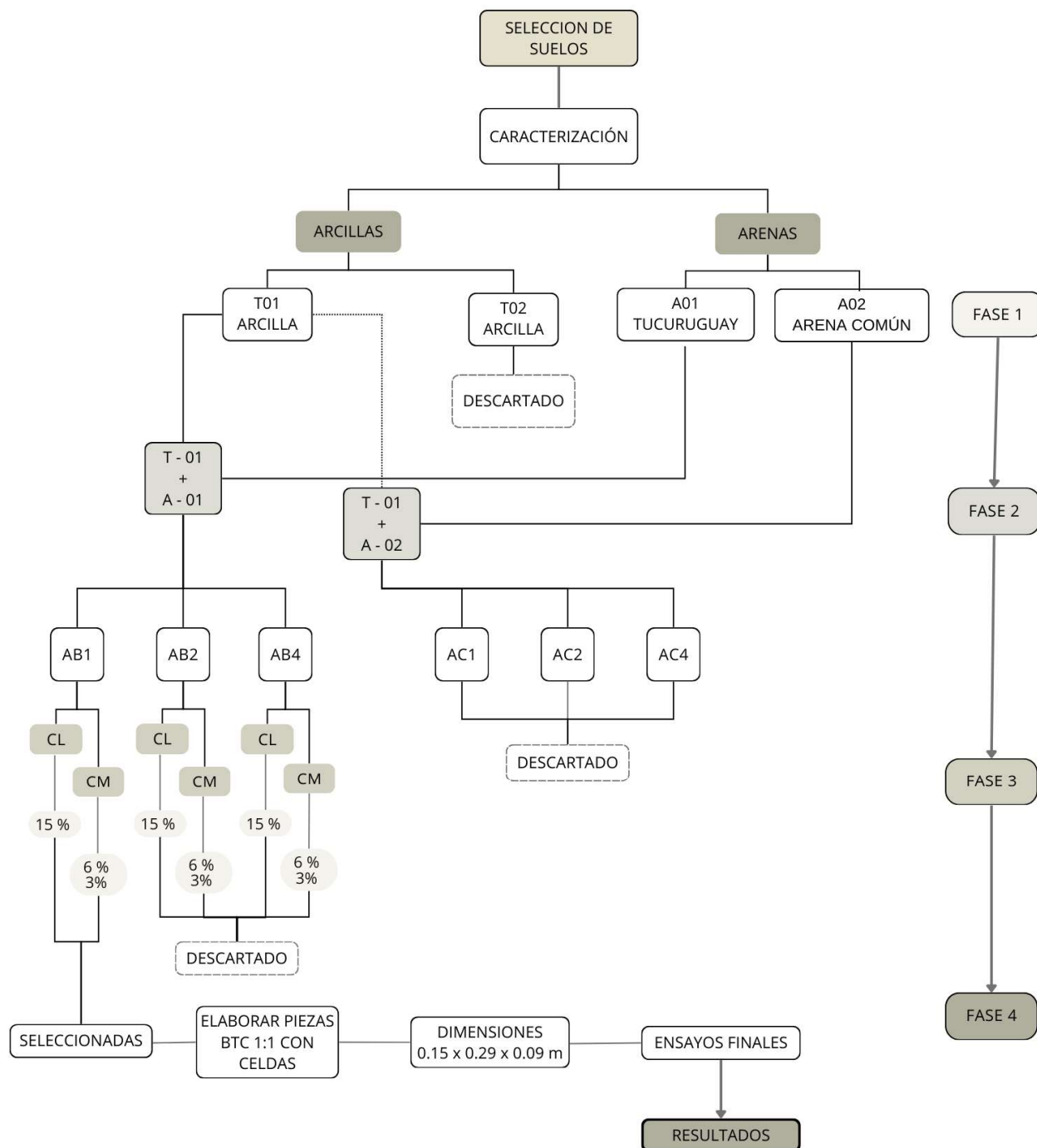
Las pruebas utilizadas para evaluar y discriminar las mezclas fueron: Límites de consistencia según la norma M-MMP-1-07/07, y prueba de compresión para suelos cohesivos no confinados de la norma ASTM D-2166.

Esta se llevó a cabo al mezclar los suelos caracterizados entre sí con diferentes porcentajes de cada uno. En esta fase ya se había descartado T02, por tema de contracción lineal y clasificación SUCS del suelo, por lo cual solo se contaba con las muestras T01, A01 y A02. En el diagrama de la Figura 59, se muestran el proceso de diseño de mezclas planteado

desde la estabilización física y la química, donde se estipuló cuáles fueron descartados de acuerdo a su proceso de manejabilidad.

Figura 59.

Mapa conceptual de combinaciones de mezclas físicas y químicas



Fuente: Elaboración propia

Se inició el estudio estableciendo proporciones en incrementos del 10% entre las mezclas, se tomó de material base la arcilla, seleccionada por su abundancia en la zona urbana y por no presentar uso agrícola (véase Tablas 8 y 9). El contenido de agua se mantuvo inicialmente constante en un 5%, para la preparación y homogenización de las mezclas. Posteriormente, dicho contenido fue ajustado gradualmente hasta alcanzar un valor 2% por debajo del óptimo determinado mediante el ensayo AASHTO, aplicado previamente a los sustratos. La estrategia de dosificación se fundamentó en estudios previos referenciados en el apartado correspondiente a Metodologías de Mezclas de este documento. (Cabrera, González, et al., 2020).

Tabla 8.

Porcentajes de primera secuencia cuyos porcentajes son en masa.

| Primera secuencia de diseño de mezclas | | | | |
|--|-----------|--------------|---------|---------------|
| Series | Arcilla % | Tucuruquay % | Arena % | Agua % máximo |
| Testigo A | 100 | | | 5 |
| Testigo B | | 100 | | 5 |
| Testigo C | | | 100 | 5 |
| AB1 | 50 | 50 | | 10 |
| AB2 | 40 | 60 | | 10 |
| AB4 | 60 | 30 | | 10 |
| AC1 | 50 | | 50 | 6 |
| AC2 | 40 | | 60 | 6 |
| AC4 | 60 | | 40 | 6 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9.

Masas equivalentes a los porcentajes de primera secuencia.

| Primera secuencia de diseño de mezclas | | | | |
|--|-------------|----------------|-----------|----------|
| Series | Arcilla (g) | Tucuruquay (g) | Arena (g) | Agua (g) |
| Testigo A | 518.8 | | | 25.87 |
| Testigo B | | 516.35 | | |
| Testigo C | | | 500 | |
| AB1 | 259.40 | 258.17 | | 25.87 |
| AB2 | 207.52 | 309 | | 25.82 |
| AB4 | 311.28 | 309.81 | | 31.05 |
| AC1 | 259.40 | | 250 | 30.56 |
| AC2 | 207.52 | | 300 | 30.45 |
| AC4 | 311.28 | | 200 | 30.67 |

Fuente: Elaboración propia, estos datos corresponden a las masas utilizadas para la preparación inicial de las probetas. El contenido de agua se incrementó progresivamente hasta alcanzar un valor 2% inferior al óptimo, determinado al ensayo AASHTO estándar,

Para esta fase, se realizaron los ensayos mencionados y en ambos casos se tomó de referencia los resultados obtenidos en fase 1, de límites de consistencia y los nuevos datos de resistencia a la compresión obtenidos de la prueba ASTM D-2166.

Se determinaron dichas pruebas ya que entre los datos que arrojan son: contracción lineal y plasticidad; factores importantes para determinar si un material puede funcionar para ser utilizado en la construcción como elemento de carga y perimetral; ya que en investigaciones similares se busca obtener una contracción lineal inferior al 20% (Roux Gutiérrez & Espuna Mujica, 2012) y para mejorar su capacidad de carga, se recurre a la estabilización física que puede aumentar la curva granulométrica, esto favorece el incremento a la resistencia a la compresión (Cabrera, González, et al., 2020).

Se ejecutó una corrida inicial con las mezclas AB1, AB2 y AB4 para combinaciones de T01-A01; y para combinaciones de T01 y A02, se inició con las mezclas AC1, AC2 y AC4. Cuyos resultados obtenidos, dirigieron los porcentajes de las mezclas subsecuentes, de acuerdo a los parámetros buscados.

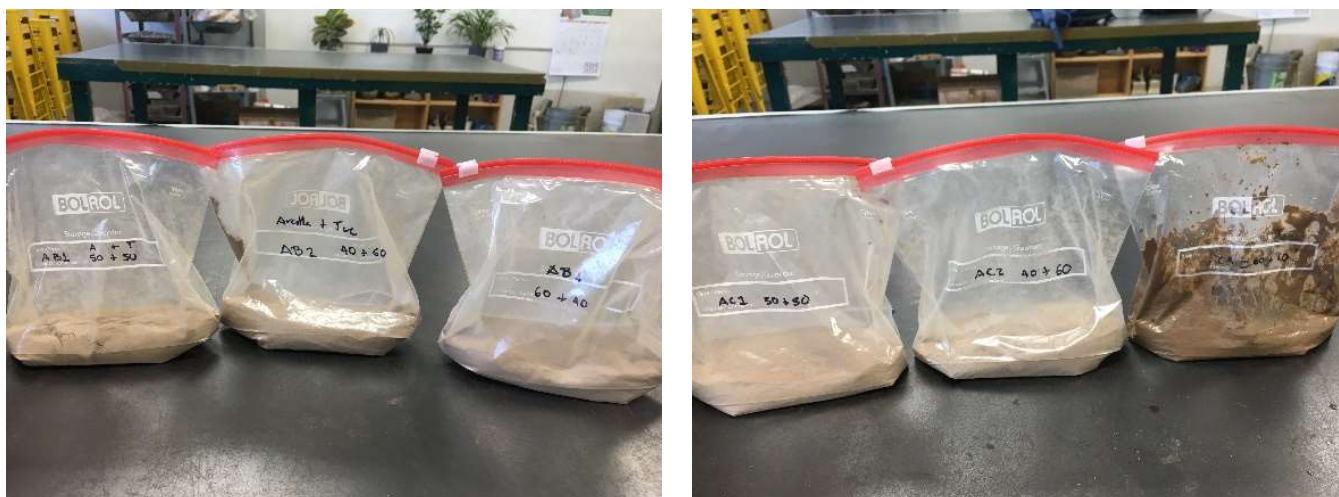
Límites de consistencia con estabilizada física

La primera prueba realizada fue la de límites de consistencia, para ello los materiales de T01, A01 y A02, pasaron por la malla #40. Posteriormente se mezclaron los suelos de acuerdo a los porcentajes marcados en AB1, AB2, AB4, AC1, AC2 y AC4. Para este proceso se tomaron en cuenta los valores en masa, ya que en laboratorio es más fácil y exacto manejarlo de esta manera. Cuando se obtenga la dosificación idónea se modificarán las masas a volumen, para llevarlo a campo

La masa total que se consideró para cada prueba fueron 300 g, se inició con las mezclas AB, donde el procedimiento se realizó igual que la norma M-MMP-1-07/07 y que en la fase 1 de este método (ver Figura 60).

Figura 60.

Mezclas para límites de consistencia de AB y AC, antes de agregarles humedad

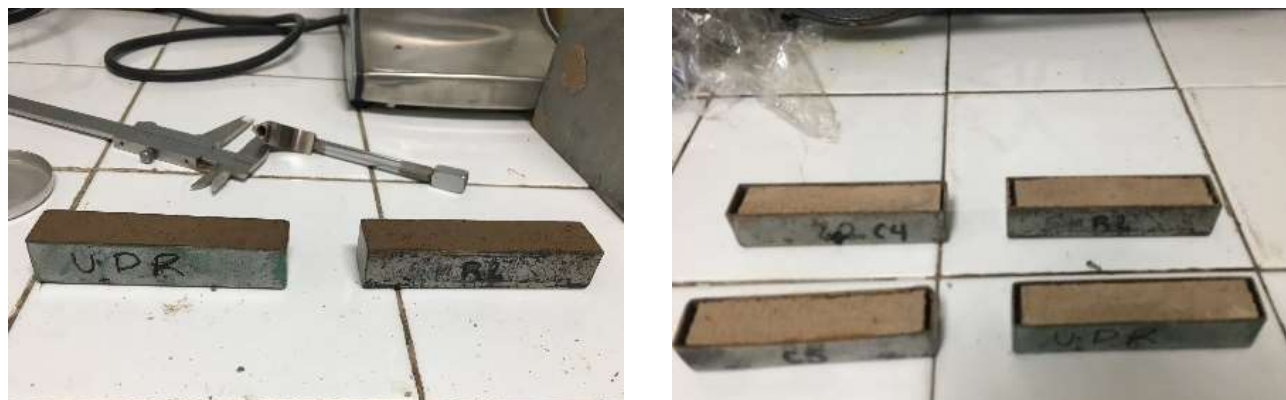


Fuente: Michel (2024)

Al igual que los datos obtenidos de las muestras vírgenes, todas las pruebas nos ayudan a determinar su límite líquido y plástico, así como la contracción lineal; donde se busca disminuir su porcentaje de contracción. En la Figura 61, se observa la prueba realizada para obtener la contracción lineal.

Figura 61.

Muestras después de secarse con dimensiones de contracción lineal



Fuente: Michel (2024)

Resistencia a la compresión en suelos cohesivos no confinados

Para determinar la resistencia a la compresión del suelo, se seleccionó la norma ASTM D-2166 como referencia técnica, ya que esta especifica el procedimiento para evaluar la resistencia a la compresión de suelos cohesivos en condiciones no confinadas. Esta prueba se realiza bajo un estado de compactación controlado, se aplicó una carga axial regulada por deformación. Según esta norma, la resistencia a la compresión no confinada se define como la carga máxima alcanzada por unidad de área o como la carga correspondiente a una deformación axial del 15%, dependiendo de cuál de estos valores se registre primero durante la ejecución del ensayo (ASTM, 2000a).

El propósito principal de esta prueba es proporcionar, una estimación de la resistencia a la compresión de suelos que poseen suficiente cohesión para mantenerse estables en condiciones no confinadas. A través de este, se obtuvieron datos de: densidad aparente o masa volumétrica seca y húmeda, esfuerzo desviador el cual es la capacidad de carga cuyo valor se da en kg/cm^2 , así como la deformación unitaria de cada muestra.

La deformación unitaria, es la deformación obtenida en relación de la altura total del espécimen, al aplicarle una fuerza en un eje. Y el esfuerzo desviador, es la carga máxima tolerada por el espécimen. Para este ensayo se requiere un aparato de compactación miniatura Harvard, un penetrómetro de bolsillo, el equipo de compactación de carga triaxial, horno, básculas, plástico adherente, contenedores metálicos, capsulas, espátula, agua, papel y aceite; equipo mostrado en la Figura 63.

Las mezclas de suelo se prepararon con un día de anticipación, se usaron bolsas de plástico para su almacenamiento (ver Figura 62). Se tomaron 500 g de suelos estabilizados según los datos especificados en la Tabla 8, se consideraron sus masas y se eliminó el peso correspondiente al contenido inicial de humedad de los sustratos.

Figura 63.

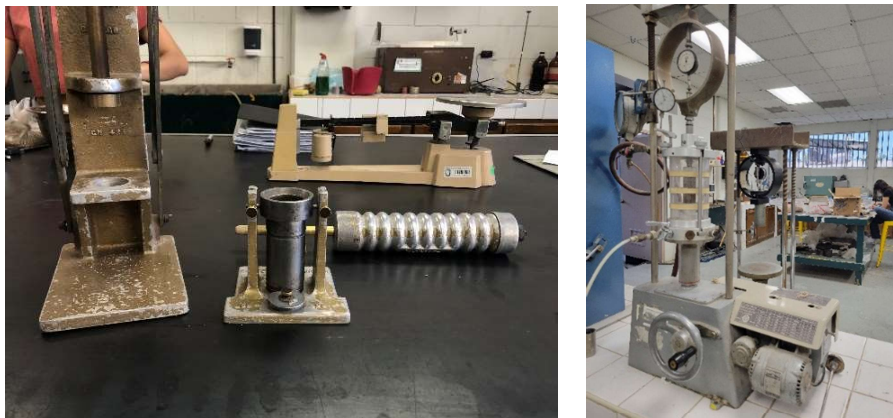
Mezclas homogenizadas dentro de las bolsas de plástico



Fuente: Michel (2024)

Figura 62.

Equipo utilizado para la prueba ASTM D2166



Fuente: Michel (2024)

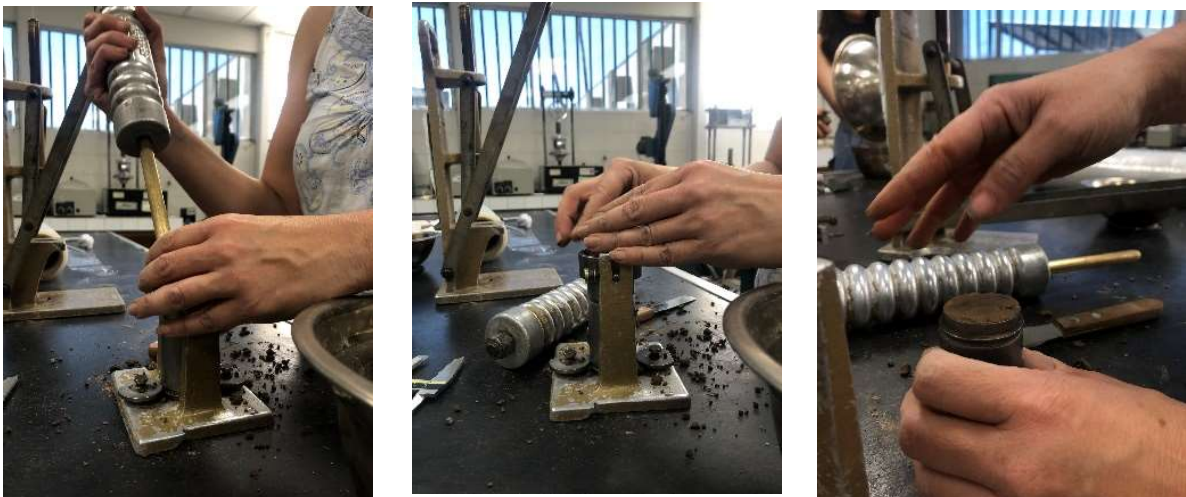
El material fue homogenizado dentro de bolsas de plástico; posteriormente, se añadió la mitad del porcentaje de humedad óptimo obtenido en la fase 1, mediante la prueba AASHTO M-MMP-1-09-03. Las mezclas se dejaron reposar 24 horas para permitir la correcta integración de los componentes y su absorción.

Una vez alcanzado el grado de humedad óptimo, el material se colocó en un molde cilíndrico miniatura. El suelo fue dispuesto en el molde en tres capas, compactándose cada una mediante un penetrómetro de bolsillo. A cada capa se le aplicaron 25 golpes uniformes, se aseguró la compactación homogénea, como se observa en la Figura 64. Entre capas, la superficie del material fue ligeramente rayada para garantizar la adecuada adhesión entre ellas. Este procedimiento continuó hasta completar la altura del cilindro.

Una vez retirada la extensión del molde, se eliminó cuidadosamente el excedente de material, asegurándose de no afectar la uniformidad de la probeta. Posteriormente, se colocaron en un extractor de probetas, permitiendo que la pieza se deslizara cuidadosamente fuera del cilindro. A continuación, las probetas fueron envueltas con plástico adherente para conservar su humedad. Las muestras preparadas se reservaron hasta el momento de ser sometidas al ensayo de compresión triaxial.

Figura 64.

Proceso de fabricación de probetas



Fuente: Michel (2024)

Se planificó la elaboración de tres probetas testigo para cada uno de los suelos designados como A, B y C, donde A correspondía a T01, B a A01 y C a A02, con un total esperado de nueve probetas. Estas serían sometidas a pruebas de carga axial para evaluar su comportamiento mecánico.

Figura 65.

Evidencia de probetas B y C, al desmontarse



Fuente: Michel (2024)

Durante el proceso, únicamente se logró completar las probetas correspondientes al suelo A, ya que las de los suelos B y C se desintegraron en el desmolde, incluso tras varios intentos (ver Figura 65). Inicialmente, las probetas se compactaron en tres capas, pero al desmontar las muestras se desbarataron. Se realizó un segundo intento con cinco capas, pero el resultado fue el mismo. Así mismo, se probó con un molde diferente para favorecer el proceso; sin embargo, la falta de cohesión de los materiales impidió que las probetas mantuvieran su forma, descartándose el uso de A01 y A02 sin estabilización para el ensayo.

En la Figura 66, se muestra una probeta extrayéndose del molde, se usó el equipo de compactación miniatura Harvard.

Figura 66.

Colocación de suelo en molde cilíndrico y desmontaje de extensión de molde.



Fuente: Michel (2024)

Después de extraer las probetas del molde, previo a someterlas a la prensa triaxial, se obtuvieron sus dimensiones siguiendo un protocolo estándar: se registró el diámetro en tres secciones (superior, central e inferior) en dos direcciones y la altura en tres puntos distintos (ver Figura 68) Estos valores permitieron calcular el área media y el volumen medio de cada probeta, datos indispensables para el ensayo. Una vez obtenidos los valores necesarios, las probetas fueron colocadas en la prensa triaxial para continuar con las pruebas.

Figura 68.

Medición de probetas



Fuente: Michel (2024)

En la Figura 69, se muestra una probeta dentro de la prensa triaxial, lista para iniciar el proceso de compresión.

Figura 69.

Probeta dentro de prensa triaxial



Fuente: Michel (2024)

Ante la imposibilidad de fabricar las piezas testigo de los suelos B y C, se optó por continuar con las probetas con estabilización física. Las probetas seleccionadas fueron AB1, AB2, AB4, AC1, AC2 y AC4, cuya fabricación siguió un proceso similar al de las muestras vírgenes, con la diferencia de las dosificaciones aplicadas y el ajuste en función del porcentaje de humedad inicial de los suelos; en la Figura 70, se muestran las probetas con el plástico adherible, reservadas para aplicar las cargas.

Figura 70.

Probetas de suelos estabilizados envueltos en plástico.



Fuente: Michel (2024)

Para garantizar que las masas de las muestras fueran consistentes con las dosificaciones indicadas en la Tabla 8, se descartó el peso de la humedad contenida en los suelos, por lo que se ajustaron las mezclas para trabajar con masas netas. Es crucial contar siempre con datos precisos sobre la humedad de los suelos, ya que este factor influye directamente en la cantidad de agua a agregar para alcanzar la humedad óptima. Con base en los resultados obtenidos en la fase 1, se definieron las características finales de las probetas. La Tabla 10, muestra las masas asignadas a las probetas realizadas.

Tabla 10.

Masas de suelos sin el contenido de humedad inicial de estos

| Dosificación de 500 g de mezclas para realizar probetas | | | | | |
|---|-------------|-----|----------------|-----------|-----|
| Serie | Arcilla (g) | % | Tucuruquay (g) | Arena (g) | % |
| AB1 | 259.4 | 50% | 258.175 | | 50% |
| AB2 | 207.52 | 40% | 309.81 | | 60% |
| AB4 | 311.28 | 60% | 206.54 | | 40% |
| AC1 | 259.4 | 50% | | 250 | 50% |
| AC2 | 207.52 | | | 300 | 60% |
| AC4 | 311.28 | | | 200 | 40% |

Fuente: Elaboración propia

Antes de agregar el porcentaje de agua a las mezclas, los sustratos fueron cuidadosamente homogenizados para asegurar una distribución uniforme de los materiales. Posteriormente, se añadió la mitad del contenido de humedad óptimo determinado en la prueba M-MMP-1-09-03. Esta decisión se basó en la necesidad de no exceder el contenido de humedad adecuado para trabajar las probetas, ya que un exceso de humedad requeriría un proceso de secado adicional para las muestras.

En los casos en los que la mezcla no alcanzó la maleabilidad idónea, se procedió a agregar agua de manera gradual, donde se incrementó en dos por ciento por vez, hasta obtener una consistencia que permitiera la compresión sin deformación. Este procedimiento garantizó que las probetas tuvieran la trabajabilidad necesaria para su fabricación y posterior ensayo.

Una vez ajustada la humedad de las mezclas, se procedió a llenar los cilindros de manera similar a la probeta A.

El siguiente paso consistió en colocar las probetas en el equipo triaxial, donde se ajustó el dispositivo de carga hasta que la platina superior entre en contacto con la probeta, se debe asegurar, que el indicador de deformación se encuentre en cero antes de iniciar la prueba. Se aplicó una carga constante simple de forma controlada, de modo que se genere una deformación axial a una velocidad constante en el rango de 0.5 % a 2 %.

En la Figura 71, se muestra la continuidad de la ejecución del ensayo, primero se obtienen las dimensiones de cada probeta, posteriormente son colocadas en el equipo de compresión en el cual se registran las cargas; cuando llega a su capacidad máxima de carga y deformación, se retira la probeta del equipo, y se observa la deformación por la carga aplicada.

Figura 71.

Proceso consecutivo de aplicación de norma ASTM D-2166



Fuente: Michel (2024)

Los datos obtenidos de carga, deformación y tiempo fueron registrados para formar la curva esfuerzo-deformación y así realizar su posterior análisis, se puede observar el diseño de la tabla, con los datos recabados en el Anexo D. Esta información ayudó a determinar la capacidad de carga máxima de la mezcla, que proporcionó datos relevantes sobre el comportamiento mecánico de las probetas bajo condiciones de carga controlada.

Una vez que la probeta alcanza el punto de fallo, se retiran de la prensa; a continuación, se pesa para colocarse posteriormente en un horno durante 48 horas para su secado, tras lo cual se vuelven a pesar, y determinar su contenido de humedad. Este procedimiento se llevó a cabo con todas las probetas de arcilla A y las mezclas AB1, AB2, AB4, AC1, AC2 y AC4, tanto en su estado seco como húmedo.

Fase 3, Diseño de mezclas segunda secuencia

En esta etapa se llevó a cabo la estabilización química, dado que los resultados obtenidos mediante la estabilización física no lograron alcanzar los objetivos de resistencia a la compresión en las probetas; aunque se observó un incremento en la resistencia, este no fue significativo para el valor requerido según la norma (ONNCCE, 2013) .

Para la estabilización química se seleccionaron dos estabilizantes: cal y cemento, los cuales se incorporaron de manera independiente a las mezclas. Este proceso consiste en la adición de un producto que reacciona químicamente con los componentes del suelo, y modifica sus propiedades físicas y mecánicas.

El trabajo en laboratorio, continuó con el descarte de mezclas con menor resistencia a la compresión y menores mejoras en plasticidad, observadas durante la fase 2. Los materiales seleccionados fueron T01 y A01, a los cuales se les adicionó el estabilizante químico, manteniendo el 100% de la mezcla basada en la estabilización física.

El estabilizante químico se añadió en proporciones específicas, junto con el agua, con el propósito de facilitar su implementación en campo. Las dosificaciones se determinaron con base en investigaciones previas y se aseguró la sustentabilidad de la modificación química (ver Figura 72). Se optó por iniciar con las dosis más elevadas posibles, y a partir de los resultados obtenidos, evaluar la posibilidad de disminuir la dosificación. Los detalles se presentan en la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11.

Diseño de mezclas segunda secuencia con estabilizantes químicos

| Diseño de mezclas segunda secuencia (500 g) | | | | | | |
|---|-----------------|-----|-----------|--------------|----|--------|
| Series | Estabilizante % | | Arcilla % | Tucuruquay % | | Agua % |
| AB1 CL | cal | 15% | 50 | 50 | | 19% |
| AB2 CL | cal | | 15% | 40 | 60 | 19% |
| AB4 CL | cal | | 15% | 60 | 40 | 19% |
| AB1 CM | cemento | | 6% | 50 | 50 | 14% |
| AB2 CM | cemento | | 6% | 40 | 60 | 14% |
| AB4 CM | cemento | | 6% | 60 | 40 | 14% |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12.*Masas de los suelos y estabilizantes en las mezclas*

| Diseño de mezclas segunda secuencia (500 g) | | | | | |
|---|-------------------|-------|--------|--------|--------|
| Series | Estabilizante (g) | | AB (g) | | Agua % |
| AB1 CL | cal | 82.88 | 552.55 | | 19% |
| AB2 CL | cal | 81.7 | 544.7 | | 19% |
| AB4 CL | cal | 81.54 | 543.6 | | 19% |
| AB1 CM | cemento | | 33.15 | 552.55 | 14% |
| AB2 CM | cemento | | 32.68 | 544.7 | 14% |
| AB4 CM | cemento | | 32.61 | 543.6 | 14% |

Fuente: Elaboración propia

Figura 72.*Mezclas de la segunda secuencia con estabilización química*

Fuente: Michel (2024)

En esta fase se consideró aplicar el ensayo de la prueba de compresión para suelos cohesivos no confinados de la ASTM D-2166 (ASTM, 2000a) para discriminar muestras; ya que los límites de consistencia M-MMP-1-07/07 (SCT, 2007), no aplican para suelos estabilizados químicamente, dado que se altera de manera significativa las propiedades plásticas y de cohesión del suelo, a través de modificaciones en la microestructura del material, donde se reduce su plasticidad y modifica su comportamiento mecánico haciendo que este ensayo sea inaplicable.

Prueba de compresión para suelos cohesivos no confinados

Se realizaron tres probetas de cada mezcla que se mantuvieron húmedas bajo el mismo procedimiento que en fase 2. En el momento del ensayo se aplicó la carga simple para determinar que mezclas se seleccionarían para la fase subsecuente, de acuerdo a la resistencia a la compresión simple que se busca obtener de acuerdo a la NMX-C-036-ONNCCE 2013.

Los datos obtenidos se vaciaron en una tabla igual a la utilizada en la fase 2, y que se encuentran en el Anexo E. Con tales resultados, se descartaron algunas mezclas para proseguir en la fase 4 del experimento.

Fase 4, Producción y desempeño de BTCE

En esta etapa, se fabricaron bloques en escala 1:1 con el objetivo de evaluar y comparar los resultados de seis mezclas diferentes. Se produjeron cantidades variables de piezas, con distintas dosificaciones distribuidas de la siguiente manera: bloques con la mezcla base AB1, bloques con mezcla AB1+cemento con dos dosificaciones, mezcla con AB1+cal con dos variables en el porcentaje de humedad, y una mezcla de T01 + cal. Las composiciones específicas de estas mezclas se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13

Dosificaciones de especímenes para pruebas de compresión simple

| Material | T01 (kg) | AB1 (kg) | Cal % | Cemento % | Agua % |
|----------|----------|----------|-------|-----------|--------|
| BTCE-1 | - | 70 kg | - | - | 15% |
| BTCE-2 | - | 45 kg | 15% | - | 15 % |
| BTCE-3 | - | 25 kg | 15% | - | 17 % |
| BTCE-4 | - | 70 kg | - | 3% | 17% |
| BTCE-5 | - | 30 kg | - | 6% | 18% |
| BTCE-5* | - | 30 kg | - | 6% | 17% |
| BTCE-6 | 30 kg | - | 15% | - | 20% |

Fuente: Elaboración propia

El propósito principal de esta fase fue verificar que los valores obtenidos cumplieran con los requisitos establecidos en la norma *NMX-C-404-ONNCCE-2012* para mampostería estructural. Según esta norma, los bloques deben alcanzar una resistencia mínima a la compresión de 70 kg/cm², en piezas individuales sin perforación y, presentar una absorción máxima del 19%; así como una contracción por secado igual o inferior a 0,065 %.

Para lograr este objetivo, se continuó la realización de las pruebas en el laboratorio de ingeniería de la UABC, bajo la supervisión del M.I. Cota, donde se aplicaron los ensayos de la Tabla 14.

Tabla 14.

Ensayos aplicados a las piezas de BTCE con los resultados sugeridos por la norma

| <i>Ensayos a piezas de BTCE</i> | | | | |
|---------------------------------|------------------------|--------------|-----------------|--|
| | ONNCCE | ASTM | | |
| Resistencia a la Compresión | NMX-C-036-ONNCCE-2013 | ASTM-C140-03 | Con perforación | |
| | | | Sin perforación | |
| Absorción | NMX-C-037-ONNCCE-2013. | ASTM-C140-03 | | |

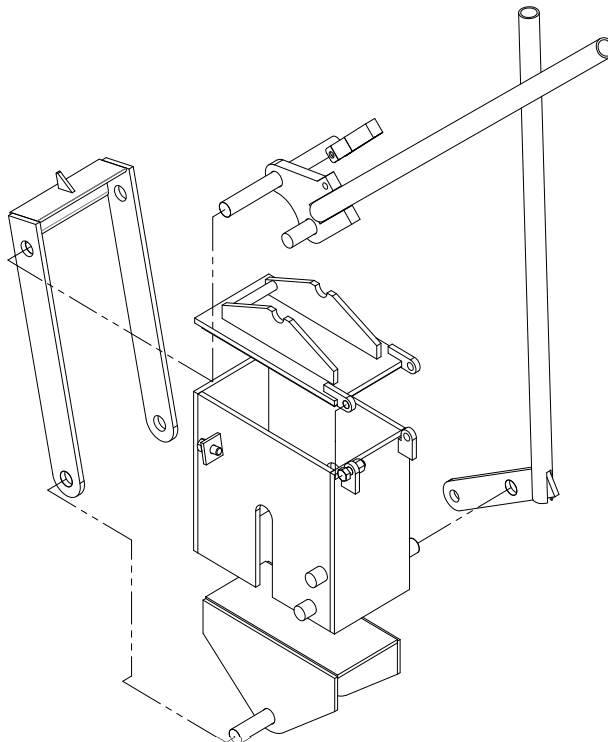
Fuente: Elaboración propia

Proceso de fabricación de la prensa

Se fabricó una prensa mecánica basada en el modelo Cinva-Ram, (*Ceta Ram | PDF*, 1981) (Galindo et al., 2023) fabricado por Breton Industrias, en la ciudad de Mexicali (ver Figura 73). Se produjeron piezas de 0.15 x 0.29 x 0.09 metros, aproximadamente, dimensiones basadas en la norma *NMX-C-038-ONNCCE-2013* para piezas de mampostería. Se realizó una adaptación a la máquina para fabricar bloques con perforación y sin perforación; sin embargo, para efectos de esta investigación se decidió seleccionar el molde con perforación.

Figura 73.

Isométrico de Cinva-Ram, fabricado en Mexicali, B.C.



Fuente: Bretón (2022)

La Figura 74, muestra la secuencia de imágenes de ensayo para verificar la funcionalidad de la maquina Cinva-Ram, fabricada y adaptada con las perforaciones.

Figura 74.

Maquina Cinva-Ram elaborada por Breton Industrias.



Fuente: Michel (2024)

Proceso de fabricación de piezas de BTCE;

La producción de las piezas se llevó a cabo con las mezclas que obtuvieron resultados óptimos con las pruebas de laboratorio, basados en los objetivos específicos de esta investigación. Además, se incluyeron dos prototipos adicionales para realizar comparaciones y ampliar el análisis de datos, en la Tabla 13, se mostraron las dosificaciones de los especímenes realizados y la nomenclatura de los mismos; y la Tabla 15 muestran los datos previos de Tabla 13, convertidos a kilogramos.

Tabla 15.

Dosificaciones de especímenes en masa

| Material | T01 (kg) | AB1 (kg) | Cal (kg) | Cemento (kg) | Mezcla total (kg) | Agua (kg) |
|----------|----------|----------|----------|--------------|-------------------|-----------|
| BTCE-1 | - | 70 kg | - | - | 70 | 10.5 |
| BTCE-2 | - | 45 kg | 6.75 | - | 51.75 | 7.76% |
| BTCE-3 | - | 25 kg | 3.75 | - | 28.75 | 17 % |
| BTCE-4 | - | 70 kg | - | 2.1 | 72.1 | 17% |
| BTCE-5 | - | 30 kg | - | 1.8 | 31.8 | 18% |
| BTCE-5* | - | 30 kg | - | 1.8 | 31.8 | 17% |
| BTCE-6 | 30 | - | 4.5 | - | 34.5 | 20% |

Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que, la mezcla base fue AB1, la cual representó el 100% de la composición, y el estabilizante se añade como un porcentaje de esta base; es decir, si la mezcla base AB1 fue el 100% y se añadió un 5% de estabilizante.

La composición final fue: de la siguiente manera: mezcla base AB1 equivale a 100 partes, más el estabilizante, que fueron de acuerdo a la pieza: 3% y 6% en el caso del cemento, y 15% en el caso de la cal; de 100 partes por lo que da un total de 105 partes. Esto implicó que, en términos porcentuales del total de la mezcla final quedara con la Fórmula 9:

Fórmula 9.*Dosificación de mezcla para elaboración de BTCE*

$$BTCE = AB1 + E$$

$$AB1 = (100/105) \times 100 \approx 95.24\%$$

$$E = (5/105) \times 100 \approx 4.76\%.$$

Donde

BTCE: Mezcla total de suelos base más estabilizante

AB1: Mezcla base, de arcilla y tucuruquay

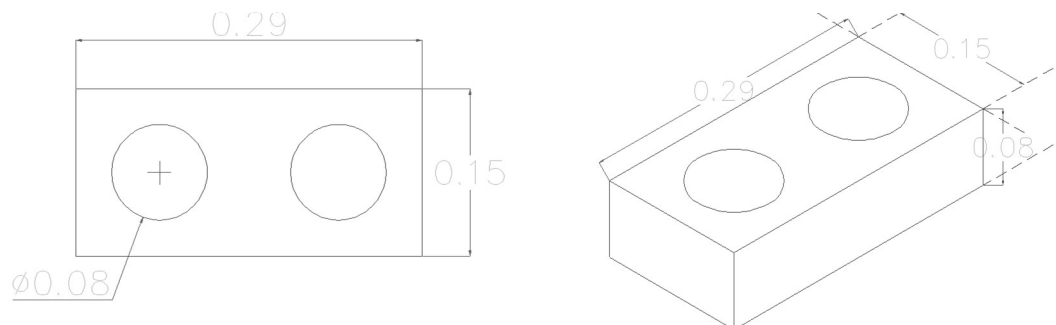
E: Estabilizante (cemento o cal)

Se decidió iniciar la producción de las piezas a partir del 10 de octubre de 2024, en un taller al aire libre donde se procesaron los materiales una vez finalizada la temporada de altas temperaturas en la región; en la Tabla 21, se muestra la temperatura de los días de elaboración de las piezas. Esta decisión respondió a dos factores clave: mantener el rendimiento humano y garantizar la adecuada conservación de la humedad en las mezclas.

Se optó por fabricar un bloque con celdas de aproximadamente 8 cm de diámetro, según el porcentaje de sólidos y vacíos, la NMX-C-404-ONNCCE-2012 lo clasifica como pieza maciza con celdas. En la Figura 75, se muestran los diagramas del diseño detallado del mampuesto.

Figura 75.

Isométrico y planta de pieza de block



Fuente: Elaboración propia

El equipo utilizado para este proceso fue una pesa de resorte, cubetas de 19 litros, pala, pisón, malla cernidor con perforaciones de 5 mm, carreta y la prensa. Los materiales para la estabilización química fueron: cal Calidra, en empaque de 25 kg adquirida en una ferretería local y cemento CEMEX-GALLO, portland CR 30R costal de 25 kg, más el agua y los suelos.

Se utilizó la pesa para manejar las dosificaciones en masa, se replicaron las condiciones utilizadas en el laboratorio. La mezcla AB1 fue elegida como referencia, y se descontó el peso de la humedad del A01 para mantener consistencia con las pruebas previas. Antes de pesarse, los materiales fueron tamizados mediante una malla de 0.5 mm (equivalente al tamiz No. 4) para garantizar uniformidad en la granulometría como se observa en la Figura 76.

Figura 76.

Tamizado de arcilla



Fuente: Michel (2024)

En la Tabla 16, se muestran las dosificaciones que se consideraron para la mezcla AB1, donde al igual que las probetas en laboratorio, se descontó el peso de humedad del

tucuruquay, ya que este se encontraba en condiciones similares, a esta pieza se le llamo BTCE-1.

Tabla 16.

Dosificación de sustratos para BTCE-1

| Mezcla AB1 para BTCE-1 | | | | | |
|------------------------|---------------|------------------|------------|-----------------|-------------|
| | Arcilla (50%) | Tucuruquay (50%) | Agua (15%) | Cantidad piezas | Peso piezas |
| Mezcla | 44.45 kg | 39.8 kg | 12.63 kg | 13 | 6 -6.5 kg |
| Cubeta (1 kg) | 44.45 kg | 39.8 kg | 12.63 kg | 13 | 6 -6.5 kg |

Fuente: Elaboración propia

Mezclado y homogenización

Cada componente se pesó individualmente y se mezcló en seco durante 15 minutos para garantizar una distribución uniforme (véase Figura 77 y Figura 78). Posteriormente, el agua se añadió en etapas, por aspersión para evitar la formación de grumos. Sin embargo, la mezcla inicial, realizada en carretilla, mostró dificultades para integrar el agua completamente, por lo que se decidió que el procedimiento en campo se realizaría directamente sobre el suelo para asegurar una homogenización adecuada.

Figura 77.

Pesaje de los materiales para garantizar la precisión en las proporciones.



Fuente: Michel (2024)

Figura 78.

Homogenización de los sustratos para formar AB1



Fuente: Michel (2024)

Durante el proceso de incorporación de agua, en carretilla; se rompieron los grumos de arcilla manualmente antes del prensado para mejorar la distribución de la humedad (ver Figura 79). El material se colocó cuidadosamente en la prensa, pero el desmolde presentó complicaciones debido a la adherencia del material. Para evitar daños, las piezas fueron trasladadas a planchas, con ello se disminuyó su manipulación directa. Se pesaron

Figura 79.

Desintegración de grumos y mezclado manual en carreta



Fuente: Michel (2024)

inmediatamente para evaluar el contenido de humedad y permitir comparaciones futuras de densidad.

De los 70 kg de mezcla inicial, se lograron 13 piezas efectivas tras rehacer aquellas que se desmoronaron durante el proceso. Cada pieza pesó entre 6 y 6.6 kg con humedad y el proceso completo tomó aproximadamente 4 horas. Durante los tres días siguientes, se midió el peso de las piezas diariamente para monitorear la pérdida de humedad (ver Figura 80).

Figura 80.

Pesado y almacenado de BTCE



Fuente: Michel (2024)

Fabricación de Bloques Estabilizados con Cal

El 14 de octubre de 2024, se procedió a la fabricación de los bloques estabilizados con cal. Se utilizaron 70 kg de material AB1, al cual se añadió un 15% de cal en peso. La homogenización del material se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento empleado para los sustratos. La cal utilizada fue un saco de 25 kg de cal hidratada, marca Calidra, adquirido en una ferretería local.

Se trabajaron dos variantes: una mezcla con 15% de humedad y otra con 17% de humedad, como se observa en la Tabla 17, con el objetivo de comparar su desempeño y propiedades finales. En total, se obtuvieron 14 piezas efectivas: 9 de la primera variante y 5 de la segunda.

Tabla 17.

Dosificación de BTCE más cal

| BTCE con cal | | | | | |
|--------------|-------|-----------|----------------|-----------------|-------------|
| Material | AB1 | Cal (15%) | Agua (17.7%) | Cantidad piezas | Peso piezas |
| BTCE-2 | 45 kg | 6.75 kg | 7.76 kg (15 %) | 9 | 6.8-7 kg |
| BTCE-3 | 25 kg | 3.75 kg | 4.88 kg (17 %) | 5 | 7-7.5 kg |

Fuente: Elaboración propia

Durante el proceso se observó que la mezcla estabilizada con cal requería una mayor cantidad de agua para lograr una homogenización adecuada, en comparación con la mezcla compuesta únicamente por los sustratos. En la Figura 81 se muestran los BTCE-2 y BTCE-3.

Figura 81.

BTCE's elaborados con cal



Fuente: Michel (2024)

Fabricación de Bloques Estabilizados con Cemento

Estas piezas se produjeron el 16 de octubre de 2024, se utilizó cemento como estabilizante, el cemento utilizado fue Cemex de 25 kg adquirido en una ferretería local. Se trabajaron dos variantes: en la primera, se mezclaron 70 kg de AB1 con un 3% de cemento, y en la segunda mezcla se utilizaron 30 kg de AB1 con un 6% de cemento. En la Tabla 18, se muestran tales dosificaciones.

Tabla 18.

Dosificación de los BTCE estabilizados con cemento

| Bloques Estabilizados con Cemento | | | | | |
|-----------------------------------|-------|---------|-----------------|--------------------|----------------|
| Material | AB1 | Cemento | Agua (17.7%) | Cantidad piezas | Peso piezas |
| BTCE-4 | 70 kg | 2.1 kg | 12.8 kg | 11 | 6.5 - 7 kg |
| BTCE-5 | 30 kg | 1.8 kg | 5.62 kg | 6 | 6.5 - 7 kg |

Fuente: Elaboración propia

En la mezcla con 3% de cemento, se añadió inicialmente 15% de agua, pero la consistencia no fue óptima, por lo que fue necesario incorporar 2 kg adicionales de agua para mejorarla. Durante el proceso, se observó que el cemento provoca una rápida deshidratación de la mezcla, lo que afecta su trabajabilidad. Después de una hora, la consistencia del material disminuye significativamente, haciendo necesario agregar más agua.

Este comportamiento debe tomarse en cuenta al planificar la producción, ya que es fundamental determinar cuántas piezas pueden fabricarse en un período de tiempo limitado antes de que la mezcla comience a perder humedad y se comprometa la calidad del producto final.

Fabricación Adicional de Bloques Estabilizados con Cemento y T01 + Cal

El 12 de noviembre de 2024, se llevó a cabo la última producción de piezas adicionales del tipo BTCE-5, se implementó una técnica alternativa de curado. En esta técnica, se buscó mantener una mayor humedad en la mezcla para evaluar su influencia en los resultados de resistencia a la compresión. Para ello, el curado consistió en sumergir las piezas en agua durante 5 segundos, de manera alternada (un día sí y un día no) a partir de su fabricación.

Adicionalmente, en la misma fecha se fabricaron bloques donde se utilizó únicamente la mezcla T01 con un 15% de cal, cuyos bloques recibieron el nombre de BTCE-6 (ver Tabla 19). El objetivo fue explorar el efecto de esta composición en la resistencia a la compresión, para ampliar el análisis comparativo.

Tabla 19.

Dosificación de piezas adicionales de BTCE-5 y BTCE-6

| Piezas adicionales de BTCE | | | | | | |
|----------------------------|----------|----------|----------|--------------|------------|-----------------|
| Material | T01 (kg) | AB1 (kg) | Cal (kg) | Cemento (kg) | Agua (kg) | Cantidad piezas |
| BTCE-5 | | 30 | | 1.8 | 5.4 (17%) | 6 ½ |
| BTCE-6 | 30 | | 4.5 | | 5.62 (20%) | 7 |

Fuente: Elaboración propia

Las dosificaciones exactas de las mezclas empleadas se detallan en la Tabla 20, donde se especifican los porcentajes y proporciones utilizadas para cada combinación. Estos datos constituyen la base para el análisis de los resultados obtenidos en las pruebas posteriores.

Tabla 20.*Datos de dosificaciones de los BTCE fabricados*

| <i>Bloques Estabilizados con Cemento</i> | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|--------------|-------------|-----------------|-------------|
| Material | T01 (kg) | AB1 (kg) | Cal (kg) | Cemento (kg) | Agua (kg) | Cantidad piezas | Peso piezas |
| BTCE-1 | | 84.26 | | - | 12.63 (15%) | 13 | 6-6.5 kg |
| BTCE-2 | | 45 kg | 6.75 | - | 7.76 (15 %) | 9 | 6.8-7 kg |
| BTCE-3 | | 25 kg | 3.75 | - | 4.88 (17 %) | 5 | 7-7.5 kg |
| BTCE-4 | | 70 kg | | 2.1 kg | 12.8 (17%) | 11 | 7-8.5 kg |
| BTCE-5 | | 30 kg | | 1.8 kg | 5.62 (18%) | 6 | 7 -9 kg |
| BTCE-5* | | 30 kg | | 1.8 kg | 5.4 (17%) | 6 | - |
| BTCE-6 | 30 kg | | 4.5 | 1.8 kg | 6.9 (20%) | 7 | - |

Fuente: Elaboración propia

Curado de las piezas

Una vez fabricadas las piezas, se dispusieron en un área protegida de la exposición directa a los rayos solares. Para evitar deformaciones y fisuras durante el proceso de curado, se utilizaron tarimas niveladas, con superficie uniforme y estable que evitara rupturas mientras las piezas aún se encontraban en estado fresco.

Con el objetivo de regular la pérdida de humedad, las piezas fueron cubiertas con hojas de palma, lo que permitió un secado gradual y controlado (véase Figura 82). En el caso de las muestras BTCE-4 y BTCE-5, fue necesario un proceso adicional de curado húmedo, durante los diez días posteriores a su fabricación, estas piezas se mantuvieron hidratadas mediante la aplicación periódica de agua con un aspersor, se aseguró que el contenido de humedad fuera el adecuado para evitar fisuras internas y garantizar las propiedades mecánicas esperadas.

Figura 82.

BTCE cubierto con hojas de palma para curado



Fuente: Michel (2024)

Para el nuevo lote de BTCE-5, se optó por un método de curado mediante inmersión, después de dejarlos tres días en reposo, posteriormente los siete días subsecuentes, fueron sumergidos hasta cubrirlos en su totalidad. El objetivo era aumentar la humedad interna de las piezas y favorecer su consolidación.

En el caso del lote BTCE-6, se aplicó el método recomendado por la *National Lime Association* [NLA] (Brief, 2006), diseñado para el curado de probetas estabilizadas con cal. Este método consiste en envolver los especímenes en plástico durante un periodo de siete días, lo que conserva la humedad necesaria para la reacción de estabilización (véase Figura 83). Para este estudio, se introdujo la variable de mantener las muestras a temperatura ambiente, en lugar de las condiciones controladas que la metodología original sugiere.

Ambos métodos fueron seleccionados estratégicamente para evaluar su influencia en las propiedades finales de los bloques, particularmente en su resistencia y comportamiento frente a condiciones ambientales.

Figura 83.*Proceso de curado de BTCE-6*

Fuente: Michel (2024)

Los tiempos de secado de las piezas variaron en función del tipo de estabilización aplicada a cada una, sin embargo, el 100% de las piezas fueron curadas a la sombra. La Tabla 20 proporciona un detalle del proceso de secado y curado para cada espécimen, se ilustra las diferencias en los tratamientos aplicados y su impacto en las propiedades finales de las muestras y las temperaturas máximas registradas durante este proceso en la ciudad de Mexicali. Así mismo, se registró la fecha cuando fueron ensayados con la prueba de compresión.

Tabla 21.*Resumen de condiciones y tiempos de curado*

| Mezcla | Fecha de fabricación | Prueba de compresión | Condiciones de curado | Temp.* |
|----------|-------------------------------|------------------------------------|--|---------|
| BTCE-1 | octubre 10, 2024 5:23 pm | octubre 28, 2024 | A la sombra cubiertos con hoja de palma | 39° C |
| BTCE-2 | Octubre 14, 2024 11 am | octubre 30, 2024 | A la sombra cubiertos con hoja de palma | 36.6 °C |
| BTCE-3 | octubre 14, 2024 12:43 pm | octubre 30, 2024 | A la sombra cubiertos con hoja de palma | 36.6 °C |
| BTCE-4 | octubre 16, 2024 10.30 am | noviembre 14, 2024 | A la sombra cubiertos con hoja de palma, curados durante 12 días | 36.6 °C |
| BTCE-5 | octubre 16, 2024 12:45 am | noviembre 14, 2024 (a los 28 días) | A la sombra cubiertos con hoja de palma, curados durante 12 días, se agregó agua con un aspersor, hasta que las piezas quedaran húmedas por todas sus caras. | 36.6 °C |
| BTCE-5 * | Noviembre 12, 2024 , 10:30 am | Noviembre 28, 2024 (16 días) | A la sombra cubiertos con hoja de palma, curados durante 12 días, sumergiéndolos en agua de manera alternada (un día sí y otro no) | 33.1°C |
| BTCE-6 | Noviembre 12, 2024 , 11:30 am | Noviembre 28, 2024 (16 días) | Envueltos en plástico durante 7 días, posteriormente se removió el plástico para un curado a la sombra cubierto con hojas de palma | 33.1°C |

Fuente: Elaboración propia

*Temperatura más alta registrada durante el proceso de curado obtenidas en <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Noviembre24.pdf>

Prueba de compresión

Se llevó a cabo la prueba de compresión simple siguiendo los lineamientos de la norma NMX-C-036-ONNCCE 2013 (Flores, 2015). Para este propósito, se utilizó una prensa universal de la marca Forney, modelo LT-1150, como se ilustra en la Figura 85. Se preparó cuidadosamente la superficie de los especímenes para asegurar una distribución uniforme de la carga, se empleó una placa inferior y otra superior, junto con una base de arena fina.

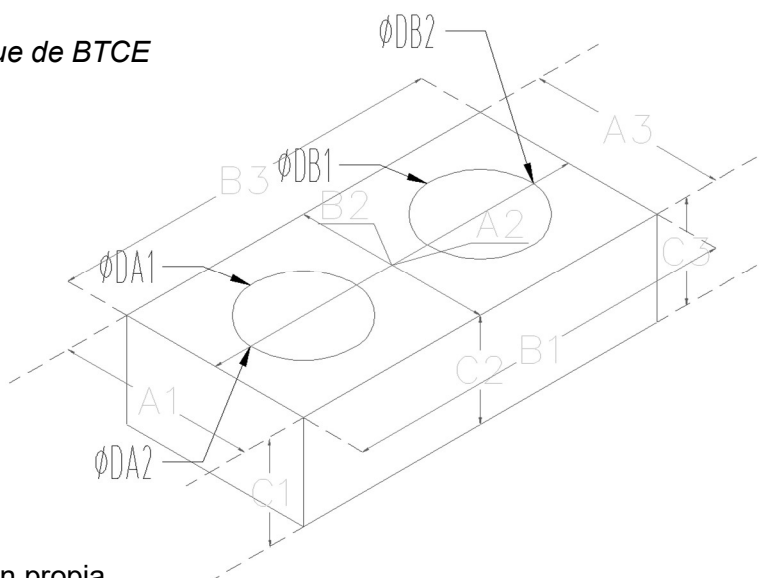
Figura 84.

Prensa universal



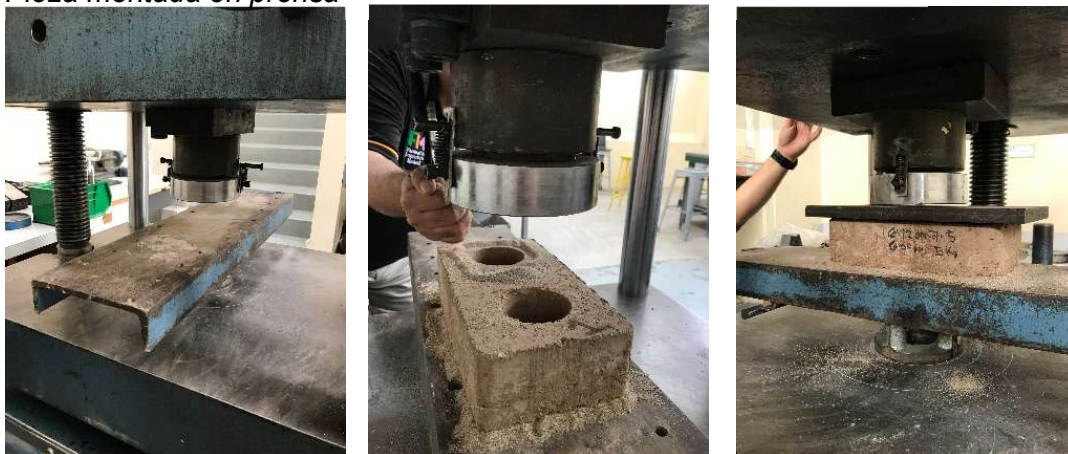
Fuente: Michel (2024)

Se seleccionaron tres especímenes representativos de cada combinación: BTCE1, BTCE2, BTCE3, BTCE4, BTCE5 y BTCE6; a los cuales se les tomaron medidas promediadas tanto de ancho, largo y alto; así como su peso y dimensiones de las celdas. Para determinar las dimensiones de ancho, alto y largo, se realizaron tres mediciones por sección de espécimen como se muestra en la Figura 85, y se calculó el promedio de estas. En el caso de los diámetros, se efectuaron dos mediciones por espécimen, de las cuales se obtuvo el valor promedio. Tales datos fueron registrados en una la tabla (ver Anexo F).

Figura 86.*Isométrico de bloque de BTCE*

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los datos de volumen y masa volumétrica de cada pieza, se procedió a realizar la prueba de compresión en la prensa universal. Las piezas se colocaron sobre una placa base distribuyendo las cargas de manera centrada y uniforme. Posteriormente, cada espécimen se asentó sobre una cama de arena, lo que permitió que cualquier relieve o textura presente en el bloque tuviera una base uniforme capaz de recibir la carga de manera homogénea. Posteriormente a la pieza se le coloca arena en su superficie para culminar con la placa cabeceadora como se muestra la Figura 86.

Figura 85.*Pieza montada en prensa*

Fuente: Michel (2024)

Los datos obtenidos se colocaron en un formato de elaboración propia basado en los datos requeridos por la norma NMX-C-036-ONNCCE 2013. Como se muestra en el Anexo E; este proceso se realizó con cada uno de los especímenes.

Para obtener el dato de la resistencia a la compresión se debe dividir el área neta de cada espécimen entre la carga máxima recibida. Por lo cual la fórmula se expresa de la siguiente manera:

Fórmula 10.

Para cálculo de resistencia a la compresión.

$$f_p = \frac{P}{A}$$

Donde:

f_p = Esfuerzo último de compresión (kg)

B = Fuerza última aplicada (kg)

C = Área neta transversal del espécimen, donde se aplica la fuerza en cm^2

Figura 87.

BTCE-3, en la maquina de compresión



Fuente: Michel (2024)

Prueba de absorción por capilaridad

La degradación de un material es un fenómeno que comúnmente se origina en su superficie expuesta. El término de resistencia química se refiere a la capacidad de un material para resistir cambios físicos o químicos que ocurren en su superficie, es ahí, donde la absorción desempeña un papel significativo.

La absorción se define como el mecanismo mediante el cual un material o sustancia porosa incorpora fluidos o humedad, ya sea por contacto directo con un líquido o a través de la captación de humedad atmosférica. Este proceso puede modificar las propiedades mecánicas del material, comprometiendo su composición estructural (Brostow, 1981, p. 431).

Para este ensayo se siguieron las directrices establecidas en las normas NMX-C-037-ONNCCE-2013 (ONNCCE, 2014a), las cuales especifican el procedimiento para determinar la absorción inicial de los materiales y absorción total. Se había considerado no realizar absorción total debido al proceso de fabricación del material con tierra cruda, sin embargo, debido a que se pretende hacer modificaciones futuras a la mezcla se consideró relevante tener resultados previos a cualquier alteración.

Se seleccionaron dos especímenes representativos de cada mezcla para garantizar resultados confiables. Estos especímenes fueron limpiados para eliminar impurezas superficiales; a continuación, se registró su peso inicial y se colocaron en un horno por 36 horas para eliminar el contenido de agua. Se buscó que las mediciones posteriores fueran realizadas en condiciones similares: libres de humedad. En la Figura 88 se muestra las probetas dentro del horno y posteriormente se sobre la báscula para registrar su peso.

Figura 88.

Probetas pesadas previo a ser horneadas, y probetas en el horno



Fuente: Michel (2024)

Los datos obtenidos de cada probeta se registraron en la Tabla 22; la cual incluye los datos en gramos de: masa inicial, masa constante y diferencia de masas; esto con el fin de registrar la masa contante libre de humedad de cada espécimen ensayado.

Tabla 22.

Masas de probetas para ensayo de absorción

| Piezas seleccionadas para ensayo de absorción. | | | | | | |
|--|------------------|-------|--------------------|-------|---------------------|-----|
| Probetas | Masa inicial (g) | | Masa constante (g) | | Diferencia en masas | |
| | a | b | a | b | a | b |
| BTCE-2 | 4,828 | 4,680 | 4,759 | 4,613 | 69 | 67 |
| BTCE-3 | 4,695 | 4,792 | 4,631 | 4,720 | 64 | 72 |
| BTCE-5 | 4,583 | 4,953 | 4,504 | 4,853 | 79 | 100 |
| BTCE-6 | 3,746 | 3,805 | 3,645 | 3,695 | 101 | 110 |

Fuente: Elaboración propia

Para obtener los resultados de absorción por capilaridad, es necesario medir la superficie de la cara sumergida en agua, expresada en cm². Estas mediciones excluyen la

superficie vertical de la probeta que no queda en contacto con el agua, siguiendo el procedimiento indicado en la Figura 89; la Tabla 23 muestra las áreas sumergidas de las probetas.

Figura 89.

Diagrama de obtención de datos de superficie

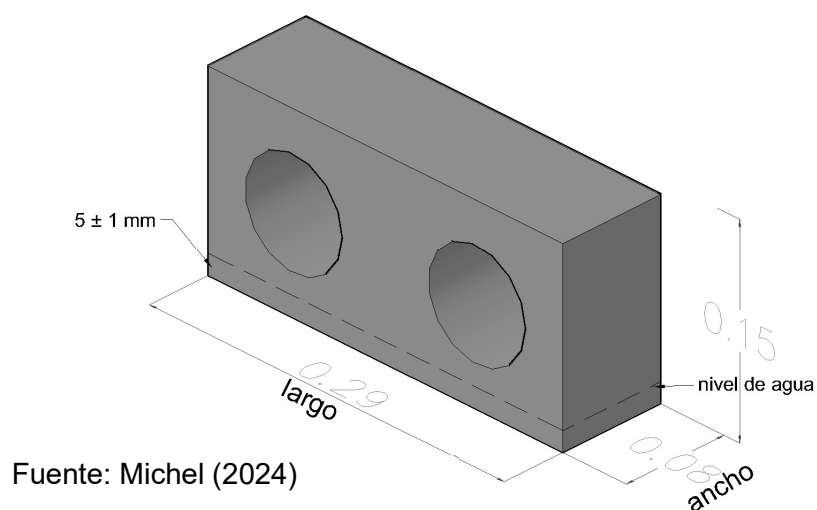


Tabla 23.

Datos de superficies sumergidas de especímenes.

| Áreas de la superficie de las probetas | | |
|--|---|--------|
| | Superficie sumergida en cm ² | |
| Probetas | a | b |
| BTCE-2 | 229.67 | 228.93 |
| BTCE-3 | 230.28 | 226.48 |
| BTCE-5 | 227.96 | 226.96 |
| BTCE-6 | 222.01 | 221.89 |

Fuente: Elaboración propia

Para la determinación de la absorción inicial de las probetas, se utilizó un recipiente para baño María que cuenta con una rejilla en su interior como se observa en la Figura 90, papel absorbente, una balanza, un cronómetro y agua.

Figura 90.

Equipo para baño María



Fuente: Michel (2024)

Se seleccionó una de las caras sin perforaciones para ser la que estuviera en contacto con el agua, sumergiéndola exactamente 5 mm, se colocaron dos piezas simultáneamente, y se puso en marcha el cronómetro como se observa en la Figura 91.

Figura 91.

Probetas sumergidas en charola, probeta después de obtener su masa



Fuente: Michel (2024)

Las probetas duraron sumergidas 10 minutos, y durante el tiempo de contacto se mantuvo el nivel del agua bajo los parámetros establecidos por la norma. Las probetas fueron retiradas del agua, secadas ligeramente sobre el paño húmedo para evitar la pérdida excesiva de agua, y pesada inmediatamente en la balanza. Los datos obtenidos se registraron inmediatamente y durante la manipulación de las probetas, se tuvo cuidado de no mojar zonas distintas a la cara sumergida, ni de salpicar o golpear las probetas entre sí.

Posteriormente, algunas de las probetas fueron seleccionadas para la siguiente fase del ensayo, correspondiente a la absorción total (ver Figura 92). En esta primera etapa, se observó que ciertos especímenes presentaban deterioros significativos que comprometían su integridad estructural, lo que llevó a descartar el espécimen BTCE-6.

Figura 92.

Probetas sumergidas en pileta durante 24 horas



Fuente: Michel (2024)

Para evaluar la absorción total, las probetas fueron sumergidas en una pileta con agua a una temperatura controlada de $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante un período de 24 horas. Posteriormente, las probetas debían ser extraídas cuidadosamente de la pileta, se eliminó el exceso de agua de su superficie y se registró su peso, para después colocarlas de nuevo en otra pileta y obtener su masa sumergida. Sin embargo, solo fue posible obtener datos para una probeta durante esta segunda etapa, debido a limitaciones en la integridad de las piezas restantes (ver Figura 93).

Figura 93.

Probetas después de sumersión



Fuente: Michel (2024)

Nota: Al centro y a la derecha la única probeta apta para obtención de masa después de 24 horas sumergida

La fórmula para determinar la absorción del agua es la siguiente:

Fórmula 11.

Cálculo para la absorción de agua

Fórmula

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - P_a} (*100)$$

Donde:

A = El volumen de agua retenida en el volumen aparente del espécimen en dm^3/m^3

M_s = Peso seco del espécimen en kilos

M_{sss} = Peso específico y superficie seco en kilos

P_a = Peso ahogado en kilos

La Tabla 24, se muestran las masas de las probetas que se pudieron ensayaron en cada etapa de esta prueba, y se registraron las piezas que se destruyeron.

Tabla 24.

Datos de piezas sometidas a prueba de absorción

| Piezas seleccionadas para ensayo de absorción. | | | | | | |
|--|--------------------|-------|----------------------------|-------|--------------------|-------|
| Probetas | Masa constante (g) | | Masa absorción inicial (g) | | Masa sumergida (g) | |
| | a | a | a | b | a | b |
| BTCE-2 | 4,759 | 4,613 | 4,930 | 4,890 | x | x |
| BTCE-3 | 4,631 | 4,720 | 4,725 | 4,851 | x | 5,565 |
| BTCE-5 | 4,504 | 4,853 | 4,696 | 4,940 | x | x |
| BTCE-6 | 3,645 | 3,695 | 4,185 | 4,153 | x | x |

Fuente: Elaboración Michel

Capítulo VI

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados de cada una de las fases y análisis planteados en la metodología para la obtención de los objetivos propuestos. En concreto, los resultados de los ensayos realizados a los suelos, probetas y BTCE fabricados en Mexicali, sirven para proponer mejoras en procedimientos, descartar ensayos que no fueron concluyentes para la aplicación en campo y considerar mayor experimentación práctica con otro tipo de estabilizantes, así como determinar si los BTCE locales pueden utilizarse para muros de carga en la ciudad.

Resultados fase 1, análisis de sustratos

Después de realizar las pruebas correspondientes se presentan los resultados de la fase uno, estos se presentan por orden de ejecución y permitieron clasificar los suelos y considerar cuales serán seleccionados para las siguientes fases.

En los apartados siguientes se muestran tablas con los resultados obtenidos de cada prueba mencionada. Los resultados de arcillas y arenas están en el mismo apartado, ya que la mayoría de las pruebas se aplican igual en ambos suelos.

Contenido de humedad en arcillas y arenas

La arcilla estaba en costales cuando se empezó a utilizar para las pruebas, pero debido a que una de las propiedades de este material es la capacidad de absorción, fue interesante ver la humedad con la que contaba el material dentro del laboratorio, ya que esta era de su capacidad de absorción. La arena A01 venía húmeda desde el punto recolección, por lo que los datos de humedad no son iguales a los que se encuentran en circunstancias naturales; por otro lado, A02 estaba en estado natural y este suelo no retiene humedad por un periodo prolongado. En la tabla 25 se muestran la información de este ensayo.

Tabla 25.**Resultados de contenido de humedad**

| Contenido de humedad de los suelos | | |
|------------------------------------|---|--------|
| T01 | $\omega = 154.7g - 149.76g / 149.76g - 18.6g (100)$ | 3.76 % |
| T02 | $\omega = 153.8 - 149.15g / 149.15g - 33.2 (100)$ | 4.01% |
| A01 | $\omega = 143.76g - 139.78g / 139.78g - 18.30g (100)$ | 3.27% |
| A02 | $\omega = 162.97 - 162.53 / 162.53 - 18.24g (100)$ | 0.305% |

Fuente: Elaboración propia

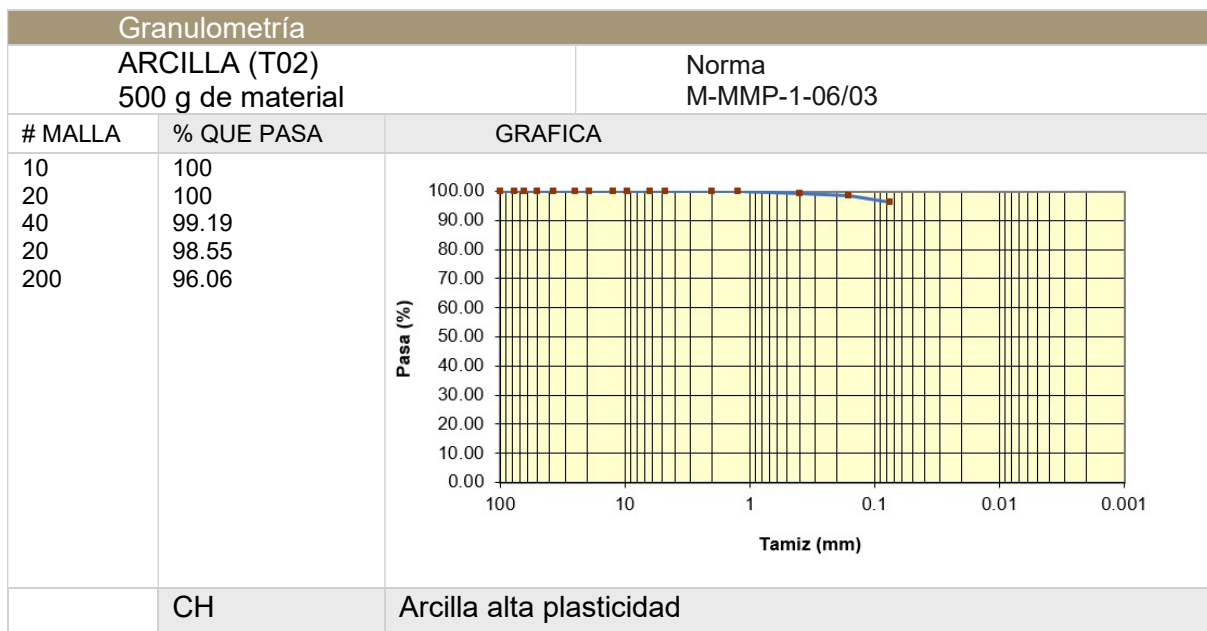
Granulometría arcillas y arenas

En las tablas subsecuentes de la 26 a la 29, se muestra la curva granulométrica del suelo, de acuerdo a la norma, si pasa más del 95% del material sobre la malla #200, se considera un suelo fino, arcillas y limos. Con datos de la plasticidad puede clasificarse en baja o alta plasticidad y determinar la nomenclatura de acuerdo a SUCS. Los resultados de las arenas, fueron los presentados por SIDURT, las gráficas y los datos fueron transcritos para esta investigación.

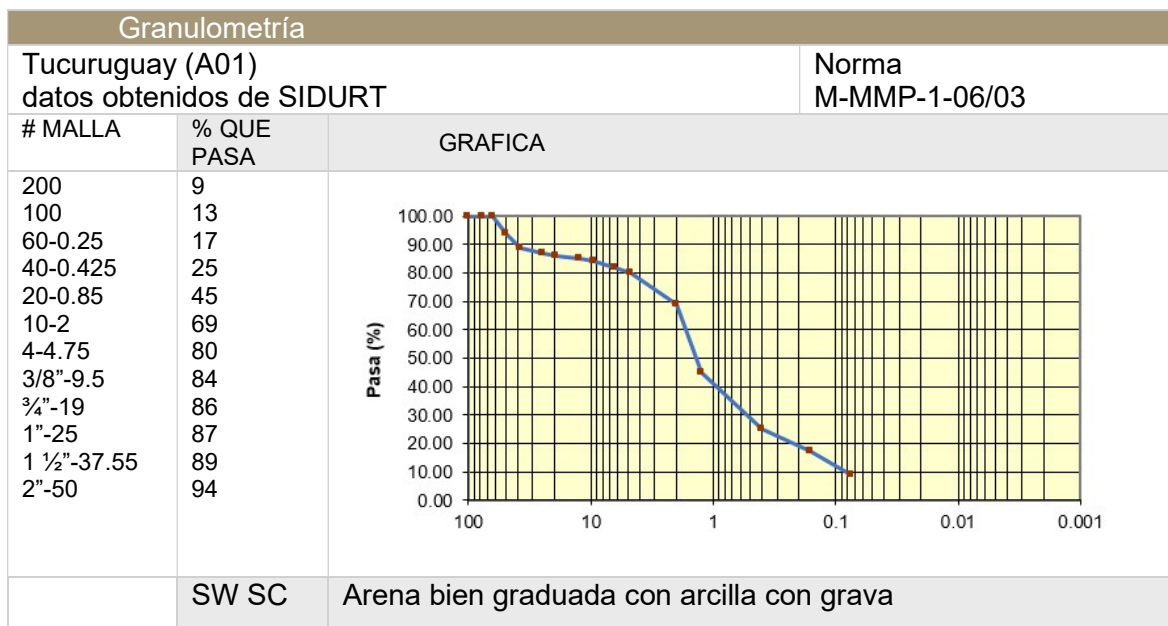
Tabla 26.**Resultados granulométricos T01**

| Granulometría | | |
|------------------------------------|------------|---|
| ARCILLA (T01) 500 g de material | | Norma M-MMP-1-06/03 |
| # MALLA | % QUE PASA | GRAFICA QUE MUESTRA MATERIAL QUE PASO MALLA |
| 10 | 100 | |
| 20 | 100 | |
| 40 | 99.91 | |
| 20 | 99.83 | |
| 200 | 96.37 | |
| | ML | Limo baja plasticidad |

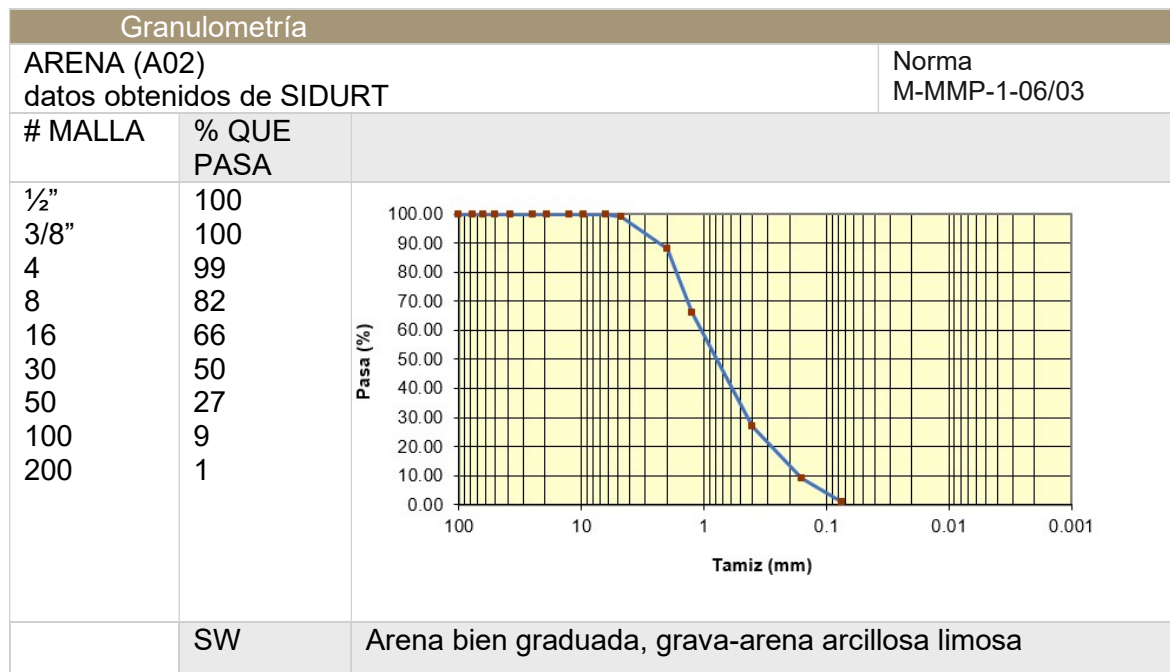
Fuente: Elaboración propia

Tabla 27.*Resultados granulométricos T02*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28.*Resultados granulométricos A01*

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de SIDURT

Tabla 29.*Resultados granulométricos A02*

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de SIDURT

Densidad en arcillas y arenas

Dentro de la tabla 30, se colocaron los datos de arcilla con la operación realizada y los datos para esta, así como la norma utilizada para ello. En la misma tabla, en la sección de densidad de arenas, se colocó el procedimiento y norma utilizada para obtener densidad en arenas. Los resultados son adimensionales, estos datos son utilizados para otras fórmulas posteriores con piezas de mampostería.

Tabla 30.

Tabla que muestra datos de la densidad relativa en sólidos

| Densidad arcilla | | SCT M-MMP-1-05/18 |
|-------------------------|---|-------------------|
| T01 | $d_s = 117.6 \text{ g} / 670.4\text{g} + 117.6\text{g} - 746.1\text{g}$ | 2.8 |
| T02 | $d_s = 254.8 \text{ g} / 670.45\text{g} + 254.8\text{g} - 832.20\text{g}$ | 2.72 |
| Densidad Relativa arena | | ASTM C-128-01 |
| A01 | $562.8 \text{ g} / (671.1\text{g} + 562.8\text{g}) - 1020.60\text{g}$ | 2.639 |
| A02 | $492.6 \text{ g} / (676.3 \text{ g} + 492.6 \text{ g}) - 981.9 \text{ g}$ | 2.634 |

Fuente: Elaboración propia

Límites de consistencia, arcillas y arenas

Esta prueba nos dio datos de plasticidad y contracción lineal, ayudan a clasificar en SUCS los suelos. Lo que se busca es tener la menor contracción y plasticidad posible, ya que estas características son perjudiciales para los muros de carga.

Tabla 31.

Resultados de límites de consistencia de sustratos

| Límites de consistencia | | | Norma M-MMP-1-04/03 | |
|-------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Suelos | Límite líquido (LL) | Límite plástico (LP) | Índice plástico (IP) | Contracción lineal (CL) |
| T01 | 47.34 | 27.56 | 19.8 | 89.85 % |
| T02 | 53.27 | 23.84 | 29.4 | 90.11 % |
| A01 | 22.7 | NP | NP | A01 NP |
| A02 | 24.7 | NP | NP | A02 NP |

Fuente: Elaboración propia

Se corrobora que ambas arcillas tienen un nulo porcentaje de arenas finas y que entre T01 y T02, sus rasgos fueron similares; sin embargo, T01 tuvo mayor porcentaje de limos, corroborándose esto con los límites de consistencia, por lo cual se consideró más apta para proseguir con esta en las siguientes fases.

Entre las arenas A01 y A02, la primera tiene mayor porcentaje de finos clasificándose como arena bien graduada con arcilla con grava, esto se determinó con la granulometría. Por lo cual, se decidió proseguir en las fases subsecuentes solo con A01, T01 y T02. Se optó seguir con T02, para comprobar si con la estabilización física mejorará su cohesión.

Prueba de compactación AASHTO estándar, en arcillas y arenas

Los valores obtenidos durante las pruebas se registraron en graficas individuales, que requieren ingresar la información de masa volumétrica y contenido de agua. Se observó durante el proceso que la arcilla es aglutinante, por lo que permanece adherida fácilmente entre sus partículas, sin embargo, la densidad más elevada se obtuvo con el A01, subsecuente la arena y al final la arcilla.

Tanto la A01 como A02, requirieron más agua para llegar a su porcentaje de humedad óptimo y obtener su mayor grado de compactación, esto sucedió debido a que se eliminó el material que no pasó la malla #40.

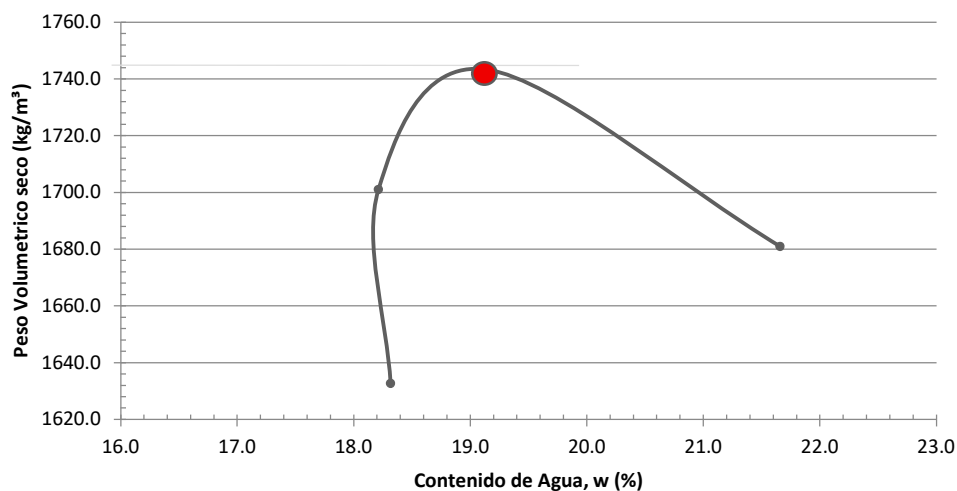
A continuación, se muestran las gráficas donde se registraron los resultados de los tres sustratos ensayados, para poder obtener el dato de la humedad óptima de cada uno de ellos.

Tabla 32.

Registro de valores de ensayo AASHTO estándar para T01

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Peso muestra húmeda y molde (g) | 3829.0 | 3903.0 | 3965.0 | 3935.0 |
| Peso del molde (g) | 2022.0 | 2022.0 | 2022.0 | 2022.0 |
| Peso de muestra humedad (g) | 1807.0 | 1881.0 | 1943.0 | 1913.0 |
| Volumen del molde (cm ³) | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Masa volumétrica húmedo (g/cm ³) | 1931.7 | 2010.8 | 2077.1 | 2045.0 |
| Masa volumétrica seco (g/cm³) | 1632.7 | 1701.1 | 1743.4 | 1681.0 |
| % de humedad | 18.3 | 18.2 | 19.1 | 21.7 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33.*Curva de compactación de T01*

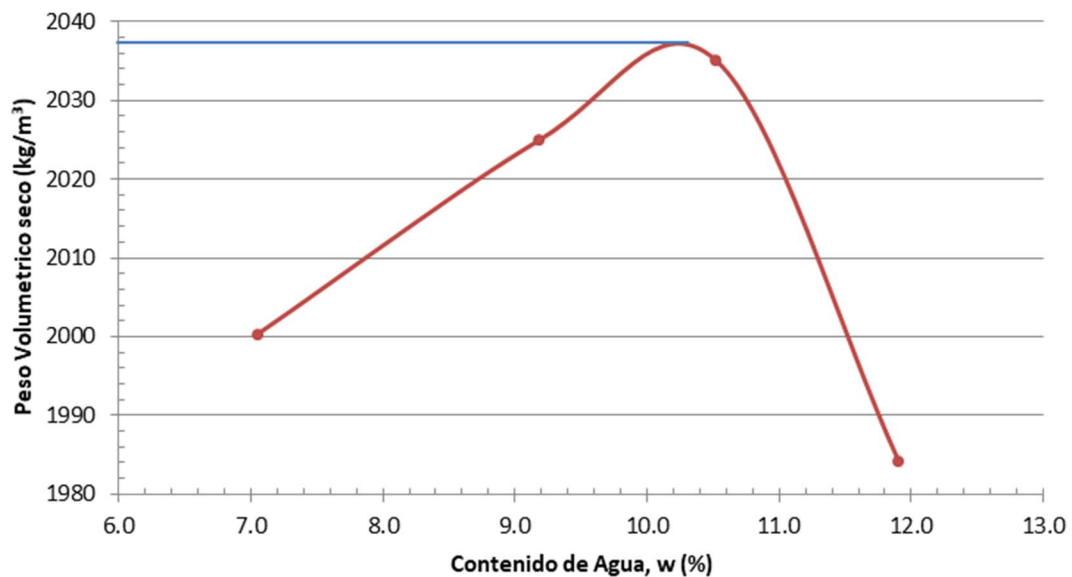
Fuente: Elaboración propia

| Resultados | |
|--------------|-------------|
| σ max | 1,742 kg/m3 |
| W opt. | 19.1% |

Tabla 34.*Registro de valores de ensayo para AASHTO estándar de A01.*

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Peso muestra húmeda y molde (g) | 4025 | 4090 | 4126 | 4099 |
| Peso del molde (g) | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 |
| Peso de muestra humedad (g) | 2003 | 2068 | 2104 | 2077 |
| Volumen del molde (cm ³) | 0.935 | 0.935 | 0.935 | 0.935 |
| Masa volumétrica húmedo (g/cm ³) | 2141 | 2211 | 2249 | 2220 |
| Masa volumétrica seco (g/cm³) | 2000 | 2025 | 2035 | 1984 |
| % de humedad | 7.0 | 9.2 | 10.5 | 11.9 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35.*Curva de compactación A01*

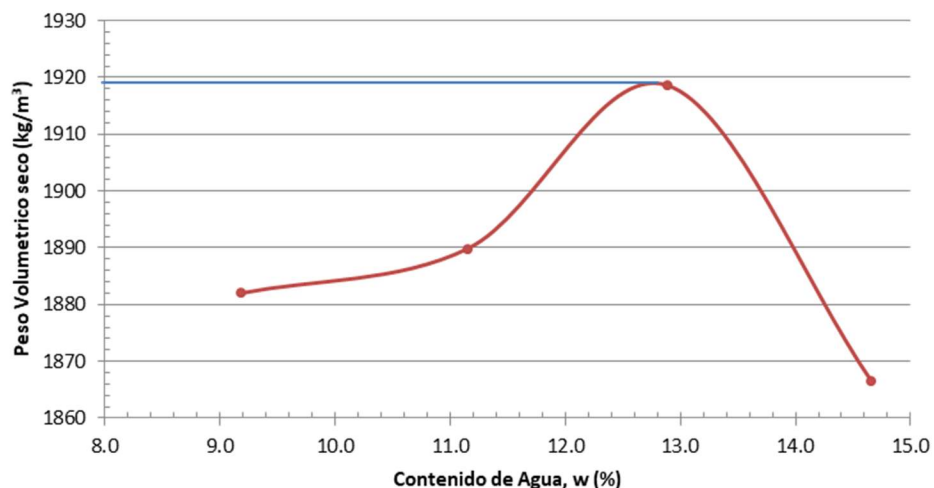
Fuente: Elaboración propia

| Resultados | |
|--------------|-------------------------|
| σ max | 2,037 kg/m ³ |
| W opt. | 10.3 % |

Tabla 36.*Registro de valores de ensayo AASHTO estándar de A02 y porcentaje de humedad.*

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Peso muestra húmeda y molde (g) | 3944 | 3987 | 4048 | 4024 |
| Peso del molde (g) | 2022 | 2022 | 2022 | 2022 |
| Peso de muestra humedad (g) | 1922 | 1965 | 2026 | 2002 |
| Volumen del molde (cm ³) | 0.935 | 0.935 | 0.935 | 0.935 |
| Masa volumétrica húmedo (g/cm ³) | 2055 | 2101 | 2166 | 2140 |
| Masa volumétrica seco (g/cm³) | 1882 | 1890 | 1919 | 1867 |
| % de humedad | 9.2 | 11.2 | 12.9 | 14.7 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37.*Curva de compactación A02*

Fuente: Elaboración propia

| Resultados | |
|--------------|-------------------------|
| σ max | 1,919 kg/m ³ |
| W opt. | 12.8 % |

Prueba de espectroscopia de Rayos X (EDX)

En las siguientes tablas se muestran los resultados de los sustratos T01, A01 y A02 a los cuales se les realizó la espectroscopia de rayos X. Tales resultados son meramente descriptivos ya que serán utilizados en estudios posteriores de esta investigación. Esta información ayudará a determinar qué elementos interfieren en procesos de investigación.

Tabla 38.*Elementos más representativos en T01*

| Analito | Resultado | | Desv.Est. | Proc.Calc. |
|---------|-----------|---|-----------|------------|
| Si | 41.097 | % | [0.602] | Quan-FP |
| Ca | 22.778 | % | [0.107] | Quan-FP |
| Fe | 14.606 | % | [0.063] | Quan-FP |
| Al | 11.889 | % | [0.618] | Quan-FP |
| K | 6.037 | % | [0.061] | Quan-FP |
| Ti | 1.651 | % | [0.036] | Quan-FP |
| S | 1.220 | % | [0.069] | Quan-FP |
| Mn | 0.290 | % | [0.013] | Quan-FP |
| Sr | 0.168 | % | [0.004] | Quan-FP |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos realizados en el Instituto de Ingeniería

Tabla 39.*Óxidos más representativos de T01*

| Analito | Resultado | | Desv.Est. | Proc.Calc. |
|--------------------------------|-----------|---|-----------|------------|
| SiO ₂ | 49.889 | % | [0.987] | Quan-FP |
| Al ₂ O ₃ | 28.017 | % | [12.191] | Quan-FP |
| K ₂ O | 9.174 | % | [0.118] | Quan-FP |
| CaO | 6.532 | % | [0.037] | Quan-FP |
| Fe ₂ O ₃ | 5.571 | % | [0.017] | Quan-FP |
| TiO ₂ | 0.491 | % | [0.008] | Quan-FP |
| SO ₃ | 0.138 | % | [0.015] | Quan-FP |
| MnO | 0.094 | % | [0.005] | Quan-FP |
| SrO | 0.023 | % | [0.001] | Quan-FP |
| V ₂ O ₅ | 0.023 | % | [0.007] | Quan-FP |
| ZrO ₂ | 0.013 | % | [0.001] | Quan-FP |
| Cr ₂ O ₃ | 0.012 | % | [0.004] | Quan-FP |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos realizados en el Instituto de Ingeniería

Tabla 40.*Tabla de los elementos más representativos en A01*

| Analito | Resultado | | Desv.Est. | Proc.Calc. |
|---------|-----------|---|-----------|------------|
| g | 52.216 | % | [0.699] | Quan-FP |
| Ca | 13.783 | % | [0.088] | Quan-FP |
| Al | 11.969 | % | [0.605] | Quan-FP |
| Fe | 11.393 | % | [0.067] | Quan-FP |
| K | 7.259 | % | [0.073] | Quan-FP |
| Ti | 1.581 | % | [0.041] | Quan-FP |
| S | 0.802 | % | [0.074] | Quan-FP |
| Sr | 0.380 | % | [0.004] | Quan-FP |
| Mn | 0.238 | % | [0.016] | Quan-FP |
| Zr | 0.107 | % | [0.005] | Quan-FP |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos realizados en el Instituto de Ingeniería

Tabla 41.*Óxidos más representativos en A01*

| Analito | Resultado | | Desv.Est. | Proc.Calc. |
|--------------------------------|-----------|---|-----------|------------|
| SiO ₂ | 68.806 | % | [1.328] | Quan-FP |
| K ₂ O | 16.183 | % | [0.219] | Quan-FP |
| Fe ₂ O ₃ | 7.167 | % | [0.030] | Quan-FP |
| CaO | 6.629 | % | [0.055] | Quan-FP |
| TiO ₂ | 0.734 | % | [0.013] | Quan-FP |
| MnO | 0.132 | % | [0.006] | Quan-FP |
| SO ₃ | 0.103 | % | [0.021] | Quan-FP |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos realizados en el Instituto de Ingeniería

Tabla 42.*Elementos más representativos en A02*

| Analito | Resultado | | Desv.Est. | Proc.Calc. |
|---------|-----------|---|-----------|------------|
| Si | 48.341 | % | [0.645] | Quan-FP |
| Ca | 17.633 | % | [0.095] | Quan-FP |
| Fe | 12.777 | % | [0.062] | Quan-FP |
| Al | 10.913 | % | [0.538] | Quan-FP |
| K | 7.214 | % | [0.068] | Quan-FP |
| Ti | 1.903 | % | [0.040] | Quan-FP |
| Mn | 0.283 | % | [0.014] | Quan-FP |
| Sr | 0.261 | % | [0.003] | Quan-FP |
| S | 0.215 | % | [0.053] | Quan-FP |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos realizados en el Instituto de Ingeniería

Tabla 43.*Óxidos más representativos en A02*

| Analito | Resultado | | Desv.Est. | Proc.Calc. |
|--------------------------------|-----------|---|-----------|------------|
| SiO ₂ | 66.000 | % | [1.251] | Quan-FP |
| K ₂ O | 15.479 | % | [0.197] | Quan-FP |
| Fe ₂ O ₃ | 9.050 | % | [0.031] | Quan-FP |
| CaO | 8.168 | % | [0.056] | Quan-FP |
| TiO ₂ | 0.975 | % | [0.015] | Quan-FP |
| MnO | 0.170 | % | [0.006] | Quan-FP |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos realizados en el Instituto de Ingeniería

Como discusión de los resultados de esta fase se determinó que Y01, al estar clasificada como limo de baja plasticidad y T02 arcilla de alta plasticidad, percibiéndose que T02 tiende a retener mayor cantidad de agua, se inclinó la selección a T01, confirmándose con los límites de Atterberg, que determinaron que el límite líquido y el límite plástico eran mayores en T02 que en T01. Con lo anterior se determinó que T02 sería descartada.

Sobre A01 y A02, de acuerdo a su granulometría se determinó que las partículas en A01 contienen limos y arcillas, favoreciendo con esto la compactación del suelo; a pesar de tal dato y saber que la partícula de arena era redondeada, sin ángulos afilados y con menor cantidad de arcilla y limos, y mayor cantidad de grava, se decidió usar como estabilizante esta mezcla junto con A01, con el fin de determinar su reacción en las probetas.

Sobre los datos de densidad, en esta etapa de la investigación fueron informativos, ya que este dato es utilizado para otros ensayos que no se aplicaron en esta investigación, ya que la densidad obtenida en esta fase fue la densidad relativa, la cual es adimensional.

La prueba de compactación AASHTO, fue determinante en conocer el contenido de humedad óptimo de los sustratos y conocer el grado de compactación. Con este ensayo se corroboró que T01 requirió un mayor porcentaje de humedad, para lograr su mayor grado de compactación que A01 y A02; así mismo, se conoció su masa volumétrica seca máxima y húmeda. Esto ayuda a correlacionar los datos de la fabricación de mampuestos en campo, si se obtiene su mayor grado de compactación que en laboratorio.

Por lo anterior, se prosiguió a la siguiente fase con los suelos T01, como base para las mezclas, donde A01 y A02, se consideraron como agentes estabilizadores.

Resultados fase 2, caracterización con estabilización física

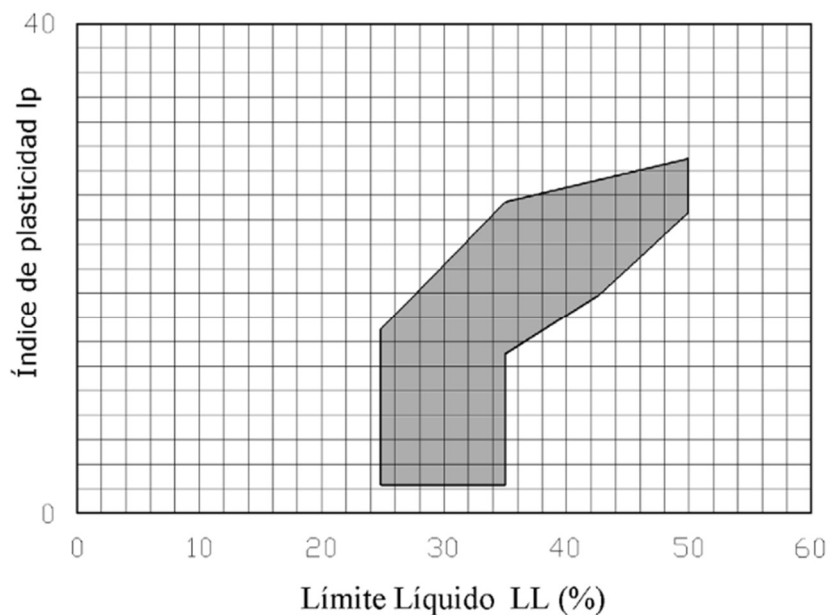
En esta sección se desglosan los resultados que sirvieron para descartar mezclas menos optimas a los objetivos planteados, y nos ayudó a corroborar el resultado del comportamiento de un suelo estabilizado físicamente.

Límites de consistencia

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de límites de Atterberg realizadas con la estabilización física. Estas pruebas proporcionaron datos sobre el límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y contracción lineal de las muestras. De acuerdo con la norma española UNE 41410 (AENOR, 2008) se recomienda que los valores se encuentren en la franja sombreada de la Figura 94. Estos parámetros sirvieron para descartar ciertas mezclas y avanzar hacia las siguientes fases del estudio.

Figura 94.

Zona recomendada de límite líquido e índice plástico por la norma UNE 41410



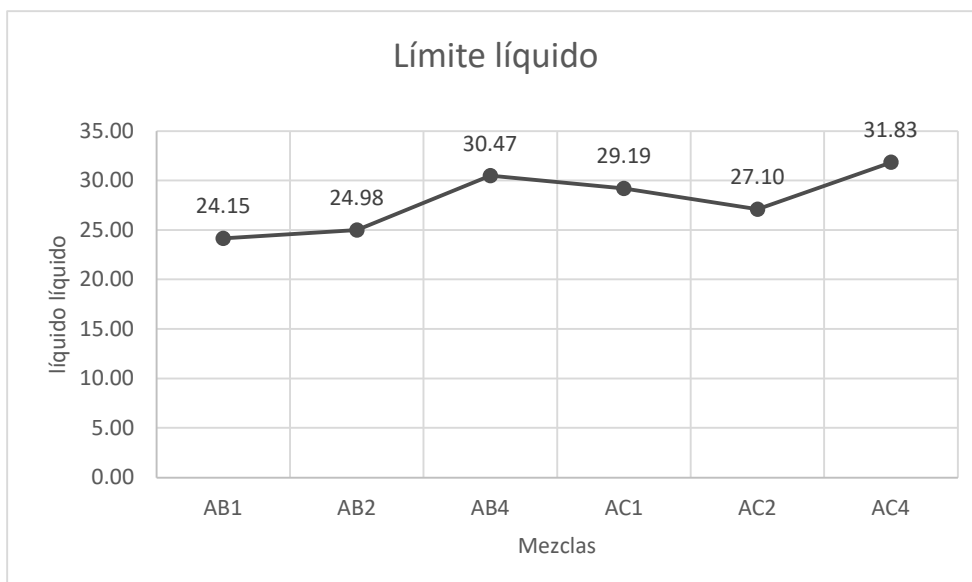
Fuente: UNE 41410

En esta etapa, se observó que la muestra A02, debido al tamaño de su grano, limitaba la posibilidad de cohesión del material, lo que llevó a su descarte. Asimismo, se identificó que, a medida que las mezclas contenían menos partículas finas, como la arcilla, y un mayor porcentaje de partículas gruesas (como las arenas), la mezcla se volvía menos manejable en probetas pequeñas. Sin embargo, este comportamiento no representa una limitante para las piezas de mampostería, ya que el tamaño de las mismas y las condiciones de curado permiten mayor flexibilidad en su manejo.

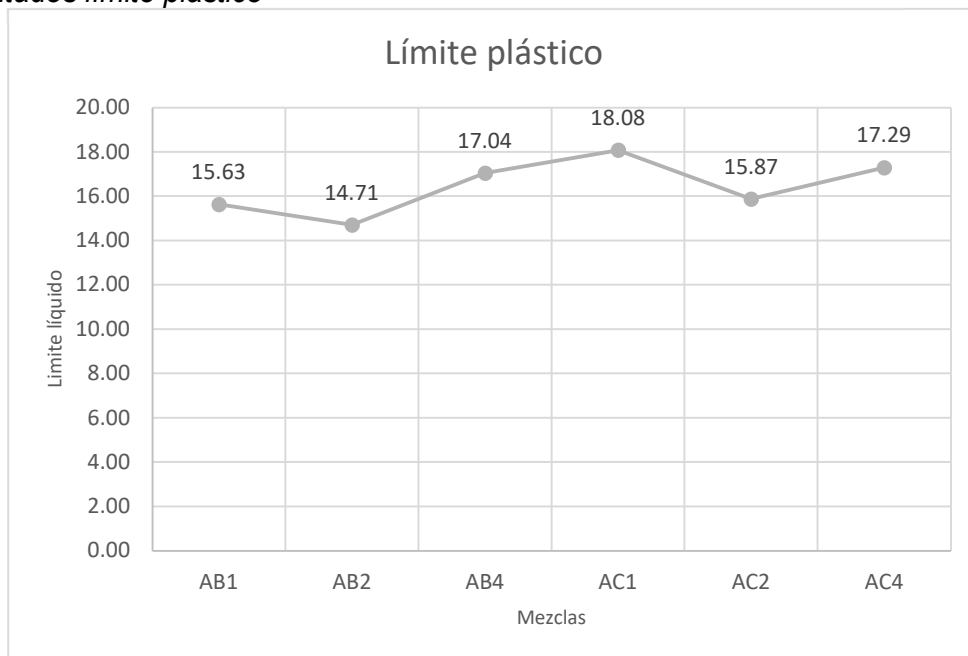
A continuación de la Tabla 44 a la Tabla 47, se muestran los datos obtenidos con los ensayos de límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y contracción lineal de las seis mezclas ensayadas.

Tabla 44.

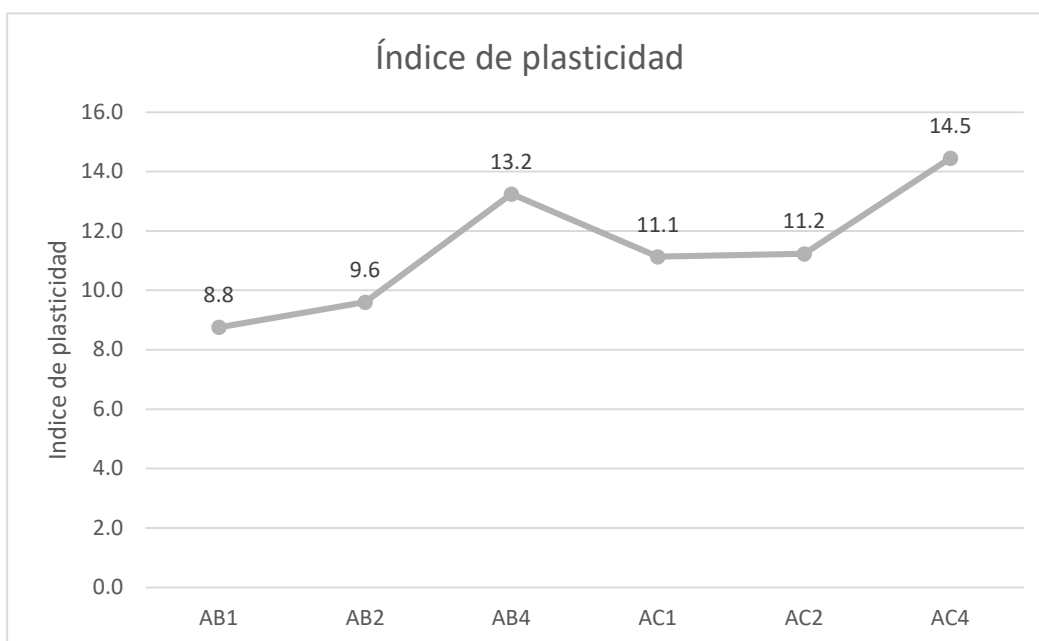
Resultados límite líquido



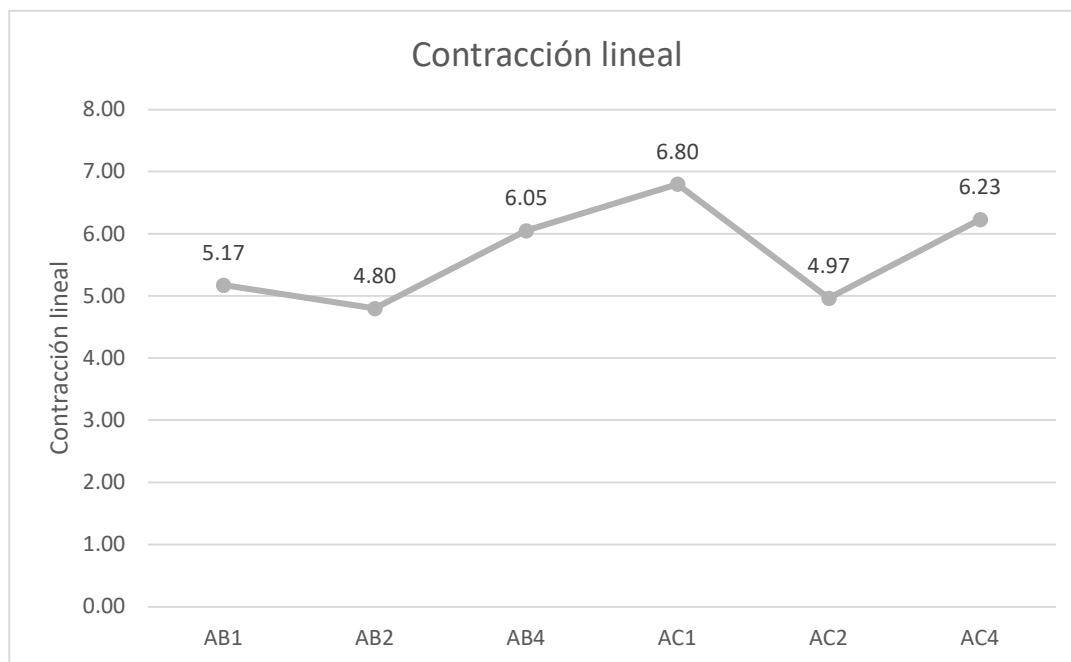
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45.*Resultados límite plástico*

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46.*Resultados de índice de plasticidad*

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47.*Resultados de contracción lineal*

Fuente: Elaboración propia.

Resistencia a la compresión en suelos cohesivos no confinados

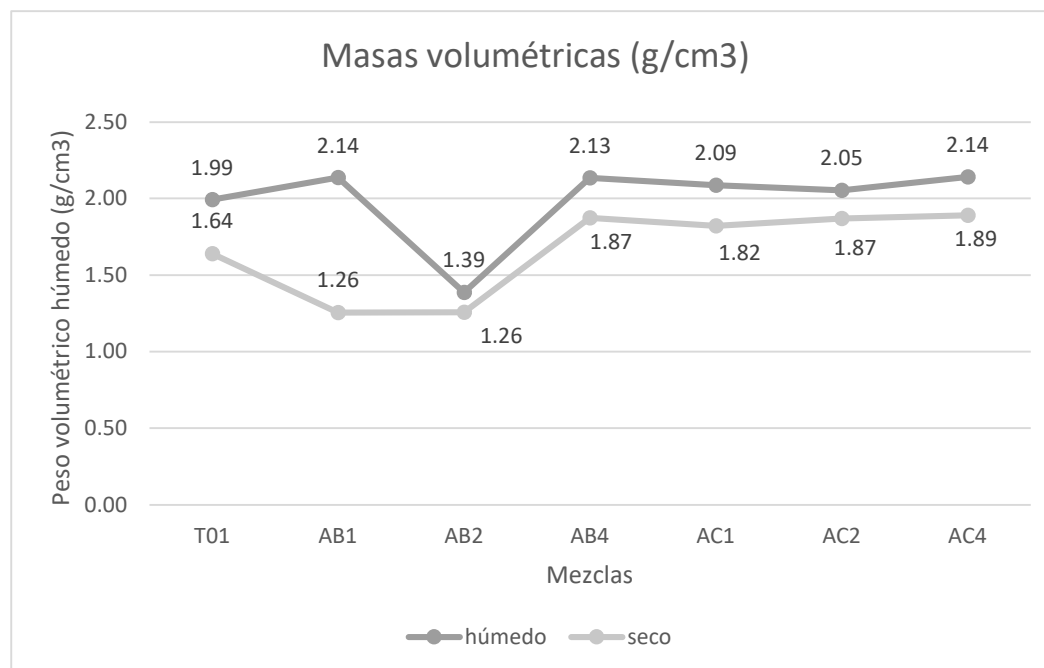
Este ensayo, llevado a cabo conforme al procedimiento descrito en la norma D 2166 – 00 (ASTM, 2000), permitió obtener datos fundamentales para el análisis de las probetas. Entre los parámetros medidos se incluyeron: masa volumétrica húmeda, esfuerzo desviador (capacidad de carga) y la deformación unitaria de cada muestra.

Todos los valores obtenidos se registraron en una tabla diseñada específicamente para este análisis, basada en los datos proporcionados por las pruebas triaxiales realizadas en el laboratorio de ingeniería bajo la supervisión del profesor Cota. Un ejemplo del formato utilizado donde se detallaron los resultados puede consultarse en el Apéndice B.

De la Tabla 48 a la 50, se muestran los hallazgos del ensayo en esta fase.

Tabla 48.

Pesos volumétricos húmedos y secos con estabilización física

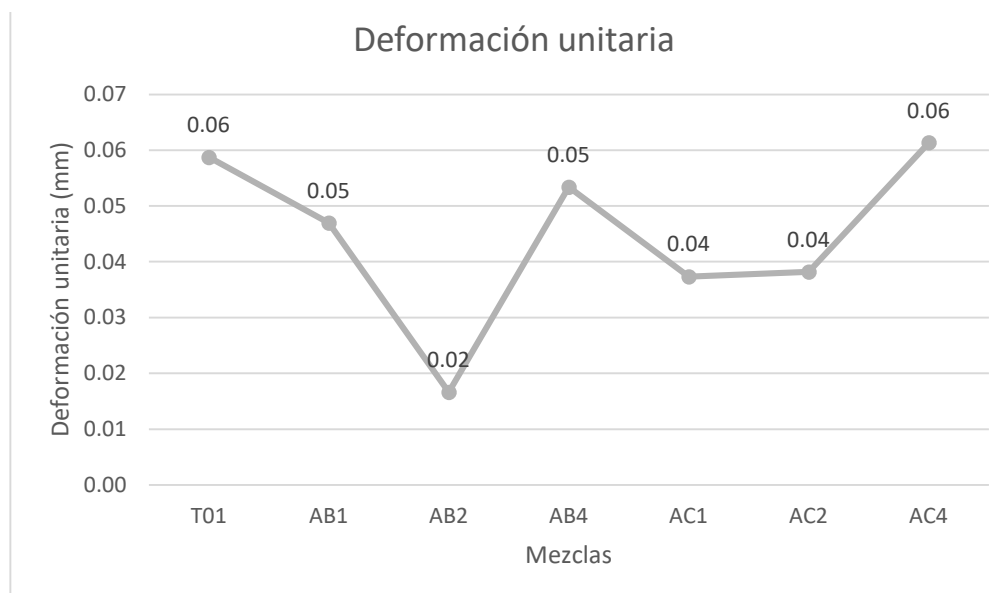


Fuente: Elaboración propia.

La deformación unitaria se obtiene dividiendo la deformación total entre la altura del espécimen. Y el esfuerzo desviador es la carga aplicada en kPa sobre el área promedio de la sección transversal correspondiente en mm².

Tabla 49.

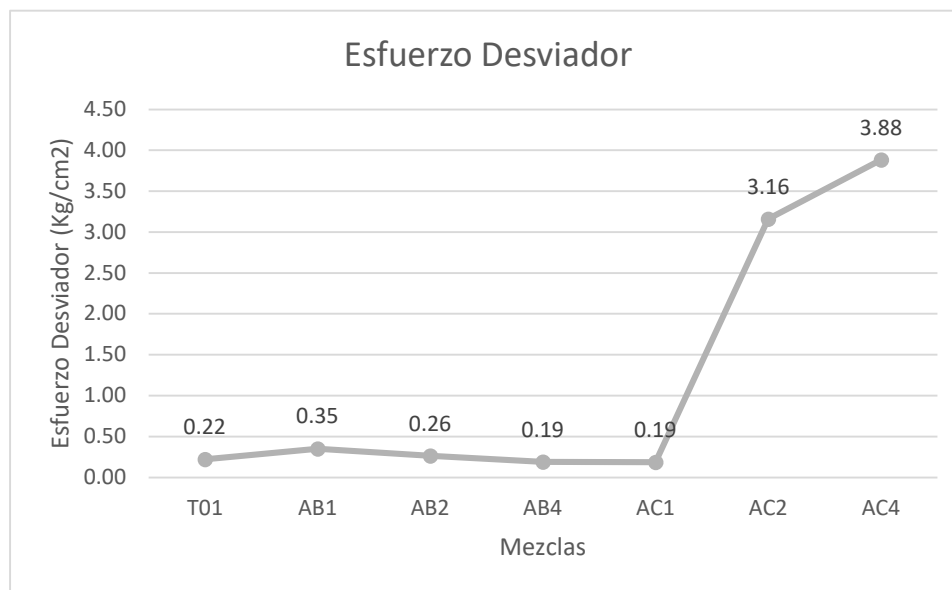
Deformación unitaria en especímenes con estabilización física



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50.

Gráfica de esfuerzo desviador en especímenes con estabilización física



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos en fase 2, con la estabilización física se notaron buenos logros en las modificaciones de los límites de Attemberg, donde las muestras AB4 y AC4, las cuales contienen un mayor porcentaje de arcilla, tuvieron valores más elevados en límite líquido e índice plasticidad, se consideró que esta mezcla no sería conveniente para fase 3, ya que demanda mayor cantidad de humedad.

La muestra AB2, en la gráfica marco una menor deformación y pesos volumétricos, esto se debió a que durante el ensayo y la manipulación de las probetas, una de estas se desbarato y solo se ensayaron dos. Por lo cual en probetas AB2 y AC2, la cohesión era menor. Así mismo, la contracción lineal más elevada se presentó en las muestras AC1 y AC4, por lo que se determino que A02, no sería la opción idónea para pasar a la estabilización química de fase 3.

Si bien, las probetas AC2 y AC4, fueron las que tuvieron mayor esfuerzo desviador, estas fueron ensayadas 3 meses después de su fabricación, por lo que se considera que el tiempo de curado envueltas en el plástico adherible modifico su nivel de humedad, favoreciendo su esfuerzo sobre las otras, estas probetas fueron las únicas que presentaron esta situación.

Por lo tanto, en favor de la cohesión, trabajabilidad y menores modificaciones plásticas, se selecciono T01 y a A01 como el sustrato base para ser estabilizado químicamente en fase 3.

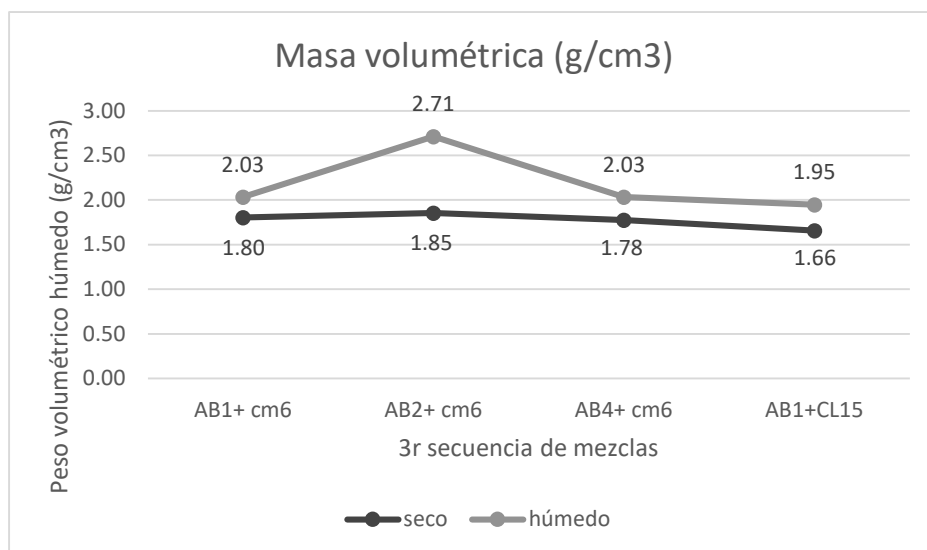
Resultados Fase 3,

Resistencia a la compresión en suelos cohesivos no confinados

De acuerdo al único ensayo aplicado en esta fase, donde las probetas contaban con estabilización química, de la Tabla 50 a la 53, se muestran los resultados obtenidos. Aquí se pueden observar como influyo la estabilización química a los sustratos.

Tabla 51.

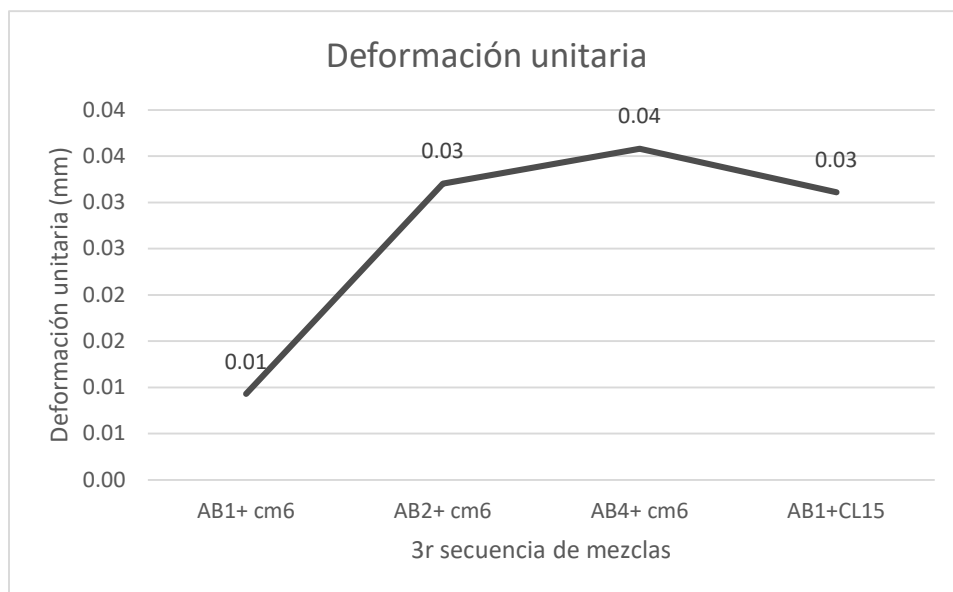
Masa volumétrica seca y húmeda de segunda secuencia de mezclas.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 52.

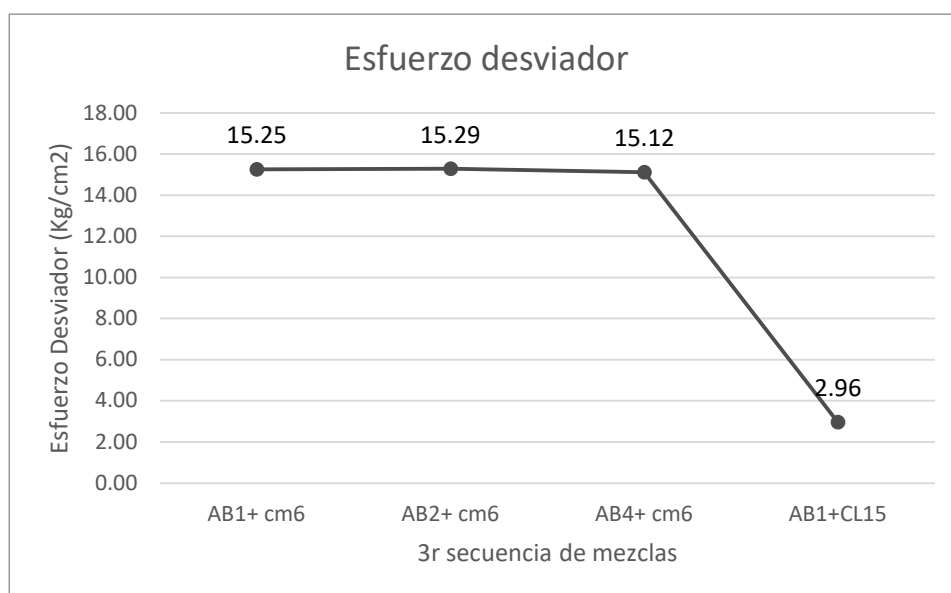
Gráfico de deformación unitaria, de segunda secuencia de mezclas.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 53.

Gráfico de capacidad de carga en segunda secuencia de mezcla



Fuente: Elaboración propia.

Las tablas anteriores mostraron que los pesos volumétricos aumentaron, pero no fue un factor determinante para ningún ensayo posterior, solo como dato de referencia y correlación en caso de tener dudas durante la fabricación de los mampuestos.

La deformación unitaria disminuyó, lo que sugiere que hubo un aumento en la capacidad de esfuerzo de las probetas, comprobado con los resultados del esfuerzo desviador que tuvieron las probetas un aumento del 45% aproximadamente en las probetas AB1 + cm6, AB2 + cm6 y AB4 + cm6.

Por otro lado, la probeta AB1+CL15, la cual fue estabilizada solo con cal, solo aumento un 8.4% comparado con las probetas con estabilización física.

Con todo lo anterior, se determina que el incremento de esfuerzos de las probetas y la disminución de la deformación, hicieron considerar favorable la estabilización química, en lo particular la adición del 6% de cemento dio mejores respuestas en esta fase que la estabilización con el 15% de cal. Sin embargo, se optó realizar experimentos en fase 4, con ambos estabilizadores, y con mezcla base a AB1, por el menor grado de deformación y mejor consistencia de la mezcla.

Resultados fase 4,

Estos resultados recaen sobre los mampuestos en escala 1:1, que se realizaron con las distintas dosificaciones. Aquí se obtuvo la información neta del comportamiento del mampuesto con la forma y dimensiones al cual, se llevarían a cabo en una construcción.

Prueba de compresión

Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores que nos indica la norma Mampostería – Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones para uso Estructural NMX-C-404-ONNCCE-2012, que debe ser igual o mayor a 70 kg/cm², cuya absorción no debe exceder el 19%, así como una contracción por secado que debe ser menor o igual a 0,065 %.

Para esta fase se aplicarán los siguientes ensayos: Resistencia a la Compresión de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones y Adoquines NMX-C-036-ONNCCE 2013 y Absorción la NMX-C-037-ONNCCE-2013.

Previo a la ejecución de la prueba, se tomaron las dimensiones de los especímenes las cuales se registraron en la Tabla 54.

Tabla 54.

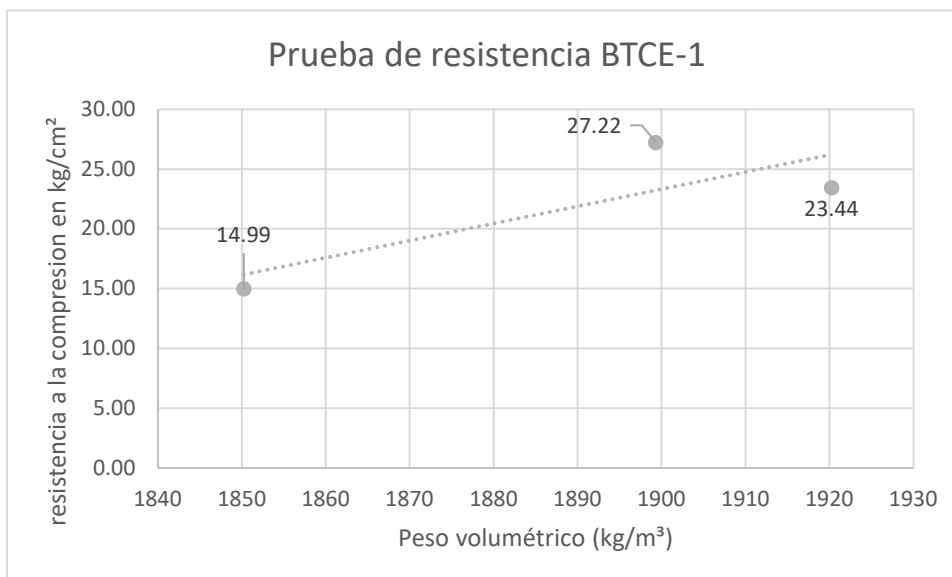
Valores promediados de los BTCE, fabricados para ensayos de compresión

| Espécimen | Largo | Ancho | Alto | Ø celda | Peso g | Masa volumétrica (kg/m ³) |
|-----------|------------|-------|------|---------|---------|---------------------------------------|
| BTCE-1 | 29.67 | 15.21 | 7.84 | 7.13 | 5509 | 1889.94 |
| BTCE-2 | 29.89 | 15.26 | 7.70 | 6.92 | 4822.33 | 1644.42 |
| BTCE-3 | 29.81 | 15.25 | 7.65 | 7.07 | 4926.33 | 1710.70 |
| BTCE-4 | Descartada | | | | | |
| BTCE-5 | 29.71 | 15.21 | 7.63 | 7.22 | 4850 | 1714.85 |
| BTCE-5* | 29.78 | 15.12 | 7.56 | 7.09 | 5100 | 1816.88 |
| BTCE-6 | 29.83 | 15.11 | 7.51 | 7.215 | 3851.83 | 1389.56 |

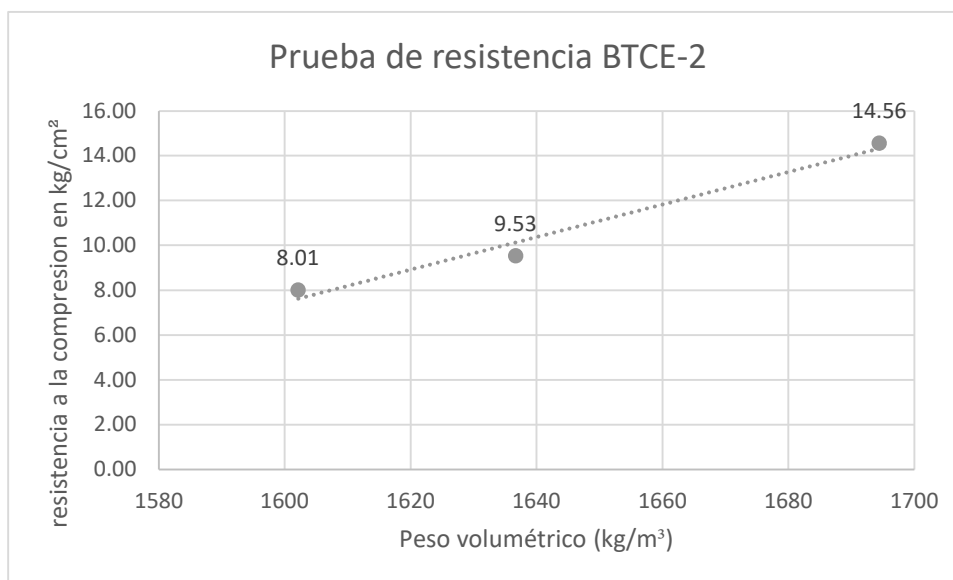
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran los gráficos de la Tabla 55 a la Tabla 60, con los datos obtenidos por cada espécimen ensayado y sus tres probetas, con el fin de visualizar la desviación estándar de los mampuestos; ya que, al ser un procedimiento de fabricación artesanal, es complicado tener un control de las variables, tanto de fuerza de compactación y humedad óptima constante. Sin embargo, los datos muestran que los resultados fueron suficientemente uniformes.

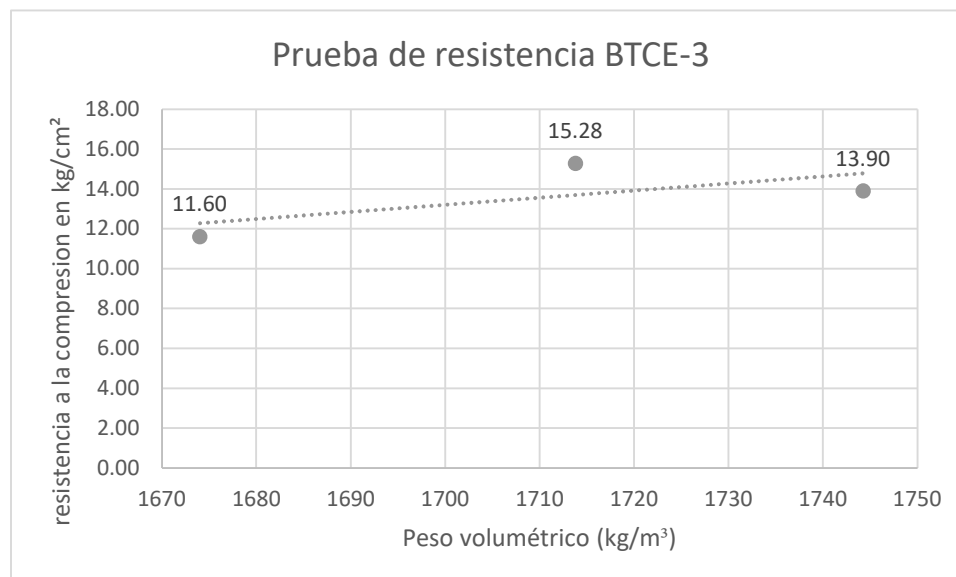
En la Tabla 61, se representa la media de todos los mampuestos y se compararon entre sí, para una mejor comprensión de los datos de resistencia entre todas las mezclas realizadas.

Tabla 55.*Valores de las tres probetas de BTCE-1*

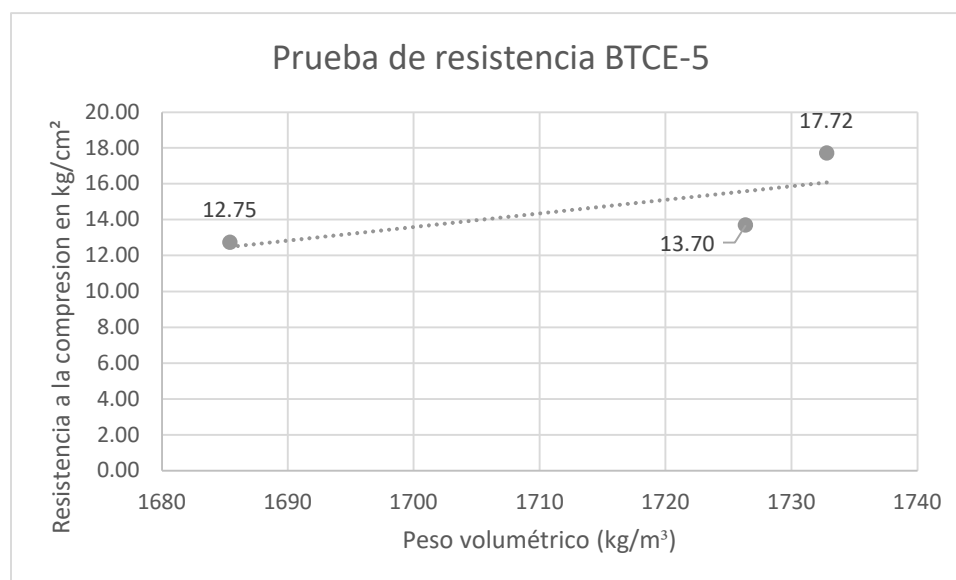
Fuente: Elaboración propia

Tabla 56.*Valores de las tres probetas de BTCE-2*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 57.*Valores de las tres probetas de BTCE-3*

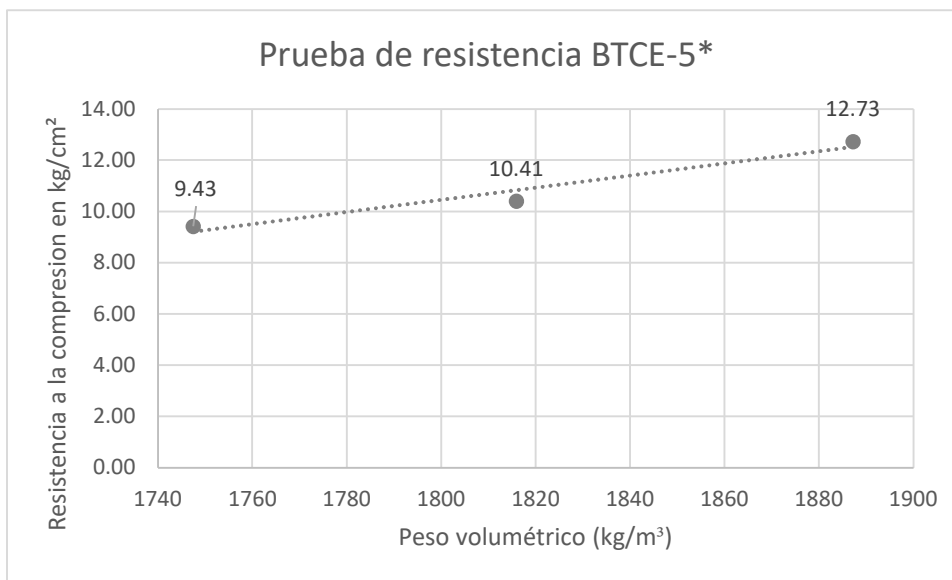
Fuente: Elaboración propia

Tabla 58.*Valores de las tres probetas de BTCE-5*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59.

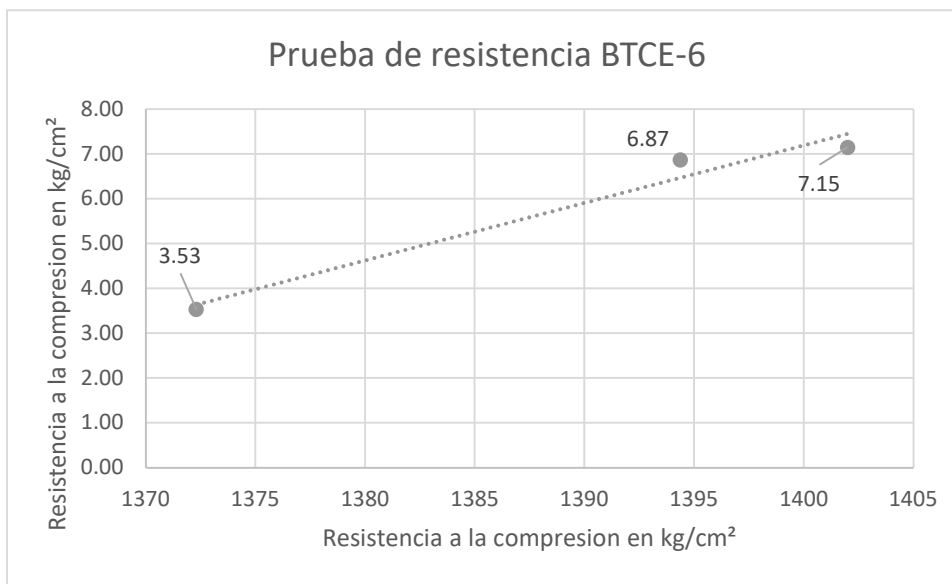
Valores de las tres probetas de BTCE-5*



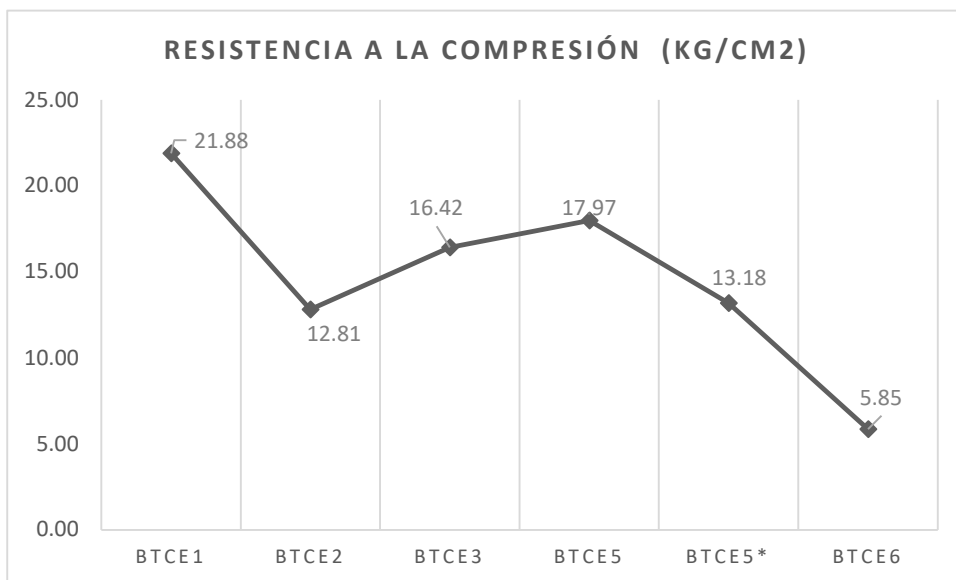
Fuente: Elaboración propia

Tabla 60.

Valores de las tres probetas de BTCE-6



Fuente: Elaboración propia

Tabla 61.*Comparativo de las siete mezclas ensavadas*

Fuente: Elaboración propia

Esta última tabla presenta las distintas resistencias obtenidas en los mampuestos. A diferencia de lo observado en fase 3; donde, se registró un incremento de hasta un 45 % en el esfuerzo desviador en las probetas estabilizadas químicamente en comparación con las estabilizadas físicamente, en esta ocasión el resultado fue lo opuesto.

Las piezas con estabilización química mostraron una menor resistencia a la compresión que aquellas estabilizadas físicamente. Este comportamiento se atribuye a las condiciones de humedad presentes durante el ensayo, ya que los mampuestos, no contaban con la humedad que presentaron las probetas en los ensayos de fase 2 y 3, las cuales se encuentran en estado húmedo.

Esto altero su desempeño de los dos agentes químicos utilizados. Esto indicó que estos suelos no deben tener estabilización química, porque descomponen la estructura molecular de los sustratos.

Tabla 64.

Fórmula y resultados de absorción total.

| Absorción total después de 24 horas | | |
|---|--|---------|
| Fórmula | | |
| $A = (M_{sss} - M_s / M_{ss} - M_a) \times 1000$ | | |
| Donde: | | |
| A = volumen de agua absorbida referido al volumen aparente del espécimen en dm^3/m^3 | | |
| M _s = masa seca del espécimen en g | | |
| M _{sss} = masa saturada y superficialmente seca en g | | |
| M _a = masa del espécimen sumergido en agua en g | | |
| 1000 = masa específica del agua (g/l) que se usa como factor para representar el resultado de absorción en términos de dm^3/m^3 que equivale a litros por m^3 | | |
| Fórmula absorción en porcentaje | | |
| $A = (M_{sss} - M_s / M_s) \times 100$ | | |
| Donde: | | |
| A = es absorción en % (en masa) | | |
| BTCE2 | Imposibilidad de manipulación | nula |
| | Imposibilidad de manipulación | nula |
| BTCE3 | Volumen de agua absorbida referido al volumen aparente del espécimen en dm^3/m^3 | 289.58 |
| | Absorción en porcentaje | 17.90 % |
| BTCE5 | Imposibilidad de manipulación | nula |
| | Imposibilidad de manipulación | nula |
| BTCE6 | Imposibilidad de manipulación | nula |
| | Imposibilidad de manipulación | nula |

NMX-C-037-
ONNCCE-2013

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar, se llevó a cabo este ensayo, con el objetivo de comprobar lo que previamente se observaba de manera visual: los mampuestos no podían ser expuestos a humedad directa sin comprometer su integridad estructural, ya que presentaban signos evidentes de desintegración. No obstante, con el fin de contar con datos cuantitativos que permitan realizar correlaciones futuras con otros tipos de sustratos y estabilizantes, se procedió a aplicar los ensayos de absorción por capilaridad y absorción total.

Tal como se muestra en las tablas, los coeficientes de absorción superaron el 20 % establecido por la norma NMX-C-037-ONNCCE-1986, lo que evidencia una alta porosidad e inestabilidad frente al agua. Cabe destacar que solo un espécimen pudo ser manipulado sin

colapsar durante el ensayo de absorción total, lo que refuerza la necesidad de mejorar la fórmula de los estabilizantes para lograr este fin.

Capítulo VII

Conclusiones

Este estudio evaluó la viabilidad técnica de producir Bloques de Tierra Comprimida Estabilizada (BTCE) con sustratos locales de Mexicali, con el objetivo de impulsar soluciones constructivas sustentables, accesibles y reproducibles en contextos de autoconstrucción. A través de una metodología experimental dividida en cuatro fases, se caracterizaron las propiedades físico-químicas de arcillas y arenas locales, se aplicaron tratamientos de estabilización física y química, y se realizaron ensayos de resistencia a compresión conforme a las normas mexicanas NMX-C-404-ONNCCE-2012 y NMX-C-036-ONNCCE-2013.

Los resultados confirman que es técnicamente factible fabricar BTCE con materiales locales. Sin embargo, bajo las condiciones evaluadas, los bloques no alcanzaron los valores mínimos de resistencia requeridos por la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012 para muros estructurales de carga, con ello se invalida parcialmente la hipótesis inicial.

No obstante, se obtuvieron mejoras mecánicas significativas mediante estabilización física, mientras que los resultados con estabilización química fueron desfavorables. Por tanto, los BTCE muestran potencial como solución viable para muros divisorios no estructurales, en cumplimiento con la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013, particularmente en entornos de autoconstrucción y vivienda social sustentable.

La fabricación de prototipos a escala real, mediante una prensa manual diseñada en esta investigación, demostró que el proceso es reproducible, económicamente factible y no requiere mano de obra especializada, aunque sí demanda un alto esfuerzo físico.

Del análisis de las fases experimentales se concluye lo siguiente: 1) fase 1: Se seleccionó la arcilla T01 por su mayor proporción de limos y mejores características granulométricas. 2) Fase 2: Se descartaron probetas con baja cohesión y la mezcla A02, que

no superó los ensayos ASTM D-2166. 3) Fase 3: Los ensayos en laboratorio fueron prometedores, pero en campo, la pérdida acelerada de humedad redujo significativamente la resistencia mecánica. Este tipo de ensayo no es adecuado para validar el comportamiento final del mampuesto. 4) fase 4: Se identificaron limitaciones operativas derivadas de la alta viscosidad de la arcilla, la rápida deshidratación del cemento, y la carga física del proceso. Mezclas de 70 kg resultaron excesivas para los operarios. La homogeneización y el control de humedad son críticos, ya que la arcilla absorbe agua rápidamente, donde interfiere con la compactación. Se concluye que la composición mineralógica de las arcillas locales no es compatible con estabilizantes químicos convencionales como la cal y el cemento.

En campo, el proceso de fabricación enfrenta limitaciones climáticas: temperaturas mayores a 37 °C aceleran la deshidratación, esto tiende a afectar la calidad del producto. Se recomienda evitar la producción bajo exposición directa al sol, y realizar el curado sobre superficies rígidas, en sombra y con cobertura vegetal para garantizar un secado gradual.

Los hallazgos de este estudio sientan una base sólida para futuras investigaciones enfocadas en tres líneas clave: 1) Identificación de nuevos agentes estabilizantes compatibles con la química de las arcillas locales. 2) Optimización del equipo de fabricación para mejorar la ergonomía y eficiencia del proceso. 3) Estandarización de métodos constructivos in situ, que permitan escalar esta tecnología hacia modelos replicables de vivienda sustentable y accesible en regiones áridas como Mexicali.

Anexo

Anexo A.

Datos complementarios de Tabla 2, de propiedades de térmicas de los bloques de tierra comprimida de otras investigaciones

| Material | Conductividad Térmica (W/m°C) | Densidad | País | Autor |
|--------------|-------------------------------|-----------|-----------|--------------------------------|
| BTCE | 0.79-0.93 | 1625-2200 | varios | (Cutiño et al., 2020) |
| BTCE | 0.93 | 1750 | Australia | (Heathcote, 2011) |
| BTCE | 0.81-0.93 | 1700 | India | (Bestraten et al., 2011b) |
| Barro macizo | 0.4-1.2 | 1000-1900 | Alemania | (Gernot Minke, 2005) |
| BTC | 1.79 | - | Varios | (Cuitiño-Rosales et al., 2020) |
| BTC | 2.84-1.84 | - | Varios | (Cuitiño-Rosales et al., 2020) |

Fuente: Elaboración propia

Anexo B.

Datos complementarios de Tabla 3, sobre características de resistencia a la compresión de los bloques de tierra comprimida, por otras investigaciones.

| Material | Resistencia Compresión Simple (kg/cm ²) | Densidad | País | Autor |
|---------------------|---|-----------|---------------------|---|
| BTCE | 40 -76 | 1625-2200 | varios | (Cutíño et al., 2020) |
| BTCE | 40.92 | 1500-200 | México | (GOPA INFRA, 1979) |
| BTCE | 50.98 | 1700 | India | (Bestraten et al., 2011b) |
| Barro macizo | 40.78 | - | México | (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012a) |
| BTCE | 20.39 | - | México | (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012b) |
| BTC | 21.41 | - | Ecuador | (Neves et al., 2017) |
| BTC con 5% cemento | 29.74 | - | Ecuador | (Neves et al., 2017) |
| BTC con 10% cemento | 32.63 | - | Ecuador | (Neves et al., 2017) |
| BTC con 10% cemento | 55.06 | - | Ecuador | (Neves et al., 2017) |
| Adobe con paja | 14.07 | 1679 | España | (Rodríguez-Mariscal & Solís, 2020) |
| BTC | 10.197 | 1700 | - | (Bestraten et al., 2011a) |
| BTC | 20.39 | - | Tamaulipas - México | (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012b) |
| BTCE | 10..8 | - | Tamaulipas- México | (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012b) |
| BTCE | 61.99 | - | Argentina | (Cabrera, González, et al., 2020) |

Fuente: Elaboración propia

Anexo C.

Figura del diseño de tabla elaborado por Roux

| | | Orientación | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------|----------------------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|-----|
| | | Norte | | Sur | | Este | | Oeste | | Noreste | | Noroeste | | Sureste | | Suroeste | | |
| | | Fibra coco | Sin fibra coco | Fibra coco | Sin fibra coco | Fibra coco | Sin fibra coco | Fibra coco | Sin fibra coco | Fibra coco | Sin fibra coco | Fibra coco | Sin fibra coco | Fibra coco | Sin fibra coco | Fibra coco | Sin fibra coco | |
| Juntas | Con zócalo | Mortero de Mortero de lodo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| | | Mortero Cemento Arena | 17 | 18 | 10 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| | | Machimbre | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
| | Sin zócalo | Mortero de Mortero de lodo | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 65 | 64 |
| | | Mortero Cemento Arena | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 |
| | | Machimbre | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 |
| | Con revoque | Mortero de Mortero de lodo | 97 | 98 | 99 | 100 | 1091 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 |
| | | Mortero Cemento Arena | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 |
| | | Machimbre | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 |
| | Sin revoque | Mortero de Mortero de lodo | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 |
| | | Mortero Cemento Arena | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 |
| | | Machimbre | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 |

Fuente: (Roux Gutiérrez & Espuna Mújica, 2012b)

Anexo D

Formato de tabla, de elaboración propia, a partir de datos obtenidos en formato de norma AASHTO estándar (M·MMP·1·09/06).

| | Muestra 1 (g) | Muestra 2 (g) | Muestra 3 (g) | Muestra 4 (g) |
|--------------------------------|---|---------------|---------------|---------------|
| 1. Peso muestra húmeda y molde | El cilindro donde se compactan las muestras, con el pistón, más el suelo compactado | | | |
| 2. Peso del molde | Peso del molde cilíndrico vacío | | | |
| 3. Peso de muestra humedad | Diferencia entre datos 1 y 2 | | | |
| 4. Volumen del molde | Se obtienen las dimensiones del volumen del molde cilíndrico, se tomaron tres valores para la altura y dos para el diámetro, de los cuales se obtiene una media para obtener volumen. | | | |
| 5. Masa volumétrica húmeda | | | | |
| 6. Peso volumétrico seco | Se obtienen con la fórmula de $W_1 - W_2 / W_2 - W_t (100)$ | | | |
| 7. Porcentaje de humedad | Se obtiene el contenido de humedad igual que en la norma M-MMP-1-04/03 | | | |

Fuente: Elaboración propia

Anexo E.

Diseño de tabla donde se registran los datos que se obtienen de las pruebas triaxiales.

| PRUEBA DE COMPRESIÓN TRIAXIAL | | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------|-------------------------------|--------------|----------------------------|--|--|
| Procedencia de la muestra: | | | | | | | 5/17/2024 | |
| Sondeo No.: ARCILLA Y TUCURUGUAY | | | | TIPO DE COMPRESIÓN | | | | |
| Muestra No.: T01-1 | | | | RAPIDA | | 1.21917144 | | |
| Profundidad: | | | | DRENADA | | | | |
| Descripción de la muestra: ARCILLA | | | | | | | | |
| DATOS DEL ESPECIMEN | | | | | | | | |
| Ds= | 3.3275 | cm | As= | 8.69615006 | Ww= | 125.66 | | |
| Dc= | 3.3365 | cm | Ac= | 8.74325521 | Vm= | 62.7902888 | | |
| Di= | 3.3175 | cm | Al= | 8.64396023 | P. Vol.= | 2.00126488 | | |
| Hm= | 7.20166667 | cm | W = | 21.9171437 | Am= | 8.71885519 | | |
| Ws= | 103.07 | g | PRESIÓN LATERAL= | | | | | |
| No. | Deformación Total en (mm) | Lectura del micrómetro | Carga (Kg) | Deformación Unitaria δ | 1 - δ | Área Corregida | Esfuerzo Desviador (Kg/cm ²) | |
| 10 | 0.254 | 2.5 | 1.975 | 0.00352696 | 0.99647304 | 8.74971509 | 0.22572164 | |
| 20 | 0.508 | 4 | 3.16 | 0.00705392 | 0.99294608 | 8.78079423 | 0.35987633 | |
| 30 | 0.762 | 9 | 7.11 | 0.01058088 | 0.98941912 | 8.81209494 | 0.8068456 | |
| 40 | 1.016 | 12 | 9.48 | 0.01410785 | 0.98589215 | 8.84361961 | 1.07195927 | |
| 60 | 1.524 | 15 | 11.85 | 0.02116177 | 0.97883823 | 8.90735047 | 1.33036193 | |
| 80 | 2.032 | 17 | 13.43 | 0.02821569 | 0.97178431 | 8.97200655 | 1.49687809 | |
| 100 | 2.54 | 19 | 15.01 | 0.03526961 | 0.96473039 | 9.03760813 | 1.66083767 | |
| 120 | 3.048 | 18.5 | 14.615 | 0.04232354 | 0.95767646 | 9.10417611 | 1.60530726 | |
| 140 | 3.556 | 20 | 15.8 | 0.04937746 | 0.95062254 | 9.17173201 | 1.72268444 | |
| 160 | 4.064 | 20 | 15.8 | 0.05643138 | 0.94356862 | 9.24029797 | 1.70990157 | |
| 180 | 4.572 | 0 | 0 | 0.0634853 | 0.9365147 | 9.30989682 | 0 | |
| GRAFICA ESFUERZO - DEFORMACIÓN | | | | | | | | |
| <p>Capacidad de carga</p> | | | | | | <p>FALLA DE LA MUESTRA</p> | | |
| OBSERVACIONES: | | | | | | | | |

Anexo F.

Formatos realizados para registro de datos de piezas en prueba de resistencia

| Pieza: | AB1 | Diseño: Sólido con perforaciones | | | Fabricación: Mecánica | | Prueba de Resistencia |
|---|--------------|----------------------------------|-----|-----|-----------------------|----------|--|
| Muestra número | | A-1 | A-2 | A-3 | | Promedio | especificaciones NMX-C-404-ONNCCE-2012 |
| Dimensiones | Largo (L) | | | | | | 39cm ± 2mm |
| | Ancho (A) | | | | | | 15 cm ± 2mm |
| | Alto (h) | | | | | | 10cm ± 3mm |
| | (a) diámetro | | | | | | Mayor a 2 cm |
| | (b) diámetro | | | | | | |
| | Area de Da | | | | | | |
| | Area de Db | | | | | | |
| área bruta en cm ² | | | | | | | |
| área neta en cm ² | | | | | | | |
| área neta (%) | | | | | | | area neta > 75% |
| volumen en cm ³ | | | | | | | |
| peso en gr | | | | | | | |
| masa volumétrica (kg/m ³) | | | | | | | |
| carga kg | | | | | | | |
| resistencia a la compresión en kg/cm ² | | | | | | | 70 kg /cm ² (mínima individual) 90 kg/cm ² (Media) |

Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos que se deben recabar de los especímenes de acuerdo a la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013.

Apéndice

Apéndice A

Extenso de ensayos de campo y laboratorio aplicados a pruebas de suelo.

| Propiedad | Análisis de laboratorio | Prueba de campo |
|--------------------------------|--|--|
| Propiedades físicas | | |
| Granulometría | Ensayo granulométrico SCT M·MMP·1·06/03 | Tacto sintiendo las partículas |
| | Ensayo sedimento métrico (Ley de Stokes) | Prueba de la botella |
| Plasticidad | Límites de Atterberg | Pegajosidad y Cohesión (Prueba del Dedo) |
| | | Prueba de rollo o la cinta |
| | | Prueba de bola y secado o de pastilla y secado |
| Contenido de humedad | Contenido de humedad | estufa portátil, cilindro metálico, y balanza |
| Densidad relativa y real | ASTM C-128 | estufa portátil, cilindro metálico, y balanza |
| | M-MMP-1-05/18 | |
| Compresibilidad - compactación | Ensayo Proctor | Prueba de la bola |
| Resistencia tracción | Prueba de tracción del ensayo del 8, ASTM C496 | Resistencia a la flexión, tracción pisando una pieza de mampostería apoyada en sus extremos sobre dos soportes (como si flotara) |
| | Contracción | Prueba de la pastilla |
| Propiedades químicas | | |
| Sales, óxidos, sulfatos, etc. | Ensayos químicos | Observación visual y olfativa (color, olor, sabor, tacto) |
| | Azul metileno | |
| Alcalinidad | Análisis de PH | |
| Elementos | Espectroscopia de barrido (EDX) | |
| Minerales | Fluorescencia de rayos X (XRF) | No hay |
| | Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente | No hay |
| Propiedades biológicas | | No se aplica a la construcción |

Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos obtenidos en laboratorios de CRAterre.

Apéndice B.

Ejemplo del formato utilizado, para llenar los datos del ensayo para suelos cohesivos no confinados. Estos datos fueron llenados con cada probeta ensayada.

| PRUEBA DE COMPRESIÓN TRIAXIAL | | | | | | | |
|---|---------------------------|------------------------|------------|-------------------------------|--------------|--------------------------------|--|
| | | | | | | | 5/17/2024 |
| Procedencia de la muestra: | | | | TIPO DE COMPRESIÓN | | | |
| Sondeo No.: ARCILLA Y TUCURUGUAY | | | | | | | |
| Muestra No.: T01-1 | | | | RAPIDA | | 1.21917144 | |
| Profundidad: | | | | DRENADA | | | |
| Descripción de la muestra: ARCILLA | | | | | | | |
| DATOS DEL ESPECIMEN | | | | | | | |
| Ds= | 3.3275 cm | As= | 8.69615006 | Ww= | 125.66 | | |
| Dc= | 3.3365 cm | Ac= | 8.74325521 | Vm= | 62.7902888 | | |
| Di= | 3.3175 cm | Al= | 8.64396023 | P. Vol.= | 2.00126488 | | |
| Hm= | 7.20166667 cm | W = | 21.9171437 | Am= | 8.71885519 | | |
| Ws= | 103.07 g | | | PRESIÓN LATERAL= | | | |
| No. | Deformación Total en (mm) | Lectura del micrómetro | Carga (Kg) | Deformación Unitaria δ | 1 - δ | Área Corregida | Esfuerzo Desviador (Kg/cm ²) |
| 10 | 0.254 | 2.5 | 0.25493 | 0.00352696 | 0.99647304 | 8.74971509 | 0.02913581 |
| 20 | 0.508 | 4 | 0.407888 | 0.00705392 | 0.99294608 | 8.78079423 | 0.04645229 |
| 30 | 0.762 | 9 | 0.917748 | 0.01058088 | 0.98941912 | 8.81209494 | 0.1041464 |
| 40 | 1.016 | 12 | 1.223664 | 0.01410785 | 0.98589215 | 8.84361961 | 0.13836687 |
| 60 | 1.524 | 15 | 1.52958 | 0.02116177 | 0.97883823 | 8.90735047 | 0.1717211 |
| 80 | 2.032 | 17 | 1.733524 | 0.02821569 | 0.97178431 | 8.97200655 | 0.19321475 |
| 100 | 2.54 | 19 | 1.937468 | 0.03526961 | 0.96473039 | 9.03760813 | 0.2143784 |
| 120 | 3.048 | 18.5 | 1.886482 | 0.04232354 | 0.95767646 | 9.10417611 | 0.20721062 |
| 140 | 3.556 | 20 | 2.03944 | 0.04937746 | 0.95062254 | 9.17173201 | 0.22236149 |
| 160 | 4.064 | 20 | 2.03944 | 0.05643138 | 0.94356862 | 9.24029797 | 0.2207115 |
| 180 | 4.572 | 0 | 0 | 0.0634853 | 0.9365147 | 9.30989682 | 0 |
| GRAFICA ESFUERZO - DEFORMACIÓN | | | | | | | |
| <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">Capacidad de carga</p> </div> | | | | | | FALLA DE LA MUESTRA | |
| OBSERVACIONES: | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Nombre del signatario | | | | | | | |

Listado de Referencias

Acuerdo de París Naciones Unidas 2015, 29 (2015).

https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf

AENOR. (2008). *UNE 41410 Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques* (No. UNE 41410). www.aenor.es

Alavedra, P., Dominguez, J., & Gonzalo, E. (1997). La construcción sostenible, el estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, 49(451), 5.

https://www.researchgate.net/publication/45601784_La_construccion_sostenible_el_estado_de_la_cuestion

Albarrán, A. (2019). *Sistema de Bloque de Tierra Compactado frente a la normatividad mexicana* [Tesis de maestría]. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.

Allen, G. T. R. (2012). Strength Properties of Stabilized Compressed Earth Blocks with Varying Soil Compositions [Maestría, University of Colorado at Boulder]. En *TESIS*.

<http://id.loc.gov/authorities/names/n50000485>

Angulo, D. E., & Carreño, A. K. (2017). El Bloque de Tierra Comprimido o (BTC). Una alternativa de Construcción para la Arquitectura Contemporánea. *Charry Revista nodo*, 12(23), 31-37. <https://doi.org/10.54104/nodo.v12n23.140>

Aram, F. (2023). Sustainable Design in Building and Urban Environment. *Designs*, 7(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/designs7040099>

ASTM. (2000a). D 2166 – 00 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. En *ASTM International, West Conshohocken, PA* (No. D 2166 – 00; Vols. D2166-00, Número Reapproved, pp. 1-6). Book of Standards Volume: 04.08.

<https://doi.org/10.1520/D2850-24>

ASTM. (2000b). *D 2487—00: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)* (No. ASTM D 2487 – 00).

- ASTM. (2010). E2392/E2392M – 10´1 Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems. En *ASTM International* (No. E2392/E2392M – 10´1; pp. 1-10).
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/95187/6e2f57c2adde437482d5caa3f698903d/ASTM-E2392-E2392M-10-2016-.pdf>.
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/95187/6e2f57c2adde437482d5caa3f698903d/ASTM-E2392-E2392M-10-2016-.pdf>
- Augarde, C. E., Beckett, C. T. S., Smith, J. C., & Corbin, A. J. (2016). Challenges in treating earthen construction materials as unsaturated soils. *E3S Web of Conferences*, 9.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160903002>
- Bestraten, S., Hormías, E., & Altemir, A. (2011a). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, 63(523), 5-20. <https://doi.org/10.3989/ic.10.046>
- Bestraten, S., Hormías, E., & Altemir, A. (2011b). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, 63(523), 5-20. <https://doi.org/10.3989/ic.10.046>
- Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., & Iwaki, C. (2011). Construcción sismorresistente en tierra: La gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*, 63(523), 41-50. <https://doi.org/10.3989/ic.10.017>
- Bradley, R. A., Gohnert, M., & Bulovic, I. (2018). Construction considerations for low-cost earth brick shells. *Journal of Construction in Developing Countries*, 23(1), 43-60.
<https://doi.org/10.21315/JCDC2018.23.1.3>
- Brief, T. (2006). Mixture Design and TMixture Design and Testing Proceduresesting Procedures for Lime Stabilized Soil for Lime Stabilized Soil Steps. *National Lime Association*, October, 1-6.
- Buntin, S. (s. f.). *The Villages of Loreto Bay, Baja California Sur, Mexico: UnSprawl Case Study: Terrain.org* [Journal]. <https://www.terrain.org/unsprawl/21/>. Recuperado 23 de noviembre de 2024, de <https://www.terrain.org/unsprawl/21/>

- Cabrera, S., González, A., & Rotondaro, R. (2020). Resistencia a compresión en Bloques de Tierra Comprimida. Comparación entre diferentes métodos de ensayo. *Informes de la Construcción*, 72(560), 1-12. <https://doi.org/10.3989/ic.70462>
- Cabrera, S., Jiménez, Y., Domínguez, E., & Rotondaro, R. (2020). Compressed earth blocks (CEB) stabilized with lime and cement. Evaluation of both their environmental impact and compressive strength. *Habitat Sustentable*, 10(2), 70-81. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.05>
- Caton l'Antien: De re rustica: Traduction française*. (s. f.). Recuperado 25 de enero de 2025, de <https://remacle.org/bloodwolf/erudits/caton/agriculture.htm>
- Centre, U. W. H. (s. f.). *Archaeological Zone of Paquimé*, Casas Grandes. UNESCO World Heritage Centre. Recuperado 24 de enero de 2025, de <https://whc.unesco.org/en/list/560/>
- Ceta Ram | PDF*. (1981). Scribd. <https://es.scribd.com/doc/57876775/Maquina-Cinva-Ram>
- Chazelles, C.-A. D. (2003). Témoignages croisés sur les constructions antiques en terre crue: Textes latins et données archéologiques. *Techniques & culture*, 41, 1-27. <https://doi.org/10.4000/tc.55>
- Cid, J. (2012). *DURABILIDAD DE LOS BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA. EVALUACIÓN Y RECOMENDACIONES PARA LA NORMALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DE EROSIÓN Y* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/14647/2/JAIME_JESUS_CID_FALCETO.pdf
- 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>
- Clima Mexicali: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Mexicali*. (s. f.). Recuperado 22 de marzo de 2025, de <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/baja-california/mexicali-2034/>

- Cointeraux, F. (1740-1830) A. du texte, & texte, S. royale d'agriculture (France) A. du. (1790). *Ecole d'architecture rurale, ou Leçons par lesquelles on apprendra soi-même à bâtir solidement les maisons de plusieurs étages avec la terre seule, ou autres matériaux les plus communs et du plus vil prix. Constructions économiques pour les campagnes, ou Batimens incombustibles ([Reprod.]) / par François Cointeraux,... ; Rapport des commissaires de la Société royale d'agriculture.*
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k484700>
- CRAterre. (2009). *La roue des techniques*. <https://craterre.hypotheses.org/3917>
- Cuitiño-Rosales, M. G., Rotondaro, R., & Esteves, A. (2020). Aportes para el análisis comparativo del comportamiento higrotérmico y mecánico de los materiales de construcción con tierra. *Revista de Arquitectura*, 22(1657-0308), 138-151.
<https://doi.org/10.14718/revarq.2020.2348>
- Cutiño, M., Rotondaro, R., & Esteves, A. (2020). Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra. *CAH. Revista de Arquitectura*, 1657-0308, 138.
- de Chazelles, C.-A., Klein, A., & Pousthomis, N. (2008). La cultures constructives de la brique crue. *Actes du colloque international de Toulouse*, 3.
- Desarrollo Territorial. (2019). *Programa de Plan Nacional de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano*.
- EBANZ. (2021). *Earth Building Association of New Zealand*. Earth Building Association of New Zealand. <https://www.earthbuilding.org.nz/about-earth-natural-building-association/>
- Echale. (2021). Echale—Reporte anual 2021. En *Reporte* (p. 36). Echale. <https://echale.mx/wp-content/uploads/2022/02/reporte-anual-vf2.pdf>
- Educación para los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Objetivos de aprendizaje—UNESCO Biblioteca Digital*. (s. f.). Recuperado 21 de noviembre de 2024, de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000252423>

Espectroscopia de Rayos X Dispersivo en Energía EDX – Cromtek. (2019, junio 17).

<https://www.cromtek.cl/producto/edx/>

Fabbri, A., Morel, J. C., & Aubert, J.-E. (2022). *Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements* (M. J.-C. F. Fabbri & J. C. Morel, Eds.; Springer, Vol. 35). RILEM; <https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1>. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1>

Flores, L. F. L. (2015). *Norma NMX para estructuras de mampostería.*

Galindo Díaz, J. (2023). Casas experimentales en el Centro Interamericano de Vivienda-CINVA, 1952-1956. *Academia XXII*, 14(27), 112-137.

<https://doi.org/10.22201/fa.2007252xp.2023.27.85757>

Galindo, J., Escorcía, O., & González, A. J. (2023). El Centro Interamericano de Vivienda—CINVA y los orígenes de la experimentación con bloques de tierra comprimida (BTC) en la vivienda social (1953-1957). *Informes de la Construcción*, 75(570), e503.

<https://doi.org/10.3989/ic.6183>

Gandreau, D., Delboy, L., & Joffroy, T. (2012). *Patrimoine Mondial, Inventaire de l'architecture de terre* (D. Gandreau, L. Delboy, & T. Joffroy, Eds.; 2012.^a ed.). CRAterre.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000217037>

García, E. (1964). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen (para adaptarlo a las condiciones de la republica mexicana).*

<https://www.igg.unam.mx/geoigg/biblioteca/archivos/memoria/20190917100949.pdf>

Gernot Minke. (2005). *Manual de construccion en tierra* (Editorial Fin de Siglo, Ed.; Segunda).

Gobierno del México. (2019). Programa_Nacional_de_Vivienda_2019-2024. *Programa Nacional de Vivienda*, 1-78.

GOPA INFRA. (1979). BLOQUE DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) ECOMATERIAL. *Energy and Buildings*, 2(3), 237-248. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(79\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0378-7788(79)90009-4)

H2os Project – 2016. (s. f.). Recuperado 27 de enero de 2025, de <http://h2os-project.org/>

- Heathcote, K. (2011). The thermal performance of earth buildings. *Informes de la Construcción*, 63(523), 117-126. <https://doi.org/10.3989/ic.10.024>
- INEGI (Ed.). (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010. Mexicali, Baja California. *Instituto Nacional de Estadística y geografía*.
- INFONAVIT. (s. f.). *MANUAL DE USUARIO DE RUV AUTOPRODUCCIÓN*.
- INFONAVIT. (2022). Estudios Especificos MunicipiosSegunBandasValor Febrero2022 RUV. *RUV, VALOR DE VIVIENDA*.
- Jiménez, A., Guadalupe, Y., García-Izaguirre, & Manuel, V. (2016). Efectos de la utilización de saviasvegetales en los bloques de tierra comprimida con respecto a la prueba de abrasión. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, 1(19), 10. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477951060015>
- Knoll, F., Pastor, M., Chazelles, C. A. D., & Cooke, L. (2019). *On cob balls, adobe, and daubed straw plaits. A glossary on traditional earth building techniques for walls in four languages* (2019.^a ed.). Landesamt Für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt. file:///C:/Users/MSI/GE75/Downloads/Knolletal2019OncobballsadobeGlossary_unlocked.pdf
- Laatar, M., Nasla, S., El Maatoufi, Y., Jamil, Y., Adib, A. F., Bouchkarem, A., Lbakhkouch, H., Kheltent, M., Gueraoui, K., & Cherraj, M. (2023). Effect of Date Palm Fibers and Lime Ratio Contents on Thermal and Mechanical Properties of Compressed Earth Blocks. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 71-88. <https://doi.org/10.17654/0973576323053>
- Lahbabi, S., Bouferra, R., Saadi, L., & Khalil, A. (2024). Study of the physicochemical, mineralogical, and geotechnical properties of clayey soils to improve the durability of eco-construction materials in the rural region. *Construction and Building Materials*, 411(October 2023), 134304. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134304>

Ley García, M. A., García coeto, R., Venegas Cardoso, F. R., & Denegri de Dios, F. (2006).

Atlas De Riesgos Naturales Y Químicos (Identificación Y Zonificación) Ciudad De Mexicali , . 254.

Lira-Herrera, H. (2005). Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento / Update of the conceptual geological model for the geothermal reservoir in Cerro Prieto , BC.

Geotermia, 18(1), 37-46.

Mario Cucinella Architects. (2024). Mario Cucinella Architects.

<https://www.mcarchitects.it/en/home-en>

Minke, G. (2005). *Manual de construccion en tierra* (Editorial Fin de Siglo, Ed.; Segunda).

http://d1.capsf.ar/wp-content/uploads/sites/3/2021/10/Manual_de_construccion_en_tierra_-_Gernot_Minke_1.pdf

Morel, J. C., Mesbah, A., Houben, H., & Rigassi, V. (2000). Compressed earth blocks, testing procedures. En *Materials and Structures* (p. 121).

Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climatico* (p. 50).

https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf

Narsilio, G. A., & Santamarina, C. (2008). Prácticas Actuales Y Recomendaciones. *Georgia Institute of Technology, 2, 18.*

Neves, C., Borges, O., & Borges Faria, O. (2011). *Técnicas de construcción con tierra*. Bauru-SP FEB-UNESP / PROTERRA. www.redproterra.org

Neves, C., Salcedo, Z., Obede, G., Faria, B., & Paz -Bolivia, L. (2017). *17º SIACOT Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra «Tierra-Identities» Memorias.*

NMAC. (2015). *14.7.4 CÓDIGO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE TIERRA DE NUEVO* (No. 14.7.4 NMAC; p. 32). División de Industrias de la Construcción del Departamento de Regulación y Licencias.

<https://www.srca.nm.gov/parts/title14/14.007.0004.html>

Olvera, D. (2019a). *Hibridacion y ciudades fronterizas, CONDICIONANTES DE LA CONSTRUCCIÓN CON ADOBE EN LA CIUDAD DE MEXICALI EN LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX* [Doctoral, Universidad de Colima].

file:///D:/documentos%20ni%C3%B1os%20-%20papa%20-

%20mama/Documentos%20Maestr%C3%ADa/Maestria%20UABC/Bibliografias%20mias/sistemas%20constructivos/CONDICIONANTES%20DE%20LA%20CONSTRUCCI%C3%93N%20CON%20ADOBE%20EN%20LA%20%20CIUDAD%20DE%20MEXICALI%20EN%20LA%20PRIMERA%20MITAD%20DEL%20SIGLO%20XX,%20DANIEL%20OLVERA.pdf

Olvera, D. (2019b). *Sistema constructivo de muros a base de palés* [Tesis maestría]. Universidad de Colima.

ONNCCE. (2013). *MAMPOSTERIA-RESISTENCIA A A LA COMPRESION DE BLOQUES, TABIQUES O LADRILLOS Y TABICOES Y ADOQUINES, METODO DE ENSAYO* (No. NMX-C-036-ONNCCE-2013).

ONNCCE. (2014a). *NMX-C-037-ONNCCE-2013 DETERMINACION DE LA ABSORCION TOTAL Y LA ABSORCION INICIAL DE AGUA EN BLOQUES, TABIQUES O LADRILLOS Y TABICONES, METODO DE ENSAYO* (No. NMX-C-037-ONNCCE-2013; Versión 2013). ORGANISMO NACIONAL DE LA NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACION DE LA CONSTRUCCION Y LA EDIFICACION, S.C.

ONNCCE. (2014b). *Y Certificación De La Construcción Industria De La Construcción – Mampostería – Bloques , Tabiques O Ladrillos Y Tabicones Para Uso Estructural – Especificaciones Y Building Industry – Masonry – Blocks , Bricks and Masonry Units for*

Structural Use – Speci (No. NMX-C-441-ONNCCE-2013).

<https://es.scribd.com/document/447984333/NMX-C-441-ONNCCE-2013-unlocked>

ONU. (1998). *PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO*.

Rodríguez-Mariscal, J. D., & Solís, M. (2020). Hacia una metodología para la caracterización experimental del comportamiento a compresión de la mampostería de adobe. *Informes de la Construcción*, 72(557). <https://doi.org/10.3989/IC.67456>

Román Guillermo Meyer Falcón, A., David Cervantes Peredo, A., Rosales García, A., Julio Millán Soberanes, I., Edna Elena Vega Rangel, D., Jazmín Anavel Monterrubio Macedo, D., Juan Javier Granados Barrón, A., David May Flores, L., & Elena Solís Pérez Dra Georgina Ramírez Sandoval Ing Alejandro Hernández Espíndola Arq Ruth Angélica Álvarez Alonso Iconografía Arq Gabriela González Zúñiga Ing Arq José Eduardo Arellano Martínez, P. (s. f.). *Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu) Agradecemos la colaboración especial de*.

www.sedatu.gob.mxwww.conavi.gob.mx

Roux Gutiérrez, R. S., & Espuna Mújica, J. A. (2012a). *Bloques de Tierra Comprimida adicionados con fibras naturales*. Universidad Autónoma de Tamaulipas.

Roux Gutiérrez, R. S., & Espuna Mújica, J. A. (2012b). *Bloques de Tierra Comprimida adicionados con fibras naturales*. Universidad Autónoma de Tamaulipas.

www.plazayvaldes.es

<https://libros.uat.edu.mx/index.php/librosuat/catalog/view/29/19/71-1>

Roux Gutiérrez, R. S., & Espuna Mújica, J. A. (2012). *El Hidróxido de Calcio y los bloques de tierra comprimida, alternativa sostenible de construcción*.

Roux, S. S. (2010). Los bloques de tierra comprimida en zonas húmedas. En *Paper Knowledge. Toward a Media History of Documents*.

- Sáinz Guerra, J. L., & Sandoval, F. (2010). *La arquitectura construida en tierra: Tradición e innovación: Congresos de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2004/09*. 7. http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2010/2010_9788469345542_p289294_seisdedos.pdf
- SCT. (s. f.). *M·MMP·1·06/03 Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías* (No. M·MMP·1·06/03).
- SCT. (2007). *M·MMP·1·07/07 Límites de Consistencia*. En *Límites de Consistencia* (No. M·MMP·1·07/07; pp. 1-9). <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-07-07.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). *La Manifestación de Impacto Ambiental Regional*. 36. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/manual-de-divulgacion?idiom=es>
- Soil Stabilization*. (s. f.). Recuperado 25 de enero de 2025, de <https://www.lime.org/lime-basics/uses-of-lime/construction/soil-stabilization/>
- Taxil, G., & Misse, A. (1999). *MAYOTTE, Filiere Blocs de Terre Comprime.pdf*. CRATerre-EAG, Société Immobilière de Mayotte. Direction de l'Équipement de Mayotte. https://www.art-terre-mayotte.org/_files/ugd/61b73d_bfc5b969fb3b42d2b28b1d5c06627919.pdf
- The right to water: Open-source project for ecovillages. (2017). *TAMassociati*. <https://www.tamassociati.org/portfolio/eco-village-in-senegal/>
- Tironi, A., Trezza, M. A., Scian, A. N., & Irassar, E. F. (2014). Potential use of Argentine kaolinitic clays as pozzolanic material. *Applied Clay Science*, 101, 468-476. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.09.009>
- Villaseñor, I., & Graham, E. (2010). The use of volcanic materials for the manufacture of pozzolanic plasters in the Maya lowlands: A preliminary report. *Journal of Archaeological Science*, 37(6), 1339-1347. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.12.038>
- Walirumana Ethno Educational Center / Salba*. (2023, abril 28). ArchDaily. <https://www.archdaily.com/980382/walirumana-ethno-educational-center-salba>

Woudstra, R. (2020). *PLANNING THE "MULTIRACIAL CITY": Architecture, Decolonization and the Design of Stability in British Africa (1945-1957)* [Massachusetts Institute of Technology]. <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/138587/1288577126-MIT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>